

デサントスポーツ科学

Vol.46

目 次

巻 頭 言

酷暑期の避難所で AVA 冷却を

神戸女子大学 名誉教授

石本記念デサントスポーツ科学振興財団 学術委員 平 田 耕 造 (1)

第 46 回助成金研究報告

【最優秀入選】

〈体力医学系〉

インターバル運動が脳内皮機能に及ぼす影響：一定強度の運動との比較

Effect of Muscle-Pump Activation on CBF Regulation during Exercise :
Comparison with Continuous Exercise

東 洋 大 学 小 河 繁 彦 (3)

運動パフォーマンス向上となる最適な咬合の解明：脳機能と脊髄機能に着目

Clarifying Optimal Occlusion to Improve Athletic Performance
Focusing on Brain and Spinal Function

新潟医療福祉大学 平 林 怜 (12)

【優秀入選】

〈体力医学系〉

スポーツ活動中の熱中症発生と水分補給に伴う骨格筋内の水分特性の変化

Effects of Heat Stroke During Sports Activities and Subsequent Hydration on
Changes in Water Molecule Properties in Skeletal Muscle

大阪工業大学 石 道 峰 典 (21)

ケトン体の経口摂取は運動誘発性の鉄欠乏に対して有効か？－ヘプシジン分泌応答に着目して－

Effect of Exogenous Ketone Supplementation on Exercise-induced Iron Deficiency:
Focusing on Hepcidin Responses

大阪公立大学 林 七 虹 (33)

マトリクス表面筋電図を用いた腓腹筋外側頭における筋痙攣発生過程の筋活動様式

Process of Muscle Cramps in Lateral Gastrocnemius Muscle using sEMG Matrix
青山学院大学 白井 礼 (42)

有酸素性運動時における異なる様式での血流制限が血管内皮機能に及ぼす影響

Effect of Aerobic Exercise with Different Pattern of Blood Flow Restriction on
Endothelial Function of The Non-Active Limb
立命館大学 水野 沙 洸 (51)

女子ラグビー選手におけるハムストリングス筋力の重要性：競技力および肉離れ発生との関連

Importance of Hamstring Muscle Strength in Female Rugby Players:
Relationship with Athletic Performance and Incidence of Hamstring Injuries
静岡産業大学 江間 諒 一 (61)

加齢による運動時の昇圧応答メカニズムの解明：内臓血管応答に着目して

Effects of Age-Related Blood Pressure Response During Exercise:
Focus on Splanchnic Blood Flow
名古屋大学大学院 塩澤 華 奈 (69)

若年期の運動不足が成年期以降の認知機能低下をもたらすエピジェネティック機構の解明

The Epigenetic Mechanisms of Physical Inactivity During Young
Periods on Cognitive Dysfunction in Adulthood
筑波大学 土橋 祥 平 (78)

関節マーカーと 3DMRI を用いた変形性膝関節症保存療法の個別化治療モニタリング

The Personalized Conservative Therapeutic Monitoring for Knee Osteoarthritis
Using The Biomarker of Cartilage Oligomeric Matrix Protein and 3DMRI
大阪体育大学 橋本 祐 介 (88)

日本代表デフサッカー選手におけるスポーツ外傷・障害、疾病調査

Sports Injuries in Deaf Japanese National Soccer Players
順天堂大学 染谷 由 希 (98)

立位中の転倒恐怖心が下肢筋脊髄興奮性に与える影響の解明

Effects of Fear of Falling on Spinal Motoneuron Excitability of
Lower-Limb Muscle During Standing Posture
東京大学大学院 高橋 涼 吾 (106)

COVID-19（コロナ）による外出自粛期間中，運動できた高齢者とできなかった
高齢者の4年後の体力（体力測定会参加者の場合）

Comparison of Fitness Between Elderly People Who Could and Those Who Could
Not Exercise Due to Voluntary Stay-At-Home During the COVID-19
Pandemic after 4 Years in Participants of a Fitness Assessment Event

京都先端科学大学 木村みさか (116)

ハムストリング肉離れの受傷予防と走能力向上の両方を満たす走動作の予測

Optimizing Running Mechanics for Hamstring Strain
Prevention and Sprint Performance Enhancement

鹿屋体育大学 宮崎輝光 (128)

ジャンプ着地動作時のアキレス腱張力に関係する足部三次元運動の解明

Three-Dimensional Foot Kinematics Associated with
Achilles Tendon Force During Jump Landing

北海道大学大学院保健科学研究院 越野裕太 (137)

後期高齢者のバスキュラー・ストレッチング介入における柔軟性および動脈硬化度への影響

Effects of Vascular Stretching Intervention on Flexibility and
Arterial Stiffness in Latter-Stage Elderly People

京都先端科学大学 新野弘美 (144)

高頻度・伸張性収縮トレーニング負荷量の下限の検討

Investigation of The Minimum Intensity of High-Frequency
Eccentric Contractions Training

西九州大院 中村雅俊 (157)

陸上競技長距離選手における重ね着を活用した持久性トレーニングの効果

The Effect of Endurance Training with Heat Stress Added by
Layered Clothing in Long Distance Runners

立命館大学 後藤一成 (167)

〈バラスポーツ系〉

片麻痺のパラアスリートにおけるランニングフォームの特徴

Characteristics of The Running Form of A Para-Athlete with Hemiplegia

帝京大学 佐賀典生 (175)

〈被服・工学系〉

セルロースを原料としたサステナブルなひずみ可視化シートの創成と応用

Sustainable Strain-Visualizable Sheets Fabricated from Cellulose

東京理科大学 古海誓一 (184)

オープンウォータースイマーの皮膚温度感覚特性とウェットスーツ普及のための基礎的研究 Characteristics of Skin Thermal Sensitivity in Open-Water Swimmers -Basic Research for Wetsuit Promotion-	新潟医療福祉大学	藤 本 知 臣	(193)
---	----------	---------	-------

衣服内および衣服外の温湿度を局所的に評価する安価で簡便な新手法の開発 Development of A Novel Method to Assess The Intra- and Extra-Clothing Microenvironments	新 潟 大 学	天 野 達 郎	(201)
--	---------	---------	-------

ファン付きベストの着用が夏季の屋外練習時における高校生アスリートの パフォーマンスと熱中症予防効果に及ぼす影響 Effects of The Fan Cooling Vest Use on Endurance Performance and Prevention of Heat-Related Illnesses in High School Athletes During Outdoor Training Sessions in The Summer Heat	姫路獨協大学	大 谷 秀 憲	(209)
---	--------	---------	-------

講 評

学術委員	押 田 芳 治	(223)
学術委員	下 村 吉 治	(225)
学術委員	福 永 哲 夫	(228)
学術委員	緒 方 徹	(230)
学術委員	井 上 真 理	(232)

財団ニュース

事業内容	(235)
役員名簿	(236)
計 報	(239)
活動報告	(240)

酷暑期の避難所で AVA 冷却を

神戸女子大学名誉教授

石本記念デサントスポーツ科学振興財団 学術委員 平 田 耕 造

2023 年（令和 5 年）は記録的な高温の 1 年であり，世界及び日本の平均気温は統計開始以降最も高くなりました．同年 7 月に国連のグテーレス事務総長が「地球温暖化の時代は終わり，地球沸騰の時代が到来した」と訴えました．わが国でも 2023 年に続いて 2024 年の夏も連日猛暑日となり，過去もつとも暑い夏となり，記録的な高温は異常気象といって差し支えないと評価されています．顕著な高温への注意として「熱中症警戒アラート」等の情報が出されましたが，全国における過去 4 年間の 5 月から 9 月の熱中症による救急搬送人員は，2021 年の累計で 47,877 人，2022 年は 71,029 人，2023 年 91,467 人，2024 年 97,578 人であり，社会生活や人々の健康に多大な影響が出ました．

もしも真夏に大規模災害が発生した場合，ライフラインは制限されることが想定されます．避難所・避難生活学会によって，避難生活を余儀なくされた場合を想定した大掛かりな酷暑期の避難所演習（高温多湿期に 1 泊 2 日の宿泊演習）が大阪府下で実施されました．場所は八尾市指定避難所の 1 つである小学校体育館．この演習の目的は酷暑期の避難所特有の課題を抽出し，それらの対策の検討を行い，その知見を広く全国の自治体に共有して避難者の安全に寄与し，二次的な健康被害を予防することでした．ちなみにこの学会では，これまでに季節に対応した避難所運営の研究として，北海道北見市にて厳冬期避難所演習を毎年開催しています．酷暑期の避難所演習も大変重要かつ貴重な活動であり，今回初めて行われました．

ライフラインが通常どおりであっても，最近の酷暑環境における生活は大変厳しい状態となっています．もしこの時期に大災害発生により，避難所生活を余儀なくされた場合にいかにして暑さを凌ぎ，健康を維持して生き延びるかについて，予め上述のような演習を繰り返して，課題の抽出，対策の検討を行うことは，人間の安全保障の視点からも極めて重要なことです．

酷暑期の避難所で暑さを避けて健康を維持するための基礎的なアイデアを考えてみたいと思います．我々の体温は熱利得と熱放散のバランスによって決まります．熱利得量とは，身体の代謝によって産生する熱と外部から受ける熱の合計した量です．他方，熱放散量は環境と身体との間の主に温度差による蒸発によらない熱放散量（放射，伝導，対流）と，主に汗が蒸発するときの気化熱による熱放散量の合計です．熱利得量から熱放散量を差し引いた値が「0」であれば平常体温を維持しますが，「プラス」であれば体温は上昇し，「マイナス」であれば低下します．酷暑期の避難所では環境条件が

劣悪に陥りやすいので、体温は上昇し身体への熱負荷が高くなります。そのため、熱放散を亢進するためにあらゆる手立てを考えなければなりません。暑さ対策として汗の蒸発を促しながら適切な水分補給を行うことは勿論ですが、未だあまり広くは知られていない方策の中にも有用なものがあるかもしれません。

暑さに対する反応として皮膚から熱放散が促進します。体格の大きさにもよりますが、頭から足先まで全身皮膚の面積は畳1枚分に近い広さです。熱放散の効率はどこでも同じではありません。このような実験を行ったことがあります。ノースリーブ服で露出している両手・両腕の面積と等しい面積の体幹部露出服を製作して、室温30℃下で60分間の運動時の体温上昇を比較しました。なお露出面積、素材は全く同じです。両者を比べるとノースリーブ服の方が体幹部露出服よりも体温が0.26℃低く、熱放散効率がきわめて高いことが示されたのです。この結果にはいくつかの理由が隠されています。

1つ目は、腕や手の形です。容積に対する表面積の比がとて大きく、体幹部を1とすると、腕は5、手は10、手指は22と大きいのです。手の指は一本ずつ離れていて凸凹があり、熱が逃げやすい形になっています。つまり手の大きさに対する皮膚面積の割合は、胴体よりはるかに大きいのです。同じ面積でも、腕、手、手指の皮膚では熱が効率よく放散されるという訳です。動物でも熱放散に適した皮膚として、ウサギの耳、ネズミやカンガルーの尻尾が積極的に熱放散を行なえるのもこの理由です。

2つ目は、「動静脈吻合(AVA)血管」です。ヒトの皮膚では末端部の手・足・顔だけにしかない特別な血管です。毛細血管が細胞に酸素や栄養を運ぶ役割なのに対して、AVA血管は毛細血管の手前で少し太い動脈と静脈を繋いでおり、体温の調節のみを役割としているのです。手のAVAは1cm²当たり100～150個、指先には500～600個もあるのです。AVA血管が拡張した場合の直径は、毛細血管に比べておよそ10倍となるため、同一条件ではポアズイユの法則により血流量が1万倍も流れるので、大量の熱がAVA血管を通過して放散されるのです。ウサギの耳、ネズミやカンガルーの尻尾でも同様です。

3つ目は、AVA血管を通過した静脈血はまだ多量の熱を保有しているので、前腕、上腕にある表在の皮静脈を通るとき腕の皮膚温を高めるため、蒸発によらない熱放散量が増えるとともに、局所温効果で腕部の発汗量もさらに増えて熱放散効率は一層高くなるのです。走行運動中の手や腕の皮膚で冷やされた血液が流れる腋窩静脈の血液温と、AVA血流の指標である指皮膚温変化の関係を明らかにした実験(Aulick et al., 1981)は、手のAVA血流量増加が上肢全体からの熱放散を促進して、体温上昇の抑制に寄与している機序を明確に示しています。

元々我々に備わっている生体のメカニズムを、積極的に利用する手のひら(AVA)冷却の方策(デサント・コアクーラー等)も簡便・有用であり、これから地球沸騰の時代における酷暑期の避難所生活等にも、暑さ対策に応用されていくことを願っています。

インターバル運動が脳内皮機能に及ぼす影響： 一定強度の運動との比較

東 洋 大 学 小 河 繁 彦
(共同研究者) オークランド大学 James Fisher

Effect of Muscle-Pump Activation on CBF Regulation during Exercise : Comparison with Continuous Exercise

by

Shigehiko Ogoh
Toyo University
James Fisher
University of Auckland

ABSTRACT

Interval exercise has been evaluated as more effective than continuous exercise in improving cardiovascular function in individuals with cardiovascular disease. Previous research has confirmed that interval exercise leads to increased vascular shear stress related to endothelial function compared to continuous exercise. However, it is unclear whether interval exercise truly improves cerebral endothelial function and reduces the risk of cerebrovascular disease. This study aimed to investigate whether interval exercise do not only increase cerebral vascular shear rate (SR) but also improves cerebral endothelial function compared to continuous exercise. Seven healthy men (mean age 21 ± 0.6 years) participated in the experiment, performing 32 minutes of interval cycling exercise and an equal amount of continuous exercise using a semi-recumbent exercise bike. Cerebral endothelial function (cFMD) was measured and

evaluated before exercise (pre), 15 minutes after exercise, and 40 minutes after exercise. cFMD was assessed by ultrasound, calculating the maximum dilation rate ($\Delta\%$) of the internal carotid artery diameter in response to a 30-second hypercapnic exposure with a partial pressure of carbon dioxide increase of approximately 9 mmHg from baseline. The results showed that cFMD did not change from baseline after both interval and continuous exercise trials, with no significant differences observed between conditions (15 minutes post-exercise, $7.47 \pm 4.92\%$ vs. $5.66 \pm 4.21\%$; 40 minutes post-exercise, $5.91 \pm 4.01\%$ vs. $6.16 \pm 2.26\%$; $p = 0.442$). This study did not find evidence for the beneficial effects of interval exercise on cerebral endothelial function.

キーワード

インターバルトレーニング, シェアストレス, 内皮機能, 頸動脈血管

Keyword

Interval Training, Shear Stress, Endothelial Function, Carotid Artery

要 旨

インターバル運動は、心血管疾患に罹患した個人の心血管機能の改善を達成するために継続運動よりも有効性が高いことが評価されている。先行研究では、インターバル運動による内皮機能に関連する血管シェアストレスが継続運動よりも増加することが確認された。しかし、継続運動と比較して、インターバル運動が脳内皮機能を改善し、脳血管疾患のリスクを低下させるかどうかは明らかでない。そこで、本研究ではインターバル運動が脳血管シェアレイト (SR) の増加だけでなく、脳血管内皮機能が継続運動と比較してより改善するかどうかを確認することを目的として実験を行った。7名の健康な男性 (平均年齢 21 ± 0.6 歳) が実験に参加し、セミリカンビントエクササイズバイクで32分間のインターバル運動及び同じ作業量の継続運動を行った。脳内皮機能 (cFMD) は、運動前 (事前)、運動後15分および運動後40分に測定・評価した。cFMDは、二酸化炭素分圧が約9mmHg上昇した30秒間の高炭酸性暴露に対

する内頸動脈血管径の最大拡張率 (基準値からの $\Delta\%$) を超音波法により算出して評価した。結果として、インターバル運動および継続運動の試行後にcFMDは基準値から変化せず、条件間に有意な差異は観察されなかった (運動後15分, $7.47 \pm 4.92\%$ vs $5.66 \pm 4.21\%$; 運動後40分, $5.91 \pm 4.01\%$ vs $6.16 \pm 2.26\%$; $p=0.442$)。これらの結果から、インターバル運動の脳内皮機能に対する有用性は認められなかった。

緒 言

身体活動の増加により、心血管疾患¹⁾ および脳血管疾患²⁾ リスクを低減させることは明らかである。近年、特に運動のなかでも高強度インターバル運動が、死亡率の強力な予測因子である心肺機能^{3, 4)} や循環器疾患患者の心臓循環機能を改善するのに持続的な一定負荷運動よりも効果的であることが報告されている⁴⁻⁷⁾。そのため、有酸素運動に加えて、高強度インターバル運動も循環器疾患発症リスクを低減させる運動として推奨されている^{8, 9)}。実際、脳損傷などの脳関連疾患を持つ患

者においては、既に有酸素インターバル運動プロトコルをリハビリテーションに使用している¹⁰⁾。しかしながら、この推奨の生理学的根拠は、特に脳に関してはまだ十分に確立されていない。運動による循環器疾患発症リスクの減少は、主に改善された全身の血管内皮機能に関連していることが示唆されている¹¹⁾。実際、先行研究では、有酸素インターバルトレーニングは、メタボリックシンドロームの人において全身血管内皮機能を向上させるため、継続的な中等度の運動よりも優れているとされている⁴⁾。血管内皮機能は、血流によるずり応力（シアレイト，SR）により調節される^{12,13)}。血流パターンに関連する血液速度SRは、血管内皮機能に寄与するため、運動様式の関数として独立して変更できる¹⁴⁾。最近の研究において、有酸素インターバル運動は等価の仕事量の有酸素性の継続運動と比較して、全身血管¹⁵⁾や脳血管¹⁴⁾のSRのパターンを変化させることが報告されている。

全身血管系では、運動負荷に関係なく、急性の脚運動により前腕動脈の逆行性SRが増加し、逆行性SRの増加が全SRを増加させる。一方、脳血管系では逆行性血流は観察されないため、運動によるSRの変化は脳では特異的である可能性がある。全身血管系では、継続運動中の順行性SRの増加は、インターバル運動中よりも大きい。逆行性SRの全SR比率（すなわち、振動性シアレイト指数）はインターバル運動中の方が高い¹⁵⁾。これは、逆行性SRの影響が平均SRに対してインターバル運動中の方がより高いことを示している。逆行性SRは血管内皮機能に有害であり、実際インターバル運動においては、全SRの増加にもかかわらず全身の血管内皮機能は継続運動よりも改善しなかった¹⁵⁾。一方、脳血管系では逆行性血流は観察されないため、運動によるSRの変化は脳では他の血管と比較して異なる可能性がある。実際、脳血管系では、特にインターバル運動

中に継続運動と比較して大きなSRの増加が観察され、インターバル運動の平均SRへの影響が継続運動よりも大きいと報告されている¹⁴⁾。これらの結果から、全身の血管と異なりインターバル運動が脳血管疾患のリスクを減少させる可能性があることが示唆される。脳血管の改善は、全身血管の改善と比較して主に脳循環によって引き起こされるが、インターバル運動の脳血管内皮機能に及ぼす影響を調査した研究は見られない。

インターバル低酸素刺激において、脳血管でのSR増加が大きいと脳血管内皮機能が改善することが報告されている¹⁶⁾。またインターバル運動で同様にSR増加が大きくなることから¹⁴⁾、脳血管内皮機能は、末梢の血管内皮機能と異なりインターバル運動で改善する可能性が高い。Carterら¹⁷⁾は、内頸動脈（ICA）の高炭酸血誘発性血管拡張が、脳血流速度の増加に伴って起こることを示し、脳血管内皮機能の指標となることを報告している。そこで、本研究では、この方法を用いてインターバル運動後の脳血管内皮機能を同定する。等価の仕事量の継続運動後の値を比較検討して、インターバル運動の脳血管内皮機能に及ぼす影響を明らかにした。

1. 研究方法

1. 1 倫理

本研究の手順はヘルシンキ宣言の基準に準拠しており、東洋大学の人間審査委員会（TU2023-040）によって承認された。実験前、各被検者は十分な説明の後、同意書に署名した。また被検者は、研究に関わる技術と手順に慣れるために研究室を訪れ、すべての測定を経験した。

1. 2 被検者

本研究には7名の健康な成人男性が参加した（年齢： 21.4 ± 0.5 歳，身長： 171 ± 3 cm，体重： 62.1 ± 7.6 kg，平均 $\pm$ 標準偏差[SD]）。被検者は

心血管疾患や肺疾患がなく、処方箋または市販薬、抗酸化ビタミンを含む食品サプリメントを使用していないことを確認している。また、被検者は定期的に持久力トレーニングを行っていないものとした（週に5時間以下）。研究室を訪れる際には、被検者には実験当日の12時間前までカフェイン飲料の摂取を控え、24時間前まで激しい運動とアルコールの摂取を抑えるように依頼した。さらに、実験は低脂肪/高タンパク質の食事を摂った後、少なくとも3時間経過後に行った。

1. 3 実験手順

各被検者は、次の2つの運動様式（継続運動、Cont-Ex; インターバル運動、Interval-Ex）のいずれかを無作為に行った。2つの異なる運動様式は、同等の仕事量（1セッションあたり153.6 kJ）とした。被験者は、エアロバイク（Aerobike 75XL III, Combi）を使用して、半リカンベント姿勢でペダルを漕ぎ、一方両腕は横に伸ばして検査テーブル上に置いた。サイクリングの回転数は運動中に常にチェックされた。両サイクリング運動は15分

の休息と40ワット（W）の標準化されたウォームアップ後に行われた。各試行間には、完全な血液動態の回復のために30分の間隔を設けた。Cont-Exにおいて被検者は80 Wで32分間連続してサイクリング運動を行った（ $80 \text{ W} \times 32 \text{ min} \times 60 \text{ s} = 153.6 \text{ kJ}$ ）。Interval-Exでは、被検者は8つのインターバルサイクリング運動を行った（各サイクルは60 Wで2分間、100 Wで2分間を8セットおこなった〔 $(60 \text{ W} \times 2 \text{ min} + 100 \text{ W} \times 2 \text{ min}) \times 8 \text{ セット} \times 60 \text{ s} = 153.6 \text{ kJ}$ 〕）。Interval-ExはCont-Exと同等の仕事量であった（図1）。

1. 4 測定項目

すべての研究は一定の温度（23℃～24℃）の静かな環境で行われた。被検者は、心拍数（HR）を測定するためにリードII心電図（ベッドサイドモニター、BMS-3400; 日本光電）で計器を装着した。動脈血圧（BP）は、左手の中指から指の光電プレソリスモグラフィ（Finapres Medical Systems）を介して連続的にモニタリングし、平均動脈圧（MAP）を決定した。呼気末二酸化炭素

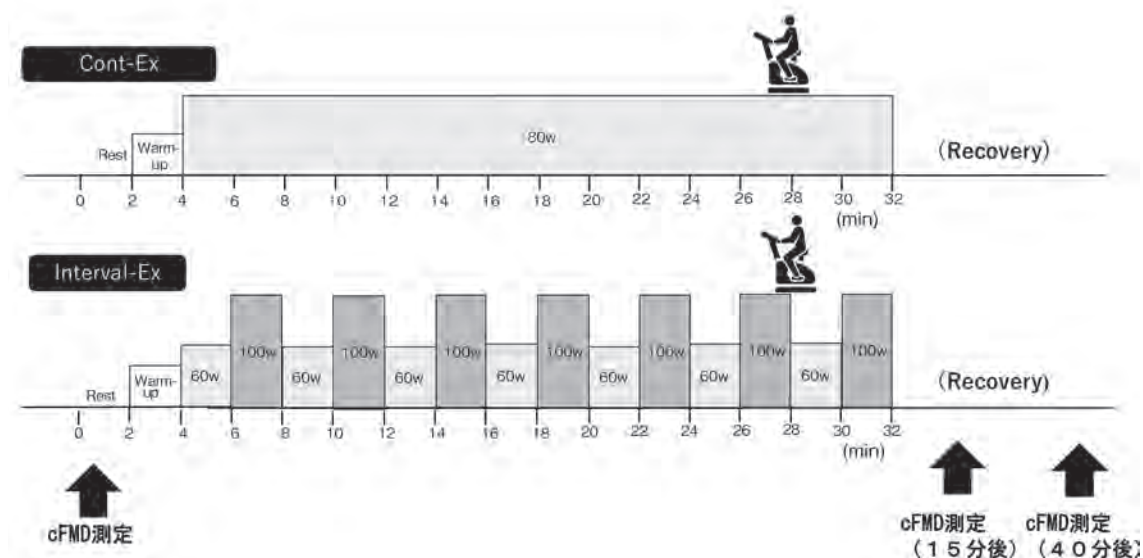


図1 実験プロトコル
(Cont-ExとInterval-Ex)

分圧 ($P_{ET}CO_2$) は、空気漏れのないマスクから採取され、ガス分析器 (AE-310S; Minato Medical Science Co.) を使用して測定した。

1. 5 脳血管内皮機能の測定 (c FMD)

内頸動脈 (ICA) の血管径と平均血流速度 (V_{mean}) は、13-MHz線型トランスデューサーを備えたデュプレックス超音波検査機 (Vivid-i; GE Healthcare) を使用して測定した (図2)。測定プローブの配置は、測定前後で同じ場所が使用されていることを確認するために、マーカーを使用して首の皮膚にマークした。ICAは頸動脈分岐部の1.0 cm以上で画像化した。縦断画像 (B モード) と速度信号 (PW モード、インソネーション角度 $<60^\circ$) を連続的かつ同時に測定し、キャプチャボックスを使用してサンプリング数30Hzでコンピュータに保存した。高 CO_2 刺激中のピーク ICA 直径の変化率によって、ICAでのSRによる拡張率を算出した¹⁷⁾。2分間のベースライン期間に続いて3分間の高 CO_2 刺激で構成されるトライアルを実施した。高 CO_2 刺激は、低抵抗の2方向

バルブ付きのガスマスクに取り付けられた高濃度 CO_2 ガス (目標終末二酸化炭素分圧 $<P_{ET}CO_2>$; 個々のベースライン値から+10 mmHg) を吸入することで行った (流量計付きのAE-310S; Minato Medical Science Co.)。アタッチメント (250 ml のガスブレンダー; Arco system) を使用して純粋な CO_2 を注入することで、すべての被験者が室内空気と CO_2 の混合気体を呼吸することを確認した。測定中、被験者には安静時の呼吸数をメトロノームでコントロールするよう指示した。脳血管内皮機能 (cFMD) は、運動前 (Pre)、運動後15分 (Post-15)、および運動後40分 (Post-40) に測定した (図2)。

1. 6 データ解析

シェアレイト (SR) による拡張は、以前の研究¹⁷⁻¹⁹⁾ に従って解析した。ICAの直径と血流速度 (V_{mean}) は、カスタム設計のエッジ検出および追跡ソフトウェア (バージョン2.0.1, 番号 S-13037; 竹井機器工業) を使用してサンプル数 30 Hz で解析した。生データ、欠損データ、異常データ (例: 飲み込みなど) は、線形補間を使用

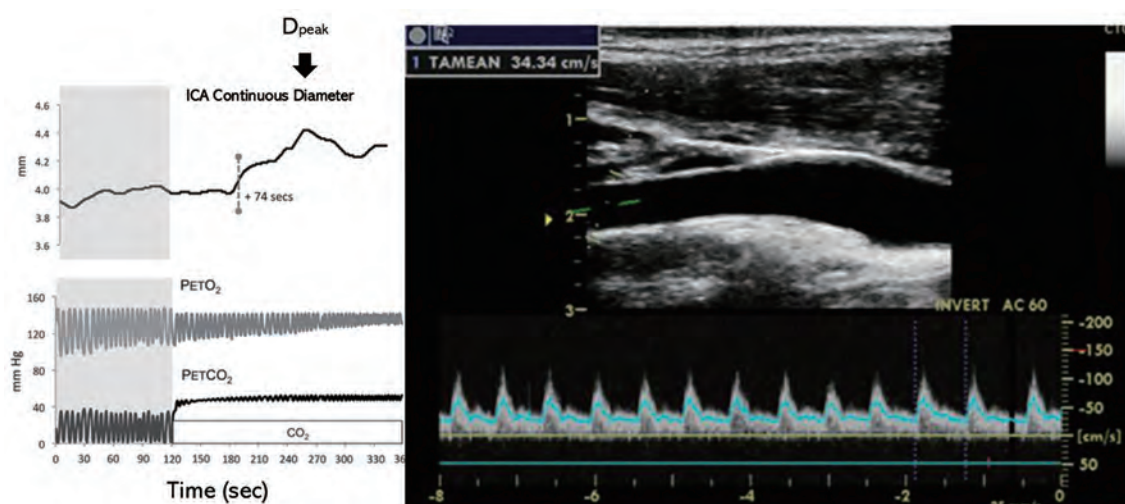


図2 ドップラー法による頸動脈血管径及び血流速度の測定

して調整した。その後、すべてのデータを1Hzに補間し、カスタムソフトウェア (Pythonバージョン3.6.1; Pythonソフトウェア財団, ウィルミントン, DE) を使用して2段階のフィルタリングプロセス (中央値フィルタとSavitzky-Golay有限インパルス応答平滑化フィルタ) を使用してフィルタリングした。D_{base} (血管径ベース), D_{peak} (血管径ピーク), SR_{base} (シェアレートベース), およびSR_{peak} (シェアレートピーク) は、カスタムソフトウェア (Python) によって自動的に検出または計算を行った。SRによる拡張比率は、ピークとベースラインの直径 (それぞれD_{peak}およびD_{base}) を使用して以下の式で算出した: $[(D_{peak} - D_{base}) / D_{base} \times 100]$ 。SRは、 $4 \times V_{mean} / \text{直径}$ で算出した。SRの相対変化 (%) は、ピークとベースラインのSR (それぞれSR_{peak}およびSR_{base}) を使用して以下の式から算出した: $[(SR_{peak} - SR_{base}) / SR_{base} \times 100]$ 。D_{base}とSR_{base}は、ベースライン中に測定された中央値として定義され、D_{peak}とSR_{peak}は、高CO₂負荷開始からD_{peak}までのピーク値を示す。SR曲線下面積 (SRAUC) は、高CO₂負荷開始からD_{peak}までの面積であり、個々のSR_{base}を減算したもので、台形法を使用して次のように計算される: $\sum [1/2 (x_{i+1} - x_i) (y_{i+1} - y_i) + (x_{i+1} - x_i) (y_i - z)]$, ここでxは時間, yはSR, zはSR_{base}。正規化されたSRによる拡張は、SRによる拡張をSRAUCで除したもので、SRによる拡張の変化 (Δ) は、事後値と事前値の差として計算した。

1. 7 統計解析

すべての統計処理は、統計解析ソフトSPSS

(SPSS Statistics 25; IBM社製, 東京, 日本) を用い、データは平均値±標準偏差として表した。各条件間の比較は、反復測定による二元配置分散分析 (two-way ANOVA, コンディション×運動モード) により解析を行った。ANOVAにより主効果が認められた場合は、Bonferroni検定により多重比較検定を行った。有意水準は、5%未満とした。

2. 研究結果

各条件における心拍数 (HR), 平均血圧 (MAP) 及び呼気終末二酸化炭素 (P_{ET}CO₂) を表1に示す。各運動により、HR, MAP及びP_{ET}CO₂は増加するが運動様式の違いによる差異は認められなかった (HR, P = 0.762; MAP, P = 0.203; P_{ET}CO₂, P = 0.814)。一方、運動前後のSRは、運動後に有意に低下しており (P < 0.001), さらにその低下は運動45分後でさらに低下した。また連続運動と比較して、インターバル運動でその低下が高値を示した (P = 0.013)。脳血管内皮機能であるcFMDの値は、運動による影響を受けなかった (P = 0.549)。さらに、運動の様式違いによりその差異はみとめられなかった (P = 0.391)。

3. 考 察

先行研究において、インターバル運動では、継続運動と比較して運動中のSRが高いことが報告された。しかしながら、本研究では、仮説と異なり脳血管内皮機能を示す脳FMDの値は運動により変化しなかった。さらに運動の様式の違いによる差異も観察されなかった。重要な結果として、運動後のSRが低下しておりまたインターバル運動後でよりその変化は顕著であった。インターバ

表1 安静時と各運動 (継続運動, Cont-Ex, とインターバル運動, Interval-Ex) 時の心拍数, 平均血圧及び呼気終末二酸化炭素分圧

		Cont-Ex		Interval-Ex		Condition	Ex mode	interaction
		baseline	Ex	baseline	Ex			
HR	(bpm)	74 ± 15	138 ± 16	80 ± 8	137 ± 21	<0.001	0.762	0.347
MAP	(mmHg)	915. ± 7.4	101.2 ± 9.9	86.0 ± 10.3	95.1 ± 12.6	0.015	0.203	0.961
P _{ET} CO ₂	(mmHg)	41.5 ± 3.1	46.5 ± 4.1	41.4 ± 2.7	47.2 ± 3.8	<0.001	0.814	0.523

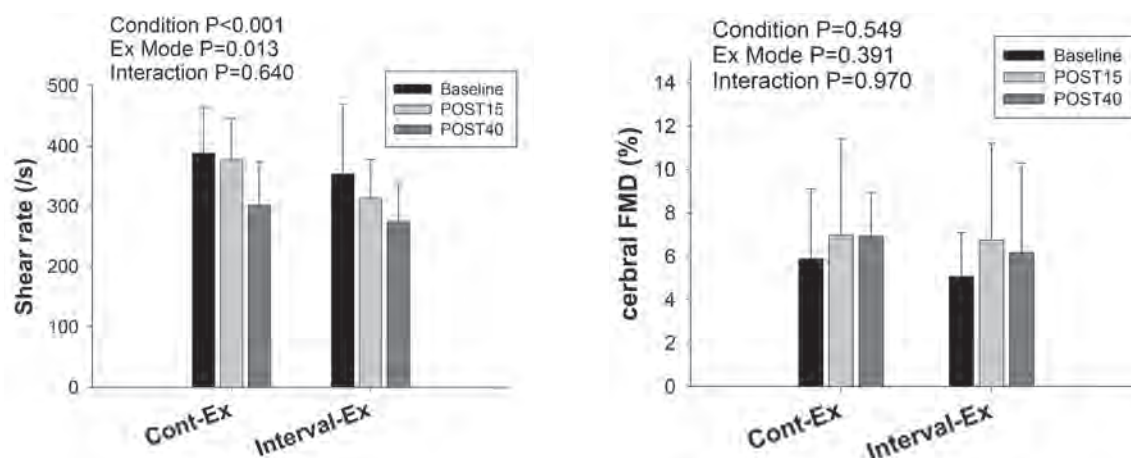


図3 運動前, 運動後10分, 40分のシェアレート(SR)及び脳FMD(cFMD)

ル運動によりSRは高まるが運動後の低下が大きいことが脳FMDに影響しなかった可能性が考えられ, 一方, 運動が脳血管に与える影響を完全に明らかにするには, さらなる調査が必要である。

我々の先行研究¹⁴⁾では, 運動強度の微細な変化が脳のSR (ICA SR)を増加させることを示し, さらにこれらの脳血管の応答は全身の血管とは異なった。実際, Lyallら¹⁵⁾は異なる運動プロトコル中に上腕動脈で血管SRを測定し, 脳血管とは対照的に継続運動とインターバル運動の間で順行性SRの増加が同等である一方, 平均SRは異なることを報告した。急性および慢性的なSRの増加は, 内皮性一酸化窒素(NO)の合成と放出の増加と関連しており^{20,21)}, NOは脳血管における神経保護作用を果たす⁸⁾。我々の先行研究¹⁴⁾の結果から, インターバル運動が全身の血管よりも脳血管でより神経保護的である可能性が示唆された。一方, 全身の血管での運動誘発性血流調節(FMD)の増加は, 運動プロトコル間で差異はみられなかった¹⁵⁾。全身の血管では, インターバル運動が逆行性SRを増加させたことが注目される。全身血管では, 有酸素運動とレジスタンス運動の両方が一般的にNO経路の活性化²²⁾および血管内皮機能の障害^{22,23)}に寄与する逆行性血流を増加

させることが示されている。

しかし, 脳血管では逆行性SRが起こらないと考えられている²⁴⁾。実際, この研究では, インターバル運動中の高い作業量でもICA血流の逆流は見られず, さらに, 脳の血流が回復期や低い作業量に移行してもICA SRが急激に低下しなかった。さらに, 脳血管には脳自己調節や脳二酸化炭素反応など, 特有の血流調節メカニズムがあることがよく知られている²⁵⁻²⁷⁾。脳血管と全身血管は解剖学的には異なるが, 機能的に統合された血管床がさまざまな流れのプロファイルにさらされることを強調するこの異なる血液動態特性は, 脳血管と全身血管の間の異なるSRの決定にも寄与する可能性がある。

我々の先行研究¹⁴⁾において, インターバル運動でより運動中のSRが継続運動と比較して高まること, さらに末梢動脈での所見を考慮すると, インターバル運動によるSRの増加は, 健康な成人男性の脳循環で全身循環よりも顕著であり, インターバル運動は, 継続運動と比較して脳動脈を刺激するためにより効果的な運動であることが考えられる。しかしながら, 本研究の結果は, 仮説と異なりインターバル運動の脳血管内皮機能におぼす影響についての有意性は観察されなかった。

この原因については明らかでないが、インターバル運動でより顕著にSRの低下が見られ、このことから、運動後のSRの低下が脳血管内皮機能に影響している可能性が考えられる。また逆にSRの低下が大きいかかわらず、脳血管内皮機能が継続運動と差異が無かったことから、運動中のSRの増加が影響しているかもしれない。インターバル運動の生理学的な有用性について明らかにする為にはさらなる研究が必要である。これらの研究は運動によりその優れた神経保護効果の基本的な統合刺激を証明する可能性がある。したがって、今後のさらなる関連所見は、脳循環の動脈硬化を改善する運動療法プログラムの構築に重要な情報を提供すると考える。

4. まとめ

インターバル運動による脳血管内皮機能に及ぼす有意な影響は観察されなかった。しかしながら、運動様式や強度等がSRの差異に影響を及ぼす。運動の適切な有用性を明らかにするためにこれらの生理的影響を理解することが重要でありさらなる研究が必要である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Booth F.W., Lees S.J., Fundamental questions about genes, inactivity, and chronic diseases., *Physiol. Genomics.*, **28** (2) : 146-57 (2007)
- 2) Fletcher G.F., Exercise in the prevention of stroke., *Health Rep.*, **6** (1) : 106-10 (1994)
- 3) Jung W.S., Hwang H., Kim J., Park H.Y., Lim K., Effect of interval exercise versus continuous exercise on excess post-exercise oxygen consumption during energy-homogenized exercise on a cycle ergometer., *J. Exerc. Nutrition. Biochem.*, **23** (2) : 45-50 (2019)
- 4) Tjonna A.E., Lee S.J., Rognmo O., Stolen T.O., Bye A., Haram P.M. et al., Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome: a pilot study., *Circulation*, **118** (4) : 346-54 (2008)
- 5) Francois M.E., Durrer C., Pistawka K.J., Halperin F.A., Little J.P., Resistance-based interval exercise acutely improves endothelial function in type 2 diabetes., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **311** (5) : H1258-H1267 (2016)
- 6) Karstoft K., Christensen C.S., Pedersen B.K., Solomon T.P., The acute effects of interval- Vs continuous-walking exercise on glycemic control in subjects with type 2 diabetes: a crossover, controlled study., *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, **99** (9) : 3334-42 (2014)
- 7) Mitranun W., Deerochanawong C., Tanaka H., Suksom D., Continuous vs interval training on glycemic control and macro- and microvascular reactivity in type 2 diabetic patients., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **24** (2) : e69-76 (2014)
- 8) Calverley T.A., Ogoh S., Marley C.J., Steggall M., Marchi N., Brassard P. et al., HIITing the brain with exercise: mechanisms, consequences and practical recommendations., *J. Physiol.*, **598** (13) : 2513-2530 (2020)
- 9) Lucas S.J., Cotter J.D., Brassard P., Bailey D.M., High-intensity interval exercise and cerebrovascular health: curiosity, cause, and consequence., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **35** (6) : 902-11 (2015)
- 10) Boyne P., Dunning K., Carl D., Gerson M., Khoury J., Kissela B., High-intensity interval training in stroke rehabilitation., *Top Stroke Rehabil.*, **20** (4) : 317-30 (2013)
- 11) Joyner M.J., Green D.J., Exercise protects the cardiovascular system: effects beyond traditional risk factors. *J. Physiol.*, **587** (Pt 23) : 5551-8 (2009)
- 12) Chatzizisis Y.S., Coskun A.U., Jonas M., Edelman E.R., Feldman C.L., Stone P.H., Role of endothelial shear stress in the natural history of coronary atherosclerosis and vascular remodeling: molecular, cellular, and vascular behavior., *J. Am. Coll. Cardiol.*, **49** (25) : 2379-93 (2007)
- 13) Davies P.F., Hemodynamic shear stress and the endothelium in cardiovascular pathophysiology., *Nat. Clin. Pract. Cardiovasc. Med.*, **6** (1) : 16-26 (2009)

- 14) Ogoh S., Washio T., Suzuki K., Iemitsu M., Hashimoto T., Iwamoto E. et al., Greater increase in internal carotid artery shear rate during aerobic interval compared to continuous exercise in healthy adult men., *Physiol. Rep.*, **9** (2) : e14705 (2021)
- 15) Lyall G.K., Davies M.J., Ferguson C., Porter K.E., Birch K.M., In-exercise vascular shear rate during acute continuous and interval exercise: impact on endothelial function and miR-21., *J. Appl. Physiol.* (1985), **127** (6) : 1754-1762 (2019)
- 16) Iwamoto E., Hanson B.E., Bock J.M., Casey D.P., Intermittent hypoxia enhances shear-mediated dilation of the internal carotid artery in young adults., *J. Appl. Physiol.* (1985), (2020)
- 17) Carter H.H., Atkinson C.L., Heinonen I.H., Haynes A., Robey E., Smith K.J. et al., Evidence for Shear Stress-Mediated Dilation of the Internal Carotid Artery in Humans., *Hypertension*, **68** (5) : 1217-1224 (2016)
- 18) Hoiland R.L., Smith K.J., Carter H.H., Lewis N.C.S., Tymko M.M., Wildfong K.W. et al., Shear-mediated dilation of the internal carotid artery occurs independent of hypercapnia., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **313** (1) : H24-H31 (2017)
- 19) Smith K.J., Hoiland R.L., Grove R., McKirdy H., Naylor L., Ainslie P.N. et al., Matched increases in cerebral artery shear stress, irrespective of stimulus, induce similar changes in extra-cranial arterial diameter in humans., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **39** (5) : 849-858 (2019)
- 20) Casey D.P., Ueda K., Wegman-Points L., Pierce G.L., Muscle contraction induced arterial shear stress increases endothelial nitric oxide synthase phosphorylation in humans., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **313** (4) : H854-H859 (2017)
- 21) Yan C., Huang A., Kaley G., Sun D., Chronic high blood flow potentiates shear stress-induced release of NO in arteries of aged rats., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **293** (5) : H3105-10 (2007)
- 22) Tinken T.M., Thijssen D.H., Hopkins N., Black M.A., Dawson E.A., Minson C.T. et al., Impact of shear rate modulation on vascular function in humans., *Hypertension*, **54** (2) : 278-85 (2009)
- 23) Thijssen D.H., Dawson E.A., Tinken T.M., Cable N.T., Green D.J., Retrograde flow and shear rate acutely impair endothelial function in humans., *Hypertension*, **53** (6) : 986-92 (2009)
- 24) Rodrigues J.C.L., Strelko G., Warnert E.A.H., Burchell A.E., Neumann S., Ratcliffe L.E.K. et al., Retrograde blood flow in the internal jugular veins of humans with hypertension may have implications for cerebral arterial blood flow., *Eur. Radiol.*, (2020)
- 25) Ogoh S., Autonomic control of cerebral circulation: exercise., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **40** (12) : 2046-54 (2008)
- 26) Ogoh S., Ainslie P.N., Cerebral blood flow during exercise: mechanisms of regulation., *J. Appl. Physiol.* (1985), **107** (5) : 1370-80 (2009)
- 27) Ogoh S., Ainslie P.N., Regulatory mechanisms of cerebral blood flow during exercise: new concepts., *Exerc. Sport Sci. Rev.*, **37** (3) : 123-9 (2009)

運動パフォーマンス向上となる最適な咬合の解明： 脳機能と脊髄機能に着目

新潟医療福祉大学 平 林 怜
(共同研究者) 同 江 玉 睦 明
広島大学大学院 岡 田 芳 幸
新潟医療福祉大学 大 西 秀 明

Clarifying Optimal Occlusion to Improve Athletic Performance Focusing on Brain and Spinal Function

by

Ryo Hirabayashi, Mutsuaki Edama, Hideaki Onishi
*Institute for Human Movement and Medical Sciences,
Niigata University of Health and Welfare*
Yoshiyuki Okada
*Graduate School of Biomedical and Health Sciences,
Hiroshima University*

ABSTRACT

Teeth clenching greatly impacts athletic performance, but the optimal occlusal force and balance between the left and right sides remain unclear. Therefore, the present study aimed to investigate the effect of imbalanced occlusal pressure on remote facilitation, focusing on spinal function and locus coeruleus activation.

Fourteen healthy adults with normal occlusion were enrolled; those with malocclusion were excluded from the analyses. Occlusal pressure measurements included maximum occlusal force and balance of occlusal pressure between the left and right sides. The sides with higher and lower occlusal pressures were referred to as

the Hyper and Hypo sides, respectively. Electromyography electrodes were attached to the bilateral masseter, anterior temporal, and soleus muscles. The occlusion conditions were as follows: no-bite condition (no contact of the dental arches), contact condition (contact of the dental arches without clenching), and conditions of 12.5%, 25%, and 50% of the maximum voluntary contraction (MVC) of the right masseter muscle, as well as a max condition. Spinal excitability was evaluated using the H-reflex, which was measured by electrically stimulating the tibial nerve in both lower limbs, with the stimulus intensity set so that the soleus H-wave amplitude was 20% of the maximum M-wave amplitude. Additionally, the pupil diameter on both sides was measured as an indicator of locus coeruleus activity. We analyzed the muscle activity of each muscle under each occlusion condition, H-wave amplitude values on both sides, and pupil diameter on both sides. Statistical processing included two-way repeated measures analysis of variance, and post hoc tests involved t-tests between conditions. The significance level was set at 5%.

The masseter and anterior temporal muscle activities were significantly higher on the hyper side than on the hypo side in the 12.5%, 25%, 50% MVC, and max conditions ($p < 0.05$). Spinal excitability and pupil diameter were significantly higher in the 12.5%, 25%, 50% MVC, and max conditions than in the no-bite condition ($p < 0.05$). Furthermore, spinal excitability was significantly higher on the hyper side than on the hypo side in the max condition ($p < 0.05$). Pupil diameter was significantly higher on the hyper side than on the hypo side in the 12.5%, 25%, 50% MVC, and max conditions ($p < 0.05$).

Our results suggest that imbalanced occlusal pressure leads to imbalances in locus coeruleus and spinal excitability activities. Given that such imbalances in the locus coeruleus and spinal excitability negatively affect cognitive and motor functions, the correction of occlusal pressure balance may be important.

キーワード

H反射, 瞳孔径, 青斑核, 咬筋, 遠隔促通

Keyword

H reflex, Pupil size, Locus coeruleus, Masseter muscle, Remote facilitation

要 旨

歯の噛みしめは運動パフォーマンスに大きな影響をもたらすが、最適な咬合強度や左右の咬合バランスについては不明である。そこで、本研究の

目的は、脊髄機能と青斑核の活性に着目して、不均衡な咬合バランスが遠隔促通効果に及ぼす影響を検討することとした。

対象は健康成人として、不正咬合者を除外した正常咬合者14名とした。咬合計測は、最大咬合

力、左右の咬合バランスを計測して、咬合が高い側をHyper側、低い側をHypo側とした。筋電図電極は両側の咬筋、前側頭筋、ヒラメ筋に貼付した。咬合条件は歯列の咬合接触がないno-bite条件、歯列の咬合接触はあるが噛みしめていない接触ありcontact条件、右咬筋最大随意収縮(MVC)の12.5%、25%、50%MVC条件とmax条件の6条件とした。脊髄興奮性はH波を用いて評価した。H波の計測は両下肢の脛骨神経に電気刺激をし、刺激強度はヒラメ筋H波振幅値が最大M波振幅値の20%になるように設定した。また、青斑核の活動指標として左右の瞳孔径を計測した。解析項目は各咬合条件での各筋の筋活動、左右のH波振幅値、左右の瞳孔径とした。統計処理として、反復測定二元配置分散分析を行い、事後検定として各咬合条件の比較にはno-biteに対する対応のあるt検定にBonferroni補正を行い、Hyper側とHypo側の比較には対応のあるt検定を行った。いずれも有意水準は5%とした。

咬筋と前側頭筋の筋活動は、12.5%、25%、50%MVC、max条件でhypo側と比較してhyper側が有意に高値を示した($p<0.05$)。脊髄興奮性と瞳孔径はno-biteと比較して12.5%、25%、50%MVC、max条件で有意に高値を示した($p<0.05$)。また、脊髄興奮性はmax条件でhypo側と比較してhyper側が有意に高値を示した($p<0.05$)。瞳孔径は12.5%、25%、50%MVC、max条件でhypo側と比較してhyper側が有意に高値を示した($p<0.05$)。

本研究の結果より、左右の咬合バランスの不均衡は、青斑核と脊髄興奮性の活動にも不均衡が生じた。青斑核や脊髄興奮性の不均衡は、認知機能や運動機能に悪影響を及ぼすことが報告されていることから、咬合バランスの補正が重要である可能性が示唆された。

緒 言

スポーツ歯科は、従来から口腔外傷の予防に重点を置いてきたが、近年では、歯の咬合がアスリートの運動パフォーマンスに影響を及ぼすことが注目されている^{1,2)}。咬合がもたらす運動機能へのポジティブな影響は、筋出力、関節運動能力、バランス能力、歩行およびランニング、垂直ジャンプなど、多岐にわたり報告されてきた³⁻⁸⁾。この影響は、咬合により三叉神経入力が青斑核⁹⁾や脊髄^{10,11)}の活動を促通する遠隔促通効果と呼ばれるメカニズムに起因する。この遠隔促通効果において主要な役割を担う三叉神経入力は、歯根膜に存在する機械受容器の発火に由来するとされており¹²⁾、近年では、咬合バランス(咬合力の左右比率)によってこのシグナルが変化することが考えられている^{13,14)}。

咬合バランスに着目した先行研究により、不均衡な咬合が運動パフォーマンスに悪影響を及ぼす可能性や、非対称な動作を引き起こす可能性が報告されてきた^{15,16)}。Tramontiらは、不均衡な咬合を有する者を対象に、咬合補正の前後で運動誘発性の皮質活動量を比較した結果、補正前で有意な皮質活動の増幅を報告している¹⁶⁾。一般的に、運動時の皮質活動は、運動の熟練や自動化による努力性注意の低下に伴って減少することが明らかにされている^{17,18)}。先行研究で確認された、不均衡な咬合による皮質活動量の増幅は、動作時に高い努力性注意を要することを意味し、運動パフォーマンスに悪影響を与えると推察している¹⁶⁾。また、我々の研究グループは、左右の足関節背屈運動パフォーマンスを検討し、咬合Hyper側で促通が大きいことを明らかにした。以上から、咬合バランスが動作の非対称に関与することが示唆されている⁸⁾。

そこで、我々は咬合不均衡による運動パフォーマンスの影響を神経生理学的メカニズムに着目

し、本研究の目的は、咬合強度と咬合不均衡による青斑核と脊髄の活性に及ぼす影響を検討することとした。

1. 方 法

実験デザインとして、咬合評価を行い咬合不均衡率を計測した。咬合条件は6条件で、脊髄興奮性の指標であるH反射と青斑核の活性の指標である瞳孔径を計測した。

1. 1 対 象

対象は本学の強化指定クラブに所属する健常成人14名（年齢 21.0 ± 0.6 歳，身長 166.8 ± 6.4 cm，体重 57.6 ± 8.5 kg，女性7名）を対象とした。本研究は、ヘルシンキ宣言に基づいたものであり、本学の倫理委員会の承認を得て実施した（18363-200210）。対象者には実験内容及び対象者の権利についての説明を十分に行い、実験参加への同意を得たうえで実験を実施した。

1. 2 測定肢位

脊髄興奮性の計測時の測定肢位は右下肢で股関節 100° ，膝関節 120° ，足関節 110° とした。下肢は実験を通して肢位が変化しないように大腿部は座面，足部はフットプレートに固定した（竹井機器工業株式会社製）。瞳孔径の計測時の測定肢位は安静椅子座位で、モニターを被験者の目の高さ前方65cmに設置した。

1. 3 筋電図記録

表面筋電図（EMG）はAg / AgCl電極を用いて（Blue Sensor, METS），両側咬筋の筋腹，両側のヒラメ筋（Sol）内側の筋腹に貼付した。アース電極はEMG電極と電気刺激電極の間に貼付した。EMG信号は増幅器（FA-DL-720・140, 4 ASSIST）で100倍に増幅したのちA/D変換（PowerLab 8/30, AD Instruments）し、サンプリ

ング周波数10kHzでパーソナルコンピュータに記録した。バンドパスフィルターは10Hzから1kHzとした。データはLabChart 7（AD Instruments）を使用して解析した。

1. 4 咬合条件

咬合条件は6条件とし、歯列の咬合接触がなく噛みしめていないno-bite条件、歯列の咬合接触はあるが噛みしめていないcontact条件、右咬筋最大随意収縮（MVC）の12.5%，25%，50%，max条件とした。咬筋のスムージング波形は対象者の前方のモニターにリアルタイムで表示し、モニターに各咬合強度（12.5%MVC，25%MVC，50%MVC）をマーカーし、視覚的フィードバックにより目標とする噛みしめ強度の $\pm 5\%$ MVCに合わせ、 $\pm 5\%$ MVCを超えた試行は除外した¹⁹⁾。全ての実験を通して咬合中は、表情筋の筋収縮が入らないようにできる限り表情を変えないよう指示し、注意して観察して実施した。咬筋のMVCの計測は3秒間を3回行い、安定した1秒間を解析し、3回の平均値をMVCの値とした。また、実験後にも同様の方法でMVCの計測を行った。

1. 5 電気刺激

電気刺激は、電気刺激装置（SEN-8203, Nihon Kohden, Tokyo, Japan）を用いて、アイソレーター（SS-104J, Nihon Kohden, Tokyo, Japan）を介して、電気刺激（持続時間1 ms, 矩形波）を実施した。Sol H反射の誘発には、選択的に脛骨神経を刺激するために、単極刺激法を用い、陽極を膝蓋骨上面，陰極を膝窩部にて実施した¹¹⁾。

1. 6 咬合バランス計測

咬合バランスの評価には、咬合力測定システム用フィルムDental Prescale II（GC社製）を用い、椅子座位で実施された。被験者は、厚さ $150\mu\text{m}$ の発色剤を含むマイクロカプセルが埋め込まれた



図1 実験デザイン

咬合条件は6条件とし、歯列の咬合接触がなく噛みしめていないno-bite条件、歯列の咬合接触はあるが噛みしめていないcontact条件、右咬筋最大随意収縮(MVC)の12.5%、25%、50%、max条件とした。実験前後に咬筋MVCを計測した。各計測での咬合条件は、すべてランダムに実施した。また、各計測では1分以上の休息を入れた。

フィルタを最大努力で3秒間噛みしめた。噛みしめられたフィルタには、被験者の咬合力に応じて破壊されたマイクロカプセルから赤色の発色が生じ、これをスキャナーで取り込むことで左右の咬合力が数値化された。左右の咬合力を比較し、数値が高い側をHyper側、低い側をHypo側とした。

1. 7 脊髄興奮性の計測

脊髄興奮性の指標として、Sol H反射を用いた。Sol H反射の計測は、11秒±1秒ごとに^{11, 20)}、対象者の前方に設置した光刺激装置(竹井機器工業株式会社製)による光刺激を合図に各咬合条件を4秒間行わせ、光刺激から3秒後に脛骨神経に電気刺激をした。刺激強度は安静時のSol-Mmaxの20%とし、実験を通して一定の強度とした^{11, 21)}。計測回数は各咬合条件をランダムに10回1セットとし、3セット実施した。各セット間は1分以上の休息を入れて実施した。

1. 8 瞳孔径の計測

瞳孔径の計測には、モニターの直下に設置したTobii Pro Nano(Tobii社製)を使用した。サンプリングレートは60Hzで計測した。瞳孔径は左右の瞳孔径の最大直径を計測した。解析は、各咬合条件を5秒間実施し、最後の1秒を解析区間とした。

1. 9 実験手順

実験手順は図1に示す。実験手順は、最初にDental Prescale IIで咬合バランス評価を行い、次に、脊髄興奮性、瞳孔径の計測を行った。最後に咬筋MVCを計測して、咬筋の筋疲労の有無を評価した。脊髄興奮性、瞳孔径の計測時の咬合条件はすべてランダムに実施した。

1. 10 データ解析

脊髄興奮性の指標として用いたH反射の解析は、Sol H反射振幅のpeak-to-peak値を振幅値として算出し、各咬合条件で得られたH反射振幅値の15波形を加算平均して算出した。各咬合条件の比較の際はSol H反射振幅値を最大M波振幅値で除して%表記にて算出した(Sol H-reflex amplitude in % Mmax)。

瞳孔径の解析は、瞳孔径最大直径を計測し、左右の瞳孔径は、各咬合条件の平均値を算出した。また、各咬合条件前の安静時瞳孔径(rest)と各咬合条件中(clenching)の瞳孔径の変化率を算出した。

1. 11 統計処理

脊髄興奮性と瞳孔径の比較には、咬合条件と左右の二要因に対する反復測定二元配置分散分析を

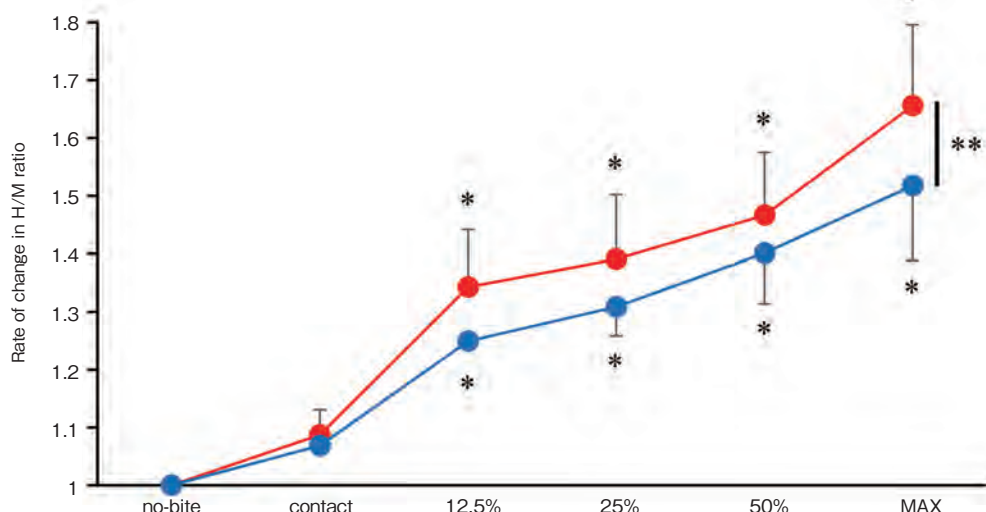


図2 脊髓興奮性(H反射振幅値の変化率)

赤はHyper側, 青はHypo側を示す. 各値は平均値±標準誤差を示す. 縦軸はH反射振幅値をMmaxで除した値を示す. 横軸は咬合条件を示す. no-bite条件と他の5条件の比較のために対応のある t検定に Bonferroni補正を行った(*p<0.05). 咬合不均衡の比較には対応のある t検定を行った(**p<0.05).

表1 Background EMG, H/M ratio

		no-bite	contact	12.5%	25%	50%	MAX
Hyper	Masseter muscle	1.4±0.4	1.8±0.6	9.9±1.5	25.4±1.9	47.8±2.2	74.0±4.8
	Sol H/M ratio	21.6±1.2	22.6±0.7	26.9±0.7	26.9±0.4	28.2±1.2	31.5±3.2
	Sol background	2.4±0.1	2.4±0.1	2.3±0.1	2.5±0.1	2.3±0.1	2.4±0.1
Hypo	Masseter muscle	1.4±0.4	2.0±0.8	10.0±1.0	23.7±0.5	50.6±2.1	67.4±5.5
	Sol H/M ratio	20.9±0.4	22.4±0.5	25.9±0.5	26.7±1.5	28.1±2.3	29.9±3.1
	Sol background	2.3±0.1	2.4±0.1	2.4±0.1	2.3±0.1	2.3±0.1	2.4±0.1

各値は平均値±標準誤差を示す. 咬筋活動のbackground EMG (%MVC) (EMG 30-50 ms before the stimulus). Sol background EMG (μV) (EMG 30-50 ms before the stimulus)

EMG, electromyography; Sol, soleus muscle; MVC, maximal voluntary contraction

行い, 事後検定として各咬合条件の比較には no-bite 条件に対する対応のある t検定に Bonferroni 補正を行い, Hyper 側と Hypo 側の比較には対応のある t検定を行った. 各計測項目の男女間の比較には対応のない t検定を行った. いずれも有意水準は5%とした.

2. 結果

2.1 脊髓興奮性

各咬合条件の H 反射振幅値の比較では, no-bite 条件と比較して 12.5%, 25%, 50%MVC 条件, max 条件で H 反射振幅値が有意に増加した ($p<0.001$). Hyper 側と Hypo 側の比較では, max 条件で H 反射振幅値が Hyper 側で有意に増加した ($p<0.001$) (図2, 表1). 男女間の比較では有意

差を認めなかった.

2.2 瞳孔径

rest と clenching の変化率で Hyper 側と Hypo 側の比較では, 25%, 50%MVC 条件, max 条件で Hypo 側と比較して Hyper 側で瞳孔径変化率が有意に増加した ($p<0.01$) (表2). 男女間の比較では有意差を認めなかった.

3. 考察

本研究の main findings は, 咬合強度が増加するにつれて, 脊髓興奮性が増大し, 瞳孔径が散大し青斑核の活性を示した. また, 脊髓興奮性は max 条件で Hyper 側が Hypo 側と比較して増大し, 瞳孔径は 25%MVC 条件以上で Hyper 側が Hypo 側と

表2 瞳孔径の値と変化率

		no-bite	contact	12.5%	25%	50%	MAX
Hyper	Rest (mm)	4.37±0.36	4.48±0.34	4.68±0.37	4.46±0.35	4.64±0.34	4.34±0.34
	Clenching (mm)	4.44±0.33	4.45±0.39	4.67±0.38	4.75±0.47	5.03±0.46	4.72±0.45
	rate of change	1.6±2.2	-0.6±3.5	-0.1±3.1	7.6±4.1*†	8.1±4.2*†	8.7±4.3*†
Hypo	Rest (mm)	4.43±0.33	4.54±0.33	4.69±0.35	4.64±0.33	4.60±0.37	4.61±0.33
	Clenching (mm)	4.50±0.35	4.47±0.41	4.53±0.39	4.89±0.43	4.85±0.41	4.86±0.42
	rate of change	1.7±1.9	-1.4±1.6	-0.3±3.1	3.4±2.2	4.9±2.3*	5.4±3.5*

各値は平均値±標準誤差を示す。

各咬合条件の比較にはno-bite条件に対する対応のあるt検定にBonferroni補正を行い (*: $p < 0.05$), Hyper側とHypo側の比較には対応のあるt検定を行った (†: $p < 0.05$)

比較して散大し青斑核の活性を示した。脊髄と瞳孔径を左右で同時に計測し、咬合強度に伴い脊髄興奮性が増大、青斑核が活性し、咬合不均衡によって脊髄興奮性と青斑核の活性に不均衡をもたらした新たな知見となった。

本研究の結果より、咬合強度の増加に伴い脊髄興奮性は増大、瞳孔径は散大した。先行研究では、遠隔促通効果として、咬合に伴って歯根膜受容体および咬筋の筋紡錘を含む三叉神経系の機械受容器からの抑制性の下降性入力により、シナプス前抑制を抑制することが報告されている²²⁾。本研究においても、咬合に伴うSol H反射の増大は、抑制性の下降性入力による遠隔促通効果であると示唆される。咬合強度に伴った脊髄興奮性が増大した本研究の結果は、我々の先行研究を支持する結果となった¹¹⁾。

本研究の結果より面白い結果は、咬合不均衡に伴った咬合力が強い側の下肢の脊髄興奮性がより増大したことである。この結果は、先行研究より、咬筋活動の不均衡に伴い、三叉神経入力に不均衡を及ぼし、青斑核の活性つまり瞳孔不同が生じることが報告されている²³⁾。脊髄興奮性における不均衡も、咬合の不均衡が三叉神経入力からの下降性入力の不均衡を生じさせ、シナプス前抑制に対する抑制量に不均衡が生じ脊髄興奮性の活性にも不均衡が生じた可能性が示唆された。本研究の結果は、咬合不均衡に伴い脊髄興奮性でも不均衡が生じることが明らかとなった新たな知見となった。また、我々の先行研究より¹¹⁾、咬合

不均衡が足関節の運動パフォーマンスにも不均衡を及ぼした結果を基礎的結果より支持する知見となった。つまり、咬合不均衡は、脊髄興奮性に不均衡を及ぼすことで、安静時の筋緊張にも左右差が生じ、静止立位時の重心が偏移してしまうことや、咬合力が強い側の関節運動や筋力発揮にも不均衡が生じることから¹¹⁾、左右均衡な運動パフォーマンスを遂行する競技において悪影響をもたらす可能性が示唆される。今後、咬合不均衡と咬合補正による運動パフォーマンスの影響を神経生理学的観点と運動機能の観点から検討する必要がある。

咬合強度の増加に伴った瞳孔径の散大と咬合不均衡に伴った瞳孔不同が生じた結果は、先行研究と同様の結果が得られた²³⁾。また、咬合に伴う瞳孔径の散大は、三叉神経-青斑核経路の可塑的变化を生じる²⁴⁾。青斑核の活性はノルアドレナリンが放出され²⁵⁾交感神経優位となり瞳孔径は散大することが報告されている。そのため咬合強度に伴い、三叉神経の入力が増加し瞳孔径が散大したことが考えられる。瞳孔径の散大は咬合強度の25%以上で生じることも明らかにした。また、咬合不均衡に伴う瞳孔不同は、三叉神経入力の不均衡に伴い瞳孔不同が生じることが報告されている^{13, 26)}。そのため、本研究の結果も同様に、咬合不均衡による瞳孔不同が生じた可能性が示唆された。本研究では、咬合不均衡を咬合力を測定できるデンタルプレスケールを用いて、筋活動と咬合力を併せて咬合不均衡を計測していることか

ら、どちらを咬合指標にしても脊髄と青斑核の活性には同様の結果が得られることが明らかとなった。

4. 結 論

本研究は、咬合強度12.5%以上で脊髄興奮性が増大し、maxの強度で脊髄興奮性の不均衡が生じた。瞳孔径は、25%以上で瞳孔散大と瞳孔不同が生じた。本研究は、咬合不均衡に伴う認知遂行機能の低下や、運動パフォーマンス低下を引き起こすメカニズムを確立した基礎的知見となった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Haughey J.P., Fine P., Effects of the lower jaw position on athletic performance of elite athletes., *B.M.J. Open Sport Exerc. Med.*, 6:e000886 doi: 10.1136/bmjsem-2020-000886 (2020)
- 2) Gallagher J., Fine P., Ashley P., Needleman I., Developing the role of the sports dentist., *Br. Dent. J.*, 231:544-546 doi: 10.1038/s41415-021-3612-9 (2021)
- 3) Sasaki Y., Ueno T., Taniguchi H., Ohyama T., Effect of teeth clenching on isometric and isokinetic strength of ankle plantar flexion., *J. Med. Dent. Sci.*, 45:29-37 (1998)
- 4) Bracco P., Deregibus A., Piscetta R., Effects of different jaw relations on postural stability in human subjects., *Neurosci. Lett.*, 356:228-230 doi: 10.1016/j.neulet.2003.11.055 (2004)
- 5) Ebben W.P., Kaufmann C.E., Fauth M.L., Petushek E.J., Kinetic analysis of concurrent activation potentiation during back squats and jump squats., *J. Strength Cond. Res.*, 24:1515-1519 doi: 10.1519/JSC.0b013e3181dc4761 (2010)
- 6) Tecco S., Polimeni A., Saccucci M., Festa F., Postural loads during walking after an imbalance of occlusion created with unilateral cotton rolls., *B.M.C. Res. Notes.*, 3:141 doi: 10.1186/1756-0500-3-141

- (2010)
- 7) Maurer C., Stief F., Jonas A., Kovac A., Groneberg D.A., Meurer A., Ohlendorf D., Influence of the Lower Jaw Position on the Running Pattern., *PLoS One*, 10:e0135712 doi: 10.1371/journal.pone.0135712 (2015)
- 8) Yamada Y., Hirabayashi R., Okada Y., Yokota H., Sekine C., Edama M., Effects of remote facilitation on ankle joint movement: Focusing on occlusal strength and balance., *Health Sci. Rep.*, 6:e1098 doi: 10.1002/hsr2.1098 (2023)
- 9) De Cicco V., Tramonti Fantozzi M.P., Cataldo E., Barresi M., Bruschini L., Faraguna U., Manzoni D., Trigeminal, Visceral and Vestibular Inputs May Improve Cognitive Functions by Acting through the Locus Coeruleus and the Ascending Reticular Activating System: A New Hypothesis., *Front Neuroanat.*, 11:130 doi: 10.3389/fnana.2017.00130 (2017)
- 10) Delwaide P.J., Toulouse P., Facilitation of monosynaptic reflexes by voluntary contraction of muscle in remote parts of the body. Mechanisms involved in the Jendrassik Manoeuvre., *Brain*, 104:701-709 doi: 10.1093/brain/104.4.701 (1981)
- 11) Hirabayashi R., Edama M., Saito A., Yamada Y., Nawa R., Onishi H., Effects of Clenching Strength on Exercise Performance: Verification Using Spinal Function Assessments., *Sports Health*, 14:404-414 doi: 10.1177/19417381211014836 (2022)
- 12) Ertuglu L.A., Karacan I., Yilmaz G., Türker K.S., Standardization of the Jendrassik maneuver in Achilles tendon tap reflex., *Clin. Neurophysiol. Pract.*, 3:1-5 doi: 10.1016/j.cnp.2017.10.003 (2018a)
- 13) De Cicco V., Barresi M., Tramonti Fantozzi M.P., Cataldo E., Parisi V., Manzoni D., Oral Implant-Prostheses: New Teeth for a Brighter Brain., *PLoS One*, 11:e0148715 doi: 10.1371/journal.pone.0148715 (2016)
- 14) Tramonti Fantozzi M.P., Lazzarini G., De Cicco V., et al., The path from trigeminal asymmetry to cognitive impairment: a behavioral and molecular study., *Sci. Rep.*, 11:4744 doi: 10.1038/s41598-021-82265-6 (2021b)
- 15) Michalakakis K.X., Kamalakidis S.N., Pissiotis A.L., Hirayama H., The Effect of Clenching and Occlusal Instability on Body Weight Distribution, Assessed by a Postural Platform., *Biomed. Res. Int.*,

- 2019:7342541 doi: 10.1155/2019/7342541 (2019)
- 16) Tramonti Fantozzi M.P., Diciotti S., Tessa C., et al., Unbalanced Occlusion Modifies the Pattern of Brain Activity During Execution of a Finger to Thumb Motor Task., *Front Neurosci.*, **13**:499 doi: 10.3389/fnins.2019.00499 (2019)
- 17) Saling L.L., Phillips J.G., Automatic behaviour: efficient not mindless., *Brain Res. Bull.*, **73**:1-20 doi: 10.1016/j.brainresbull.2007.02.009 (2007)
- 18) Wu T., Chan P., Hallett M., Modifications of the interactions in the motor networks when a movement becomes automatic., *J. Physiol.*, **586**:4295-4304 doi: 10.1113/jphysiol.2008.153445 (2008)
- 19) Takada Y., Miyahara T., Tanaka T., Ohya T., Nakamura Y., Modulation of H reflex of pretibial muscles and reciprocal Ia inhibition of soleus muscle during voluntary teeth clenching in humans., *J. Neurophysiol.*, **83**:2063-2070 doi: 10.1152/jn.2000.83.4.2063 (2000)
- 20) Aymard C., Katz R., Lafitte C., Lo E., Pénicaud A., Pradat-Diehl P., Raoul S., Presynaptic inhibition and homosynaptic depression: a comparison between lower and upper limbs in normal human subjects and patients with hemiplegia., *Brain*, **123** (Pt 8) :1688-1702 doi: 10.1093/brain/123.8.1688 (2000)
- 21) Malmgren K., Pierrot-Deseilligny E., Evidence for non-monosynaptic Ia excitation of human wrist flexor motoneurons, possibly via propriospinal neurones., *J. Physiol.*, **405**:747-764 doi: 10.1113/jphysiol.1988.sp017359 (1988)
- 22) Ertuglu L.A., Karacan I., Yilmaz G., Turker K.S., Standardization of the Jendrassik maneuver in Achilles tendon tap reflex., *Clin. Neurophysiol. Pract.*, **3**:1-5 doi: 10.1016/j.cnp.2017.10.003 (2018b)
- 23) Tramonti Fantozzi M.P., De Cicco V., Argento S., et al., Trigeminal input, pupil size and cognitive performance: From oral to brain matter., *Brain Res.*, **1751**:147194 doi: 10.1016/j.brainres.2020.147194 (2021a)
- 24) De Cicco V., Tramonti Fantozzi M.P., Cataldo E., Barresi M., Bruschini L., Faraguna U., Manzoni D. Trigeminal, visceral and vestibular inputs may improve cognitive functions by acting through the locus coeruleus and the ascending reticular activating system: a new hypothesis., *Frontiers in Neuroanatomy*, **11**:130 (2018)
- 25) McCormick D.A., Pape H.C., Williamson A., Chapter 22 - Actions of norepinephrine in the cerebral cortex and thalamus: implications for function of the central noradrenergic system. In: Barnes CD, Pompeiano O (eds) Progress in, *Brain Res., earch. Elsevier*, pp 293-305 (1991)
- 26) De Cicco V., Cataldo E., Barresi M., Parisi V., Manzoni D., Sensorimotor trigeminal unbalance modulates pupil size., *Arch. Ital. Biol.*, **152**:1-12 (2014)

スポーツ活動中の熱中症発生と水分補給に伴う 骨格筋内の水分特性の変化

大阪工業大学 石 道 峰 典

Effects of Heat Stroke During Sports Activities and Subsequent Hydration on Changes in Water Molecule Properties in Skeletal Muscle

by

Minenori Ishido

*Section for Health-related Physical Education,
Division of Human Sciences, Faculty of Engineering,
Osaka Institute of Technology*

ABSTRACT

Water molecule dynamics in vivo are important for heat stroke caused by exercise in high-temperature environments and its prevention. Water molecules in skeletal muscle and other living tissues can be broadly classified into “free water,” which can move freely without binding to other substances, and “bound water,” which is bound to other substances and whose molecular motion is constrained. However, the effects of hydration at the onset of heat stroke and afterward on water molecules of different properties, such as free water and bound water, are unclear. The present study examined the effects of running exercise-induced heat stroke caused in a high-temperature environment and subsequent hydration on water molecule properties and water transport mechanisms in skeletal muscle in rats. Running exercise at a running speed of 10 m/min was performed in a room maintained at a room temperature of $31 \pm 2^\circ$ and humidity of $45 \pm 5\%$. The exercise was terminated when the rats lost 3% of their body weight during the running exercise. Hydration was then provided ad libitum for 24 hours. As a result, it was demonstrated that muscle water content

changes in response to changes in free water volume due to running exercise-induced heat stroke and subsequent hydration. On the other hand, there was no change in hyaluronan concentration, suggesting that changes in bound water may not be affected. Furthermore, no significant changes were observed in the expression levels of AQP1 and AQP4, which are water molecule transport mechanisms. In the present study, it was suggested that running exercise induced heat stroke and subsequent hydration may affect the dynamics of free water, but not bound water. In addition, it was also indicated that the water molecule transport mechanism was hardly affected.

キーワード

骨格筋, 運動, 熱中症, 自由水, アクアポリン

Keyword

skeletal muscle, exercise, heat stroke, free water, aquaporin

要 旨

高温環境下での運動による熱中症やその予防において生体内での水分子動態は重要である。しかし、熱中症発症時やその後の水分補給が自由水や結合水といった異なる性質の水分子に及ぼす影響は不明瞭である。本研究では、ラットを用いて高温環境下での走運動による熱中症やその後の水分補給が骨格筋の水分子特性や水分輸送機構に与える影響を検討した。その結果、運動による熱中症やその後の水分補給により自由水量の変化に応じて筋水分含有率が変化することが明らかとなった。一方、ヒアルロン酸濃度に変化はなく、結合水の変化には影響していない可能性が示唆された。また水分子輸送機構であるAQP1やAQP4の発現レベルに有意な変化は認められなかった。本研究より運動による熱中症やその後の水分補給は、自由水の動態に影響を及ぼす一方で結合水には影響しない可能性が示唆された。また、水分子輸送機構はほとんど影響を受けないことも示された。

緒 言

近年の温暖化にともない夏場だけでなく一年の多くの期間でスポーツ活動中の熱中症予防が重要となってきた。スポーツ活動中の熱中症の多くは脱水により引き起こされる。スポーツ活動中の発汗などにより細胞外液の浸透圧が上昇することで細胞内の水分子は細胞外に流出していく¹⁾。例えば骨格筋の場合、体重の約3%の水分が失われることで発揮筋力の低下や筋容積の減少などが引き起こされる^{2,3)}。一方で、高温環境下での運動中や運動後に水分を補給することで発揮筋力や筋容積の維持や回復に効果的であることも明らかとなっている^{3,4)}。

このように高温環境下での運動による熱中症の発症やその予防において生体内での水分子動態が重要であることは明白である。しかし、生体組織内に異なる性質の水分子が局在していることはあまり知られていない。骨格筋などの生体組織における水分子は、他の物質と結合することなく自由に動き回ることのできる“自由水”とタンパク質や炭水化物等の他の物質と結合し、分子運動が束

縛されている“結合水”に大きく分類できる^{5,6)}。骨格筋内の自由水と結合水の割合は生後に確定したのちは大きく変動しないことが報告されている⁵⁾。また自由水の動態変化が筋ジストロフィーなどの筋疾患と関係しているとする報告もあり、自由水が骨格筋の恒常性を維持する上で重要な役割を担っている可能性が示されている⁷⁾。一方で生体組織内において結合水は様々な物質と結合しており、生理的役割は明らかになっていない。例えば、水分子はヒアルロン酸との親和性が高く、ヒアルロン酸と結合することで組織内に結合水として貯留されているが⁸⁾、結合水としての生理的役割に関する知見はほとんどない。その上、運動による筋活動の増加やそれにとまなう熱中症により水分動態が著しく変動するにも関わらず^{1,9)}、熱中症発症時やその後の水分補給によって自由水や結合水の動態にどのような影響が生じているのかについては不明瞭なままである。

骨格筋内の水分子の移動には、水分子を選択的に通過させる水チャネルであるアクアポリン1 (aquaporin 1: AQP1) とアクアポリン4 (aquaporin 4: AQP4) が重要な役割を担っている。AQP1は毛細血管側に特異的に発現し、AQP4は筋線維側に特異的に発現しており、この両者の間で水分子のやり取りが行われている¹⁰⁻¹²⁾。骨格筋におけるAQP4については、継続的な走運動により発現レベルが増加し水分子の移動性の亢進に貢献する一方で、脱水による細胞内浸透圧の著しい低下にあわせて発現レベルが低下するなどの報告がある^{13,14)}。しかし、高温環境下での走運動とその後の水分補給がこれらの水分子輸送機構に及ぼす影響は不明瞭である。

本研究では、高温環境下での走運動による熱中症およびその後の水分補給における骨格筋内の異なる水分子やヒアルロン酸濃度およびAQP発現レベルの変化を調べることで、熱中症と水分補給が骨格筋の水分子特性や水分貯留機構に与える影

響を検討した。

1. 研究方法

1. 1 実験概要

実験動物には、8週齢のFischer344系雌ラット(n=6/group)を用いた。実験に用いた被験筋は、前脛骨筋(tibialis anterior muscle: TA)及びヒラメ筋(soleus muscle: SOL)とした。実験群は、対照群(control group: C)、高温環境下走運動群(running group: R)高温環境下走運動後の水分補給群(hydration after running: HR)とした。実験動物は昼夜逆転した12時間の明暗サイクルの飼育小屋にて餌、飲水ともに自由摂取の環境下で飼育した。なお、本研究は、大阪工業大学ライフサイエンス実験倫理委員会の承認を得た上で実施した。

1. 2 高温環境下における走運動

先行研究¹⁵⁾を参考にR群およびHR群に対しては、強制回転かご(回転輪: 直径307mm, 幅110mm, 走行距離0.965m/回転)(FWS-3006, メルクエスト, 日本)を用いた強制走を行わせた。ラットを常温環境下で数日間、強制回転かごによる強制走に慣れさせた。実験当日は、室温 $31 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $45 \pm 5\%$ に保った部屋内で走速度10m/minでの走運動を実施した。走運動前にラットの体重を測定し、走運動中に体重が3%減少した段階で、走運動を終了させた。平均走運動時間は約45分、平均走行距離は約450mであった。

1. 3 水分補給

HR群に対しては、高温環境下走運動終了後からの24時間に自由摂取による水分補給を行った。水分補給のための飲水として経口補水液(OS-1, 大塚製薬工場, 日本)を用いた。経口補水液100ml当たりの栄養成分量は、エネルギー:10kcal, タンパク質:0g, 脂質:0g, 炭水化

物:2.5g, 食塩相当量:0.292g, カリウム:78mg, マグネシウム:2.4mg, リン:6.2mgであった。また、電解質濃度は Na^+ :50mEq/l, K^+ :20mEq/l, Cl^- :50mEq/l, ブドウ糖:1.8%である。浸透圧は約260mOsm/Lである。

1. 4 サンプル採取

各群の実験終了後、直ちに吸引麻酔とチオペンタールナトリウムの過剰投与下で屠殺し、左右脚から前脛骨筋とヒラメ筋をそれぞれ摘出した。右脚の被験筋は、水分活性値の測定をした後、筋重量及び水分含有率の測定に用いた。左脚の被験筋は、生化学的な分析まで-80℃で凍結保存した。

1. 5 水分活性

各被験筋の水分活性は、静電容量式センサーによる水分活性測定装置 (HygroPalm23-AW-A, rotronic, スイス) を用いて測定した。

1. 6 水分含有量

摘出した右脚の被験筋の筋湿重量を測定した後、100℃で24時間、乾熱乾燥させ、筋乾燥重量を測定した。筋湿重量と筋乾燥重量から以下の式より、水分含有率を算出した。

水分含有率 (%)

$$= (\text{筋湿重量} - \text{筋乾燥重量}) / \text{筋湿重量} \times 100$$

1. 7 電気泳動およびウエスタンブロット法

被験筋におけるタンパク質発現量の分析には、先行研究¹⁶⁾で示されているプロトコルに基づいたウエスタンブロット法を用いた。筋サンプルを1x Protease Inhibitor Cocktail (Roche Diagnostic, Dubai, UAE) を含んだRIPA buffer (50 mM Tris-HCl, pH 8.0, 150 mM sodium chloride, 1% NP-40, 0.5% sodium deoxycholate, and 0.1% sodium dodecyl sulfate) (Sigma-Aldrich, St Louis, MO, USA) でホモジナイズし、15000×gで遠心した

後、上清を回収した。その後、BCA protein assay kit (Thermo scientific, Rockford, IL) を用いて各サンプルのタンパク質濃度を均一に調整した。

筋サンプル (タンパク質:10 μg) を12.5% (AQP1とAQP4) および7.5% (CD44) のポリアクリルアミドゲルを用いて20 mA, 300 V, 70分で電気泳動を行った。その後、polyvinylidene difluoride (PVDF) 膜への転写を行った。PVDF膜に対し、1% skim milkと0.1% Tween-20を含むTris-buffered saline (TBS) (pH 7.6) を用いて室温で60分間のブロッキング処理を行った。その後、各種一次抗体[rabbit polyclonal anti-AQP4 (Abcam, Cambridge, UK), rabbit monoclonal anti-AQP1 (Abcam), mouse monoclonal anti-CD44 (Proteintech, IL, USA) を4℃, overnightでインキュベーションした。TBSで洗浄した後、二次抗体 [biotinylated anti-rabbit IgG (Invitrogen, Camarillo, CA, USA), biotinylated anti-mouse IgG (Invitrogen)] を室温で1時間インキュベーションした。TBSで洗浄した後、peroxidase conjugated streptavidin horseradish (GE Healthcare, Buckinghamshire, UK) を室温で1時間インキュベーションした。最後に、化学発光試薬 (Immunostar zeta, 和光純薬工業, 大阪, 日本) を用いて標的タンパク質を可視化した。得られた画像からImageJを用いて、定量化した。

1. 8 ELISA法によるヒアルロン酸濃度測定

本研究では、ヒアルロン酸濃度の測定にELISA法を用いた。被験筋をcell Lysis Buffer 2 (R&D systems, Minneapolis, USA) でホモジナイズし、15000×gで遠心した後、上清を回収した。BCA protein assay kit (Thermo scientific) を用いて各サンプルのタンパク質濃度を均一に調整した (0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{l}$)。その後、Hyaluronan ELISA Kit (R&D systems) を用いて各サンプルのヒアルロン酸濃度を測定した。

1. 9 統計処理

全ての測定値は、平均値±標準偏差で示した。統計処理は、C群、R群とHR群間の比較は、Scheffé's検定による分散分析を用いて行った。有意水準は $p<0.05$ とした。

2. 研究結果

2. 1 高温環境下での走運動とその後の水分補給による体重および筋重量の変化

R群およびHR群の安静時(pre)に対する高温環境下で走運動後(post)の体重減少率は $4.41 \pm 1.37\%$ 、 $4.02 \pm 1.67\%$ であり、それぞれ有意な体重減少が認められた($p<0.05$) (表1)。一方、HR群の水分補給24時間後の体重はpreとの間に有意差は認められなかった (表1)。

TAの相対筋重量においてC群とR群の間に統計的有意差は認められなかった。一方、HR群のTAの相対筋重量はC群やR群に対しそれぞれ有

意な高値を示した ($p<0.05$) (図1A)。

SOLの相対筋重量では、いずれ実験群間の比較においても統計的有意差は認められなかった (図1B)。

これらの結果は、高温環境下における走運動によりR群、HR群ともに脱水による有意な体重減少が生じたことを示す。

2. 2 高温環境下での走運動とその後の水分補給が骨格筋の水分含有率に及ぼす影響

本研究では、筋湿重量と筋乾燥重量より骨格筋における水分含有率を算出した。その結果、TAでは、C群に対しR群で高値を示す傾向は見られたが、統計的有意差は認められなかった。一方、HR群はC群およびR群に対しそれぞれ有意な高値を示した ($p<0.05$) (図2A)。SOLの水分含有率においては、C群に対しR群で低値、HR群が高値を示す傾向がそれぞれ見られたが、いずれ

表1 Body weights in control, running and hydration after running (HR) groups

	Pre	Post	Recovery
C	158.71 ± 4.50		
R	162.50 ± 9.35	155.33 ± 9.16*	
HR	164.17 ± 4.83	156.00 ± 2.12*	160.40 ± 3.36

C: control, R: running, HR: hydration after running

Pre: resting state before running exercise, Post: immediately after running exercise, Recovery: hydration after running exercise.

All values were mean ± S.D. * $p<0.05$ compared to pre-running of same group.

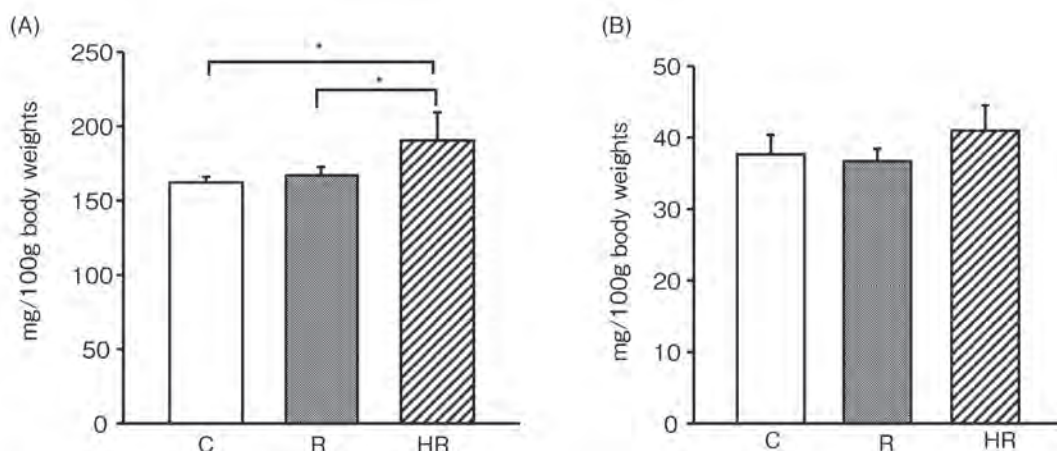


図1 Relative muscle weights of tibialis anterior muscles (A) and soleus muscles (B) in control (C), running (R) and hydration after running (HR) groups. Values were means±SD.* $p<0.05$

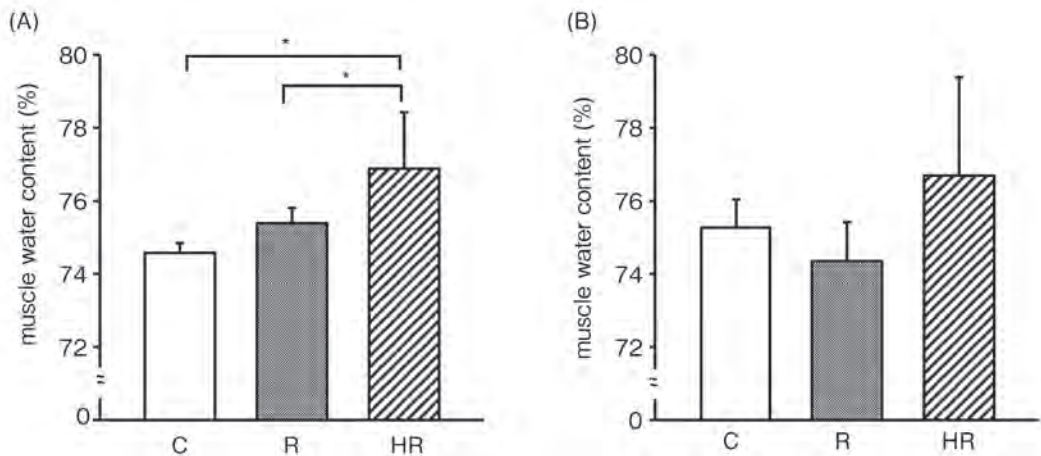


図2 Muscle water content of tibialis anterior muscles (A) and soleus muscles (B) in control (C), running (R) and hydration after running (HR) groups. Values were percentages and represent means $\pm$ SD. Muscle water content (%) = (muscle wet weight - muscle dry weight)/muscle wet weight*100 *p<0.05

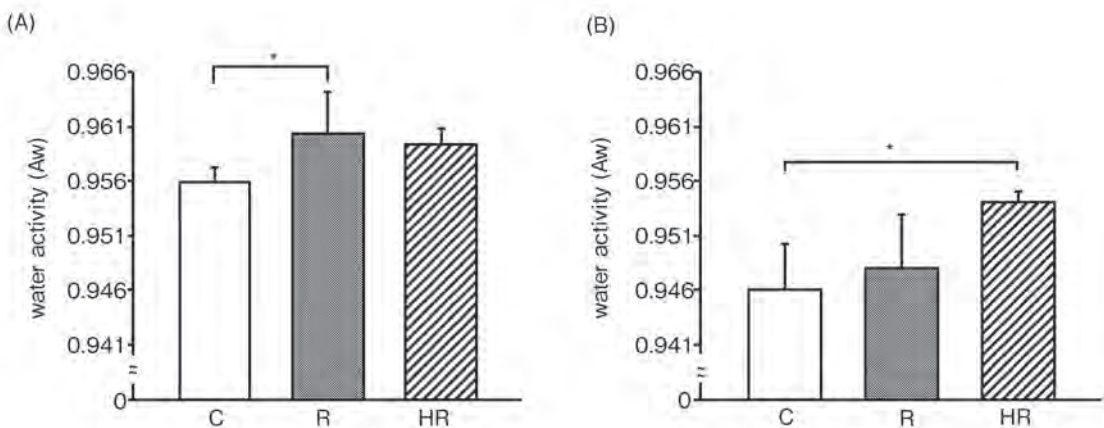


図3 Water activities of tibialis anterior muscles (A) and soleus muscles (B) in control (C), running (R) and hydration after running (HR) groups. Values were means $\pm$ SD. *p<0.05 *p<0.05

においても統計的有意差は認められなかった (図 2B)。

これらの結果は、高温環境下での走運動の後の水分補給によって、遅筋である SOL ではなく速筋である TA の水分含有率に変化が生じたことを示す。

2. 3 高温環境下での走運動とその後の水分補給が骨格筋の水分活性に及ぼす影響

本研究では、骨格筋内の自由水量の変化を検討するために、水分活性値を測定した。TA の水

分活性値では C 群に対し R 群が有意な高値を示した ($p < 0.05$)。一方、HR 群は R 群との間に有意差はなく、C 群に対しても高値を傾向が見られた (図 3A)。SOL の水分活性値では、R 群は C 群に対し高値を示す傾向は見られたものの、統計的有意差は認められなかった。一方、SOL の水分活性値では HR 群が C 群に対し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 3B)。

これらの結果は、高温環境下での走運動やその後の水分補給が骨格筋の水分活性値の変化に影響を及ぼしたことを示す。

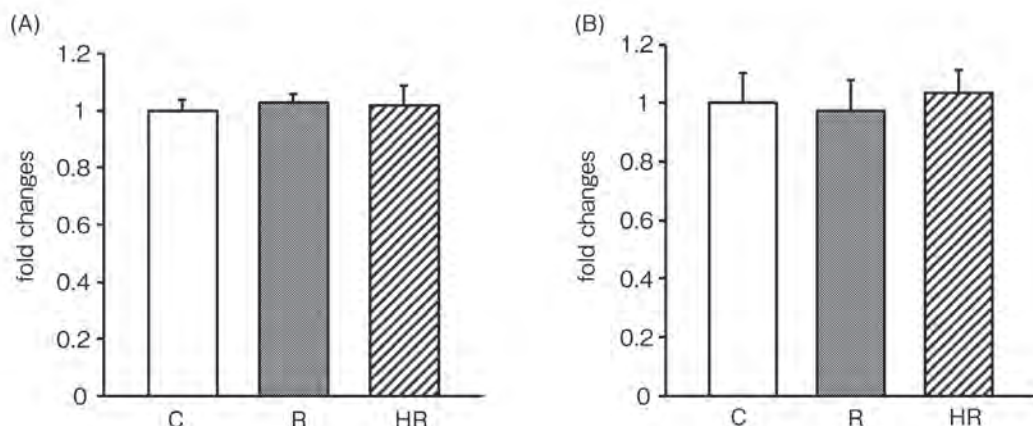


図4 Changes in hyaluronic acid concentration in tibialis anterior muscles (A) and soleus muscles (B) in control (C), running (R) and hydration after running (HR) groups. Values are means $\pm$ SD. Values were expressed relative to the values of control TA and SOL, respectively

2. 4 高温環境下での走運動とその後の水分補給が骨格筋のヒアルロン酸濃度の変化に及ぼす影響

本研究では、高温環境下での走運動とその後の水分補給が、ヒアルロン酸濃度の変化に及ぼす影響を検討した。その結果、TAにおけるヒアルロン酸の濃度はいずれの実験群間においても統計的有意な変化としては認められなかった(図4A)。同様にSOLのヒアルロン酸濃度においても、いずれの実験群間においても有意な変化は認められなかった(図4B)。これらの結果は、高温環境下での走運動とその後の水分補給によって、骨格筋内のヒアルロン酸の濃度が直ちに变化するわけではないことを示す。

2. 5 高温環境下での走運動とその後の水分補給が骨格筋のCD44の発現量に及ぼす影響

CD44はヒアルロン酸受容体である。本研究では、高温環境下での走運動とその後の水分補給が、CD44の発現に及ぼす影響を検討した。その結果、TAにおけるCD44の発現レベルはいずれの実験群間においても統計的有意差は認められなかった(図5A)。同様にSOLのCD44の発現レベルにおいても、いずれの実験群間においても有意な変化

は認められなかった(図5B)。これらの結果は、高温環境下での走運動とその後の水分補給によって、骨格筋内のCD44の発現レベルが直ちに变化するわけではないことを示す。

2. 6 高温環境下での走運動とその後の水分補給が骨格筋のAQP4の発現量に及ぼす影響

本研究では、高温環境下での走運動やその後の水分補給が、筋線維に特異的に発現する水チャネルAQP4の発現に及ぼす影響を検討した。その結果、TAにおけるAQP4の発現レベルにおいて、いずれの群間においても統計的有意差は認められなかった(図6A)。また、SOLにおいてもいずれの群間においても有意差は認められなかった(図6B)。これらの結果は、高温環境下での走運動やその後の水分補給は、筋線維に特異的に発現するAQP4の発現様式に直ちに影響を及ぼす要因ではないを示す。

2. 7 高温環境下での走運動とその後の水分補給が骨格筋のAQP1の発現量に及ぼす影響

AQP1は、骨格筋内の毛細血管に特異的に発現し、筋線維側のAQP4との間で水分のやりとをしをしている水チャネルである。本研究では、高温

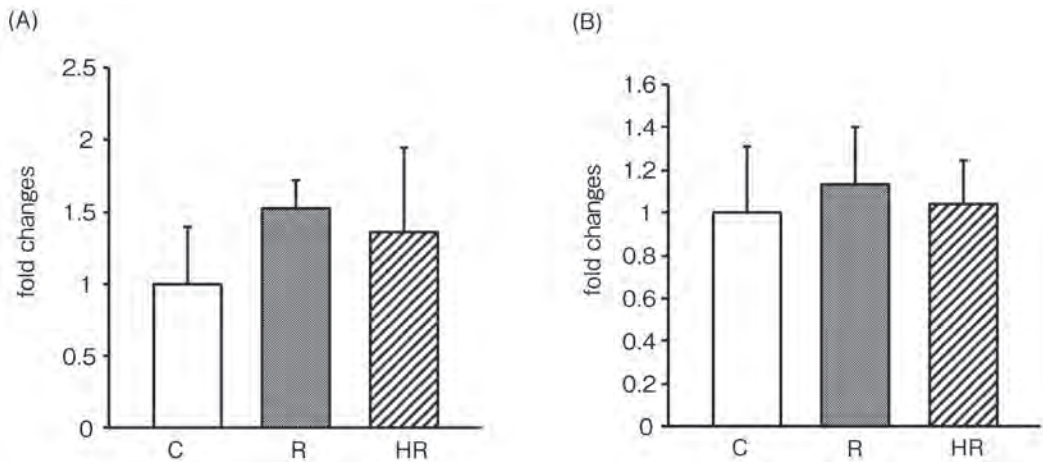


図5 Protein expression level of CD44 in tibialis anterior muscles (A) and soleus muscles (B) in control (C), running (R) and hydration after running (HR) groups. Values are means $\pm$ SD. Values were expressed relative to the values of control TA and SOL, respectively

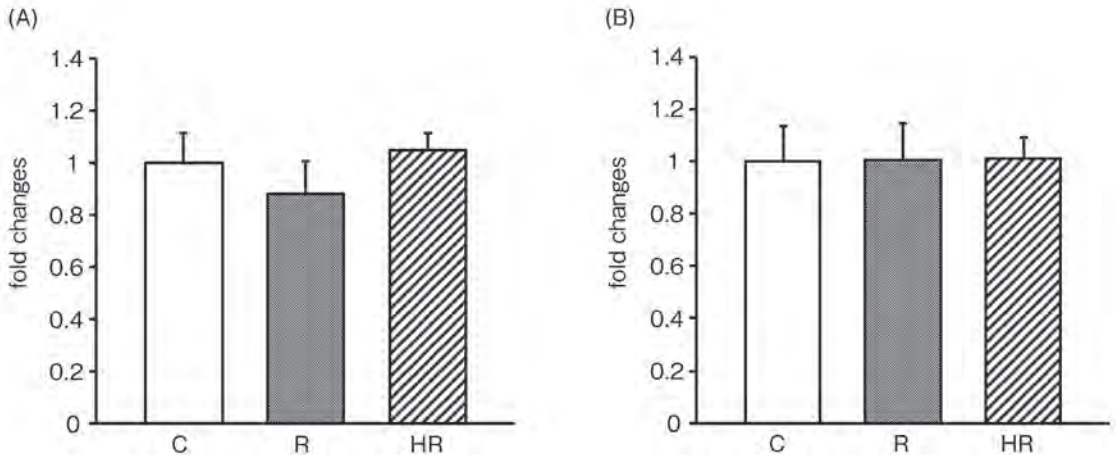


図6 Protein expression level of AQP4 in tibialis anterior muscles (A) and soleus muscles (B) in control (C), running (R) and hydration after running (HR) groups. Values are means $\pm$ SD. Values were expressed relative to the values of control TA and SOL, respectively

環境下での走運動とその後の水分補給が、AQP1の発現に及ぼす影響を検討した。その結果、TAにおけるAQP1の発現レベルは、いずれの群間においても統計的有意差は認められなかった(図7A)。同様に、SOLのいずれの群間においても統計的有意差は認められなかった(図7B)。これらの結果は、高温環境下での走運動とその後の水分補給によって、骨格筋内のAQP1の発現レベルが直ちに变化するわけではないことを示す。

3. 考 察

高温環境下でのスポーツ活動による熱中症は脱水による体重減少率が約3%になると発症し始め、筋力低下などの運動機能における障害などが特長的な症状の一つとなる²⁾。本研究では、R群およびHR群ともに体重減少率が3%に近づくにつれて走運動の継続が困難となっていった。これらの現象は、先行研究による報告と類似していた¹⁵⁾。したがって、本研究における高温環境下での走運動による体重減少は脱水によるものであり、本研

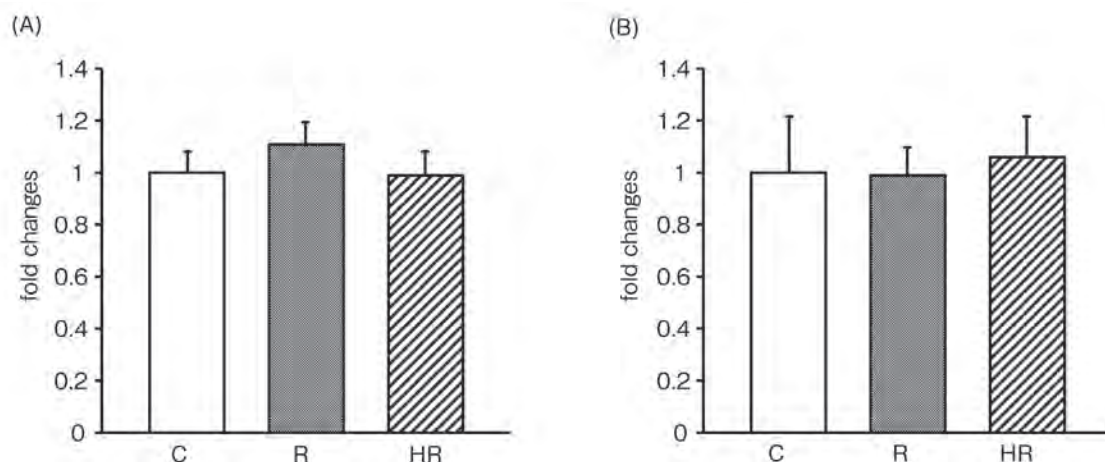


図7 Protein expression level of AQP1 in tibialis anterior muscles (A) and soleus muscles (B) in control (C), running (R) and hydration after running (HR) groups. Values are means $\pm$ SD. Values were expressed relative to the values of control TA and SOL, respectively

究における実験条件は熱中症を誘発する上で適切であったと考えられる。

本研究では、TAの体重100g当たりの相対筋重量においてHR群はC群やR群に対し有意な高値を示した。同様にTAの水分含有率においてもHR群はC群やR群に対し有意な高値を示した。したがって、HR群で見られた相対筋重量の有意な上昇は、水分含有率の上昇に起因する部分が大いものと考えられる。先行研究では運動による脱水後に水分補給をすることにより一定期間の間、摂取した水分の大部分が排泄されることなく体内に貯留されることが報告されている¹⁷⁾。本研究においてもHR群では脱水後の水分補給により骨格筋内の水分貯留能が一時的に亢進した可能性が示唆された。また統計的有意差は認められなかったが、R群の水分含有率はC群に対し高値を示す傾向が見られた。これらの傾向は、運動直後には一過性の水分含有率の上昇が誘発されることを報告した先行研究によって支持されるものであった¹⁸⁾。

一方、SOLの相対筋重量に群間の有意差は認められなかった。また水分含有率については、統計的有意差は見られなかったもののR群はC群に対して低値を示す傾向があり、HR群はC群に対し

高値を示す傾向がそれぞれ見られた。このようにSOLで見られた水分含有率の変化のパターンは、TAで見られたパターンとは異なっていた。先行研究では、脱水などによる浸透圧の変化に対する感受性は遅筋よりも速筋の方が高いことが報告されている¹⁴⁾。本研究で見られた水分含有率の変化のパターンにおけるTAとSOLの違いは、浸透圧の変化に対する感受性の違いが関与している可能性がある。しかし、本研究ではこの点に關与する分子メカニズムは明らかにできておらず、今後のさらなる研究が必要となる。

本研究では、骨格筋内の自由水量を反映する指標として水分活性値を測定した。TAではR群がC群に対し有意な高値を示す一方で、R群とHR群との間に有意差は認められなかった。またSOLではHR群がC群に対し有意な高値を示した。これらの結果は、TAとSOLの水分含有率の変化パターンと類似するものであり、自由水量の変化が水分含有率の変化に反映されていた可能性を示唆するものであった。先行研究では、生後の骨格筋において自由水と結合水の割合が確定したのちは、通常の水分摂取状態下では、その割合に変化が生じないことが報告されている⁵⁾。したがって、本研究で見られた水分活性値の変化は、高温環境

下での走運動による熱中症およびその後の水分補給という特異的な状況によって誘発された自由水量の変化を反映している可能性が示唆された。一方で生体組織内の自由水の測定は、核磁気共鳴法によるものが多く^{19, 20)}、運動などによって生じる一過性の自由水の変化やその生理的意義に関する報告はほとんどない。本研究においても水分活性値の変化から運動時の熱中症やその後の水分補給による自由水量の変化を検討可能であることは示されたが、その生理的意義については明らかにすることができなかった。生体組織内の自由水の生理的意義の解明にはさらなる研究が必要である。

我々の知る限り生体組織内の結合水を測定する方法はない。生体組織内においてヒアルロン酸は水分子と結合することで結合水を組織内に貯留する役割をもつ⁸⁾。そこで本研究では、高温環境下での走運動とその後の水分補給によるヒアルロン酸濃度の変化を測定することで骨格筋内の結合水の間接的な検討を試みた。その結果、TAおよびSOLともにいずれの実験群間においてもヒアルロン酸濃度に有意な変化は認められなかった。先行研究では、骨格筋内のヒアルロン酸濃度は一過性の運動の影響を受けないことが報告されている²¹⁾。この知見は、TAとSOLのいずれにおいてもR群とC群のヒアルロン酸濃度に有意差が認められなかった本研究結果と一致する。また肺ではヒアルロン酸濃度の上昇に伴い結合水も増加する可能性が示されている²²⁾。これらのことから、本研究では高温環境下での走運動による熱中症やその後の水分補給は、骨格筋内の結合水量の変化に影響を及ぼさなかった可能性が示唆された。

ヒアルロン酸は受容体であるCD44と結合することで骨格筋の恒常性維持にも関与している²³⁻²⁵⁾。本研究では、TAおよびSOLのいずれの実験群間においてもヒアルロン酸濃度に加えCD44の発現レベルでも有意差は認められなかった。これ

らのことから、本研究では、高温環境下での走運動による熱中症やその後の水分補給は、ヒアルロン酸経由の恒常性制御メカニズムにも影響を及ぼすものではなかった可能性が示唆された。

骨格筋内においてAQP4およびAQP1はそれぞれ筋線維側、毛細血管側に特異的に発現している水チャネルであり、これらの水チャンネルを介して水分子のやり取りが行われている¹⁰⁻¹²⁾。本研究では、高温走直後および水分補給による回復期のいずれにおいてもTAでAQP4やAQP1の発現レベルの変化は認められなかった。これはSOLにおいても同様の結果であった。これらの結果は、高温環境下での一過性の走運動を行なった先行研究の結果と類似している¹⁵⁾。したがって、これらの結果により高温環境下での走運動のみならずその後の水分補給による回復期であっても、TAおよびSOLのいずれにおいてもAQP4やAQP1の一過性の発現レベルの変化を誘発する要因とはなり得ないことが示唆された。一方で先行研究では、筋活動量の増加に応じてAQP4の発現量が増加することが示されている¹³⁾。さらに細胞内の浸透圧変化の感受性は遅筋よりも速筋が高く、過度な脱水により細胞内の水分子が著しく消失することでAQP4の発現レベルが減少していくことが報告されている¹⁴⁾。したがって、本研究ではAQP4やAQP1のmRNAの発現レベルは検討していないが、高温環境下での一過性の走運動やその後の水分補給による回復期においてAQP4やAQP1のmRNA発現レベルの変化は誘発されていた可能性はある。一方で、本研究ではそれぞれのAQPの機能面の評価を行っていない。特にAQP4は、transient receptor potential vanilloid 4やNa,K-ATPaseなどの関連因子との機能的相互作用により浸透圧や形態の制御を行なっている^{10, 26, 27)}。したがって、本研究においても高温環境下での走運動による脱水やその後の水分補給によって浸透圧調整におけるAQPの機能的変化が誘発

されている可能性はある。高温環境下での走運動による脱水やその後の水分補給がAQPの機能性に及ぼす影響については、今後のさらなる研究が必要である。

4. 結 語

本研究では、高温環境下での走運動による熱中症およびその後の水分補給が骨格筋内の水分含有量や水分子特性や水分子輸送機構に及ぼす影響を検討した。その結果、運動による熱中症やその後の水分補給による自由水量の変化を反映する形で水分含有率の変化が引き起こされることが明らかとなった。一方で高温環境下での走運動による熱中症やその後の水分補給ではヒアルロン酸濃度に変化は生じず、結合水の変化には影響していない可能性が示唆された。また走運動による熱中症やその後の水分補給が水分子の主たる輸送機構であるAQP1やAQP4の発現レベルに及ぼす影響は認められなかった。これらのことから本研究により高温環境下での走運動とその後の水分補給は、自由水の動態には影響を及ぼす一方で結合水の動態には影響しない可能性が示唆された。さらにこれらの異なる性質の水分子の動態が骨格筋の水分含有率に反映されている可能性が示された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く御礼申し上げます。

文 献

- Costill D.L., Cote R., Fink W.: Muscle water and electrolytes following varied levels of dehydration in man, *J. Appl. Physiol.*, **40**:6-11 (1976)
- Yoshida T., Takanishi T., Nakai S., Yorimoto A., Morimoto T., The critical level of water deficit causing a decrease in human exercise performance: a practical field study, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **87**:529-534 (2002)
- Hackney K.J., Cook S.B., Fairchild T.J., Ploutz-Snyder L.L., Skeletal muscle volume following dehydration induced by exercise in heat, *Extrem. Physiol. Med.*, **1**:3 (2012)
- Harris P.R., Keen D.A., Constantopoulos E., Weninger S.N., Hines E., Koppinger M.P., Khalpey Z.I., Konhilas J.P., Fluid type influences acute hydration and muscle performance recovery in human subjects, *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, **16**:15 (2019)
- Berenyi E., Szendro Z., Rozsahegyi P., Bogner P., Sulyok E., Postnatal changes in water content and proton magnetic resonance relaxation times in newborn rabbit tissues, *Pediatr. Res.*, **39**:1091-1098 (1996)
- 栗田太作, 灰田宗孝, 篠原幸人. 骨格筋における自由水の特性. 東海大学スポーツ医科学雑誌, **7**:99-104 (1995)
- Mankodi A., Azzabou N., Bulea T., Reyngoudt H., Shimellis H., Ren Y., Kim E., Fischbeck K.H., Carlier P.G., Skeletal muscle water T (2) as a biomarker of disease status and exercise effects in patients with Duchenne muscular dystrophy, *Neuromuscul. Disord.*, **27**:705-714 (2017)
- Comper W.D., Laurent T.C., Physiological function of connective tissue polysaccharides, *Physiol. Rev.*, **58**:255-315 (1978)
- Trombitas K., Baatsen P., Schreuder J., Pollack G.H., Contraction-induced movements of water in single fibres of frog skeletal muscle, *J. Muscle Res. Cell Motil.*, **14**:573-584 (1993)
- Frigeri A., Nicchia G.P., Balena R., Nico B., Svelto M., Aquaporins in skeletal muscle: reassessment of the functional role of aquaporin-4, *FASEB J.*, **18**:905-907 (2004)
- Neely J.D., Amiry-Moghaddam M., Ottersen O.P., Froehner S.C., Agre P., Adams M.E., Syntrophin-dependent expression and localization of Aquaporin-4 water channel protein, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **98**:14108-14113 (2001)
- Jimi T., Wakayama Y., Inoue M., Kojima H., Oniki H., Matsuzaki Y., Shibuya S., Hara H., Takahashi J. Aquaporin 1: examination of its expression and localization in normal human skeletal muscle tissue, *Cells Tissues Organs*, **184**:181-187 (2006)
- Basco D., Blaauw B., Pisani F., Sparaneo A., Nicchia G.P., Mola M.G., Reggiani C., Svelto M.,

- Frigeri A., AQP4-Dependent Water Transport Plays a Functional Role in Exercise-Induced Skeletal Muscle Adaptations, *PLoS One*, **8**:e58712 (2013)
- 14) Farhat F., Grosset J.F., Canon F., Water deprivation decreases strength in fast twitch muscle in contrast to slow twitch muscle in rat, *Acta Physiol. (Oxf)*, **224**:e13072 (2018)
- 15) 石道峰典, 骨格筋における自由水の特徴. デサントスポーツ科学, **39**:224-233 (2018)
- 16) Ishido M., Hung Y.L., Machida S., Aquaporin 4 Expression Level Is Decreased in Skeletal Muscles with Aging, *Kobe J. Med. Sci.*, **69**:E40-E48 (2023)
- 17) Takamata A., Mack G.W., Gillen C.M., Nadel E.R., Sodium appetite, thirst, and body fluid regulation in humans during rehydration without sodium replacement, *Am. J. Physiol.*, **266**:R1493-502 (1994)
- 18) Kowalchuk J.M., Heigenhauser G.J., Lindinger M.I., Sutton J.R., Jones N.L., Factors influencing hydrogen ion concentration in muscle after intense exercise, *J. Appl. Physiol.*, **65**:2080-2089 (1988)
- 19) Takemori S., Yamaguchi M., Kimura M., Skinning effects on skeletal muscle myowater probed by T2 relaxation of 1H-NMR, *Biophys. J.*, **92**:3610-3614 (2007)
- 20) Kimura M., Takemori S., Yamaguchi M., Umazume Y., Differential osmotic behavior of water components in living skeletal muscle resolved by 1H-NMR, *Biophys. J.*, **89**:1143-1149 (2005)
- 21) Piehl-Aulin K., Laurent C., Engstrom-Laurent A., Hellstrom S., Henriksson J., Hyaluronan in human skeletal muscle of lower extremity: concentration, distribution, and effect of exercise, *J. Appl. Physiol.*, **71**:2493-2498 (1991)
- 22) Nettelbladt O., Tengblad A., Hallgren R., Lung accumulation of hyaluronan parallels pulmonary edema in experimental alveolitis, *Am. J. Physiol.*, **257**:L379-84 (1989)
- 23) Armstrong S.E., Bell D.R. Relationship between lymph and tissue hyaluronan in skin and skeletal muscle, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **283**:H2485-94 (2002)
- 24) Aruffo A., Stamenkovic I., Melnick M., Underhill C.B., Seed B., CD44 is the principal cell surface receptor for hyaluronate, *Cell*, **61**:1303-1313 (1990)
- 25) Noble P.W., Hyaluronan and its catabolic products in tissue injury and repair, *Matrix Biol.*, **21**:25-29 (2002)
- 26) Illarionova N.B., Gunnarson E., Li Y., Brismar H., Bondar A., Zelenin S., Aperia A., Functional and molecular interactions between aquaporins and Na,K-ATPase, *Neuroscience*, **168**:915-925 (2010)
- 27) Benfenati V., Caprini M., Dovizio M., Mylonakou M.N., Ferroni S., Ottersen O.P., Amiry-Moghaddam M. An aquaporin-4/transient receptor potential vanilloid 4 (AQP4/TRPV4) complex is essential for cell-volume control in astrocytes, *Proc Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **108**:2563-2568 (2011)

ケトン体の経口摂取は運動誘発性の鉄欠乏に対して有効か？ —ヘプシジン分泌応答に着目して—

大阪公立大学 林 七 虹

Effect of Exogenous Ketone Supplementation on Exercise-induced Iron Deficiency: Focusing on Hepcidin Responses

by

Nanako Hayashi
*Research fellow of the JSPS,
Osaka Metropolitan University*

ABSTRACT

[Purpose] The present study aimed to investigate the effect of β -hydroxybutyrate (β HB) elevation via exogenous ketone supplementation on serum erythropoietin (EPO) and hepcidin concentrations in response to endurance exercise in young active women. [Methods] Eight young women (20 ± 1 years) performed two high-intensity interval cycling sessions (8 sets $\times$ 3 min of cycling at 85% of peak oxygen consumption) followed by supplementation of 25.5g β HB (8.5 g/h, 3 times; β HB trial) or placebo (CON trial). Both trials were conducted during the early follicular phase (day 1 to day 7 after the onset of menstruation). Blood samples were taken before exercise, immediately, 30, 60, 120, and 180 min after exercise. Ketone and iron metabolism were assessed from the collected blood samples. [Results] Serum β HB concentrations in the β HB trial were significantly increased from 30 min to 180 min after exercise ($p < 0.01$ at each time point), with higher β HB concentrations in the β HB trial compared to the CON trial ($p < 0.05$ at each time point). The average blood glucose concentration in the β HB trial was significantly lower than in the CON trial ($p = 0.012$). Serum

ferritin concentration at baseline did not vary between the trials ($p = 0.474$). Serum hepcidin concentration did not change after exercise (interaction: $p = 0.449$), and changes in this concentration did not differ significantly between the trials ($p = 0.430$). Changes in serum EPO concentration 180 min after exercise significantly differed between the trials ($p = 0.027$). [Conclusion] Serum β HB elevation via exogenous ketone supplementation in active young women influenced EPO changes after exercise while not hepcidin changes in response to endurance exercise in young active women.

キーワード

鉄代謝, 外因性ケトン体, ケトーシス, 持久性運動, 女性

Keyword

iron regulation, exogenous ketone supplements, ketosis, endurance exercise, female

要 旨

【目的】 活動的な若年女性を対象に, 持久性運動後におけるケトン体 (β HB) の経口摂取がエリスロポエチン (EPO) およびヘプシジンの分泌応答に及ぼす影響を検討した。【方法】 活動的な若年女性8名 (20 ± 1 歳) を対象に, 高強度インターバル運動後に25.5gの β HB (8.5g/1時間, 3回) を摂取する (β HB) 条件とプラセボを摂取する (CON) 条件の2条件を実施した。運動前, 直後, 30分後, 60分後, 120分後および180分後に採血を行った。【結果】 β HB条件における血清 β HB濃度は運動30分後から180分後まで有意に上昇し, いずれの時点も CON条件と比較して有意に高値を示した。 β HB条件における血中グルコース濃度は, CON条件と比較して有意に低値を示した。血清ヘプシジン濃度には, 有意な変化は認められなかった。運動180分後における血清EPO濃度の変化量には, 条件間での有意差が認められた。【結論】 若年女性における β HBの経口摂取はEPO濃度を変化させたが, ヘプシジンの分泌応答に影響を及ぼさなかった。

緒 言

鉄欠乏は, 世界で最も多い栄養欠乏症である。鉄欠乏のリスクは男性よりも女性の方が高く, 女性の中でも運動実施者で高いことが指摘されている¹⁾。運動実施者における鉄欠乏の発症要因として, 発汗や溶血 (赤血球の破壊), 消化器官からの出血等による鉄の喪失や食事による鉄の摂取不足が考えられてきた。しかし, スポーツ競技者は推奨とされる鉄摂取量を満たしているにも関わらず, 低い鉄状態を示すことは少なくない。近年では, 肝臓由来のペプチドホルモンであるヘプシジンの分泌亢進を介した鉄代謝の抑制も発症要因として指摘されている²⁾。ヘプシジンは, 鉄輸送体であるフェローポルチンに作用し, 十二指腸での鉄の吸収やマクロファージでの鉄の再利用を阻害する³⁾。運動を実施した際には, 血中および尿中ヘプシジン濃度が運動終了3~6時間後にピーク値を示し, 運動後に鉄代謝が抑制されるフェーズが生じる²⁾。実際, 運動終了後のヘプシジン濃度の上昇は, 鉄の吸収率を低下させることが明らかとなっている⁴⁾。

ヘプシジンの分泌は, 赤血球造血刺激により下

方制御される。赤血球造血を促進するエリスロポエチン (EPO) や赤芽球から分泌されるエリスロフェロン (ERFE) を介し、ヘプシジンの分泌抑制が調整されている⁵⁾。EPOやERFEの分泌増大は低酸素誘導因子発現や動脈血酸素飽和度の低下により誘発されるため、これまでに安静時や運動中の高地・低酸素環境への曝露がヘプシジン分泌応答に及ぼす影響が検討されてきた^{6,7)}。その結果、運動後の一過的な低酸素曝露は運動3時間後のヘプシジン濃度の上昇を抑制させること⁶⁾や連日の低酸素曝露は安静時のヘプシジン濃度を低下させること⁷⁾を報告しており、低酸素による赤血球造血刺激は運動誘発性のヘプシジン分泌を抑制する強力な因子であることが示唆されている。

2023年、高地・低酸素環境への曝露を行わず、持久性運動後のケトン体の経口摂取により運動終了2~4時間後の血清EPO濃度が上昇することが報告された⁸⁾。ケトン体は β ヒドロキシ酪酸 (β HB) およびアセト酢酸 (AcAc) の総称であり、 β HB濃度が高値を示した状態をケトosisという。ケトン体の産生は体内のグルコース利用が制限された状態 (e.g., エネルギー不足、炭水化物制限等) で亢進する (内因性ケトosis)。したがって、 β HBの上昇には極端な食事制限が必要であり、ケトン誘発食として1日あたりの炭水化物摂取量を50g以下に留めるなど内的な β HBの上昇は身体的および精神的な負担も大きい (Burke, 2021)。しかし、ケトン体サプリメントの開発・普及により、極端な食事制限を伴わず体内の β HB濃度を上昇させることが可能となり (外因性ケトosis)、 β HBの有する生理学的効果から運動パフォーマンスに関する検討が実施されてきた⁹⁾。そして、Evans et al. (2023) の報告は β HBの新たな生理学的効果を示唆しており⁸⁾、ケトン体の経口摂取はEPO濃度の上昇/ヘプシジン濃度の低下を介し、運動誘発性の鉄欠乏に対して有効である可能性が考えられる。しかし、これまでにケ

トン体の経口摂取による外因性のケトosisがヘプシジン分泌応答に及ぼす影響を検討した研究はみられない。

そこで本研究では、活動的な若年女性を対象に、持久性運動後におけるケトン体の経口摂取がEPOおよびヘプシジンの分泌応答に及ぼす影響を検討することを目的とした。ケトン体の経口摂取は運動3時間後の血清EPO濃度を上昇させる一方で、運動3時間後の血清ヘプシジン濃度を低下させるとの仮説を設けた。

1. 方 法

1. 1 対象者

活動的な若年女性8名 (平均 $\pm$ 標準偏差 (SD), 年齢 20 ± 1 歳, 身長 155.8 ± 7.9 cm, 体重 54.9 ± 6.2 kg) を対象とした。対象者の選定基準として、(i) 過去3年以内に喫煙の習慣がない、(ii) 運動器系の障害や外傷を有していない、(iii) 医療機関にて貧血の診断を受けていない、(iv) 貧血の自覚症状を有していない、(v) 過去6ヶ月以内に低用量/中用量ピルを服用していないことと定めた。対象者には、予め実験の主旨、内容やそれに伴うリスク等を書面および口頭で説明し、実験に関する理解と実験参加への同意を得た。本研究は、日本体育大学倫理審査委員会の承認を受けた上で実施した。

1. 2 実験概要

各研究対象者は、(1) β HBを25.5 g摂取する (β HB) 条件と (2) プラセボを摂取する (CON) 条件の2条件の測定を異なる日に実施した。なお、測定の実施順序はランダムとし、各条件間は卵卵前期 (月経開始1~7日目) に実施した。実験デザインとして、二重盲検プラセボ対照クロスオーバー比較試験を用いた。

β HBおよびCON条件の実施前には、各条件での運動負荷の決定のため、自転車エルゴメー

ターを用いて漸増負荷試験を行い（コリバルcpet, Lode社, Groningen), 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) を測定した. その後, 2条件のいずれかの条件での測定を実施した. いずれの条件においても, 研究対象者は10時間以上の絶食後に実験室に来室した (8:00~9:00). 測定前日は, 運動の実施やカフェイン, サプリメントの摂取を控えるように指示をした. β HB条件およびCON条件の測定では, 来室後に身長・体重および体組成 (InBody 770, 株式会社インボディジャパン, 東京) を測定した. その後, 100 mlの水を摂取し, 22Gサーフロー留置針を前腕静脈に穿刺し, 留置を行った. 10分間安静状態を維持した後に, シリンジを用いて空腹安静時の血液を採取した (Baseline; BL). 採血後, 自転車エルゴメーターを用いて8分間のウォーミングアップを50% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する負荷で実施し, 85% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する負荷 (140 ± 24 W) で3分間のペダリング運動 (60回転/分) を8セット実施した (ワークレスト比 2:1)¹⁰⁾. セットの後半で85% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する負荷での遂行が困難な場合は, 運動強度を下げ ($\approx 80\% \dot{V}O_{2peak}$), 完遂させた. 高強度インターバル運動実施後は40% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する負荷で8分間のクールダウンを実施し, 運動直後の採血を実施した (0 min). 運動終了後から運動終了180分後は安静状態を維持し, 運動終了30分後 (30 min), 60分後 (60 min), 120分後 (120 min) および180分後 (180 min) に採血を行った. β HBもしくはプラセボは,

運動直後, 60分後, 120分後の採血終了後のタイミングで摂取した. β HB条件では1時間ごとに8.5gの β HBを摂取し (合計 25.5g), CON条件では β HBが一切含まれていない同一フレーバーのプラセボ (水92.9%配合) を摂取し (OKETOATM, 大阪ガス株式会社, 大阪), 測定条件は測定実施者および研究対象者にブラインド化した状態で実施した. 運動直後および120分後のタイミングで, β HB/プラセボを水200 mlに添加した飲料を提供した. 60分後のタイミングでは, オレンジジュース (濃縮還元) 200 mlに添加し, カステラと合わせて提供を行った (体重あたりの炭水化物摂取量 0.9 ± 0.0 g, 体重あたりのタンパク質摂取量 0.1 ± 0.0 g). 運動中は自由飲水とし, 運動中の水分摂取量を記録することで条件間での差がないかを確認した.

1. 3 測定項目

1. 3. 1 心拍数・主観的運動強度

運動中は, 胸部無線式ハートレートモニター (ポラール・エレクトロ・ジャパン株式会社, 東京) を用いて心拍数を連続的に測定した. また, 各セットの終了時にBorgスケールを用いて主観的運動強度を評価した.

1. 3. 2 血液指標

運動前, 運動直後, 30分後, 60分後, 120分後および180分後に前腕静脈から採血を行い, 採血後に血糖自己測定器 (アークレイ株式会社, 京

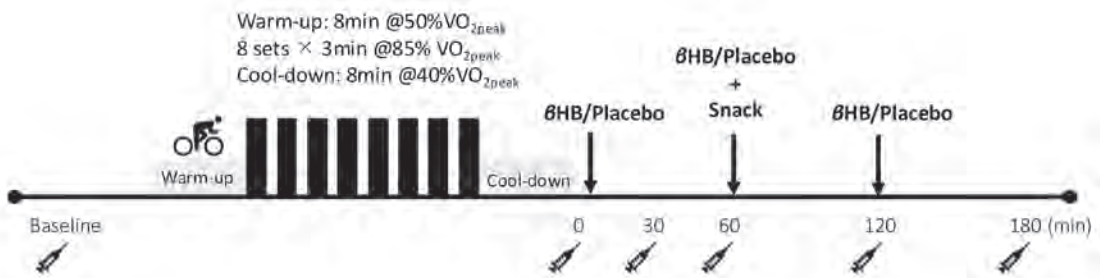


図1 実験概要

都)を用いて血中グルコース濃度を、ラクテート分析装置(アークレイ株式会社, 京都)を用いて血中乳酸濃度を直ちに測定した。血清採血管にて採取した血清サンプルから、血清エストラジオール(E2)、プロゲステロン(P4)濃度、ケトン体分画(β HB, AcAc)、フェリチン、EPOおよびヘプシジン濃度を測定した。ヘプシジン以外の測定項目は、臨床検査会社(株式会社LSIメディエンス, 東京)に解析を依頼した。ヘプシジンは、市販のenzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) キットを用いて測定した(R&D systems 社, Minneapolis)。1回目の採血前に前腕静脈に留置針(22Gサーフロー留置針)を留置し、留置針を用いてシリンジで血液を採取した。毎回の採血のタイミングで血液の凝固を防ぐため、生理食塩水をフラッシュした。

1. 4 統計解析

全ての測定値は、平均値 $\pm$ SDで示した。統計解析は、統計分析ソフト(JASP 0.19, JASP Team, Amsterdam)を用いた。空腹安静時の血清E2, P4およびフェリチン濃度および運動終了時の心拍数および主観的運動強度には対応のある t 検定を用い、平均値の差の検定を行った。運動に伴う血液指標の変化には二元配置分散分析-反復測定(two-way ANOVA RM)を行い、交互作用(条件 $\times$ 時間)および主効果(条件, 時間)の有無を検定した。交互作用または主効果が認められた場合、調整済みBonferroni多重比較法でのPost hoc検定を実施した。統計学的有意水準は、危険率5%未満とした。

2. 結果

2. 1 心拍数および主観的運動強度

運動終了時の心拍数には、条件間での有意差は認められなかった(β HB条件: 179 ± 9 bpm, CON条件: 175 ± 17 bpm, $p = 0.329$)。運動終了時

の主観的運動強度には、条件間での有意差は認められなかった(β HB条件: 17 ± 2 , CON条件: 17 ± 3 , $p = 0.435$)。

2. 2 性ホルモン濃度

空腹安静時の血清E2濃度には、条件間での有意差は認められなかった(β HB条件: 34 ± 20 pg/mL, CON条件: 31 ± 5 pg/mL, $p = 0.703$)。空腹安静時の血清P4濃度には、条件間での有意差は認められなかった(β HB条件: 0.2 ± 0.1 ng/mL, CON条件: 0.2 ± 0.1 ng/mL, $p = 0.685$)。

2. 3 ケトン体濃度

β HB条件における血清 β HB濃度は、運動30分後、60分後、120分後および180分後で有意な上昇が認められ、CON条件と比較して有意に高値を示した(30 min: $p = 0.004$, 60 min: $p = 0.004$, 120 min: $p = 0.006$, 180 min: $p = 0.028$; 図2)。 β HB条件における血清AcAc濃度は、運動30分後、60分後、120分後および180分後で有意な上昇が認められ、CON条件と比較して有意に高値を示した(30 min: $p = 0.005$, 60 min: $p = 0.006$, 120 min: $p = 0.007$, 180 min: $p = 0.005$; 図2)。

2. 4 血中グルコースおよび乳酸濃度

血中グルコース濃度および血中乳酸濃度に有意な交互作用は認められなかった(図3)。血中グルコース濃度は条件の主効果が認められ、 β HB条件がCON条件に比較して有意に低値を示した($p = 0.012$; 図3)。

2. 5 鉄代謝関連指標

空腹安静時の血清フェリチン濃度には、条件間での有意差は認められなかった(β HB条件: 35.1 ng/mL, CON条件: 40.9 ± 35.0 ng/mL, $p = 0.474$)。血清ヘプシジン濃度には、交互作用($F = 0.714$, $p = 0.427$) およびいずれの主効果(時間: $F = 3.272$,

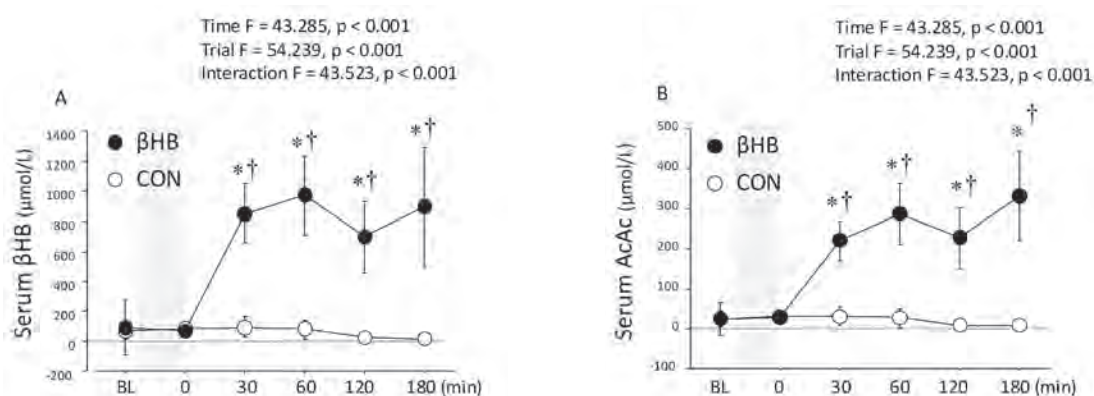


図2 血清 β HBおよびAcAc濃度の変化
 平均 $\pm$ SD, *, $p < 0.05$ vs. BL, †; $p < 0.05$ vs. CON

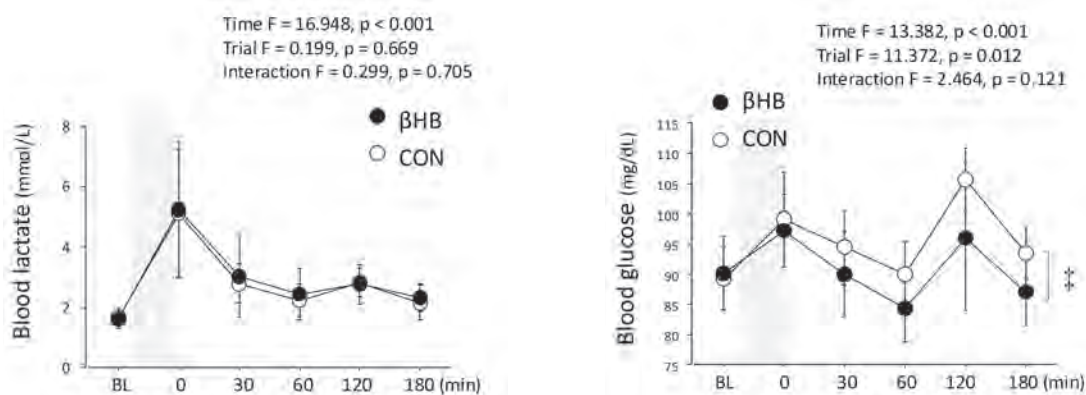


図3 血中乳酸およびグルコース濃度の変化
 平均 $\pm$ SD, ‡; $p < 0.05$, 条件間の平均値

$p = 0.113$; 条件: $F = 0.644$, $p = 0.449$) も認められなかった(表1). また, 血清ヘプシジン濃度の変化量にも, 条件間での有意差は認められなかった($p = 0.430$; 図4). 血清EPO濃度には有意な交互作用が認められたが($F = 7.595$, $p = 0.020$; 表1), post-hoc検定における有意差は認められなかった. 血清EPO濃度の変化量には, 条件間での有意差が認められた($p = 0.027$, 図4).

3. 考 察

本研究では, 女性を対象にインターバル運動後における β HBの経口摂取が血清EPOおよびヘプシジン濃度に及ぼす影響を検討することを目的とした. その結果, β HB条件における血清 β HB濃度およびAcAc濃度は, プラセボを摂取したCON条件と比較して, 有意に高値を示した. また,

表1 血清ヘプシジンおよびEPO濃度の変化

	Trial	Time			ANOVA-RM interaction
		BL	0min	180min	
Hepcidin (ng/mL)	β HB	7.002 $\pm$ 3.975	8.923 $\pm$ 4.284	10.315 $\pm$ 5.420	F = 0.714 $p = 0.427$
	CON	11.147 $\pm$ 15.978	15.031 $\pm$ 23.828	20.123 $\pm$ 34.380	
EPO (mIU/mL)	β HB	7.688 $\pm$ 3.098	7.537 $\pm$ 3.550	8.013 $\pm$ 3.802	F = 7.595 $p = 0.020$
	CON	9.125 $\pm$ 3.737	8.550 $\pm$ 3.761	7.800 $\pm$ 2.998	

平均 $\pm$ SD

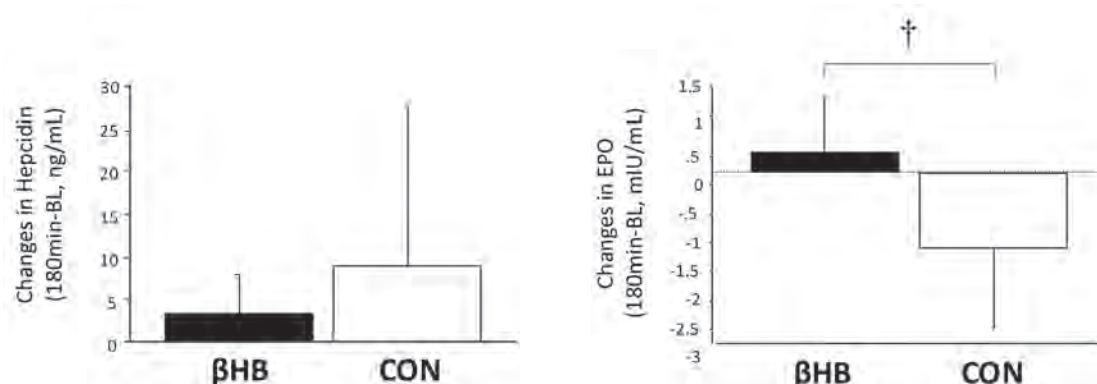


図4 運動180分後における血清ヘプシジンおよびEPO濃度の変化量
平均 $\pm$ SD, $\dagger$; $p < 0.05$ vs. CON

運動180分後における血清EPO濃度の変化量では、条件間での有意差が認められた。一方で、血清ヘプシジン濃度の変化やその変化量には、条件間での有意差は認められなかった。

血清ヘプシジン濃度の変化に条件間での有意差が認められなかった要因として、運動によるヘプシジン濃度の有意な上昇が認められなかったことが挙げられる。先行研究では、様々な運動様式で3時間後にヘプシジン濃度の上昇が認められることを報告している。Sim et al. (2013) は、トレーニングレベルの高い男性を対象に本研究と同一のプロトコルを使用しており、運動終了3時間後に血清ヘプシジン濃度の有意な上昇がみられている¹⁰⁾。一方で、本研究では女性を対象にしており、Sim et al. (2013) と比較して、血清フェリチン濃度が $\approx 40\sim 50\%$ 程度低値を示していた。安静時のフェリチン濃度は、運動3時間後のヘプシジン濃度に影響する¹¹⁾。血清フェリチン濃度が30 ng/mL未満を示すスポーツ競技者では、30 ng/mL以上を示す者と比較して、運動3時間後における血清ヘプシジン濃度の上昇が有意に低値を示すことが報告されている¹²⁾。また、運動に対するヘプシジン分泌応答を検討したメタアナリシスでは、女性における運動後のヘプシジン濃度の上昇は男性と比較して30%低値を示すことを報告している¹³⁾。さらに、女性の対象者における分析では、

運動時間と運動前のフェリチン濃度が運動後のヘプシジン濃度に対して最も寄与率の高い要因であることを示している¹³⁾。したがって、鉄状態が低い対象者ではヘプシジン濃度の上昇の程度が小さく、 β HBの効果が顕著に現れなかった可能性も考えられる。今後はサンプル数を増加させて検討する必要がある。また、女性と比較して交絡因子が少ない男性を対象に拡大し、 β HB摂取がヘプシジン分泌応答に及ぼす効果を明らかにすることが求められる。

血清EPO濃度の変化には交互作用が認められ、その変化量に β HB条件とCON条件で有意差が認められた。この結果は運動後に β HB (ケトンエステル) を摂取したEvans et al. (2023) と一致するものである⁸⁾。ヒト実験において、 β HBを5時間かけて静脈注射にて投与し、血中 β HB濃度を5 mmol/Lまで上昇させた結果、30%のEPO濃度の上昇が報告されている¹⁴⁾。 β HB (ケトンエステル) を3週間連続して摂取した研究では、高負荷の持久性トレーニング期間中における運動後と睡眠前の β HBは、トレーニング期間後において血中EPO濃度を上昇させたことを報告している。 β HB摂取が血中EPO濃度を上昇させた報告はあるものの、その機序は明らかでない。また、本研究におけるEPOの上昇の程度は、先行研究と比較して、わずかなものであった。本研究では

β HBの摂取形式としてケトンソルトを用いたが、先行研究ではケトンエステルを用いている^{8, 15)}。ケトンモノエステルは、ケトンソルトと比較すると、急速に血中 β HB濃度を上昇することが可能であり、その上昇の程度も高いことが指摘されている⁹⁾。さらに、本研究の被験者は、先行研究と比較して、血清フェリチン濃度が低い。したがって、鉄状態の相違が造血応答に影響した可能性があり、結果としてEPOの上昇の程度が小さくなったことが考えられる¹⁶⁾。今後、 β HBの上昇の程度やベースラインの鉄状態の相違が、 β HBの経口摂取によるEPOの上昇に及ぼす影響を検討する必要がある。

4. 結 論

本研究では、活動的な若年女性を対象に高強度インターバル運動後における β HBの経口摂取が血清EPOおよびヘプシジン濃度に及ぼす影響を検討した。その結果、 β HBの経口摂取による外因性のケトーシスは運動後のEPOの変化に影響する一方で、ヘプシジンの分泌応答に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、 β HBおよびプラセボ試料を提供いただきました大阪ガス株式会社 エネルギー研究所 バイオケミカルチームに深く感謝申し上げます。最後に、本研究を遂行するにあたり多大なご協力を賜りました須永 美歌子先生（日本体育大学）、亀本 佳世子先生（日本体育大学）および山田 満月先生（東海学園大学）に深く感謝申し上げます。

文 献

1) Badenhorst C.E., Forsyth A.K., Govus A.D., A contemporary understanding of iron metabolism in

active premenopausal females., *Frontiers in sports and active living*, 4, 903937 (2022)

2) Peeling P., Exercise as a mediator of hepcidin activity in athletes., *European journal of applied physiology*, 110 (5), 877–883 (2010)

3) Nemeth E., Ganz T., Hepcidin-Ferroportin Interaction Controls Systemic Iron Homeostasis., *International journal of molecular sciences*, 22 (12), 6493 (2021)

4) Barney D.E., Ippolito J.R., Berryman C.E., Hennigar S.R., A Prolonged Bout of Running Increases Hepcidin and Decreases Dietary Iron Absorption in Trained Female and Male Runners., *The Journal of nutrition*, 152 (9), 2039–2047 (2022)

5) Nemeth E., Ganz T., Hepcidin and Iron in Health and Disease., *Annual review of medicine*, 74, 261–277 (2023)

6) Badenhorst C.E., Dawson B., Goodman C., Sim M., Cox G.R., Gore C.J., Tjalsma H., Swinkels D.W., Peeling P., Influence of post-exercise hypoxic exposure on hepcidin response in athletes., *European journal of applied physiology*, 114 (5), 951–959 (2014)

7) Govus A.D., Peeling P., Abbiss C.R., Lawler N.G., Swinkels D.W., Laarakkers C.M., Thompson K.G., Peiffer J.J., Gore C.J., Garvican-Lewis L.A., Live high, train low - influence on resting and post-exercise hepcidin levels., *Scandinavian journal of medicine science in sports*, 27 (7), 704–713 (2017)

8) Evans E., Walhin J.P., Hengist A., Betts J.A., Dearlove D.J., Gonzalez J.T., Ketone monoester ingestion increases postexercise serum erythropoietin concentrations in healthy men. *American journal of physiology., Endocrinology and metabolism*, 324 (1), E56–E61 (2023)

9) Evans M., McClure T.S., Koutnik A.P., Egan B., Exogenous Ketone Supplements in Athletic Contexts: Past, Present, and Future., *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 52 (Suppl 1), 25–67 (2022)

10) Sim M., Dawson B., Landers G., Swinkels D.W., Tjalsma H., Trinder D., Peeling P., Effect of exercise modality and intensity on post-exercise interleukin-6 and hepcidin levels., *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 23 (2), 178–186 (2013)

11) Peeling P., McKay A.K.A., Pyne D.B., Guelfi K.J., McCormick R.H., Laarakkers C.M., Swinkels D.W.,

- Garvican-Lewis L.A., Ross M.L.R., Sharma A.P., Leckey J.J., Burke L.M., Factors influencing the post-exercise hepcidin-25 response in elite athletes., *European journal of applied physiology*, **117** (6), 1233–1239(2017)
- 12) Peeling P., Sim M., Badenhorst C.E., Dawson B., Govus A.D., Abbiss C.R., Swinkels D.W., Trinder D., Iron status and the acute post-exercise hepcidin response in athletes., *PloS one*, **9** (3), e93002(2014)
- 13) Fensham N.C., Govus A.D., Peeling P., Burke L.M., McKay A.K.A., Factors Influencing the Hpcidin Response to Exercise: An Individual Participant Data Meta-analysis., *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, **53** (10), 1931–1949(2023)
- 14) Lauritsen K.M., Søndergaard E., Svart M., Møller N., Gormsen L.C., Ketone Body Infusion Increases Circulating Erythropoietin and Bone Marrow Glucose Uptake., *Diabetes care*, **41** (12), e152–e154(2018)
- 15) Poffé C., Ramaekers M., Van Thienen R., Hespel P., Ketone ester supplementation blunts overreaching symptoms during endurance training overload., *The Journal of physiology*, **597** (12), 3009–3027(2019)
- 16) Gassmann M., Muckenthaler M.U., Adaptation of iron requirement to hypoxic conditions at high altitude., *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, **119** (12), 1432–1440(2015)

マトリクス表面筋電図を用いた腓腹筋外側頭における 筋痙攣発生過程の筋活動様式

青山学院大学 白井 礼

Process of Muscle Cramps in Lateral Gastrocnemius Muscle using sEMG Matrix

by

Aya Shirai

Aoyama Gakuin University

ABSTRACT

Exercise-Associated Muscle Cramps (EAMC) are sudden, involuntary muscle contractions that often occur during or after physical activity. Despite their commonality, the exact physiological mechanisms underlying EAMC remain elusive and are the subject of ongoing research. Two primary hypotheses have been proposed to explain their origin: the central nervous system origin hypothesis and the peripheral nervous system origin hypothesis. The central nervous system origin hypothesis suggests that muscle cramps may be triggered by abnormal neural activity originating from the brain or spinal cord. This theory posits that disruptions in motor neuron firing patterns, possibly due to fatigue or electrolyte imbalances, could lead to the involuntary contractions observed in EAMC. On the other hand, the peripheral nervous system origin hypothesis proposes that cramps arise from abnormalities in the nerves directly controlling the affected muscles, possibly due to compression, injury, or metabolic changes within the muscle fibers themselves. The aim of this study is to elucidate changes associated with EAMC. Matrix sEMG was used to monitor the muscle activity patterns in the lateral gastrocnemius muscle during repetitive plantar flexion exercises of the dominant foot. As the results, during the onset of muscle cramp precursors,

the muscle activity patterns changed that the sEMG signals exhibited increased amplitude and had a high-frequency band at the localized site. Concurrently, the new innervation zones observed. These findings provide support for the central nervous system hypothesis by suggesting that muscle cramps occur due to a disruption of the size principle in conventional muscle contractions, leading to irregular firing of motor neurons.

キーワード

マトリクス表面筋電図, 筋痙攣, 腓腹筋外側頭, 神経支配帯, 短時間フーリエ変換

Keyword

surface EMG matrix, muscle cramps, lateral gastrocnemius muscle, Innervation zone, STFT

要 旨

運動時における筋痙攣は突然に発生する不随意収縮であり、適切な予防対策が重要である。しかし、筋痙攣の生理学的メカニズムは解明されておらず、脳や脊髄などの中枢神経を要因とする説、筋などの末梢神経を要因とする説が挙げられる。本研究ではマトリクス表面筋電図を用いて、腓腹筋外側頭の筋痙攣発生に伴う筋活動様式の変化を明らかにすることを目的とし、利き足関節の底屈運動を行った際の信号計測を行った。結果として、筋痙攣の前兆が発生した際に、空間的筋活動の分布パターンが変化することが明らかとなった。局所的な部位において、筋電信号の振幅が増加し、高周波帯域の信号成分が多く観察されたほか、新たな神経支配帯の出現が認められた。これらの結果は、サイズの原理から逸脱した α 運動ニューロンが異常発火したことにより、局所的に強い筋収縮を引き起こす筋痙攣が発生したと推測される。本研究は筋痙攣の発生源は中枢神経を由来とする説を支持する結果となった。

緒 言

運動時における筋痙攣や肉離れは、直接の外力

なしに、かつ、突然に、筋収縮が発生、もしくは筋線維が損傷する怪我であるが、治療は安静による自然治癒を基本としており、回復後の運動パフォーマンスが低下するだけではなく、再発頻度も高いことが報告されている¹⁾。歩行などの日常生活動作において、筋痙攣が突発的に発生した場合、転倒するリスクがあり、特に、高齢者においては転倒による捻挫等の怪我から寝たきり状態に繋がってしまう恐れがあり、予防が重要であるが、具体的な予防方法は確立されていない。この要因の一つとしては、突発的な怪我であるため、受傷する瞬間の筋機能評価を行うことは困難であり、発生メカニズムが解明されていないことが挙げられる。現在、筋痙攣の発生源は中枢神経を由来とする説、末梢神経を由来とする説に分かれ議論がされており、筋内の局所的な箇所から筋全体に広がっていくことのみが明らかになっている^{2,3)}。

筋収縮は脊髄にある α 運動ニューロンが電気信号として神経軸索を通り、筋線維に送られることによって発生する⁴⁾。この1つの α 運動ニューロンが支配する筋線維群を運動単位という。表面筋電図(sEMG)法は運動単位の活動電位を皮膚表面上から計測する手法であり、客観的かつ非侵襲的に筋機能評価を行えることから広く利用され

ており、1対の電極を双極差動導出することにより、個々の運動単位活動電位が重畳した複合波形として計測される。従来、sEMG計測は単チャンネルから導出した信号を用いて、振幅や周波数情報などを算出し、筋機能評価が行われている^{5,6)}。振幅解析ではsEMG信号のARV（整流平滑化）やRMS（二乗平均平方根）からの筋活動量の定量的評価が行われており、周波数解析では、高速フーリエ変換（FFT）を利用した平均周波数（MNF）や中央周波数（MDF）からの評価が広く行われている。また近年、時間分解能が低いFFT解析に変わり、短時間フーリエ変換やウェーブレット変換を用いた時間-周波数特性解析についても検討が行われている⁷⁾。

しかし、正確な筋機能評価を行うためには皮膚下の神経支配帯位置を考慮する必要があるが、従来の単チャンネルでの計測手法では神経支配帯位置の特定は困難である。そこで、近年、筋全体に複数の電極を貼付するアレイ電極やマトリクス電極を用いた筋機能評価が注目されている^{8,9)}。筋線維に沿ってアレイ状に複数チャンネルの信号を計測することにより、神経支配帯の位置を特定することを可能にするだけでなく、筋線維を流れる活動電位の速度である筋線維伝導速度の解析も可能になる。さらに、線形ではなくマトリクス状に電極を配置し、信号導出を行うことによって同一筋内の空間的な筋活動分布について評価が行える。

マトリクス電極を用いた筋痙攣時の筋機能評価として、K. Roeleveldらは筋痙攣発生時、発生箇所sEMG信号の周波数帯域が変化することから正常な運動単位の活動が行われていないと推測し、筋痙攣の発生源は末梢神経にあると結論づけている¹⁰⁾。しかし、sEMG信号は個々の運動単位の複合波形として計測され、活動に参加する運動単位が異なればsEMG信号の周波数帯域に変化をもたらす。そのため、中枢神経の起源を否定す

るには新たな運動単位が動員されていないことを明らかにする必要がある。

そこで本研究では、神経支配帯の位置推定を行うことにより、動員される運動単位の変化を捉えることが可能になると考え、筋痙攣発生に伴う筋活動様式の変化を明らかにすることを目的とし、マトリクス表面筋電図を用いて腓腹筋外側頭における空間的筋活動分布から検討した。

1. 実験方法

1. 1 被験者および被験筋

被験者は20歳代2名、30歳代1名、60歳代1名の健常成人男性4名を被験者とし、利き足腓腹筋外側頭を被験筋として実験を行った。被験筋における被験者の筋痙攣の発生経験有無に関して、20歳代2名の被験者が経験なしであり、30、60歳代の2名の被験者が経験ありであった。なお、本研究は青山学院大学研究倫理審査委員会の承認を得て行われており、被験者には研究内容に関する説明を実施し、研究の参加に同意を得た上で実施した（承認番号：H23-007）。

1. 2 実験方法

被験者には図1に示すように端座位の状態で、足関節の底屈運動を15秒間行った後、4秒間の休



図1 運動動作

息を行う動作を1サイクルとし、これを10回繰り返す運動を1セットとして、計3セット実施した。この時、底屈位および運動強度は外力なしに被験者が発揮できる最大の底屈角度および強度とした。また、実験中に筋痙攣もしくは筋痙攣の前兆を感じた場合は、口頭で申告させた。

1. 3 信号計測

測定に用いたマトリクス電極を図2に示しており、直径2 mmの電極を13もしくは12行×5列に8 mm間隔で配列されたOT Bioelettronica製 ELSCH064NM2を使用し(図2 (a))、伏臥位時において電極の長軸が筋線維に沿うように正中線から5～10度傾け、皮膚表面上に貼付した(図2 (b))。この時、接地電極は直径35 mmのデイスボ電極を膝蓋骨の皮膚表面上に貼付した。

sEMG 信号計測は、OT Bioelettronica製 Sessantaquattroを用い、サンプリング周波数2000 Hz、ローカット周波数10 Hz、ハイカット周波数500 Hzで計算機に記録を行った後、電極の長軸において隣り合う電極同士を双極差動導出し、ch1～ch12(もしくはch11)×5列の計59チャンネルにおける信号の導出を行った。

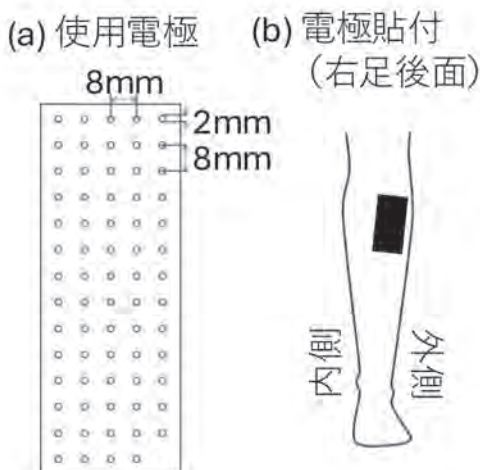


図2 使用電極

1. 4 信号解析

1. 4. 1 振幅解析

活動に参加する運動単位の動員数の評価を振幅のRMSを算出することにより行った。解析区間は底屈運動時におけるsEMG信号とし、各チャンネルにおいて0.5秒おきに以下の(1)式を用いてRMSの導出を行った。ここで、 $x(n)$ はsEMG信号、 N は0.5秒間のサンプリング数(1000)を表す。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2} \quad (1)$$

1. 4. 2 周波数解析

時間経過に伴う周波数解析として、短時間フーリエ変換(STSF)を算出することにより行った。STFTはsEMG信号を短い時間窓(ウィンドウ)に分割し、時間窓ごとにフーリエ変換を行うことによって時間-周波数解析を可能にする手法であり、以下の(2)式により導出を行った。この時、STFT(t, k)は時間 t 角周波数 k のスペクトル、 $x(n)$ はsEMG信号、 $\omega(n)$ は窓関数、 tR は時間シフトパラメータ、 f は周波数。

$$STFT(t, k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \omega(n - tR) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

本研究においては1セットを解析区間とし、各チャンネルにおいて、ウィンドウ長を64サンプル(32 ms)、窓関数にはHamming窓を使用し、オーバーラップを50%、DFT(Discrete Fourier Transform)点を256サンプル(周波数分解能7.81 Hz)としてSTFT解析を行った。

1. 4. 3 神経支配帯位置の推定

底屈運動時における神経支配帯の位置の推定は、各列において、隣り合うチャンネルとの相互相関係数を以下の手順で算出することにより行った。

1) sEMG信号の平滑化：信号に含まれるノイ

ズの影響を除外するために、ガウス加重移動平均フィルタを用い、平滑化を行った。

2) ゼロクロス波形の切り出し：時間変化に伴うIZ位置の変化を推定するために、0Vを基準として、波形が正から負へ、負から正へ交差する区間をゼロクロス波形として抽出した。この時、周期が10 ms未満かつ、RMSが5 μ V未満のゼロクロス波形は解析から除外した。

3) 相互相関係数の算出：各ゼロクロス波形において、隣接チャンネルとの相互相関係数を、(3)式で示すピアソンの積率相関係数 r_{xy} より算出した。この時、 x および y はsEMG信号、 n はゼロクロス波形のデータ数を表す。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

r_{xy} は ± 8 ポイントの時間差の範囲で算出し、絶対値の最大値を相互相関係数とした。

神経支配帯の位置はチャンネル間に強い負の相関が見られる、もしくは他チャンネルと比べsEMG信号の振幅が極端に低く、隣接チャンネル間との相関が認められない箇所とした。

2. 結果

2. 1 筋痙攣の発生有無

4名の被験者のうち、60歳代の被験者1名において、測定中に筋痙攣の前兆を感じたという回答を得た。そこで、筋痙攣の前兆を申告した被験者を「筋痙攣あり」、その他の被験者を「筋痙攣なし」として評価を行った。

2. 2 空間的筋活動分布

特定サイクルにおける空間的RMS活動分布の時間推移の一例を図3および図4に示しており、図3は「筋痙攣なし」の被験者Aの活動分布を、図4は「筋痙攣あり」の被験者Bの活動分布を示す。この時、被験者Bにおける13.5～14 sは筋痙攣の前兆を申告した時の活動分布を表している。また、運動初期(1～1.5 s)とのRMSの変化率の算出を行い、表1に同一サイクルにおける全59chチャンネルの変化率の平均と標準偏差を示す。結果として、「筋痙攣なし」の場合、電極位置によるRMS値に違いは見られたが、サイクルを通して同一箇所のRMS値が高く、変化率の標準偏差が常に一定であったことから、時間経過に伴う分布

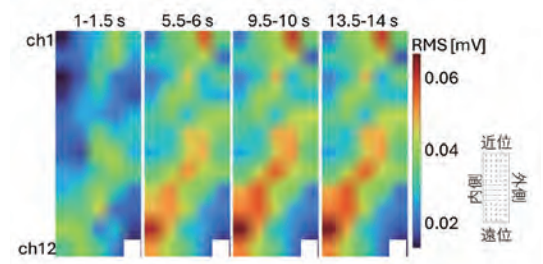


図3 被験者Aの空間的RMS活動分布

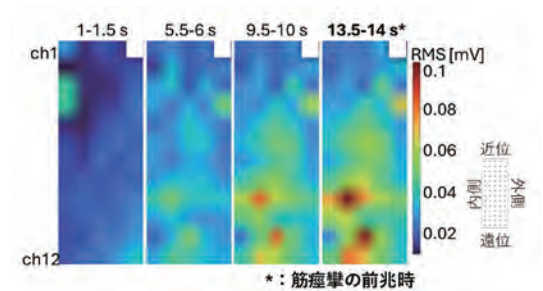


図4 被験者Bの空間的RMS活動分布

表1 運動初期との変化率の平均・標準偏差

	5.5-6 Sec	9.5-10 Sec	13.5-14 Sec
被験者A (筋痙攣なし)	33.4 $\pm$ 23.9	39.5 $\pm$ 28.1	38.0 $\pm$ 28.7
被験者B (筋痙攣あり)	62.6 $\pm$ 46.6	104.4 $\pm$ 70.4	131.5 $\pm$ 87.5 (筋痙攣前兆時)

mean $\pm$ SD[%](データ数:N=59)

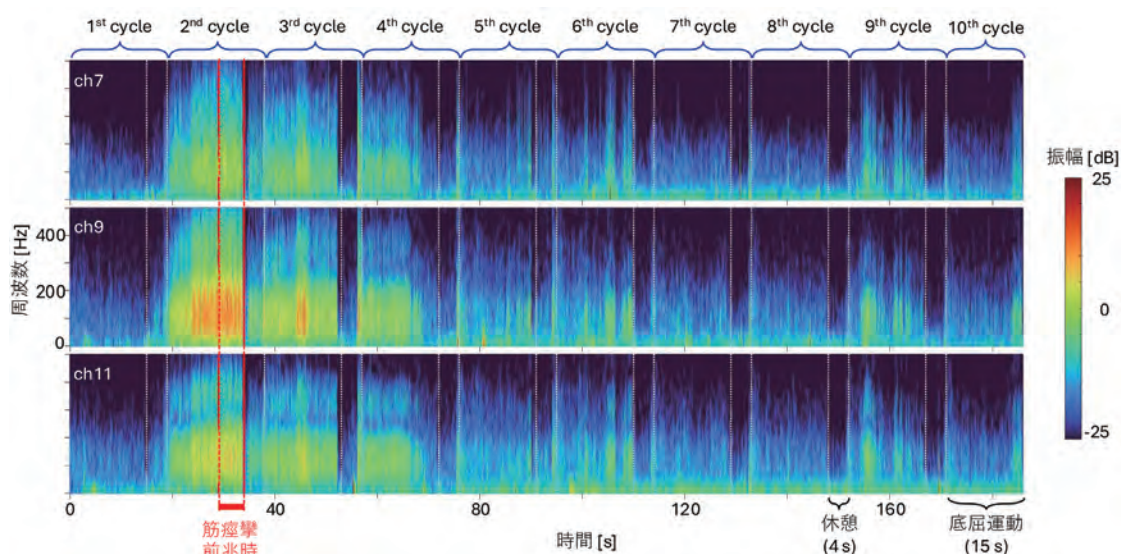


図5 被験者Bにおけるスペクトログラム

パターンに変化は見られなかった。一方、「筋痙攣あり」の場合、時間経過に伴う分布パターンに変化が見られ、時間経過に伴い変化率の標準偏差が増加し、図4より筋痙攣の前兆発生時において局所的にRMS値が高い値を示す箇所が出現した。

2. 3 時間一周波数特性

図5に「筋痙攣あり」の被験者Bにおける1セット間におけるスペクトログラムを示す。これは、筋痙攣の前兆発生時に最も高いRMSを示した内側側から2列目のch9および前後のch7, ch11のスペクトログラムである。筋痙攣の前兆発生前の1サイクル目、および5サイクル目以降においては、sEMG信号に200～500 Hzの高周波帯域はほとんど含まれなかった一方で、筋痙攣の前兆発生の数秒前より高周波数成分が観察された。また、筋痙攣の前兆発生後すぐの4秒間の休憩においては、自発的な筋収縮を行っていないにも関わらず、50 Hz以上の周波数成分が観察された。その後は、サイクルを重ねていくにつれて、高周波成分の出現は減少した。

2. 4 神経支配帯位置

図6および図7に被験者A, Bにおける図3, 4と同一サイクルにおける時間経過に伴う相互相関係数を示しており、もっとも高いRMS値を示した列における3チャンネル間分の解析結果となっている。「筋痙攣なし」の被験者Bにおいては、ch8-9において強い負の相関を持つゼロクロス波形が多く出現し、このチャンネル間に神経支配帯が位置すると推定された。また、時間経過に伴う負の相関を持つゼロクロス波形の出現頻度に変化は見られなかった。一方、「筋痙攣あり」の被験

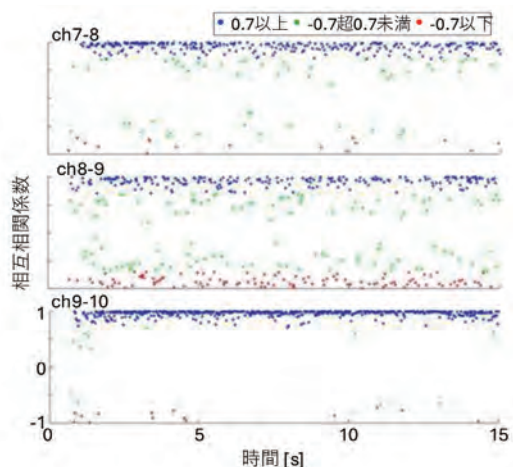


図6 被験者Bにおける相互相関係数の時間推移

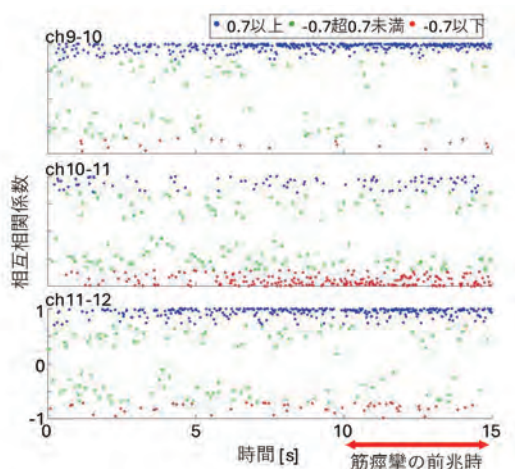


図7 被験者Bにおける相互相関係数の時間推移

者Bにおいて、時間経過に伴ってch10-11において強い負の相関を持つゼロクロス波形が多く出現した。このことから運動動作中に新たにch10-11に神経支配帯が出現したと推定された。

3. 考 察

3. 1 神経支配帯位置と空間的筋活動分布

神経支配帯は、運動神経終末と筋線維の接着部である神経筋接合部が集中的に分布している領域を指すが、位置や大きさには個人差がある。K. SaitouらはsEMG信号を目視による神経支配帯の位置分布解析を行っており¹¹⁾、腓腹筋外側部の神経支配帯の位置は筋腹をU字型に囲むように分布している傾向があることを報告している。また、Rodrigo A., Guzmán-VenegasらはM波とH反射を用いた神経支配帯の位置推定を行っており¹²⁾、腓腹筋外側部において膝窩から踵骨までを100%とした場合、平均して39.7%の位置に腓腹筋外側頭の神経支配帯が存在したことを報告している。本研究においては神経支配帯の位置は相互相関係数から推定しており、従来の報告と同様に遠位側のチャンネルに神経支配帯が多く存在していることが明らかとなった。

同一筋内における筋活動分布パターンと神経支

配帯位置は密接な関係性を持つ。本研究において、神経支配帯と推定されたチャンネル間の前後のチャンネルにおいて、最も高いRMS値を示した。A Rainoldiらはアレイ電極を用いて腓腹筋の神経支配帯の位置とsEMG信号の振幅の関係性を検討したところ¹³⁾、神経支配帯箇所の振幅が最も低く、神経支配帯から10～20 mm離れた箇所で計測された振幅が最も高い値を示したことを報告している。本研究では神経支配帯と推定された箇所のRMS値はマトリクス電極の各列において最小値を示さなかった。これは、神経支配帯のサイズおよび位置と電極の相対的な位置関係が影響を与えたと考えられる。運動単位活動電位は神経支配帯から筋線維の両端へ送られるが、1対の電極の中央に神経支配帯が位置する場合は、両端へ流れる活動電位が互いに相殺し合うため、導出されるsEMG信号は極端に振幅が小さくなる。一方、1対の電極の片側に寄って神経支配帯が位置する場合は、電位の相殺割合が減少するため振幅が極端に小さくなることはない。また、活動電位は神経支配帯から遠ざかるにつれて減衰し、振幅は減少する。そのため空間的RMS活動分布において局所的に高い値を示す箇所は神経支配帯付近であり、時間経過に伴う筋活動パターンに変化が認められ場合は、新たな運動単位が活動に参加し、神経支配帯が出現する、もしくは運動単位の活動が停止し、神経支配帯が消失したことを表すといえる。

3. 2 周波数解析

STFT解析を行ったところ、筋痙攣の前兆が発生したサイクル付近を除き、10～200Hzの周波数成分が多く含まれことが明らかとなった。M. Bilodeauらは腓腹筋外側頭におけるsEMG信号のFFT解析を行ったところ、MDFは100～120 Hz（電極間距離6 mm）であったと報告しており¹⁴⁾。本研究のSTFT解析は従来のFFT解析の報告と同様

の特性が得られた。このことから、本研究で用いたSTFT解析のパラメータは妥当であるといえる。

3. 3 筋痙攣の発生過程

本研究において、筋痙攣の前兆を申告したサイクルは底屈運動開始直後から他のサイクルに比べ高い振幅を示しただけではなく、筋痙攣の前兆を申告する数秒前よりsEMG信号に200 Hz以上の高周波数成分が観察された。また、それと同時に局所的なRMSの増加を示したチャンネル付近に新たな神経支配帯の出現が推定された。これらは、K. Roeleveldらの報告を否定する結果となり¹⁰⁾、筋痙攣は新たな運動単位が動員されたことにより引き起こされることが明らかになった。

筋収縮は運動単位の発火頻度および動員される運動単位数により発揮筋力量が制御されるが、運動単位の動員順序はサイズの原理により決定される¹⁵⁾。サイズの小さな運動ニューロンは支配する筋線維数が少数であり、発火頻度・強度が低く、高い持久力を持つ特徴があり、低強度の運動の際に動員される活性化の閾値が低い運動ニューロンである。一方、サイズの大きな運動ニューロンは多数の筋線維を支配し、発火頻度・強度が高く、低い持久力を持ち、高強度の運動のみに動員される活性化の閾値が高い特徴がある。通常、筋発揮は、サイズの小さな運動単位から順に動員されることによってスムーズかつ効率的に発揮筋力量の制御が実現される。本研究では、筋痙攣は何らかの原因で、サイズの原理から逸脱した高閾値の α 運動ニューロンが活性化されることによって発生すると推測するのが妥当である。この α 運動ニューロンによって新たな神経支配帯が出現し、活動様式の異なる運動単位が動員されることによって、局所的かつ過剰な強度の不随意収縮が発生し、強い痛みが引き起こされることが考えられる。

現在、筋痙攣の発生源は中枢起源説と末梢起源説に意見が分かれている^{2,3)}。中枢説は脊髄にあ

る運動ニューロンの異常発火、脊髄反射の過敏性が高まることなどが要因として引き起こされるという説である。一方、末梢説は体内の電解質の欠乏、筋疲労、筋組織や末梢神経の炎症や損傷などが要因として引き起こされるという説である。しかし、Martin D. Hoffmanらは161 kmのウルトラマラソンの参加者においてレース後に血清ナトリウム濃度を調査しており¹⁶⁾、筋痙攣の発生有無と血清ナトリウム濃度に関係性が認められなかったことを報告している。本研究では、中枢起源説を支持する結果となった。

4. まとめ

本研究は腓腹筋外側頭における筋痙攣発生過程の解明を空間的筋活動分布から明らかにすることを目的とし筋機能評価を行った。結果として、筋痙攣の前兆を自覚した際に、新たな神経支配帯が出現し、サイズの大きな運動単位が局所的に活動に参加したことが明らかとなった。このことから、筋痙攣の発生源は中枢神経に存在し、サイズの原理を逸脱した運動ニューロンの異常発火により引き起こされると推測された。

謝 辞

本研究にご協力いただきました被験者の皆さまに心より感謝申し上げます。また、研究助成を頂きました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団さまに深く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Timothy M. Miller, Robert B. Layzer, "Muscle cramps", *Muscle Nerve.*, 32, no.4, pp. 431-432, Oct. (2005)
- 2) Gaia Giuriato, Anna Pedrinolla, Federico Schena and Massimo Venturelli, "Muscle cramps: A comparison of the two-leading hypothesis", *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 41, pp. 89-98, Aug. (2018)
- 3) Marco Alessandro Minetto, Aleš Holobar, Alberto Botter and Dario Farina, "Origin and development of

- muscle cramps”, *Exerc. Sport Sci. Rev.*, **41**, no.1, pp. 3-10, Jan.(2013)
- 4) John V., Basmajian and Carlo J., De Luca, “Muscles Alive: their functions revealed by electromyography (5th)”, *Williams & Wilkins*, (1985)
 - 5) Edward A. Clancy, Evelyn L. Morin, Gelareh Hajian and Roberto Merletti, “Surface electromyogram (sEMG) amplitude estimation: Best practices”, *Electromyogr Kinesiol.*, **72**, Oct.(2023)
 - 6) Carlo J., De Luca, “The Use of Surface Electromyography in Biomechanics”, *J. Appl. Biomech.*, **13**, no.2, pp. 135-163, May (1997)
 - 7) Carlos De la Fuente, Eduardo Martinez-Valdes, Jose Ignacio Priego-Quesada, Alejandro Weinstein, Oscar Valencia, Marcos R Kunzler, Joel Alvarez-Ruf and Felipe P Carpes, “Understanding the effect of window length and overlap for assessing sEMG in dynamic fatiguing contractions: A non-linear dimensionality reduction and clustering”, *J. Biomech.*, **125**, Aug.(2021)
 - 8) Gea Drost, Dick F. Stegeman, Baziel G.M. van Engelen and Machiel J. Zwartz, “Clinical applications of high-density surface EMG: a systematic review”, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **16**, no.6,
 - 9) Dario Farina, Frédéric Leclerc, Lars Arendt-Nielsen, Olivier Buttelli and Pascal Madeleine, “The change in spatial distribution of upper trapezius muscle activity is correlated to contraction duration”, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **18**, no.1, pp. 16-25, Feb. (2008)
 - 10) K. Roeleveld, B.G. van Engelen and D.F. Stegeman, “Possible mechanisms of muscle cramp from temporal and spatial surface EMG characteristics”, *J. Appl. Physiol.*(1985)., **88**, no.5, pp.1698-1706, May (2000)
 - 11) K. Saitou, T. Masuda, D. Michikami, R. Kojima and M. Okada, “Innervation zones of the upper and lower limb muscles estimated by using multichannel surface EMG”, *J. Hum. Ergol.(Tokyo)*, **29**, no.1-2, pp. 35-52, Dec.(2000)
 - 12) Rodrigo A., Guzmán-Venegas, Felipe H., Palma-Traro, Oscar D., Valencia, María José Hudson, and Patricio A. Pincheiral, “Location In Vivo of the Innervation Zone in the Human Medial Gastrocnemius Using Imposed Contractions: A Comparison of the Usefulness of the M-Wave and H-Reflex”, *J. Funct. Morphol. Kinesiol.*, **7**, no.4, p. 107, Dec.(2022)
 - 13) A. Rainoldi, M. Nazzaro, R. Merletti, D. Farina, I. Caruso and S. Gaudenti, “Geometrical factors in surface EMG of the vastus medialis and lateralis muscles”, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **10**, no.5, pp. 327-376, Oct.(2000)
 - 14) M. Bilodeau, C. Goulet, S. Nadeau, A.B. Arsenault and D. Gravel, “Comparison of the EMG power spectrum of the human soleus and gastrocnemius muscles”, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **68**, no.5, pp.395-401, (1994)
 - 15) E. HENNEMAN, G. SOMJEN and D.O. CARPENTER, “FUNCTIONAL SIGNIFICANCE OF CELL SIZE IN SPINAL MOTONEURONS”, *J. Neurophysiol.*, **28**, pp. 560-580, May (1965)
 - 16) Martin D. Hoffman and Kristin J. Stuempfle, “Muscle Cramping During a 161-km Ultramarathon: Comparison of Characteristics of Those With and Without Cramping”, *Sports Med. Open.*, **1**, no.1, p. 24, (2015)

有酸素性運動時における異なる様式での 血流制限が血管内皮機能に及ぼす影響

立 命 館 大 学 水 野 沙 洸

Effect of Aerobic Exercise with Different Pattern of Blood Flow Restriction on Endothelial Function of The Non-Active Limb

by

Sahiro Mizuno

Ritsumeikan University,

Research Organization of Science and Technology

ABSTRACT

The aim of the present study was to determine the effects of aerobic exercise with different pattern of blood flow restriction on endothelial function of the non-active limb. Six males (25 ± 3 yr, 176.1 ± 5.5 cm, 66.2 ± 6.6 kg) completed 30 min of recumbent leg-cycling at 40% of $\dot{V}O_2$ peak in two trials: 1) exercise with continuous blood flow restriction (continuous trial) and 2) exercise with intermittent blood flow restriction (3 cycles of 5 min inflation/5 min deflation) (intermittent trial). Cardiovascular hemodynamics and brachial shear rate were recorded every five min during exercise. Brachial artery flow-mediated dilation (FMD) was assessed before exercise and 10 and 60 min post-exercise. Both trials showed increases in arterial blood pressure during exercise, with the intermittent trial demonstrating lower values during the deflation phases (10, 20, and 30 min) compared to the continuous trial ($p < 0.001$). Changes in blood flow and shear rate during exercise did not differ between the trials ($p > 0.05$). FMD was decreased in both the continuous (7.7 ± 1.2 to $3.7 \pm 1.4\%$) and intermittent (8.0 ± 2.0 to $4.9 \pm 1.6\%$) trials at 10 min post-exercise ($p < 0.001$). However, the change in FMD from baseline to 60 min post-exercise was higher in the

intermittent trial ($+1.7 \pm 2.5\%$) than in the continuous trial ($-3.1 \pm 1.0\%$, $p = 0.047$). In conclusion, impaired vascular function following exercise with blood flow restriction can be restored with using intermittent blood flow restriction, independent of shear rate kinetics.

キーワード

血流制限下の運動, 血管内皮機能, 血流パターン, 循環応答

Keyword

exercise with blood flow restriction, vascular function, blood flow pattern, cardiovascular response

要 旨

本研究では、有酸素性運動時における異なる様式での血流制限が、血管内皮機能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。若年男性6名 (23 ± 2 歳) を対象に、最高酸素摂取量の40%強度にて30分間の下肢自転車運動を以下の2条件下にて実施した: 1) 血流制限を連続して行う条件(連続条件), 2) 血流制限を断続的(5分駆血・5分除圧×3)に行う条件(断続条件)。いずれの条件も、動脈遮断圧の80%に相当する血流制限圧を用いた。運動前および運動中は5分ごとに、心拍数および動脈血圧、血管径、血流速度を測定した。運動前および運動後(10分, 60分)に上腕動脈における血流依存性血管拡張反応(flow-mediated dilation; FMD)を測定した。運動中、平均血圧はいずれの条件においても増加したが、断続条件では連続条件と比較して、運動開始10, 20, 30分の時点(除圧時)に有意に低下した。運動時の血流量と剪断速度の推移に、条件間の差異はみられなかった。FMDは、運動終了10分後に両条件で低下した(連続条件: $7.7 \pm 1.2\% \rightarrow 3.7 \pm 1.4\%$, 断続条件: $8.0 \pm 2.0\% \rightarrow 4.9 \pm 1.6\%$)。運動前から運動終了60分後におけるFMDの変化量は、断続条件($+1.7 \pm 2.5\%$)が連続条件($-3.1 \pm 1.0\%$)と比較して有意に高値を示した。以上の結

果から、血流制限下の運動により引き起こされる血管内皮機能の低下は、断続的な血流制限を用いた場合、その回復が早まるが、これら動態に剪断速度は影響しないことが明らかになった。

緒 言

習慣的な有酸素性運動とレジスタンス運動の実施は、健康の維持・増進や疾病の予防を目的として広く推奨されている^{1,2)}。しかし、現代の人々にとって、運動トレーニングのための時間を捻出すること、また高負荷のトレーニングを継続することは決して容易ではない。この課題に対して、血流制限下の運動の有用性に注目が集まっている。血流制限下の運動は、従来ではトレーニング効果の得られない短時間の歩行など、短い時間・低い負荷での運動を用いた場合でも、骨格筋の肥大や筋力増大に加え、有酸素性能力の向上など優れた効果がみられることが明らかにされている^{3,4)}。その一方で、近年、血流制限下の有酸素性運動は、代謝産物の蓄積により顕著な昇圧応答がみられること⁵⁾、活動肢における血管内皮機能の低下を誘発することが報告された^{6,8)}。さらに著者は、単回の血流制限下の下肢自転車運動は、上腕動脈における血管内皮機能を運動後に低下させることを認めた⁹⁾。これらの知見は、血流制限下の有酸素性運動は、骨格筋の適応など優れたトレー

ニング効果を有する一方で、全身性の血管内皮機能に対して負の影響を与える可能性を示唆するものである。内皮機能障害は、動脈硬化の初期病変にみられる症状であり、心血管系の有害事象（脳卒中、心筋梗塞など）の発生にも関係する指標である^{10,11)}。したがって、血管内皮機能への負の影響を考慮した運動プロトコルを開発することは喫緊の課題である。

血管内皮にかかる力学的刺激、剪断速度は、内皮細胞のシグナル伝達を介して、動脈壁の機能的・構造的変化に重要な役割を果たしている¹²⁾。運動や加温による平均剪断速度の上昇は、血流依存性血管拡張反応（flow-mediated dilation; FMD）によって評価される血管内皮機能の改善を促す¹³⁾。なお、平均剪断速度のレベルに加えて血流パターンが重要であり、前向き（順行性）の剪断成分を増加させることはFMDの改善と関連するが、逆向き（逆行性）の剪断成分や振動剪断指数（oscillatory shear index; OSI）の増加はFMD障害と関連する¹⁴⁾。血流制限下での運動は、活動筋での代謝産物の蓄積が助長されることから、代謝受容器反射に起因した血管運動神経活動および末梢血管抵抗の増加が促される¹⁵⁾。その結果、逆行性剪断速度の増大につながるが、非活動肢における内皮機能障害が生じる1つの要因として推察される。一方で近年、断続的陰圧により誘発される剪断速度の揺動が、平均剪断速度が変化せずとも上腕動脈FMDを急性に改善することが示された¹⁶⁾。この知見は、平均剪断速度よりも、血流の揺動自体が血管内皮機能に好影響を及ぼす可能性を示すものである。この点に関して、血流制限下の運動時における一時的な血流制限の解除は、末梢血管抵抗の減少に起因した非活動肢における逆行性血流ならびに剪断速度の低下につながることが想定される。したがって、運動中に血流制限の解除を断続的に行うことは、連続的に血流制限する場合と比較して、剪断速度の揺動を誘発

する手段となるかもしれない。しかしながら、血流制限下の運動時における血流の揺動と非活動肢における血管内皮機能との関係性はこれまでに検討がされていない。

本研究では、有酸素性運動時における異なる様式での血流制限が、非活動肢における血管内皮機能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。この際、運動時の血流の揺動との関係を検討し、血管内皮機能が変化する機序解明を試みる。

1. 方 法

1. 1 対象者

7名の健康な成人男性が本研究に参加した。対象者全員が非喫煙者であり、心血管系に影響を及ぼす薬物および／またはサプリメントを服用していなかった。事前スクリーニングにより、心血管疾患・代謝性疾患の既往歴のある参加者は除外した。各参加者は、実験に参加する前に書面によるインフォームド・コンセントを実施した。本研究は立命館大学人を対象とする医学系研究倫理審査委員会に承認され実施した（受付番号：BKC-LSMH-2023-112）。

1. 2 研究進行

実験期間を通して、対象者は合計3日間実験室へ来室した。測定は一定温度（24℃）に調節された実験室にて実施した。1日目は、動脈遮断圧の決定のための測定および下肢自転車エルゴメータを用いた最大運動テストによる最高酸素摂取量（peak oxygen uptake; $\dot{V}O_{2peak}$ ）測定を行った。2～3日目は、2つの異なる条件〔連続して血流制限を行う条件（連続条件）、断続的に血流制限（5分間駆血・5分間徐圧×3セット）を行う条件（断続条件）〕での最大下運動テストをランダムに実施した。いずれの条件においても、対象者は24時間前から激しい運動と飲酒・カフェインの摂取を控えた上で、6時間以上の絶食状態で翌日の8

時あるいは14時に実験室へ来室した。

1. 3 動脈遮断圧決定のためのテスト

対象者の右脚大腿基部へ間欠・漸増的に圧迫を課した際の後脛骨動脈の血流速度を超音波診断装置 (Vivid q, GE HealthCare) にて計測し、血流速度の波形が消失する圧を動脈遮断圧として定義した¹⁷⁾。測定では、上腕動脈における動脈血圧を測定した後、右脚大腿基部への圧迫を50mmHgから開始した。その後、収縮期血圧値での圧迫を行い、以降は波形が消失するまで、収縮期血圧値に40mmHgずつ加算した圧にて漸増的に圧迫を行った。それぞれの圧迫時間は30秒間とし、10秒間の除圧 (0mmHg) を挟んだ。血流速度波形の消失がみられた時点で、5秒毎に1~5mmHgずつ圧を漸減させ、波形が出現しない最低限の圧を動脈遮断圧とした。なお、測定時の対象者の姿勢は安静仰臥位として、圧迫にはコンプレッサーおよび10.5 cm × 82.5 cmのカフ (Booster, MON-Stars) を用いた。

1. 4 最大運動テスト

リカンベント式の下肢自転車エルゴメータ (Cardio comfort 837E, Monark) を用いた多段階漸増負荷法により $\dot{V}O_{2peak}$ を測定した。エルゴメータには、ペダル型パワーメーター (Rally RS200, Garmin) を装着し、サイクルコンピューター (Edge 540, Garmin) とペアリングさせた上で仕事率および回転数を記録した。測定では、30 Wの負荷から1分毎に15 Wずつ負荷を漸増させ、規定の回転数 (50 rpm) に追従できなくなった時点をもって運動終了とした。運動中の呼吸パラメータは、breath-by-breath法により測定した。対象者は呼吸マスク (FFM-100, Minato Medical Science) を装着し、酸素摂取量、炭酸ガス排出量、呼吸数、1回換気量を呼吸代謝モニタシステム (AE-310S, Minato Medical Science) にて測定した。また、運

動中は心拍センサより心拍数を算出した (Polar H10 N, Polar)。呼吸パラメータおよび心拍数は30秒ごとに平均し、運動中の酸素摂取量の最高値を $\dot{V}O_{2peak}$ とした。

1. 5 上腕動脈FMD

上腕動脈FMDの測定は、運動前、運動終了10分、60分後に、ガイドラインをもとに実施した¹⁸⁾。超音波診断装置 (Vivid q, GE HealthCare) を用いて、右上腕動脈の血管径と血流速度を、それぞれ超音波B-mode法およびパルスウェーブ法により測定した。測定には、リニア型プローブを用いた (12L-RS, GE HealthCare)。測定では、プローブ固定具 (MIST-100H, SARAYA) を用い、動脈に対して60度の角度でプローブを固定した上で、血管長軸方向の横断画像と血流速度を同時にかつ連続的に測定した。測定時の姿勢は安静仰臥位として、記録は安静30秒の後、駆血5分、開放後3分間とした。安静30秒では、心拍数および動脈血圧の測定を同時に実施した。駆血はカフを医用電子血圧計 (MIST-1000, SARAYA) に接続して膨張させ、220mmHgで行った。得られた画像および流速波形はビデオキャプチャユニット (DVI2USB 3.0, ARGO) を通じて、サンプリング周波数30 Hzにてコンピュータに取り込んだ。解析には、エッジ検出および壁追跡解析ソフトウェア (T.K.K 5814 Ver. 2.2.1, Takei Scientific Instruments) を用いた。欠損データは線形補完を用いて調整し、外れ値 (2.5 SD) は除外した上で、安静時血管径および最大拡張血管径を算出した。最大拡張血管径の算出には、先行研究を参考にスムージングを行った値を用いた¹⁹⁾。また、駆血開放後に最大血管拡張に達するまでの時間をピーク時間とした。FMDおよび血管に対する刺激であるシエアレート (Shear rate; SR) は、以下の式にて算出した。

FMD (%) = (最大拡張血管径 (cm) - 安静時血

管径 (cm)) / 安静時血管径 (cm) *100

$$SR = 4 \times \text{血流速度 (m}\cdot\text{s}^{-1}) / \text{血管径 (cm)}$$

駆血開放直後から最大血管拡張に至るまでの SR の総和を SR AUC (Area under the curve; AUC) とした。

1. 6 上腕動脈血流測定

安静時および運動中における上腕動脈血管径と血流速度は、上述の手技を用いて測定した。運動中のデータは5分ごとに測定を行った。得られたデータから、血流量（順行性血流速度、逆行性血流速度、平均血流速度）と SR（順行性 SR、逆行性 SR、平均 SR）、OSI を以下の式にて算出した。

$$\text{血流量} = [\pi \times (\text{血管径} / 2)^2] \times \text{血流速度} \times 60 \text{ (mL}\cdot\text{min}^{-1})$$

$$SR = 4 \times \text{血流速度 (m}\cdot\text{s}^{-1}) / \text{血管径 (cm)}$$

$$OSI = | \text{逆行性 SR} | / (| \text{順行性 SR} | + | \text{逆行性 SR} |)$$

1. 7 最大下運動テスト

安静状態で測定を終えた後、対象者の両脚大腿基部に 10.5 cm × 82.5 cm (Booster, MON-Stars) のカフを巻き、下肢自転車ペダリング運動を開始した。いずれの条件も血流制限圧には、個人の動脈遮断圧の 80% に相当する圧を用いた⁴⁾。運動強度は 40% $\dot{V}O_{2peak}$ 、回転数は 50 rpm とした。連続条件および断続条件では、運動開始後 30 秒間は圧迫を行わず、規定の負荷・回転数にて自転車運動を実施し、30 秒経過時点において、コンプレッサー (Booster, MON-Stars) により圧迫を課して 30 分間の運動を実施させた。連続条件では、30 分間にわたり規定の駆血圧にて圧迫を維持した。断続条件では、規定の駆血圧にて 5 分間の圧迫・5 分間の除圧 (0 mmHg) を 3 回にわたり繰り返した。

1. 8 心拍数および動脈血圧

安静時および運動中における心拍数および動

脈血圧は、それぞれ心拍センサ (Polar H10 N, Polar) とステスコープ (Cardiology IV 6152, 3M) およびアネロイド血圧計 (5098-27, Welch Allyn) にて評価した。

1. 9 統計解析

すべての測定値は、平均値 ± 標準偏差で示した。安静時および運動中の心拍数および動脈血圧、運動前後の上腕動脈 FMD 測定時における循環指標の時間経過に伴う平均値の差の検定には、二元配置分散分析-反復測定を用い、交互作用と主効果 (条件、時間) の有無を検定した。ANOVA により交互作用が認められた場合、Tukey-Kramer 法での Post hoc 検定を実施した。上腕動脈 FMD の変化量 (Δ FMD) は、paired t-test を実施した。有意水準は危険率 5% 未満とした。

2. 結果

本研究に参加した 7 名の対象者のうち、1 名は最大下運動テスト時の駆血による痛みにより離脱した。したがって、統計解析に用いられたデータは、6 名の対象者のものである。対象者の基本情報は表 1 に示した。

表 1 対象者の基本情報

年齢 (歳)	25 ± 3
身長 (cm)	176.1 ± 5.5
体重 (kg)	66.2 ± 6.6
BMI (kg/m ²)	21.3 ± 1.3
心拍数 (bpm)	55 ± 7
収縮期血圧 (mmHg)	106 ± 7
拡張期血圧 (mmHg)	69 ± 6
平均動脈血圧 (mmHg)	82 ± 6
平均値 ± 標準偏差	

2. 1 動脈遮断圧

対象者における動脈遮断圧は、175 ± 10 mmHg であった。動脈遮断圧の 80% に相当する血流制限圧は、140 ± 8 mmHg であった。

2. 2 最大運動テスト

対象者の最高酸素摂取量は、 $41.7 \pm 3.7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。最大下運動テストの強度（最高酸素摂取量の40%に相当する強度）は、 $81 \pm 9 \text{ W}$ であった。

2. 3 最大下運動テスト時における循環指標の変化

運動時における循環指標の変化を表2に示す。

表2 運動時における循環指標の変化

		安静時		運動中						交互作用
			5分	10分	15分	20分	25分	30分		
心拍数 (bpm)	連続	56±5	96±18	111±9	117±13	122±12	122±18	126±17	0.654	
	断続	56±6	82±24	103±8	104±9	112±11	110±10	117±13		
収縮期血圧 (mmHg)	連続	106±6	152±10*	158±12*	158±14*	158±13*	157±12*	158±14*	<0.001	
	断続	106±9	141±7*	134±8* [†]	158±11*	136±10* [†]	161±13*	138±7* [†]		
拡張期血圧 (mmHg)	連続	67±5	82±11*	89±8*	91±9*	91±8*	90±8*	93±8*	<0.001	
	断続	72±7	84±7*	65±5* [†]	83±10*	66±8* [†]	84±10*	63±5* [†]		
平均血圧 (mmHg)	連続	80±5	105±10*	112±9*	113±9*	113±9*	113±8*	114±8*	<0.001	
	断続	83±6	108±16*	88±5* [†]	108±10*	90±8* [†]	110±10*	88±4* [†]		
順行性血流量 (mL·min ⁻¹)	連続	81±31	70±35	90±21	109±46	131±52	137±96	146±70	0.082	
	断続	83±38	64±22	115±51	122±56	160±74	157±99	206±86		
逆行性血流量 (mL·min ⁻¹)	連続	-9±9	-25±4	-19±6	-15±4	-13±6	-15±6	-13±7	0.235	
	断続	-2±1	-25±6	-9±6	-12±8	-9±8	-8±5	-4±5		
平均血流量 (mL·min ⁻¹)	連続	72±33	45±34	72±27	94±49	118±57	122±102	133±76	0.060	
	断続	81±38	39±25	106±56	110±63	151±80	149±102	202±89		

平均値 ± 標準偏差。*p < 0.05 vs. 運動前, [†]p < 0.05 vs. 連続。

運動中の収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧に交互作用が認められ、いずれの条件も安静時と比較して増加した (p < 0.001)。断続条件では連続条件と比較して、運動開始10分、20分、30分経過時点での収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧が低値を示した (p < 0.001)。運動中の順行性血流量、逆行性血流量、平均血流量に交互作用はみられなかった。運動中のSRおよびOSIの変化を図1に示す。順行性SR、逆行性SR、平均SR、OSIに交

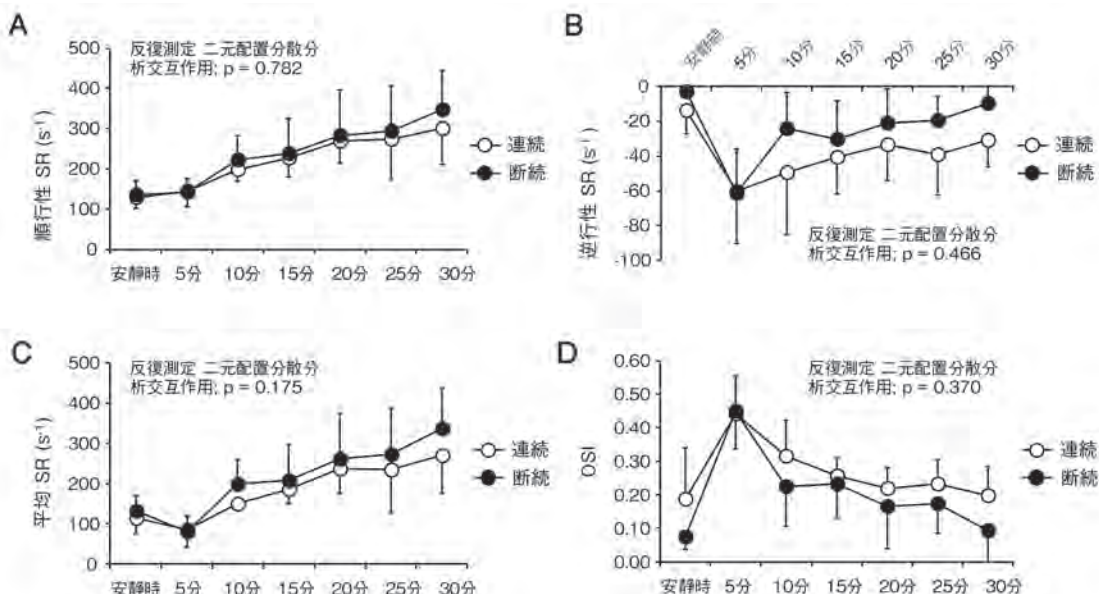


図1 運動時における剪断速度および振動剪断指数の変化

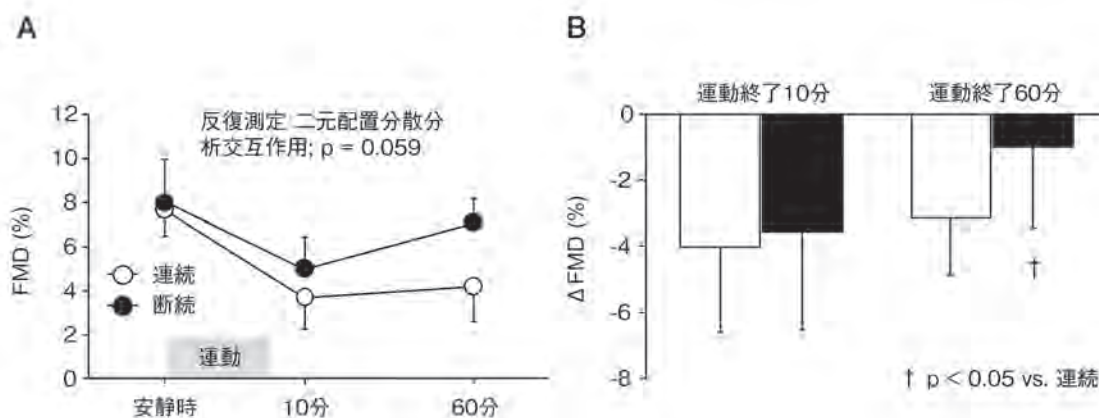


図2 運動前後における上腕動脈FMDの変化

表3 運動前後の上腕動脈FMD測定時における循環指標の変化

		安静時	運動後10分	運動後60分	交互作用
心拍数 (bpm)	連続	56 ± 5	126 ± 17*	59 ± 7	0.018
	断続	56 ± 6	114 ± 9*	56 ± 5	
収縮時血圧 (mmHg)	連続	106 ± 6	111 ± 6	105 ± 7	0.750
	断続	106 ± 9	114 ± 8	107 ± 7	
拡張時血圧 (mmHg)	連続	67 ± 5	67 ± 9	68 ± 5	0.751
	断続	72 ± 7	68 ± 5	70 ± 6	
平均血圧 (mmHg)	連続	80 ± 5	82 ± 6	80 ± 4	0.740
	断続	83 ± 6	83 ± 4	82 ± 5	
安静時血管径 (mm)	連続	3.78 ± 0.31	3.86 ± 0.42	3.75 ± 0.36	0.158
	断続	3.72 ± 0.39	3.82 ± 0.37	3.76 ± 0.34	
最大拡張血管径 (mm)	連続	4.07 ± 0.36	4.00 ± 0.41	3.91 ± 0.38	0.054
	断続	4.02 ± 0.44	4.01 ± 0.37	4.02 ± 0.33	
Absolute diff (mm)	連続	0.29 ± 0.06	0.14 ± 0.05*	0.16 ± 0.06*	0.045
	断続	0.30 ± 0.09	0.18 ± 0.06	0.26 ± 0.03	
Peak time (s)	連続	54.2 ± 14.3	69.3 ± 15.9	53.3 ± 10.6	0.667
	断続	53.3 ± 23.8	64.4 ± 8.1	42.7 ± 6.9	
SR AUC (a.u)	連続	18562 ± 5784	26095 ± 3494	20394 ± 4973	0.609
	断続	18426 ± 7046	27942 ± 10991	16906 ± 3779	

平均値 ± 標準偏差. Absolute diff; 最大拡張血管径と安静時血管径の差分, Peak time; 最大拡張血管径到達時間, SR AUC; SRの総和.

* $p < 0.05$ vs. 安静時

交互作用はみられず、両条件で同様の経時変化を示した。

2.4 最大下運動テスト前後の上腕動脈FMD測定時における循環指標の変化

運動前、運動終了10分、60分後における上腕動脈FMD測定時における循環指標の変化を表3に示す。心拍数および血管径の変化量（最大拡張血管径と安静時血管径の差分）にのみ、それぞれ交互作用が認められた。心拍数は、運動終了10分の時点で両条件が安静時と比較して高値を示し

た ($p = 0.018$)。血管径の変化量は、連続条件が安静時と比較して、運動終了10分および60分に低値を示した ($p = 0.045$)。

上腕動脈FMDの変化を図2Aに示す。交互作用は認められず ($p = 0.059$)、両条件ともに同様の推移を示した。上腕動脈FMDの変化量 (Δ FMD) を図2Bに示す。 Δ FMDは、運動終了後60分にて、断続条件 (+1.7 ± 2.5%) が連続条件 (-3.1 ± 1.0%) と比較して高値を示した ($p = 0.047$, 図2B)。なお、安静時血管径およびFMDの変動係数はそれぞれ 1.47 % および 8.23 % であった。

3. 考 察

本研究では2つの主要な知見が得られた。第一に、運動時の連続的または断続的な血流制限は、逆行性血流およびSRの揺動に影響を及ぼさなかった。第二に、運動時における活動肢への血流制限は、非活動肢FMDを有意に低下させた。しかし、運動時における断続的な血流制限は、連続的な血流制限を行う場合と比較して、運動終了60分後における非活動肢FMDの低下の程度を抑制した。以上の結果から、血流制限下の運動により引き起こされる血管内皮機能の低下は、断続的な血流制限を用いる場合その回復が早まるが、これら動態に血流の揺動は影響しないことが明らかとなった。

本研究は、血流制限下の有酸素運動中における非活動肢の血流パターンを測定した初めての研究である。血流パターンは、全身灌流圧（上流）と末梢抵抗血管の臨界閉鎖圧（下流）の圧勾配により決定される^{20, 21)}。本研究の断続条件における除圧時には、末梢血管抵抗の減少に起因した逆行性血流およびSRの低下につながることを仮説に設けていたが、これらの動態に条件間の有意差はみられなかった。なお、断続条件では、除圧時に収縮期ならびに拡張期血圧の一時的な低下が認められた（表2）。これは、除圧に起因した末梢血管抵抗の低下が要因と考えられる。また、両条件において、逆行性血流量ならびにSRは、運動時間の経過に伴い低下がみられた（図1B）。この点に関して、下肢自転車運動時における上腕動脈では、主に熱交換を促進するための調節反応として、抵抗血管と皮膚微小循環の拡張による末梢血管抵抗の減少が生じる¹²⁾。したがって、本研究における逆行性SRの揺動は、代謝受容器反射や圧勾配など他の影響に加え、皮膚血管拡張の影響を受けた可能性もある。今後は、中枢性因子（心拍出量、交感神経活動など）や皮膚血流量など血流パター

ンを制御する因子を合わせて評価する必要があるだろう。

本研究では、下肢自転車運動時の血流制限の様式にかかわらず、運動終了10分後に上腕動脈FMDの低下を認めた。なお、興味深いことに、運動終了60分後におけるFMDの低下は、断続条件が連続条件と比較して有意に抑制され、低下したFMDが早期に回復した。これらの知見は、単回の運動後の非活動肢FMDは二相性の反応を示し、FMDは運動直後に急性に低下するが、運動1時間後には回復することを提唱した先行研究と一致する²²⁾。本研究では、運動終了10分後にFMDの低下が見られた要因について、FMD検査時の安静時血管径の増加や剪断速度（SR曲線下面積）の低下は観察されなかったことから、これらの要因が運動後の低下に影響を及ぼした可能性は低い。そのほかの要因として、運動中における逆行性SR増加の関与が推察される。逆行性SRの増加は、エンドセリン-1の発現増加²³⁾や活性酸素産生酵素の発現増大²⁴⁾、内皮型NO合成酵素の発現低下²⁵⁾を亢進することから、これらが運動終了後の上腕動脈FMDの急性低下に関与したのかもしれない。一方で、断続条件においてFMDが早期に回復した機序には、運動時における動脈血圧の上昇が関与した可能性がある。先行研究では、実験的に急性高血圧が誘発されると、直ちに内皮機能の低下がみられること、この影響は、血圧が正常値に戻った後も少なくとも2.5時間にわたり増強されることが報告されている^{26, 27)}。実際に、血流制限下の有酸素運動中における平均血圧の上昇が高い条件では、低い条件と比較して、運動後における非活動肢FMDの低下がより増大したことが認められている⁹⁾。本研究では、運動の開始に伴い両条件において動脈血圧の顕著な上昇がみられたが、断続条件における除圧時には連続条件と比較して、動脈血圧は低値を示していた。推測の域を出ないが、上記の知見を考慮すると、運

動時における動脈血圧の連続した上昇あるいはその累積が、運動後におけるFMDの回復動態に影響を及ぼしたのかもしれない。

有酸素性運動と血流制限の併用が非活動肢FMDへ及ぼす影響を検討したそのほか唯一の研究では²⁸⁾、間欠的な歩行(2分×5セット、セット間休息1分、運動強度:0.9 m·s⁻¹)中に、運動時にのみ160 mmHgを両脚大腿基部へカフにて負荷し、運動前後における上腕動脈FMDを評価している。その結果、運動終了直後ならびに60分後の上腕動脈FMDに変化はみられず、血流制限下の有酸素性運動による血管内皮機能の低下は認められなかった。これまでに、有酸素性運動直後にみられる非活動肢FMDの低下には、運動の強度および時間に依存する可能性が示されている^{29, 30)}。したがって、血流制限下の有酸素性運動において、歩行などの低強度で短時間(～10分)の運動様式を用いる場合には、非活動肢における血管内皮機能の低下は生じない可能性がある。

本研究には、実験的に考慮すべき点がいくつかある。クロスオーバーデザインを採用したが、十分なサンプルサイズではなかったため、人数を増やした検討が必要である。また、血流制限下の有酸素性運動は、顕著な昇圧応答を惹起する³¹⁾。本研究では健康な成人男性を対象としたが、今後は心血管系リスクの高い集団における血流制限下の有酸素性運動が心血管系への応答を評価する研究が求められる。最後に、血流制限下の運動時における心血管系機能に対する効果を明確にするためには、変数(例:血流制限圧、カフの幅、運動強度・時間・様式)の様々な組み合わせが血流の揺動に及ぼす影響についてさらなる調査が必要である。

4. まとめ

本研究では、有酸素性運動時における異なる様式での血流制限が、非活動肢における血流の揺動
デサントスポーツ科学 Vol. 46

ならびに血管内皮機能に及ぼす影響を検討した。その結果、血流制限下の運動により引き起こされる血管内皮機能の低下は、断続的な血流制限を用いた場合その回復が早まるが、これら動態に血流の揺動は影響しないことが明らかになった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、立命館大学の後藤一成先生、富石千尋先生、小林美優先生、成瀬正俊先生、牧野晃宗先生に御指導ならびに御協力をいただきました。感謝申し上げます。本研究に助成いただきました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝いたします。

文 献

- 1) Booth F.W., M.V. Chakravarthy, E.E. Spangenburg, Exercise and gene expression: physiological regulation of the human genome through physical activity., *J. Physiol.*, **543** (Pt 2): p.399-411(2002)
- 2) Mora S. et al., Physical activity and reduced risk of cardiovascular events: potential mediating mechanisms., *Circulation*, **116**(19): p.2110-8(2007)
- 3) Pearson S.J., S.R. Hussain, A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy., *Sports Med.*, **45** (2): p.187-200(2015)
- 4) Conceicao M.S. et al., Augmented Anabolic Responses after 8-wk Cycling with Blood Flow Restriction., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **51** (1): p.84-93 (2019)
- 5) Mannozi J. et al., Blood flow restriction training activates the muscle metaboreflex during low-intensity sustained exercise., *J. Appl. Physiol.* (1985), **135** (2): p.260-270(2023)
- 6) Renzi C.P., H. Tanaka, J. Sugawara, Effects of leg blood flow restriction during walking on cardiovascular function., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42** (4): p.726-32(2010)
- 7) Paiva F.M. et al., Effects of disturbed blood flow during exercise on endothelial function: a time course analysis., *Braz. J. Med. Biol. Res.*, **49** (4): p.e5100(2016)
- 8) Credeur D.P., B.C. Hollis, M.A. Welsch, Effects of

- handgrip training with venous restriction on brachial artery vasodilation., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42** (7) : p.1296-302(2010)
- 9) 水野沙洗, et al., 血流制限下での有酸素性運動の効果: 血管内皮機能への影響を考慮した至適プロトコルの探索, *デサントスポーツ科学*, **43**: p. 34-42(2022)
- 10) Heitzer T. et al., Endothelial dysfunction, oxidative stress, risk of cardiovascular events in patients with coronary artery disease., *Circulation*, **104** (22) : p.2673-8(2001)
- 11) Yeboah J. et al., Predictive value of brachial flow-mediated dilation for incident cardiovascular events in a population-based study: the multi-ethnic study of atherosclerosis., *Circulation*, **120** (6) : p.502-9 (2009)
- 12) Green D.J. et al., Vascular Adaptation to Exercise in Humans: Role of Hemodynamic Stimuli., *Physiol. Rev.*, **97** (2) : p.495-528(2017)
- 13) Tinken T.M. et al., Impact of shear rate modulation on vascular function in humans., *Hypertension*, **54** (2) : p.278-85(2009)
- 14) Thijssen D.H. et al., Retrograde flow and shear rate acutely impair endothelial function in humans., *Hypertension*, **53** (6) : p.986-92(2009)
- 15) Spranger M.D. et al., Blood flow restriction training and the exercise pressor reflex: a call for concern., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **309** (9) : p.H1440-52(2015)
- 16) Holder S.M. et al., Fluctuation in shear rate, with unaltered mean shear rate, improves brachial artery flow-mediated dilation in healthy, young men., *J. Appl. Physiol. (1985)*, **126** (6) : p.1687-1693(2019)
- 17) Loenneke J.P. et al., Effects of cuff width on arterial occlusion: implications for blood flow restricted exercise., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **112** (8) : p.2903-12 (2012)
- 18) Thijssen D.H.J. et al., Expert consensus and evidence-based recommendations for the assessment of flow-mediated dilation in humans., *Eur. Heart J.*, **40** (30) : p.2534-2547(2019)
- 19) Black M.A. et al., Importance of measuring the time course of flow-mediated dilatation in humans., *Hypertension*, **51** (2) : p.203-10(2008)
- 20) Halliwill J.R. C.T. Minson, Retrograde shear: backwards into the future?, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **298** (4) : p.H1126-7(2010)
- 21) Simmons G.H. et al., Increased brachial artery retrograde shear rate at exercise onset is abolished during prolonged cycling: role of thermoregulatory vasodilation., *J. Appl. Physiol. (1985)*, **110** (2) : p.389-97(2011)
- 22) Dawson E.A. et al., Effects of acute exercise on flow-mediated dilatation in healthy humans., *J. Appl. Physiol. (1985)*, **115** (11) : p.1589-98(2013)
- 23) Hwang J. et al., Pulsatile versus oscillatory shear stress regulates NADPH oxidase subunit expression: implication for native LDL oxidation., *Circ. Res.*, **93** (12) : p.1225-32(2003)
- 24) De Keulenaer G.W. et al., Tumour necrosis factor alpha activates a p22phox-based NADH oxidase in vascular smooth muscle., *Biochem. J.*, **329** (Pt 3) : p.653-7(1998)
- 25) Ziegler T. et al., Influence of oscillatory and unidirectional flow environments on the expression of endothelin and nitric oxide synthase in cultured endothelial cells., *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.*, **18** (5) : p.686-92(1998)
- 26) Lamping K.G., W.P. Dole, Acute hypertension selectively potentiates constrictor responses of large coronary arteries to serotonin by altering endothelial function in vivo., *Circ. Res.*, **61** (6) : p.904-13(1987)
- 27) Millgard J., L. Lind, Acute hypertension impairs endothelium-dependent vasodilation., *Clin. Sci. (Lond.)*, **94** (6) : p.601-7(1998)
- 28) Stray-Gundersen S., S. Wooten, H. Tanaka, Walking With Leg Blood Flow Restriction: Wide-Rigid Cuffs vs. Narrow-Elastic Bands., *Front. Physiol.*, **11**: p. 568(2020)
- 29) Johnson B.D., J. Padilla, J.P. Wallace, The exercise dose affects oxidative stress and brachial artery flow-mediated dilation in trained men., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **112** (1) : p.33-42(2012)
- 30) Birk G.K. et al., Effects of exercise intensity on flow mediated dilation in healthy humans. *Int J. Sports Med.*, **34** (5) : p.409-14(2013)
- 31) Cristina-Oliveira M. et al., Clinical safety of blood flow-restricted training? A comprehensive review of altered muscle metaboreflex in cardiovascular disease during ischemic exercise., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **318** (1) : p.H90-H109(2020)

女子ラグビー選手におけるハムストリングス筋力の重要性： 競技力および肉離れ発生との関連

静岡産業大学 江 間 諒 一
(共同研究者) 芝浦工業大学 赤 木 亮 太

Importance of Hamstring Muscle Strength in Female Rugby Players: Relationship with Athletic Performance and Incidence of Hamstring Injuries

by

Ryoichi Ema
*Faculty of Sport Science,
Shizuoka Sangyo University*
Ryota Akagi
*College of Systems Engineering and Science,
Shibaura Institute of Technology*

ABSTRACT

The present study examined the importance of hamstring muscle strength in female rugby players from the perspectives of athletic performance and occurrence of hamstring injuries. Twenty female rugby sevens players participated in this study. Participants were classified into regular and semi-regular groups based on their tournament participation. Measurements were taken for lean body mass, eccentric and concentric knee flexion torque, as well as 10-meter sprint times. Eccentric knee flexion torque was assessed using strength in the Nordic hamstring exercise. Measurements for lean body mass and muscle strength were repeated after three months. A significant positive correlation was found only between lean body mass and eccentric knee flexion torque. After three months of competitive training, eccentric knee flexion torque

increased in the regular group, but no significant changes were observed in the semi-regular group or in concentric knee flexion torque in either group. Players who had experienced hamstring injuries in the past two years exhibited significantly lower eccentric torque compared to those without such history. These findings suggest that eccentric muscle strength exerted during the Nordic hamstring exercise may be related to athletic performance and the experience of hamstring injuries.

キーワード

伸張性収縮, 短縮性収縮, アスリート, 競技力, 筋力

Keyword

Eccentric contraction, Concentric contraction, Athlete, Athletic performance, Muscular strength

要 旨

本研究は、女子ラグビー選手におけるハムストリングス筋力の重要性について、競技力および肉離れ発生の観点から検討した。7人制女子ラグビー選手20名が実験に参加した。対象者を、大会参加数でレギュラー群と準レギュラー群に分類した。除脂肪量、伸張性および短縮性膝関節屈曲トルク、ならびに10m走のタイムを計測した。伸張性膝関節屈曲トルクは、ノルディックハムストリング中の筋力を用いた。除脂肪量および筋力については、3カ月後にも計測を行った。除脂肪量と伸張性膝関節屈曲トルクの間にのみ、有意な正の相関関係がみられた。3カ月の競技トレーニングにより、レギュラー群の伸張性膝関節屈曲トルクは有意に増加したが、準レギュラー群の伸張性膝関節屈曲トルクおよび両群の短縮性膝関節屈曲トルクには有意な変化がみられなかった。過去2年間にハムストリングス肉離れを経験していた選手の伸張性膝関節屈曲トルクは、未経験選手よりも有意に小さかった。以上の結果は、ノルディックハムストリング中に発揮される伸張性筋力が、競技力や肉離れの経験と関連することを示唆している。

緒 言

ハムストリングスとは、太腿裏側に存在する4つの骨格筋（大腿二頭筋長頭、大腿二頭筋短頭、半腱様筋、半膜様筋）の総称である。運動習慣のない人と比較して、陸上競技短距離選手¹⁾や自転車競技選手²⁾等、アスリートは大きなハムストリングス筋体積を有している。よって、スポーツ選手にとって重要な役割を果たす骨格筋群であるといえる。

ハムストリングスは、スポーツ外傷が生じやすい筋群としても知られている。中でも重篤なスポーツ外傷である肉離れの好発筋である³⁾。近年、ハムストリングスの肉離れ予防を目的としたエクササイズ（ノルディックハムストリング）が考案され、エクササイズ中のハムストリングス筋力が肉離れのリスクと関連することが報告されている⁴⁾。これらのデータの多くは男子スポーツ選手を対象としたものである。男子スポーツ選手と女子スポーツ選手では筋力⁵⁾や筋量⁶⁾の大きさが異なることから、男子選手における知見を女子選手に当てはめることができるかは不明である。特に、ラグビー⁷⁾など、肉離れが好発するスポーツ選手における検討が必要である。7人制ラグビー

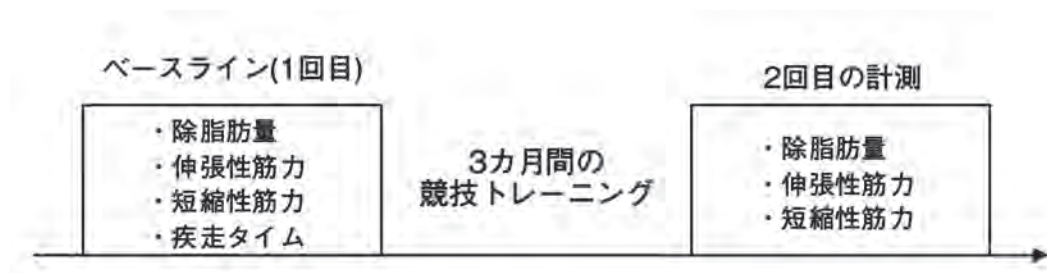


図1 実験の流れ

については、2016年のリオデジャネイロオリンピックから男女とも正式種目として採用され、競技人口の増加や競技の醸成が期待されている。7人制ラグビー選手、とりわけ女子選手における各種データの取得は、競技力の向上やスポーツ外傷の予防に繋がる知見の提供になることが期待できる。

ノルディックハムストリングにおいて、ハムストリングスは伸張性収縮を行うため、計測される値はハムストリングスの伸張性筋力として評価できる。短縮性収縮を行った際のハムストリングス筋力も肉離れのリスクと関連するのかどうか、さらには、伸張性および短縮性ハムストリングス筋力が身体運動パフォーマンスや競技力と関連するのはよく分かっていない。これらを明らかにすることができれば、ハムストリングス筋力の重要性について、スポーツ現場で活用できるエビデンスを提示できる可能性がある。

そこで本研究は、7人制女子ラグビー選手を対象に、ハムストリングス筋力の大きさと身体運動パフォーマンス、競技力、および肉離れとの関連を検討し、ハムストリングス筋力の重要性を明らかにすることを目的とした。

1. 研究方法

7人制女子ラグビーチームに所属する選手20名(年齢 24 ± 4 歳、身長 161.8 ± 6.7 cm、体重 62.5 ± 8.6 kg)が本研究に参加した。参加者に対して実験内容と方法について説明を行い、同意を得たのちに

実験を実施した。本研究は、静岡産業大学における研究倫理審査委員会の承認を得た。

測定実施期間を含む1.5年間において、大会登録選手として試合に出場した回数を調査した。中央値以上の出場回数の選手をレギュラー群($n = 10$)、中央値未満の出場回数の選手を準レギュラー群($n = 10$)とした。

身体運動パフォーマンスの指標として、ハムストリングス伸張性・短縮性筋力と走力を評価した。これらの計測は、十分なウォーミングアップ後に行った。除脂肪量および筋力については、ベースラインとなる計測(1回目)に加えて、3カ月後(2回目)にも計測を行った(図1)。

マルチ周波数体組成計(MC-980A-N plus, TANITA corporation)を用いて、除脂肪量を計測した。素足で体組成計の台の上に立ち、モニターに提示される指示に従って計測を行った。

等速性筋力計(CON-TREX MJ, PHYSIOMED)を用いて、角速度180度/秒の条件で、短縮性膝関節屈曲トルクを計測した(図2)。対象者を筋力計の座面に座らせ、身体が動かないようにシートベルトで固定した。対象者の膝関節中心と筋力計の回転中心が一致するように留意した。複数回の練習試行の後、全力で膝関節を屈曲させた。計測は3回行い、トルクのピーク値が最大となる試行を分析対象とした。3カ月の競技トレーニングの影響を検討する際には、除脂肪量で除して正規化した値を用いた。

伸張性膝関節屈曲筋力について、ノルディック



図2 短縮性膝関節屈曲筋力計測の様子



図3 ノルディックハムストリングの様子

ハムストリング（図3）中の伸張性膝関節屈曲力を計測した（図4）。足首をベルトで固定し、ロードセル（LUX-B-1KN-ID, Kyowa）を用いて左右の筋力が計測できる特注の筋力計を使用した。対象者に対して、見本を見せながらやり方を説明した。その際、腰を引かず（身体がくの字にならないようにする）、膝関節から上の身体全体を一直線に保ちながら、ゆっくり前方に倒れていくよう伝えた。対象者に、2～3回程度練習してもらった後、本番試行を行った。前方に倒れることによる負荷に対して、できるだけ抵抗するよう指示した。試行は3回行った。左右の力のピーク値の平

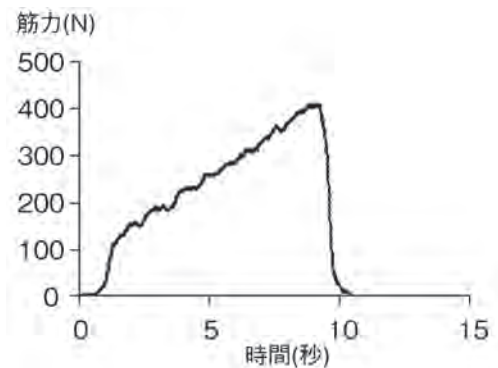


図4 ノルディックハムストリングにおける発揮筋力の典型例



図5 疾走タイム計測の様子

均を算出し、その最大値を分析に採用した。膝関節中心から力の計測部位までの距離を計測し、ピーク値に乗ずることで、伸張性膝関節屈曲トルクを算出した。3カ月の競技トレーニングの効果を調べる際には、除脂肪量で除して正規化した。

走力の指標として、10m走のタイムを計測した。芝生グラウンド上で、選手個人のスパイクを履いて全力で50m走を行ってもらい、10m地点の通過タイムを記録した(図5)。計測には光電管(VoltOnoSprint, S-CADE)を用いた。スタンディングスタートを採用し、選手が動き出すと同時に記録を開始するシステムを用いた。拘束時間およびグラウンドの使用可能時間等の関係から、一部の選手で計測を行うことができなかった。

2. 統計処理

全ての結果は平均±標準偏差で示した。ベースラインの測定項目間の関係性について、ピアソンの積率相関係数を用いて評価した。除脂肪量および筋力について、二元配置の分散分析(群×時間)を行い、群によって変化が異なるかどうか調べた。ベースライン計測時において、過去2年間に肉離れを経験した選手が1名いた。ベースラインにおける肉離れ経験者と未経験者の筋力を比較するために、1サンプルのt検定を行った。有意水準は5%とした。統計処理はSPSS version 28を用いて

実施した。

3. 研究結果

レギュラー群と準レギュラー群選手の大会出場回数を表1に示す。出場回数の中央値は7.5回であった。

表1 群ごとの大会出場数(回)

レギュラー群	10±2
準レギュラー群	4±2

除脂肪量と伸張性膝関節屈曲トルクとの間に、有意な正の相関関係($r = 0.484$, $P = 0.031$)が観察された。一方、除脂肪量と短縮性膝関節屈曲トルクおよび10m走の記録、筋力と10m走の記録との間に、有意な相関関係は観察されなかった。

除脂肪量について、有意な交互作用および主効果のいずれも観察されなかった。伸張性および短縮性膝関節屈曲トルクの変化を図6に示す。ベースラインおよび3カ月後の計測値について、有意な群間差はみられなかった。伸張性膝関節屈曲トルクについて、二元配置分散分析の結果、有意な群×時間の交互作用がみられた($P = 0.041$)。レギュラー群においては、3カ月の計測後に伸張性膝関節屈曲トルクが有意に増加した。一方、準レギュラー群については有意な変化がみられなかった。短縮性膝関節屈曲トルクに関して、有意な主

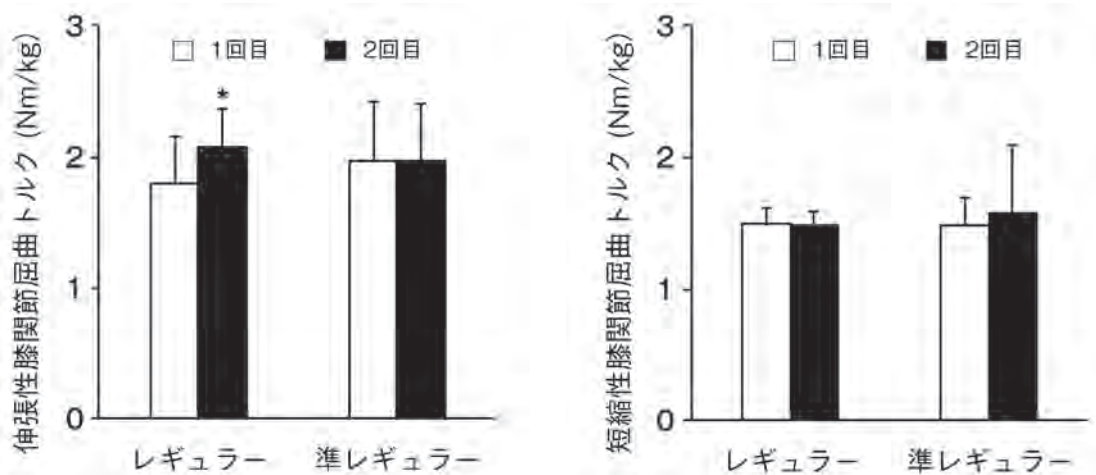


図6 ハムストリングス筋力の結果

※: $P < 0.05$

効果および交互作用のいずれも観察されなかった。

研究期間内に肉離れが生じた選手はいなかった。過去2年間に於いてハムストリングスの肉離れを経験した選手1名と未経験選手の筋力の結果を図7に示す。他の選手と比較して、肉離れを経験した選手の伸張性膝関節屈曲トルクは有意に低かった ($P < 0.001$)。一方、短縮性膝関節屈曲トルクには有意差はみられなかった ($P = 0.080$)。

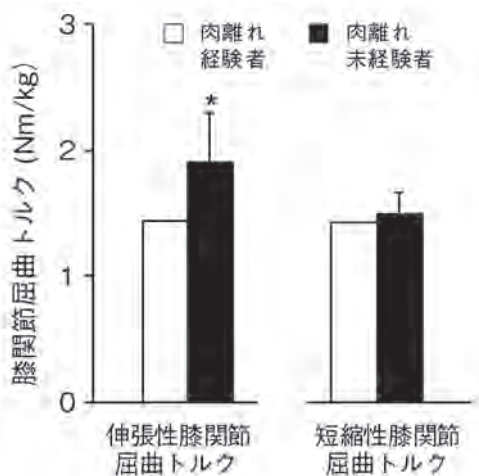


図7 肉離れ経験者と非経験者の比較

※: $P < 0.05$

4. 考 察

ベースラインにおいて、ハムストリングス伸張性筋力はレギュラー群と準レギュラー群間で差がなかったものの、3カ月の競技トレーニングにより、レギュラー選手はハムストリングス伸張性筋力が増加した。さらに、過去2年以内に肉離れ経験がある選手のハムストリングス伸張性筋力は、肉離れ未経験選手と比較して有意に小さかった。一方、ハムストリングス短縮性筋力については、いずれの群においても有意な変化がみられず、肉離れ経験の有無も大小関係に影響しなかった。以上の結果は、ノルディックハムストリング時に計測されるハムストリングス伸張性筋力が、競技力や肉離れの経験と関連することを示唆している。

ハムストリングス伸張性筋力の変化は、レギュラー群と準レギュラー群で異なり、3カ月後の計測では、レギュラー群のみ有意に増加した。本実験の参加者は同一チームに所属しており、競技トレーニングメニューの違いが群間差につながった可能性は考えにくい。7人制ラグビーは、15人制と比較して人数が半分以下でありながら、同じ大きさのフィールド (約70 m × 100 m) を利用する。また、前後半7分という短い時間で勝負を決する

特徴があり、高い疾走速度で短距離を駆け抜ける機会が多いと考えられる。陸上競技短距離選手において、発達したハムストリングスが観察されている¹⁾。レギュラー群においては、高い疾走強度でトレーニングを積むことができ、ハムストリングス伸張性筋力の変化における群間差として現れたのかもしれない。また、ノルディックハムストリングトレーニングにより、男子サッカー選手の10m走のタイム⁸⁾や方向転換のタイム⁹⁾が向上したことが報告されている。ラグビーでは、急加速や急停止が多いことから¹⁰⁾、疾走能力や方向転換能力は重要視される能力である。本研究では、走タイムの変化や方向転換タイムを計測していないが、レギュラー選手においては、ハムストリングス伸張性筋力の向上とともに、これらの能力も練習を通じて向上し、レギュラー選手として活躍の機会を得ているのかもしれない。この点については、今後のさらなる研究が必要である。

肉離れ経験がある選手のハムストリングス伸張性筋力は、未経験者のそれよりも有意に小さかった。一方、ハムストリングス短縮性筋力には有意差がみられなかったことから、ハムストリングス短縮性筋力の大小は、肉離れの経験とは関連しないと考えられる。男子サッカー選手において、ハムストリングス伸張性筋力が低いことがハムストリングス肉離れのリスクであることが報告されている⁴⁾。また、肉離れ経験のある男子ラグビー選手において、健側と患側のハムストリングス伸張性筋力を比較したところ、患側で有意に低かった¹¹⁾。本研究の結果は、先行研究の結果を支持するものであり、男子選手だけではなく、女子選手においても、ハムストリングス伸張性筋力が低いことが、ハムストリングス肉離れの経験と関連することを示唆する。ただし、本研究に参加した対象者は、研究実施期間において、その後ハムストリングス肉離れを発症しなかった。よって、女子ラグビー選手において、ハムストリングス伸張性

筋力が低いために肉離れを発症するという、因果関係に言及することは難しい点に留意する必要がある。

5. 結 論

本研究では、7人制女子ラグビー選手を対象として、ハムストリングス筋力と競技力およびハムストリングス肉離れの関連を検討した。本研究の結果、3カ月の競技トレーニングにより、レギュラー選手において、ノルディックハムストリングを実施したときに計測される伸張性膝関節屈曲筋力が向上した。一方、準レギュラー選手においては、伸張性膝関節屈曲筋力に変化がみられなかった。肉離れ経験がある選手は、未経験選手よりも伸張性膝関節屈曲筋力が低かった。このような結果は、短縮性膝関節屈曲筋力においては観察されなかった。以上のことから、ハムストリングス伸張性筋力は競技力およびハムストリングス肉離れの経験と関連することが示唆された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Ema R., Sakaguchi M., Kawakami Y., Thigh and psoas major muscularity and its relation to running mechanics in sprinters., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **50** (10): 2085-2091 (2018)
- 2) Ema R., Wakahara T., Yanaka T., Kanehisa H., Kawakami Y., Unique muscularity in cyclists' thigh and trunk: A cross-sectional and longitudinal study., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **26**(7): 782-793 (2016)
- 3) 大垣亮, 大竹源人, 中根聡子, 小笹由希子, 菅野陽介, 村上大記, 谷川聡, 竹村雅裕, 男子大学生ラグビー選手における肉離れの疫学調査., 日本アスレティックトレーニング学会誌, **5**(2): 123-132 (2020)
- 4) Timmins R.G., Bourne M.N., Shield A.J., Williams

- M.D., Lorenzen C., Opar D.A., Short biceps femoris fascicles and eccentric knee flexor weakness increase the risk of hamstring injury in elite football (soccer): a prospective cohort study., *Br. J. Sports Med.*, **50**(24): 1524–1535 (2016)
- 5) Ema R., Kawaguchi E., Suzuki M., Akagi R., Plantar flexor strength at different knee positions in older and young males and females., *Exp. Gerontol.*, **142**:111148 (2020)
 - 6) Ema R., Wakahara T., Hirayama K., Kawakami Y., Effect of knee alignment on the quadriceps femoris muscularity: Cross-sectional comparison of trained versus untrained individuals in both sexes., *PLoS One*, **12**(8): e0183148 (2017)
 - 7) Fuller C.W., Taylor A., Douglas M., Raftery M., Rugby World Cup 2019 injury surveillance study., *S Afr. J. Sports Med.*, **32**(1): v32i1a8062 (2020)
 - 8) Ishøi L., Hölmich P., Aagaard P., Thorborg K., Bandholm T., Serner A., Effects of the Nordic Hamstring exercise on sprint capacity in male football players: a randomized controlled trial., *J. Sports Sci.*, **36**(14): 1663–1672 (2018)
 - 9) Siddle J., Weaver K., Greig M., Harper D., Brogden CM., A low-volume Nordic hamstring curl programme improves change of direction ability, despite no architectural, strength or speed adaptations in elite youth soccer players., *Res. Sports Med.*, **32**(1): 49–60 (2024)
 - 10) Harper D.J., Carling C., Kiely J., High-intensity acceleration and deceleration demands in elite team sports competitive match play: A systematic review and meta-analysis of observational studies., *Sports Med.*, **49**(12): 1923–1947 (2019)
 - 11) Bourne M.N., Opar D.A., Williams M.D., Shield A.J., Eccentric knee flexor strength and risk of hamstring injuries in rugby union: A prospective study., *Am. J. Sports Med.*, **43**(11): 2663–2670 (2015)

加齢による運動時の昇圧応答メカニズムの解明： 内臓血管応答に着目して

名古屋大学大学院 塩澤 華奈
(共同研究者) 名古屋大学 石田 浩司
県立広島大学 鍛島 秀明
同 遠藤(山岡)雅子
名古屋大学 片山 敬章

Effects of Age-Related Blood Pressure Response During Exercise: Focus on Splanchnic Blood Flow

by

Kana Shiozawa
*Graduate School of Medicine,
Nagoya University*
Koji Ishida, Keisho Katayama
Nagoya University
Hideaki Kashima, Masako Yamaoka Endo
Prefectural Hiroshima University

ABSTRACT

During dynamic exercise, blood flow to active muscles increases, while blood flow to inactive organs, such as inactive limbs and splanchnic organs, decreases. At resting conditions, the splanchnic region and renal receive about 50% of cardiac output, while this is reduced to 20-25% of basal values during maximal dynamic exercise. Differences in splanchnic blood flow during exercise have been observed between younger and older males. However, to our knowledge, no data exist on age-related

differences in splanchnic blood flow during dynamic exercise in females. This study aimed to elucidate the effects of aging in females on arterial blood pressure and celiac artery blood flow responses during light-intensity dynamic exercise. Ten young females (YF; 20 ± 2 yrs, mean $\pm$ SD) and ten elderly females (EF; 71 ± 5 yrs) performed dynamic knee-extension and -flexion for 4-min at 30% heart rate reserve. Heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP; automated sphygmomanometer), and celiac artery mean blood flow (celMBF; Doppler ultrasound) were measured continuously during the experiment. HR increased in both groups at the onset of exercise and was maintained throughout the exercise. The increase in HR was larger in the YF than in EF as expected ($+37.3 \pm 5.5$ vs. $+26.0 \pm 5.3$ beats/min, $P < 0.001$). The rise in MAP during exercise was greater in the EF than in YF ($+27.2 \pm 10.3$ vs. $+12.8 \pm 6.9$ mmHg, $P < 0.001$). celMBF decreased during exercise in both groups, with no significant difference between YF and EF (-100.3 ± 64.5 vs. -84.7 ± 68.9 mL/min, $P = 0.61$). Similarly, vascular conductance (celVC; celMBF/MAP) decreased during exercise in both groups, with no significant difference in response between YF and EF (-1.8 ± 1.0 vs. -1.5 ± 0.7 mL/min/mmHg, $P = 0.33$). These results suggest that aging has minimal impact on changes in celiac artery blood flow during light-intensity dynamic exercise in females.

キーワード

加齢, 血流再配分, 動的運動, 内臓血流, 腹腔動脈

Keyword

aging, blood flow distribution, celiac artery, dynamic exercise, splanchnic blood flow

要 旨

本研究では、軽強度の動的運動が腹部内臓領域の血流変化に及ぼす女性での加齢の影響を明らかにすることを目的とした。若齢女性10名 (20 ± 2 歳, 平均値 $\pm$ 標準偏差), 高齢女性10名 (71 ± 5 歳)を対象に、動的膝伸展屈曲運動を30%予備心拍数の運動強度にて4分間行った。心拍数、動脈血圧、腹腔動脈の血流量を連続的に記録した。平均血圧は運動により若齢女性および高齢女性で上昇し、上昇の程度は若齢女性と比べて高齢女性で有意に高値を示した(若齢女性; $+12.8 \pm 6.9$, 高

齢女性; $+27.2 \pm 10.3$ mmHg, $P < 0.001$)。腹腔動脈の血流量は運動開始とともに両群で減少したが、その減少の程度に両群間で有意な差は認められなかった(若齢女性; -100.3 ± 64.5 , 高齢女性; -84.7 ± 68.9 mL/分, $P = 0.61$)。以上の結果から、女性においては、軽強度の動的運動時における腹部内臓領域の血流応答に与える加齢の影響は小さいことが示唆される。

緒 言

運動時には、動脈血圧の維持と活動筋に適切な血流を供給(酸素運搬)するために緻密な循環調

節が行われる。この循環調節の一つに血流再配分がある¹⁻³⁾。これは、非活動肢や腎臓、腹部内臓など非活動部位への血流を制限し、優先的に活動筋へ血流を増加させる調節である^{1,2)}。腹部内臓と腎臓は安静時に心拍出量の約50%の血液が供給されているが³⁾、最大運動時には腹部内臓と腎臓の血流量は安静時の20~25%程度になることが報告されている^{3,4)}。この一過性の運動時の腹部内臓領域の血流量の減少は、交感神経活動の増加に対する腹部内臓領域の末梢血管収縮によるところが大きいと考えられている²⁾。

加齢により動的運動時の動脈血圧の上昇（昇圧応答）が大きくなることが知られている⁵⁻⁷⁾。運動時の過剰な昇圧応答は心血管系や脳血管系疾患の発生リスクを高める^{8,9)}。高齢者でみられる動的運動時の過剰な昇圧応答のメカニズムはいまだ不明な点が多いが、骨格筋内の末梢血管への交感神経活動の増加とそれに伴う末梢血管抵抗の上昇や、内皮依存性血管拡張の低下などが機序として考えられる¹⁰⁾。興味深いことに、加齢による心血管系や血行動態への影響は男性より女性で大きくなることが知られている¹¹⁾。さらに、最大下運動における血圧応答と血管抵抗の上昇は、高齢男性や若齢女性と比べて閉経後の女性で大きくなることが報告されている^{7,9,12)}。この閉経後の女性の運動中の昇圧応答には、非活動肢の骨格筋や腹部内臓領域での交感神経性の血管収縮が関係しているかもしれない¹³⁾。我々の知る限り、女性において動的運動中の腹腔動脈の血流変化に対する加齢の影響を調べた研究はこれまでにない。

本研究では、軽強度の動的膝伸展屈曲運動中の高齢女性と若齢女性における血圧および腹腔動脈血流の応答を明らかにすることを目的とした。我々は、若齢女性に比べて高齢女性では動的運動中の動脈血圧の上昇、腹部内臓領域の血流量の減少および血管コンダクタンスの低下は大きくなると仮説を立てた。

1. 方 法

本研究は名古屋大学総合保健体育科学センター・ヒトを対象とする研究審査委員会に承認され実施した（受付番号：22-03）。すべての対象者には口頭で本研究の目的、方法などを十分に説明し、研究参加の同意を得て実施した。

1. 1 対象者

健康な若齢女性10名（YF； 20 ± 2 歳，平均値 $\pm$ 標準偏差），高齢女性10名（EF； 71 ± 5 歳）を対象とした。若齢女性は正常月経を有する者で，本実験は月経周期の卵胞期初期に実施した。

1. 2 研究進行

対象者は合計2日間実験室へ来室した。測定は22~24℃に調節された実験室にて行った。1日目は、実験に関する詳細な説明を行い、同意書への署名を得たのち、測定装置に慣れさせた。2日目は、軽強度の動的膝伸展屈曲テストを実施した。対象者は前日に激しい運動・飲酒を控えた上で、6時間以上の絶食状態で実験室に来室した。

1. 3 運動様式

運動テストは動的な両膝（交互）伸展屈曲運動とし、自転車エルゴメータ（75XLII, Combi）のクランク（ペダルアーム）と連結された特別仕様の膝伸展屈曲装置を用いた¹⁴⁻¹⁶⁾。足部を装置のヒールカップに固定し、左右交互に膝の伸展屈曲運動を行った。運動時の膝関節角度は伸展時に140度、屈曲時に90度になるようにペダルの高さを調節した。運動強度の調節は、自転車エルゴメータの操作パネルにて行った。

1. 4 運動テスト

まず、対象者は安静状態の5分間のデータを測定し、その後運動強度の決定のために1.5分

程度の運動を行った。運動強度 [30% 予備心拍数；30% heart rate reserve (HRR)] は以下の式を用いて計算した： $0.3 \times (\text{最大心拍数} - \text{安静時心拍数}) + \text{安静時心拍数}$ 。最大心拍数は以下の式で計算した： $208 - 0.7 \times \text{年齢}^{17)}$ 。その後運動テストを、安静3分（ベースライン）、運動4分、の合計7分間行った。運動のピッチは40回/分とし、呼吸数は20回/分とした。安静時および運動中には呼吸数をニューモタコメータ（PN-230, Arco System）を用いて一呼吸ごとによって測定した。心拍数、動脈血圧、腹腔動脈の血流量を連続的に測定した。心拍数は、双極誘導法による心電図より算出し（AB-621, Nihon Kohden）、動脈血圧は右腕に自動血圧測定装置（STBP-780, Colin Medical Instruments）のカフを巻き測定した。腹腔動脈の血流量は、超音波診断装置（Vivid i, GE-Yokogawa Medical System）を用いて、腹腔動脈の血管径と血流速度を、それぞれ超音波 B-mode 法および PW 法により測定した。測定にはコンベックス型プローブを用いた（4C-RS, GE-Yokogawa Medical System）。測定では、動脈に対して60度以下の角度でプローブを固定したうえで、血管長軸方向の横断画像と血流速度を同時にかつ連続的に測定した。得られた画像および流速波形は、ビデオキャプチャユニット（DVI2USB3.0, ARGO）を通じて、サンプリング周波数40Hzにてコンピュータに取り込んだ。解析は画像解析ソフト（T.K.K5814 Ver. 2.2.5, Takei Scientific Instruments Co., Ltd）を用いて行い、腹腔動脈の血管径および血流速度から腹腔動脈の平均血流量（mean blood flow; celMBF）を算出した。平均血流量の算出には以下の式を用いた：平均血流速度 $\times \pi \times (\text{血直径}/2)^2 \times 60$ 。末梢血管収縮の程度の指標となる血管コンダクタンス（celVC）は平均血流量を平均血圧で除すことで算出した。測定はすべて1分ごとの平均とし、安静時は3分のデータのうち後半の2分の平均を算出した。ま

た運動1分目は後半30秒のデータを平均し、それ以外の2～4分目のデータは1分ごとに平均した。YFとEFにおいて安静時のデータに差が見られたため、循環・血流パラメータは安静時からの変化量（ Δ ）を算出し2群を比較した。

1. 5 統計解析

測定値を平均値 $\pm$ 標準偏差で示す。すべての測定値は Shapiro-Wilk の検定を用いて、正規および非正規性を確認した。身体特性、運動負荷、安静データの YF と EF の比較には、正規分布が認められた際には対応のない t 検定、正規分布が認められなかった際には Mann-Whitney の U 検定を用いた。運動中の呼吸・循環パラメータの時間経過に伴う平均値の YF と EF のデータの検定には、二元配置分散分析-反復測定を用い、交互作用および主効果（グループ、時間）の有無を検定した。二元配置分散分析により交互作用が認められた場合、グループの要因には Bonferroni 法での Post hoc 検定を実施した。有意水準は危険率5%とした。

2. 結果

2. 1 身体特性

YF と EF の身長と体重に有意な差は認められなかった（YF； $156.6 \pm 4.5\text{cm}$, $49.3 \pm 5.9\text{kg}$, EF； $153.9 \pm 3.8\text{cm}$, $47.4 \pm 5.2\text{kg}$ ）。

2. 2 ベースラインデータ

安静時の呼吸数に YF と EF に差は見られなかった（表1）。心拍数は2群間に有意な差は認められなかったが（表1）、動脈血圧は YF に比べて EF で有意な高値が認められた（表1）。安静時の血流速度と血管径は YF と EF で差は見られなかったが（表2）、celMBF と celVC は YF に比べて EF で有意に低値を示した（表2）。

表1 運動テスト中の呼吸・循環パラメータの変化

	グループ	ベースライン	運 動				二元配置分散分析- 反復測定
			1分	2分	3分	4分	
fb	若齢女性	13.8±3.1	20.2±1.7	20.7±2.0	19.8±1.5	20.8±1.8	F=1.8, P=0.144
(回/分)	高齢女性	11.9±2.1	20.2±2.7	20.7±1.5	20.9±2.0	20.2±1.9	
HR	若齢女性	70.2±6.8	100.3±7.8*	105.0±4.6*	105.9±6.5*	107.5±5.0*	F=9.5, P<0.001
(拍/分)	高齢女性	72.4±8.3	91.6±10.0	94.8±8.6	96.3±6.6	98.4±6.0	
SBP	若齢女性	108.6±8.3*	114.2±12.5*	124.9±9.6*	129.4±11.7*	130.9±8.9*	F=9.1, P<0.001
(mmHg)	高齢女性	122.5±11.3	138.0±17.1	160.4±19.4	169.0±22.8	173.3±20.0	
ΔSBP	若齢女性	0.0±0.0	5.6±8.5*	16.3±6.1*	20.8±9.5*	22.3±8.5*	F=9.1, P<0.001
(mmHg)	高齢女性	0.0±0.0	15.5±14.6	37.9±20.5	46.5±21.6	50.8±18.4	
DBP	若齢女性	66.9±7.7	65.1±11.9*	73.4±10.8*	77.1±12.8*	75.0±8.7*	F=3.2, P=0.018
(mmHg)	高齢女性	76.0±11.6	85.7±17.9	88.1±12.1	90.9±13.4	91.2±12.1	
ΔDBP	若齢女性	0.0±0.0	-1.8±8.5*	6.5±6.4*	10.2±8.6*	8.1±7.6*	F=3.2, P=0.018
(mmHg)	高齢女性	0.0±0.0	9.7±10.9	12.1±5.8	14.9±5.2	15.2±7.2	
MAP	若齢女性	80.8±6.4*	81.5±9.5*	90.6±8.8*	94.5±9.5*	93.6±7.8*	F=5.8, P<0.001
(mmHg)	高齢女性	91.5±11.0	103.3±16.5	112.3±12.3	117.1±14.3	118.7±13.5	

平均値±標準偏差。fb, 呼吸数; HR, 心拍数; SBP, 収縮期血圧; DBP, 拡張期血圧; MAP, 平均血圧; Δ, ベースラインからの変化量。* P<0.05 vs. 高齢女性。

表2 運動テスト中の腹腔動脈血流パラメータの変化

	グループ	ベースライン	運 動				二元配置分散分析- 反復測定
			1分	2分	3分	4分	
MBV	若齢女性	35.5±4.8	26.7±4.1	26.0±3.7	26.2±3.8	27.1±5.6	F=0.4, P=0.798
(cm/秒)	高齢女性	32.4±4.1	24.5±1.8	24.4±2.0	24.2±2.3	24.1±2.7	
ΔMBV	若齢女性	0.0±0.0	-8.8±4.7	-9.5±4.3	-9.3±4.3	-8.4±5.1	F=0.4, P=0.798
(cm/秒)	高齢女性	0.0±0.0	-8.0±3.4	-8.0±3.8	-8.2±4.4	-8.3±5.1	
Diameter	若齢女性	0.5±0.0	0.5±0.0	0.5±0.0	0.5±0.0	0.5±0.0	F=1.7, P=0.150
(mm)	高齢女性	0.5±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1	
ΔDiameter	若齢女性	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	F=1.7, P=0.150
(mm)	高齢女性	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	
celMBF	若齢女性	413.8±91.2*	322.6±57.7	316.7±70.0	320.0±62.6	321.1±77.8	F=0.7, P=0.606
(mL/分)	高齢女性	336.1±100.9	245.6±67.2	248.1±69.4	246.1±72.2	247.8±70.7	
celVC	若齢女性	5.3±1.3*	3.9±0.7	3.5±0.8	3.4±0.8	3.5±0.9	F=1.2, P=0.332
(mL/分/mmHg)	高齢女性	3.6±1.0	2.4±0.8	2.2±0.7	2.1±0.7	2.1±0.7	

平均値±標準偏差。MBV, 平均血流速度; Diameter, 血管径; celMBF, 平均血流量; celVC, 血管コンダクタンス; Δ, ベースラインからの変化量。* P<0.05 vs. 高齢女性。

2. 3 運動データ

運動負荷: 30%HRRでの運動負荷はYF (21 ± 7W) がEF (14 ± 7W) に比べて有意に高値を示した (P=0.031)。

呼吸パラメータ: 運動テスト時の呼吸数は2群間に有意な差は認められなかった (表1)。

循環・血流パラメータ: 表1, 図1に動的運動テストにおける循環応答を示す。運動中の心拍数および収縮期血圧, 拡張期血圧, 平均血圧は2群とも運動前のベースラインと比較して有意に上昇した (表1, 図1A, 1B)。運動中の心拍数はEFに比べてYF, 動脈血圧はYFに比べてEFで有意

に高値を示した (表1, 図1A, 1B)。運動開始直後に腹腔動脈の血流速度は両群とも減少し, 運動中はその低下が維持されたが, 低下の程度に2群間で有意な差は見られなかった (表2)。血管径は, 運動テストを通して変化せず, 2群間に有意な差は認められなかった (表2)。celMBFおよびcelVCは運動によりYFおよびEFとも低下したが, その低下の程度に2群間で差は見られなかった (図1C, 1D)。

3. 考 察

本研究では, 軽強度の動的膝伸展屈曲運動中の

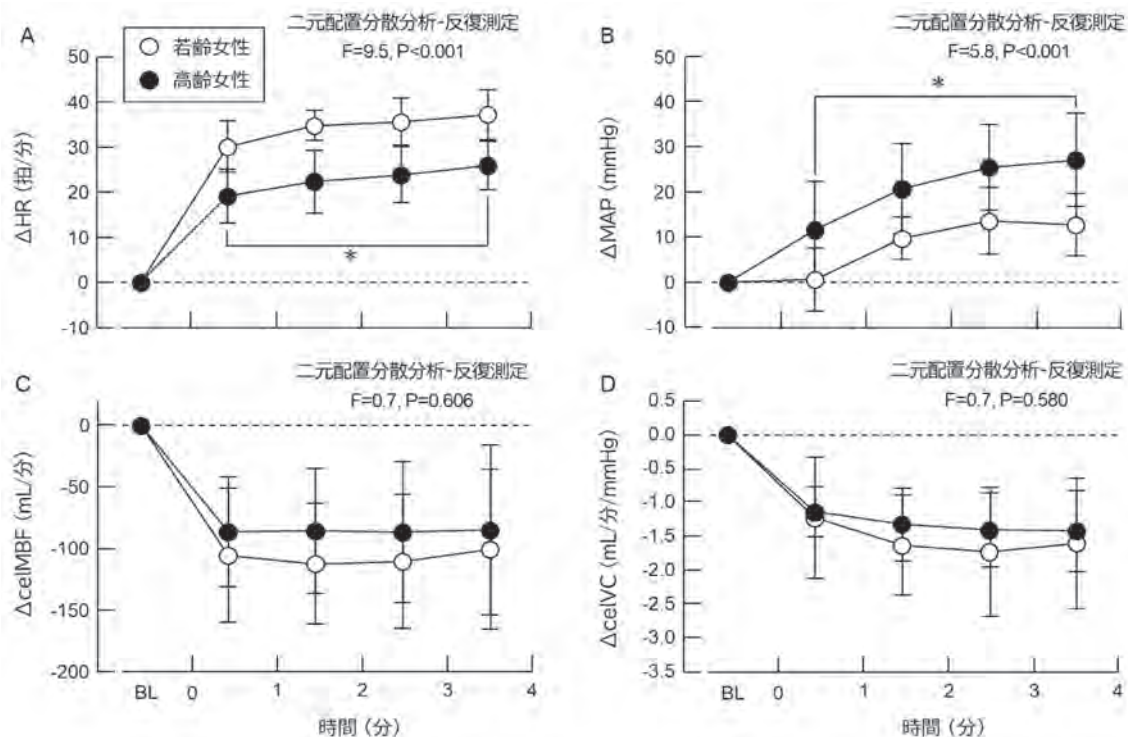


図1 運動テスト時のベースライン変化量

(A)HR, 心拍数, (B)MAP, 平均血圧, (C)celMBF, 腹腔動脈平均血流量, (D)celIVC, 腹腔動脈血管コンダクタンス
 平均値±標準偏差. BL, ベースライン. *P<0.05 若齢女性 vs. 高齢女性

血圧上昇はYFに比べてEFで大きく, celMBFおよびcelIVCに両群間で差が認められなかった. 以上の結果から, 軽強度の動的下肢運動中の女性の加齢における腹部内臓領域の血行動態への影響は小さく, 内臓血管収縮が若齢者と高齢者で異なる昇圧応答に与える影響は小さいことが示唆される.

EFはYFと比較して安静時の血圧が高く, 動的運動中の血圧の上昇が大きいことがよく知られている^{7,9,12)}. 本研究においても安静時の平均血圧および運動中の血圧の上昇はYFよりEFで高値を示した(表1, 図1B). 我々は, EFでみられる運動中の血管抵抗の上昇に内臓血管における交感神経性の末梢血管収縮が関係しているのではないかと仮説を立て, 動的運動中の腹腔動脈血流を測定し, EFとYFの応答を比較した. 先行研究で

は, 性別に関わらず安静時の腹腔動脈の血流速度は若齢者と高齢者で差がなかったとの報告がある¹⁸⁾. 同様に, 我々の研究においても安静時のcelMBFはYFとEFで差は見られなかった(表2). また, 表2に示すように安静時のEFのcelIVCはYFより低く, EFでは安静時の内臓血管床における交感神経性の末梢血管収縮が高いことが推測される. 動的運動時には腹部内臓領域や腎臓の血流量が減少することがよく知られている²⁾. 本研究でもEFとYFで軽強度動的運動中にcelMBFおよびcelIVCが減少したが, ベースラインから運動時の変化量にはYFとEFで差は見られなかった(図1C, 1D). これらの結果から, 女性における軽強度の下肢動的運動中の腹腔動脈の血行動態反応には加齢の影響は小さいことが示唆される.

急性運動時の腹腔動脈血流は主に交感神経性の

末梢血管収縮によって調節されることが知られている¹⁹⁾。ヒトの研究では、電気刺激による不随意な上腕二頭筋の収縮は腎血管収縮を引き起こしたが、同じ仕事量での随意的な収縮では腎血管収縮は引き起こされなかったことが報告されている²⁰⁾。このことから、血圧上昇時の腎血管収縮には、筋機械受容器反射と、筋原性血管収縮の両方が関与していることが示唆される²⁰⁾。交感神経性の末梢血管収縮の指標となるcelVCの低下は、YF、EFともに下肢運動開始直後に起こり、運動中もその低下が継続した(図1D)。運動は軽強度で短時間であったため、筋代謝受容器反射の影響は軽微であると推測される。したがって、セントラルコマンドおよび筋機械受容器反射を介した内臓血管の交感神経性血管収縮は、女性の加齢の影響を受けにくいと推測される。腹部内臓領域の末梢血管収縮に影響を及ぼす可能性のある他のメカニズム(筋代謝受容器反射、動脈圧反射、心肺圧受容器反射)を含め、この仮説を明らかにするためには更なる研究が必要である。

EFではYFと比較して下肢運動中の血圧上昇が大きかったが、この差は運動中のcelVCの低下を伴うものではなかった。このことは、EFにおける動的な下肢運動中の過剰な血圧上昇は、内臓動脈における交感神経性の末梢血管収縮の増大によるものではないことを示唆している。しかし、この考察にはいくつかの注意すべき点がある。Endoら²¹⁾は、低強度の下肢自転車運動中に腎動脈と脾動脈の血流速度は低下するが、上腸間膜動脈の血流速度は変化しなかったことを明らかにしている。したがって、腹腔動脈以外の腹部動脈の動的運動に対する血流応答は、EFとYFで異なることも考えられる。さらに、運動に対する心血管系および血行動態の反応には、個人差が大きいことが知られている。我々の知る限りでは、YFおよびEFにおける運動中の腹腔動脈血流の個人差に寄与する因子(身体活動や運動能力)は明らか

にされていない。EFの動的運動中における昇圧応答について腎動脈や内臓血管収縮以外に考えられる機序として、非活動肢骨格筋内の交感神経性末梢血管収縮が大きくなることが考えられる。これは、閉経前の女性では β アドレナリン受容体が α アドレナリン作動性血管収縮の伝達を相殺するが、閉経後の女性ではこの機能がないためである²²⁾。もう一つの要因としては、加齢にともなう女性の血中エストロゲン濃度の低下である。Joynerら²³⁾は、エストロゲンが血圧調節の主な調節因子であることを示唆している。したがって、加齢にともなうエストロゲン濃度の低下も、女性の動的運動時の加齢にともなう昇圧応答の変化を引き起こす要因の一つであると推測される。これらは非活動筋への血管に対しての報告であるが、内臓の血行動態についても同じことが言えるかもしれない。

4. まとめ

本研究では、軽強度動的運動中の血圧の上昇はYFに比べてEFのほうが大きい^が、腹腔動脈の血流量および血管コンダクタンスの減少の程度はYFとEFで差はみられなかった。これらの結果から、女性における加齢は、軽強度動的運動時の腹部内臓領域の血行動態へ与える影響は小さく、若齢女性と高齢女性の運動時の昇圧応答の違いに腹部内臓領域の血管収縮が与える影響は小さいことが示唆される。

謝 辞

本研究を行うにあたり、吉岡弘様、加納亜衣子様(千種区社会福祉協議会)に多大な協力を得ました。深謝いたします。最後に、本研究に助成いただきました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に御礼申し上げます。

文 献

- 1) R. B. Armstrong, M. D. Delp, E. F. Goljan, M. H. Laughlin. Distribution of blood flow in muscles of miniature swine during exercise., *J. Appl. Physiol.* (1985). , 62:1285-98(1987)
- 2) M. H. Laughlin, M. J. Davis, N. H. Secher, J. J. van Lieshout, A. A. Arce-Esquivel, G. H. Simmons, S. B. Bender, J. Padilla, R. J. Bache, D. Merkus, D. J. Duncker. Peripheral circulation., *Compr. Physiol.*, 2:321-447(2012)
- 3) L. B. Rowell. Human Cardiovascular Control. (1993)
- 4) L. B. Rowell. Regulation of splanchnic blood flow in man., *Physiologist.*, 16:127-42(1973)
- 5) K. Katayama, M. Saito, K. Ishida, K. Shimizu, K. Shiozawa, S. Mizuno, S. Ogoh. Sympathetic vasomotor outflow during low-intensity leg cycling in healthy older males., *Exp. Physiol.*, 107:825-33(2022)
- 6) W. H. Martin, 3rd, T. Ogawa, W. M. Kohrt, M. T. Malley, E. Korte, P. S. Kieffer, K. B. Schechtman. Effects of aging, gender, and physical training on peripheral vascular function., *Circulation.*, 84:654-64(1991)
- 7) T. Ogawa, R. J. Spina, W. H. Martin, 3rd, W. M. Kohrt, K. B. Schechtman, J. O. Holloszy, A. A. Ehsani. Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise., *Circulation.*, 86:494-503(1992)
- 8) J. R. Smith, K. E. Koepp, J. D. Berg, J. G. Akinsanya, T. P. Olson. Influence of Sex, Menstrual Cycle, and Menopause Status on the Exercise Pressor Reflex., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 51:874-81(2019)
- 9) J. D. Trinity, G. Layec, C. R. Hart, R. S. Richardson. Sex-specific impact of aging on the blood pressure response to exercise., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 314:H95-104(2018)
- 10) D. S. DeLorey. Sympathetic vasoconstriction in skeletal muscle: modulatory effects of aging, exercise training, and sex., *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 46:1437-47(2021)
- 11) B. E. Hanson, M. J. Joyner, D. P. Casey. Sex-related differences in rapid-onset vasodilation: impact of aging., *J. Appl. Physiol.* (1985). , 130:206-14(2021)
- 12) J. S. Green, P. R. Stanforth, J. Gagnon, A. S. Leon, D. C. Rao, J. S. Skinner, C. Bouchard, T. Rankinen, J. H. Wilmore. Menopause, estrogen, and training effects on exercise hemodynamics: the HERITAGE study., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34:74-82(2002)
- 13) A. Momen, U. A. Leuenberger, B. Handly, L. I. Sinoway. Effect of aging on renal blood flow velocity during static exercise., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 287:H735-40(2004)
- 14) K. Katayama, K. Goto, K. Shimizu, M. Saito, K. Ishida, L. Zhang, K. Shiozawa, A. W. Sheel. Effect of increased inspiratory muscle work on blood flow to inactive and active limbs during submaximal dynamic exercise., *Exp. Physiol.*, 104:180-8(2019)
- 15) K. Shiozawa, M. Saito, J. B. Lee, H. Kashima, M. Y. Endo, K. Ishida, P. J. Millar, K. Katayama. Effects of sex and menstrual cycle phase on celiac artery blood flow during dynamic moderate-intensity leg exercise in young individuals. *J. Appl. Physiol.* (1985). , 135:956-67(2023)
- 16) K. Shiozawa, K. Shimizu, M. Saito, K. Ishida, S. Mizuno, K. Katayama. Sex differences in blood pressure and inactive limb blood flow responses during dynamic leg exercise with increased inspiratory muscle work., *Nagoya J. Med. Sci.*, 84:782-98(2022)
- 17) H. Tanaka, K. D. Monahan, D. R. Seals. Age-predicted maximal heart rate revisited., *J. Am. Coll. Cardiol.*, 37:153-6(2001)
- 18) C. L. Sauder, E. E. Conboy, S. A. Chin-Sang, C. A. Ray. Otolithic activation on visceral circulation in humans: effect of aging., *Am. J. Physiol. Renal. Physiol.*, 295:F1166-9(2008)
- 19) N. Iida. Different flow regulation mechanisms between celiac and mesenteric vascular beds in conscious rats., *Hypertension.*, 25:260-5(1995)
- 20) A. Momen, U. A. Leuenberger, C. A. Ray, S. Cha, B. Handly, L. I. Sinoway. Renal vascular responses to static handgrip: role of muscle mechanoreflex., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 285:H1247-53(2003)
- 21) M. Y. Endo, R. Suzuki, N. Nagahata, N. Hayashi, A. Miura, S. Koga, Y. Fukuba. Differential arterial blood flow response of splanchnic and renal organs during low-intensity cycling exercise in women., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 294:H2322-6(2008)
- 22) E. C. Hart, N. Charkoudian, B. G. Wallin, T. B.

Curry, J. Eisenach, M. J. Joyner. Sex and ageing differences in resting arterial pressure regulation: the role of the beta-adrenergic receptors., *J. Physiol.*, **589**:5285-97 (2011)

23) M. J. Joyner, B. G. Wallin, N. Charkoudian. Sex differences and blood pressure regulation in humans., *Exp. Physiol.*, **101**:349-55 (2016)

若年期の運動不足が成年期以降の 認知機能低下をもたらすエピジェネティック機構の解明

筑波大学 土橋 祥平
(共同研究者) 同 松井 崇
順天堂大学 吉原 利典

The Epigenetic Mechanisms of Physical Inactivity During Young Periods on Cognitive Dysfunction in Adulthood

by

Shohei Dobashi, Takashi Matsui
*Institute of Health and Sport Sciences,
University of Tsukuba*
Toshinori Yoshihara
*Graduate School of Health and Sports Science,
Juntendo University*

ABSTRACT

Regular physical activity in early life is linked to lifelong cognitive health, whereas the effects of early-life physical inactivity on future cognitive function remain unknown. In this study, we examined the hypothesis that physical inactivity during childhood affects DNA methylation in the hippocampus, which is retained over time and leads to cognitive decline in adulthood. Four-week-old male Wistar rats were divided into two groups: a control group (CON) and a physical inactivity group (IN). Rats in the IN group were housed in narrow cages with approximately half of the usual floor space to restrict their movement for 8 weeks until 12 weeks of age. After this period, all the rats were housed in standard-sized cages until 20 weeks of

age. The object location task (OLT) was used to assess cognitive function at 19 weeks old. The dorsal hippocampus was collected immediately after the activity restriction intervention (12 weeks old) and 8 weeks after the intervention ended (20 weeks old) for analysis of genome-wide DNA methylation levels (RRBS), RNA-seq, and protein expression levels. The IN group's physical activity decreased to about one-quarter that of the CON group between 4-12 weeks of age. In contrast, there were no significant differences in body weight or food intake throughout the experimental period. The IN group showed poor OLT performance and an increased expression of myelination-related genes and proteins in the hippocampus. However, the expression of these genes was not associated with the changes in DNA methylation induced by early-life physical inactivity. Instead, they are linked to DNA hypomethylation observed only in adulthood. These findings demonstrate that physical inactivity during the young period leads to cognitive decline in adulthood. This may be due to the dysregulation of myelination-related gene expression associated with DNA hypomethylation, a delayed consequence of physical inactivity in childhood.

キーワード

運動不足, 海馬, DNA メチル化, RNA-seq, 認知機能

Keyword

physical inactivity, hippocampus, DNA methylation, RNA-seq, cognitive function

要 旨

本研究の目的は、若年期の運動不足が海馬におけるDNAメチル化状態に変化を及ぼし、成年期の認知機能低下を招くかどうかを検証することであった。ラットを4週齢時に、通常飼育(CON)群と床面積が通常の半分程度の狭いケージで飼育することで活動制限を行う(IN)群に分け、12週齢まで飼育した。12週齢以降は活動制限を解除し、20週齢に至るまで両群通常サイズのケージで飼育を行い、物体位置認識試験を実施した。IN群での物体位置認識試験の成績不良とともに、海馬においてミエリン化に関わる遺伝子とタンパク質の発現が増大した。一方、これらの遺伝子発現は、若年期の運動不足によって誘発されたDNAメチ

ル化が成年期まで保持されたものではなく、成年期にのみ観察されるDNA低メチル化と関連していた。若年期の運動不足は遅発的なDNAの低メチル化とそれに連動したミエリン化関連遺伝子の発現調節障害とともに将来の認知機能低下を招く可能性が示唆された。

緒 言

認知症の患者数は世界中で増加の一途を辿っており、早急に解決すべき健康課題の一つである。認知症の発症メカニズムは未だ十分に解明されていないものの、運動不足がその大きな危険因子として指摘されている¹⁾。マウスを対象に、活動可能範囲を制限した狭小ケージ内で長期間飼育すると、海馬において神経新生に関わる脳由来神経栄

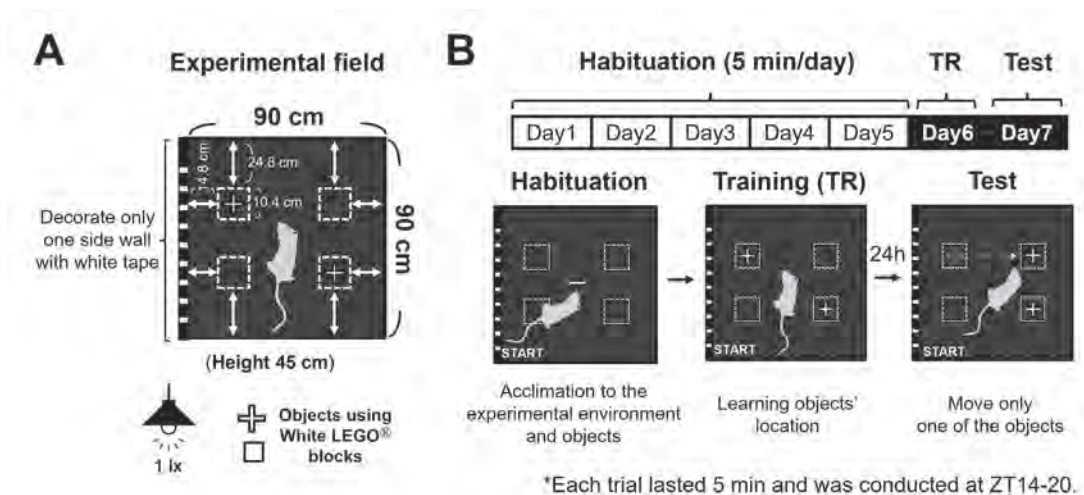


図2 物体位置認識試験の概要. 試験環境(A) および試験スケジュール(B)
ZT: zeitgeber time

1. 2 認知機能評価

空間記憶機能を司る行動試験として, 物体位置認識試験 (object location task: OLT) を用いた. (図2)⁵⁾ 本研究では, 黒色のプラスチック段ボールでオープンフィールド (長さ90 cm × 幅90 cm × 高さ45 cm) を自作した (図2A). 試験に先駆け, オブジェクト (長さ12.8 cm × 幅1.6 cm × 高さ2.2 cm) の白いレゴ®ブロック) をフィールド中央に固定し, 照明を1ルクス未満にした環境下でラットを1日当たり5分間, 5日間連続で行い試験環境への環境馴化を図った (図2B). その後, 環境馴化の際に用いたオブジェクトと同様の白いレゴ®ブロックで構成された十字型の立体オブジェクト (長さ6.5 cm × 幅6.5 cm × 高さ16 cm) を2個作成し, フィールド上の対角上にそれぞれ設置した上で, ラットをフィールド内で5分間自由に行動させた (トレーニング試行). その24時間後に, 片方のオブジェクトの位置を移動させ, 同様にラットをフィールド内に5分間自由に行動させた (テスト試行). OLTは18週齢後半から環境馴化を開始し, 19週齢時後半にテスト試行を実施した.

探索行動中の様子はビデオカメラにより記録した. 先行研究の方法に則り, 動画をコンピュータ上で視認し, 各オブジェクトの末端から2 cm以内に侵入した時間 (探索時間) をコンピュータ上のストップウォッチで記録した⁶⁾. 位置を変更したオブジェクトの探索時間を2種類のオブジェクト両方の探索時間の和で除したものを物体の識別率 (Discrimination index: DI) として算出した⁵⁾. また, 先行研究の基準⁷⁾に従い, トレーニング試行時点でDIが30%未満または70%以上のラット, あるいはトレーニング試行, テスト試行のいずれかで総探索時間が3秒間を下回っていたラットは解析対象から除外した.

1. 3 検体採取

8週間の活動制限介入直後 (12週齢) および活動制限解除8週間後 (20週齢) に, ラットを12時間の食餌制限下で5% イソフルランにより麻酔をかけて安楽死させ, 海馬組織と血液を採取した. 海馬は背側部と腹側部に分類し, 液体窒素で急速凍結した. 血液はヘパリンの入った真空採血管に採取し, 冷却下で遠心分離 (3,000 rpm, 10分間)

を行い、血漿を回収した。いずれの検体もその後の分析まで-80℃で保存した。なお、海馬は背側部が主に空間記憶を司り、腹側部が主に情動を司ることが指摘されていることから、本研究の生化学分析は海馬背側部を中心に実施した。

1. 4 血漿コルチコステロン濃度

血漿中のコルチコステロン濃度は、Corticosterone EIA Kit (YK240, 矢内原研究所, 静岡, 日本) を用いて定量した。

1. 5 RNA-seq

成年期 (20 週齢) のラットから回収した海馬背側部中の Total RNA を RNeasy Plus Mini Kit (QIAGEN) により抽出した。その後、Bioanalyzer (Agilent Technologies) を用いて RNA の品質を確認し、ライブラリー作成および濃度調製を行った上で、NextSeq500/550 High Output Kit v2.5 (75 Cycles) (Illumina) を用いて、NextSeq500 システム (Illumina) での次世代シーケンス解析を行った。シーケンスは 36 基ずつのペアエンドリードで行った。シーケンス後、FASTQ ファイルをエクスポートし、CLC Genomics Workbench 21.0.3 ソフトウェア (QIAGEN) で品質確認を行った上で Transcripts per million (TPM) を取得し群間比較に用いた。各遺伝子の TPM について、対応のない t 検定を用いて群間比較し、偽発見率を調整した上で $p < 0.01$ の遺伝子を発現変動遺伝子 (DEGs) として抽出した。さらに Metascape を用いて DEGs の機能的エンリッチメント解析を行った⁸⁾。

1. 6 タンパク質発現解析

凍結された海馬サンプルに、プロテアーゼ阻害剤を含んだ RIPA バッファー (ナカライテスク, 京都, 日本) 下でホモジナイズしタンパクを抽出した。得られたタンパク質濃度は $2.0 \mu\text{g}/\mu\text{L}$ にな

るよう、4X Bolt™ LDS Sample Buffer (Thermo Fisher Scientific) と 10X Sampling Reducing Agent (Thermo Fisher Scientific) を用いて調整した。その後、全てのサンプルを 70℃ で 10 分間加熱し、分析まで -80℃ で保管した。調製したサンプルをアクリルアミドゲルに各レーンあたり等量のサンプル ($10\text{--}15 \mu\text{g}$) を投入した上で電気泳動を行い、セミドライ法を用いて PVDF メンブレンに転写した。転写後は、EveryBlot ブロッキングバッファー (Bio-Rad) で 20 分間室温ブロッキングを行った後、Tris-Buffered Saline with Tween[®] 20 (TBS-T) で希釈した 1 次抗体を添加し、4℃ で一晩反応させた。用いた抗体は、MBP (1:1000, Medical & Biological Laboratories, PD004), MAG (1:2000, Proteintech, 14386-1-AP), Amyloid β (1:1000, Proteintech, 25524-1-AP), BDNF (1:1000, Abcam, ab108319), NeuN (1:1000, Proteintech, 26975-1-AP), GFAP (1:1000, Proteintech, 16825-1-AP), Synaptophysin (1:1000, Proteintech, 17785-1-AP), GAPDH (1:1000, Cell Signaling Technologies, 97166) であった。反応後、2 次抗体を添加して 1 時間室温で反応させ化学発光試薬を用いて発光させ、標的タンパク質を検出した。各タンパク質発現レベルはローディングコントロールとして検出した GAPDH の発現レベルの相対量として算出し、CON 群の平均値で正規化した。

1. 7 DNA メチル化解析

若年期 (12 週齢) と成年期 (20 週齢) のラットから両方から採取した海馬背側部を対象に、Reduced representation bisulfite sequencing (RRBS) を用いてゲノムワイドな DNA メチル化状態の評価を行った。海馬背側部のゲノム DNA を QIAmp DNA Mini Kit (Qiagen) を用いて抽出した。Zymo-Seq RRBS Library Kit (Zymo Research) を用いて、CpG リッチな領域を濃縮し、ライブラリーを調整した。その後、NovaSeq6000

システムでのシーケンスを行った。シーケシングで得られたデータからRパッケージである methylKit を用いてリードカウントを正規化し、ロジスティック回帰分析で群間比較を行った。その結果、群間のメチル化率の差が25 % 以上かつ調整後p値が0.01未満の領域を変動メチル化領域として抽出した。

1. 8 統計分析

RNA-seqとRRBS以外のデータは平均値±標準偏差で示した。体重と摂餌量の推移は、群と時間経過を要因とした二元配置分散分析で解析した。ケージ内活動量、血漿コルチコステロン濃度、ならびに各タンパク質発現レベルの比較には、対応

のないt検定を行った。OLTの成績変化については、対応のあるt検定を行った。有意水準は危険率5%未満とした。

2. 研究結果

活動制限期間中の活動期の身体活動量はCON群と比較してIN群は約4分の1程度まで減少したが(図3A)、活動制限解除後の身体活動量に群間の差は認められなかった(図3B)。非活動期(明期)の身体活動量は研究期間を通して群間の違いは認められなかった。また研究期間中は体重および摂餌量のいずれも群間の有意差は検出されなかった(図3C, D)。さらに活動制限介入直後(12週齢)、および介入終了8週間後(20週齢)後のい

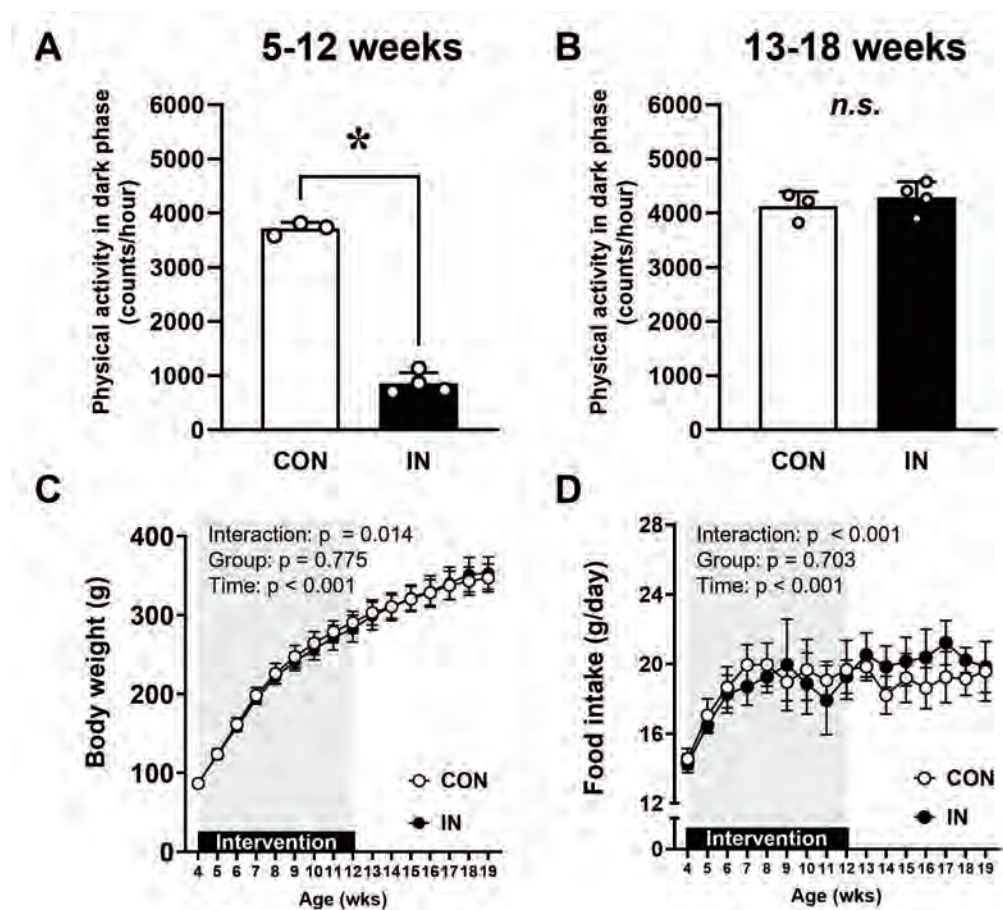


図3 活動制限中 (A) および活動制限解除後 (B) における活動期(暗期)の身体活動量および飼育期間中の体重 (C) と摂餌量 (D) の推移. 平均値±標準偏差

* $p < 0.05$. n.s. not significant

ずれも血漿コルチコステロン濃度について群間の有意差は観察されなかった。

活動制限介入終了7週間後の19週齢時後半に評価したOLTの識別率については、CON群では、トレーニング試行時と比較してテスト試行時に有意な増大が観察された一方で、IN群では有意差は観察されなかった(図4)。

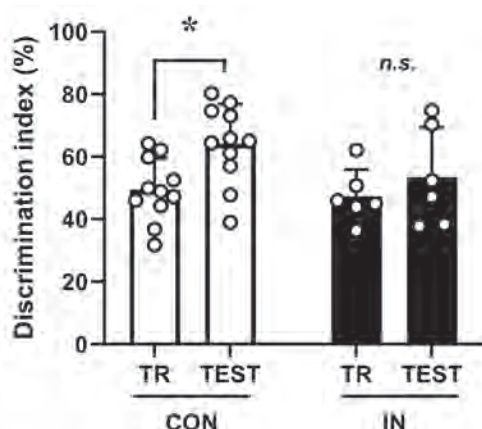


図4 物体位置認識試験の識別率
平均値±標準偏差。* $p < 0.05$ 。

次に、OLTを実施したラットから採取した海馬背側部を対象にRNA-seqを行った。その結果、

CON群と比較してIN群で95種類の遺伝子発現が有意に増大し、20種類の遺伝子発現が有意に減少していることが示された。機能的エンリッチメント解析を行った結果、「ミエリン化 (myelination)」に関わる遺伝子群が顕著に増大していることが観察された。

RNA-seqの結果をもとに海馬におけるミエリン関連タンパク質 (MBP, MAG) の発現レベルを評価したところ、どちらもCON群と比較してIN群で有意な高値を示した(図5)。またアルツハイマー型認知症の発症に関連することが知られているアミロイド β のタンパク質発現レベルも同様にIN群で有意に増大していた。一方で、認知機能に関与することが知られているBDNFや、成熟ニューロン (NeuN)、グリア線維性酸性蛋白 (GFAP)、シナプス小胞膜タンパク質 (Synaptophysin) のタンパク質発現レベルはいずれも群間の有意差は認められなかった。

本研究では、ミエリン化に関わる遺伝子発現が増大し、タンパク質発現もそれに符合していたことから、活動制限介入直後の若年期 (12週齢) と介入終了8週間後の成年初期 (20週齢) に共通して生じていたDNA低メチル化領域と成年期にお

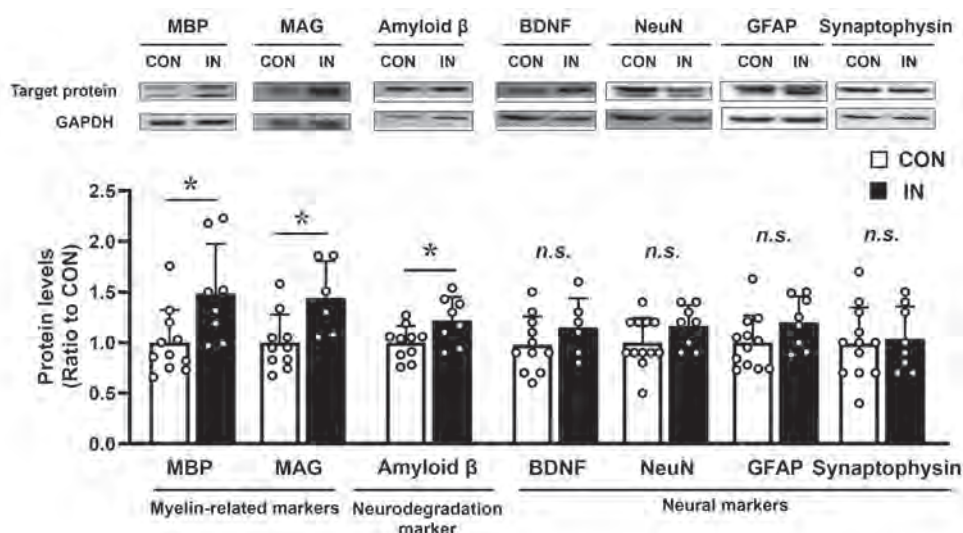


図5 20週齢の海馬サンプルにおけるタンパク質発現レベル
平均値±標準偏差。* $p < 0.05$

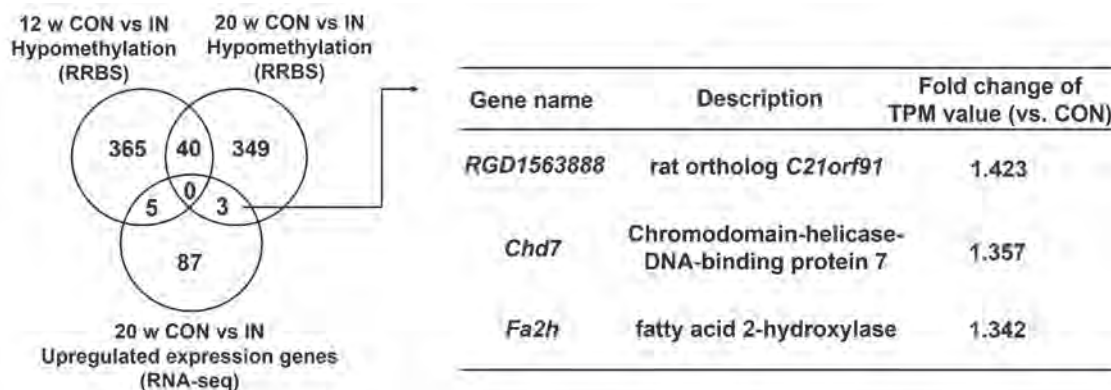


図6 若年期の活動制限によるDNAメチル化の低下に連動して増大する遺伝子の抽出
RRBS, reduced representation bisulfite sequencing. TPM, transcripts per million.

いて増大した遺伝子発現の関連を検討する統合解析を実施した。RRBSの結果、12週齢ではCON群と比較してIN群で411の遺伝子領域のメチル化が減少し、20週齢では393の遺伝子領域のメチル化の減少が観察された。また、12週齢と20週齢で共通して低メチル化状態が観察された領域数は40であった。しかし、RNA-seqで増大が確認された遺伝子の中にこれら40の遺伝子領域の低メチル化と連動したものは存在しなかった(図6)。一方で、成年期のみにおいてIN群による低メチル化が観察された遺伝子領域に連動して発現が増大していた遺伝子が3種類抽出された(*RGD1563888*, *Chd7*, *Fa2h*)。これらの遺伝子はいずれもミエリン化やミエリンの機能に関わる遺伝子であった。

3. 考 察

本研究の結果、活動制限介入を行った若年期にのみ身体活動量が減少したが、活動制限解除の身体活動量や体重、摂食量、ならびに生体に対するストレス応答のバイオマーカーとして知られる血漿コルチコステロン濃度にも群間の違いは認められなかった。これは狭小ケージによる飼育モデルを活用した先行研究^{2, 4)}と同様の結果を示しており、本研究で用いた活動制限が過度な生理的負担

を強いることなく、若年期にのみ運動不足である状態を創出できたものと考えられる。

本研究では活動制限を解除してから8週間後において、IN群でOLTの成績不良が観察された。これは若年期の運動不足の影響が長期にわたり残存し、将来の認知機能低下を招く可能性を示唆する結果であると考えられる。この分子機構に迫るため、RNA-seqを行った結果、IN群では「ミエリン化」に関わる遺伝子発現が増大し、ミエリンのタンパク質発現レベルも増大していた。一般的にはミエリンは加齢などにより消失(脱髄)することで神経信号の伝達機能が低下し、これが認知機能の悪化につながるものと考えられている。しかし最近の研究では、ミエリンの脱髄が進行する前段階でミエリンの肥大が生じ、その段階で認知機能低下が生じていることが報告されている⁹⁾。本研究では組織免疫染色などでミエリン径を直接評価していないものの、ミエリンが過剰に肥大していた可能性が考えられる。また、ミエリンの機能不全がアミロイドβの沈着を増大させることも確認されているが¹⁰⁾、本研究でも同様にIN群でアミロイドβが増大していた。しかし、先行研究²⁾で指摘されているようなBDNFの遺伝子・タンパク質発現変化は本研究では認められなかった。以上のことから、若年期の運動不足は成年期におけ

るミエリンの制御不良に伴う肥大とアミロイド β の増大を介して認知機能低下を引き起こしている可能性が示唆される。

本研究ではさらにゲノムワイドなDNAメチル化解析 (RRBS) を行い, RNA-seq で変化が認められた遺伝子と照合する統合解析を行った。本研究では, 若年期の活動制限によりDNAメチル化状態に変化が生じ, それは成年期になるまで保持されることで遺伝子発現の変化をもたらすものと予想していたが, その予想に反して成年期まで保持されたDNAメチル化領域と関連して変動していた遺伝子は認められなかった。しかしながら, 成年期においてのみIN群で低メチル化状態が観察された遺伝子領域と連動して発現が増大していた遺伝子はいずれもミエリン化やミエリンの機能に関わる遺伝子であった (*RGD1563888*, *Chd7*, *Fa2h*)。特に*RGD1563888* 遺伝子を過剰発現させると, 軸索に関連しない箇所で集積するような, いわゆる機能的ではないミエリンが増大することが報告されている¹¹⁾ ことから, IN群で増大していたミエリンは機能不良に陥っていた可能性があり, IN群での認知機能の悪化と符合する。以上のことから, IN群で観察された認知機能低下のメカニズムに, DNA低メチル化を発端としたミエリン制御異常が関与している可能性が示唆された。

興味深いことに, 若年期の運動不足の影響が即座にDNAメチル化に変動を及ぼしてそれが長期間保持されることで成年期の遺伝子発現に影響を及ぼすのではなく, 加齢変化と相まって遅延して生じる可能性が示唆された。しかしながら, このような変化が生じた原因やその意義については現時点では不明である。エピジェネティクス修飾にはDNAメチル化以外にもヒストン修飾やmicroRNAによる発現調節機構も存在しており, これらの変化が, 成年期におけるDNAメチル化や遺伝子発現に影響を及ぼした可能性は否定でき

ない。今後はこれらの分子機構にも着目しながら, ライフステージに応じたエピジェネティクス機構にも着目していく必要がある。一方で, 活動制限を解除し, 身体活動量が回復してもなおこのような変化が生じたことから, 若年期の運動不足の負の影響は少なくとも日常的な身体活動では相殺することが出来ない可能性が示唆される。今後は, 若年期の活動制限介入後に積極的に運動介入を行うなど, 若年期の運動不足による認知機能低下への対抗策を検討していく必要がある。

4. 結 論

若年期の活動制限は成年期の認知機能低下を招くことが明らかとなった。その背景となる分子機構には, 活動制限解除後に遅延して生じるミエリン関連遺伝子のDNAメチル化レベルの低下と遺伝子・タンパク質発現の増大が関与している可能性が示唆された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また本研究の遺伝子発現網羅解析にあたり多大にご協力いただきました筑波大学医学医療系スポーツ医学研究室菅澤威仁助教に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) World Health Organization. Global status report on physical activity 2022., *World Health Organization*, Geneva (2022)
- 2) Kim J., Park J., Mikami T. Regular Low-Intensity Exercise Prevents Cognitive Decline and a Depressive-Like State Induced by Physical Inactivity in Mice: A New Physical Inactivity Experiment Model., *Frontiers in Behavioral Neuroscience*., **16**, 866405 (2022)
- 3) Gomez-Pinilla F. et al. Exercise impacts brain-derived neurotrophic factor plasticity by engaging

- mechanisms of epigenetic regulation., *European Journal of Neuroscience.*, **33**, 383-390 (2011)
- 4) Yoshihara T. et al. Long-term physical inactivity exacerbates hindlimb unloading-induced muscle atrophy in young rat soleus muscle., *Journal of Applied Physiology.*, **130**, 1214-1225 (2021)
 - 5) Takahashi Y., Sawa K., Okada T. The diurnal variation of performance of the novel location recognition task in male rats., *Behavioral Brain Research.*, **256**, 488-493 (2013)
 - 6) Koizumi H. et al. Preventive role of regular low-intensity exercise during adolescence in schizophrenia model mice with abnormal behaviors., *Biochemical and Biophysical Research Communications.*, **534**, 610-616 (2021)
 - 7) Vogel-Ciernia A., Wood M.A. Examining object location and object recognition memory in mice., *Current Protocols in Neuroscience.*, **69**, 8-31 (2014)
 - 8) Zhou Y. et al. Metascape provides a biologist-oriented resource for the analysis of systems-level datasets., *Nature Communications.*, **10**, 1523
 - 9) McNamara N.B. et al. Microglia regulate central nervous system myelin growth and integrity., *Nature.*, **613**, 120-129 (2023)
 - 10) Depp C. et al. Myelin dysfunction drives amyloid- β deposition in models of Alzheimer' s disease., *Nature.*, **618**, 349-357 (2023)
 - 11) Reiche L. et al. C21orf91 Regulates Oligodendroglial Precursor Cell Fate—A Switch in the Glial Lineage? *Frontiers in Cellular Neuroscience.*, **15**, 653075 (2021)

関節マーカーと 3DMRI を用いた 変形性膝関節症保存療法の個別化治療モニタリング

大阪体育大学	橋 本 祐 介
(共同研究者) 大阪公立大学	西 野 壱 哉
同	飯 田 健
同	荻 久 美
大阪体育大学	前 島 悦 子

The Personalized Conservative Therapeutic Monitoring for Knee Osteoarthritis Using The Biomarker of Cartilage Oligomeric Matrix Protein and 3DMRI

by

Yusuke Hashimoto, Etsuko Maeshima
*Dept. of Sport Sciences,
Osaka University of Health and Sports Science,
Graduate School of Sport Sciences*
Kazuya Nishio, Ken Iida, Kumi Ogi
Osaka Metropolitan University

ABSTRACT

Purpose: Measurement of serum cartilage oligomeric matrix protein (COMP) level is known to be useful for detection and monitoring of cartilage degeneration. The present study examined the impact of physical activity in daily life on cartilage changes in patients with knee osteoarthritis (OA) by the measurement of serum COMP levels with 3D-MRI scanning.

Method: Seven patients with knee OA participated in the present study. Blood

sampling and knee MRI scanning were performed, and serum COMP levels were measured. Clinical scores of Tegner activity scale (TAS), The International Knee Documentations Committee Rating System (IKDC), Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS), and Locomo25 were obtained. Two-step test and measurement of knee extension strength were performed. All measurements above were performed at the start of the study and after the three months observation. During the observation, physical activity such as the daily steps and walking distance were recorded. Participants received treatment including outpatient rehabilitation by a physical therapist during the observation.

Result: All cases involved low-impact sports, and the average number of steps per day was 11,579. While the change in serum COMP levels tended to be negatively correlated with the change in cartilage volume, no correlation was found with other parameters regarding daily living activities, clinical evaluation, or muscle strength.

Conclusion: The present study showed the possibility that the serum COMP levels could be effective even in predicting only a minor change in cartilage degeneration as shown by 3DMRI.

キーワード

変形性膝関節症, 運動療法, 血清COMP値, 軟骨体積, 個別化保存治療モニタリング

Keyword

knee osteoarthritis , exercise therapy, serum COMP, cartilage volume,

Personalized conservative therapeutic Monitoring

要 旨

対象と方法

安定期変形性膝関節症（膝OA）患者の内、本研究に同意を得た7名を対象とした。研究開始時と3ヶ月後に臨床評価、MRI撮像と採血を行い、血清COMP値を測定した。臨床評価、日常の活動指標（1日歩数や距離）、軟骨体積、血清COMP値の相関を検討した。

結 果

すべてlow impact sportsの症例であった。血清COMP値が増えると軟骨体積が減るという負の相

関傾向を認めたが、その他の日常の活動指標、臨床評価、筋力とは相関を認めなかった。自覚的膝臨床評価（KOOS;点数が高い方が成績がよい）の変化量は2ステップテスト（数字が高いほうが機能がよい）の変化量と正の相関、ロコモ25（点数低い方がロコモ度が低い）の変化量と負の相関を認めた。

考察と結論

血清COMP値は早期OA変化を検出できるとされている。本研究においても血清COMP値変化量は軟骨摩耗量を反映しており、軟骨摩耗変化を鋭敏に検出できることが示された。一方、血清

COMPと臨床評価が相関しなかった。本症例はlow impact sportsを行う者に限られ、急速な増悪症例は存在しなかったためと考えられる。

緒 言

変形性膝関節症（膝OA）の有病者数は本邦で1千万人を超えており、社会的に問題となっている。特に、末期膝OA患者では著しく日常生活が制限されるため、手術療法、特に人工関節置換術にならざるを得ない。できることなら予防的に膝OA進行を予防し、健康な日常生活を送ることが出来ることが理想である。手術以外の方法としては、抗炎症作用の内服療法、運動療法などの保存療法が高いエビデンスをもって推奨されているが¹⁾、どの病期でどの程度の運動療法が効果的かの知見はなく、さらにどの強度であれば軟骨変性が進行しないのかも不明である。ロコモティブシンドローム（運動器症候群）は「高齢化にともなって運動機能低下をきたす運動器疾患により、バランス能力 および移動歩行能力の低下が生じ、閉じこもり、転倒リスクが高まった状態」として、日本整形外科学会、日本運動器リハビリテーション学会、日本臨床整形外科学会が2006年4月に定義した。変形性膝関節症もこのロコモティブシンドロームの原因の一つとなっている。さらに、このロコモ状態に陥らないために運動療法が薦められているが、その程度については明らかではない。運動療法には理学療法士の指導下で運動を行う方法と、自ら動くウォーキング、ジョギングなどの日常生活での運動方法がある。WHO（世界保健機関）や米国のCDC（疾病管理予防センター）などの機関では週に150分以上の中程度の有酸素運動、つまり心拍数が上がり、呼吸が速まる程度の運動を行うことが推奨されているが、軟骨状態が不安定な膝関節症に対して、どれだけの歩行ならば膝の状態に問題が生じないかは明らかでない。つまり、今までの膝OAに対する運動療法は疼痛

を改善させることに焦点を合わせて議論されていたが、その治療が疾患の根源である軟骨変性に与える影響は全く検討されていない。そこで、それぞれの病期における最適な運動療法、内服療法の検討が必要であり、そのためにはオーダーメイドのモニタリング技術が必要となる。軟骨を評価する方法としての単純X線での評価は比較的低侵襲で、簡便であるが、膝痛が出現した初期の時点ではまだ単純X線上の変化が出現しておらず、変化が出現するには年単位の期間を要し、軟骨状態を鋭敏に感知出来ない。最近低侵襲で軟骨変性変化をとらえることができるツールとしてMRIと血液マーカーが開発されている²⁾。T2マッピングというMRI技術の進歩によって軟骨内部の変化をとらえられるようになってきたが、2次元的な解析しか出来ないために、視覚的にも全体像を把握するには困難である。一方、近年軟骨計測ソフトが開発され、視覚的に軟骨変性部位が同定でき、即時的に軟骨体積が計算され簡便である（図1）。また、採血下で測定できる軟骨代謝マーカーの血清cartilage oligomeric matrix protein (COMP) 値は侵襲の少ない、安価な検査として簡便で有力なツールである³⁾。COMPは軟骨特異的に発現している非コラーゲタンパク質で、膝OAの重症度とCOMP値に高い相関があることが報告されている⁴⁾。我々は重症度が軽度な前十字靱帯損傷患者の血清COMP値を計測し、MRIの軟骨評価（Whole-Organ Magnetic Resonance Imaging Score）及び関節鏡による重症度（International Cartilage Repair Society分類）と相関している知見を報告しており^{5,6)}、血清COMP値の測定は膝OAの軟骨状態をモニタリングできるツールになりえると考えた。よって、上記の血清COMP値と3DMRIによる軟骨体積を用いて、軟骨状態を鋭敏に検出できる可能性を考えた。よって、本研究では症状が安定しており保存療法を行っている膝OA患者に対して日常生活強度を含めた軟骨評価を行い、運

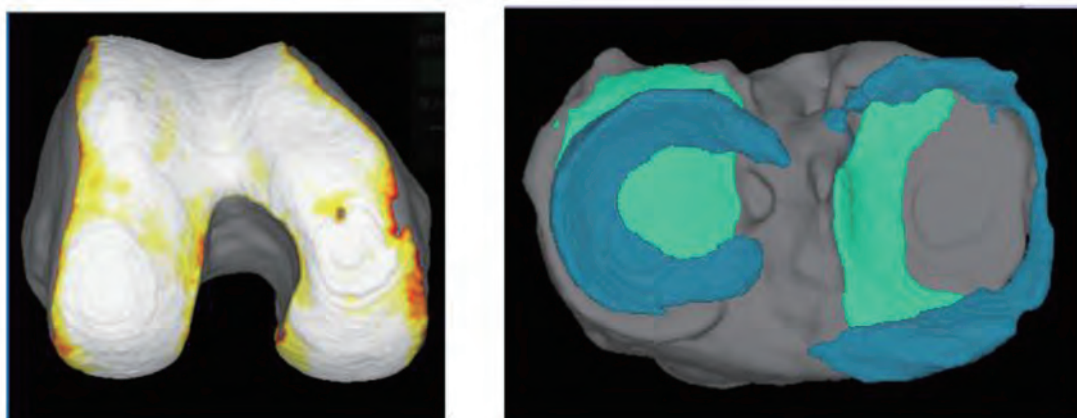


図1 FUJI FILM SYNAPSE VINCENTの膝関節解析ソフトによる膝軟骨半月板描出
軟骨の厚さを色識別できる(左図), 半月板と軟骨欠損との関係(右図)
※SYNAPSE VINCENTは富士フイルム株式会社の登録商標です。

動強度と軟骨状態の関係, 臨床成績に関与する因子を探索することとした。

1. 研究方法

大阪公立大学医学部附属病院整形外科を受診され, 片膝OAで症状が安定し保存療法を希望された患者の内, 本研究について同意が得られた7例を対象とした。研究開始時に体格, 単純X線, MRI, 採血, 臨床評価, 筋力評価を行った。単純X線は膝3方向と下肢全長を撮像し, Kellgren-Lawrence (K-L) 分類に基づき, 各参加者をI (疑い) /II (初期) /III (進行期) /IV (末期) に分類した。MRIは3テスラのMRI機器 (Philips 社) で撮像し, 軟骨評価ソフト (FUJIFILM) を用いて軟骨体積を計測した (図2)。採血では血算, リウマチ因子, CRPを測定し, 関節リウマチ症例を除外し, 血清COMP値をELISA法 (Human COMP Quantikine ELISA kit, R&D, USA) で測定した。通常膝OAではCRPは陰性である。臨床評価はTegner activity scale (TAS), The International Knee Documentations Committee Rating System (IKDC)⁷⁾, Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS)⁸⁾, ロコモ25を用いた。IKDCは主にスポーツ活動性における膝機能の主観的評価であり上限100点下限0点で高値の方が膝の状態が良い

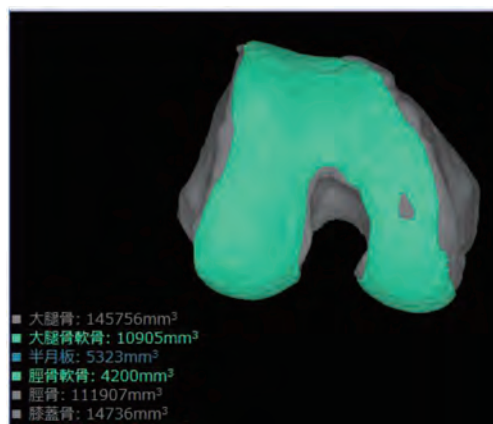


図2 膝関節解析ソフトによる軟骨体積算出
軟骨体積が自動計算される

ことを示す。KOOSは膝に関する自覚症状を初め, 日常生活やスポーツ活動, 生活の質などに与える膝の影響を尋ねる自記式質問票であり, 上限500点, 下限0点で高値の方が膝の状態が良いことを示す。IKDCとKOOSの使い分けはスポーツレベルによって評価困難となることがあるため, 両方を用いた。筋力評価としては日本整形外科学会が推奨している立ち上がりテスト, 2ステップテスト, 膝伸展筋力を測定できるロコモスキャン (アルケア社) を用いた (図3:a, b, c)。ロコモスキャンは健側, 患側共に2回計測し, 各側の最大筋力 (N) を採用した。さらにロコモスキャンの計測値に対して健患比 (% ; 患側/健側x100) と体重比

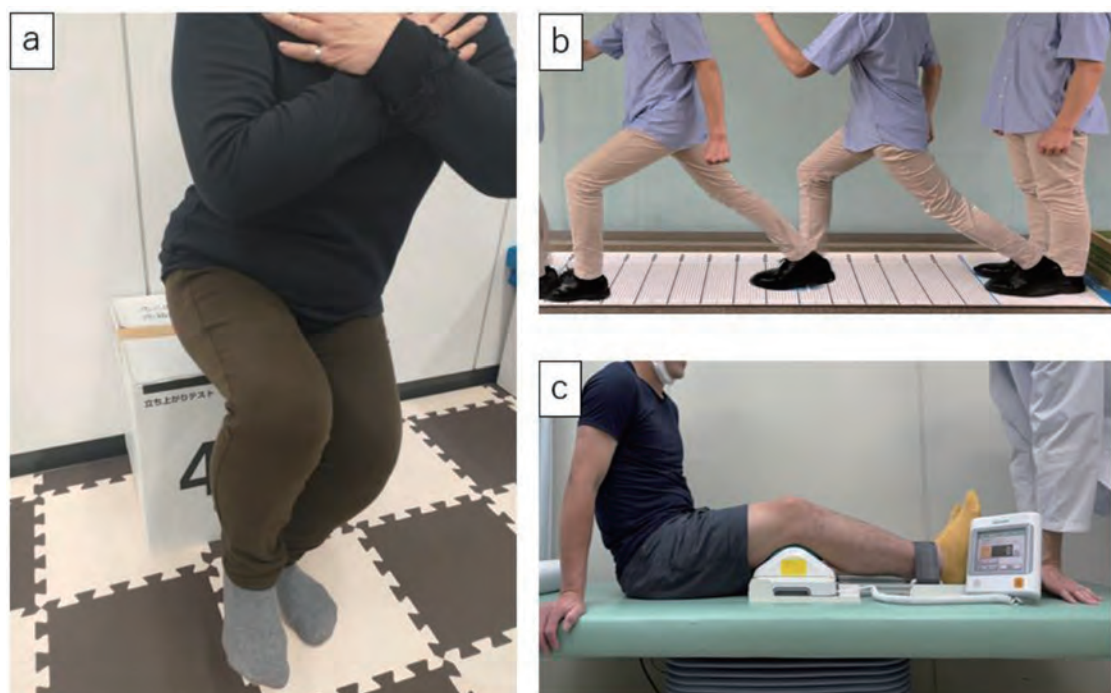


図3 ロコモ度を評価するテスト, 筋力評価
a:立ち上がりテスト, b:2ステップテスト, c:ロコモスキャンによる伸展筋力評価

(スキャン計測値 (N) / 体重 kg) を算出した。保存療法としては通院リハビリテーションを行い、ストレッチ、可動域訓練、筋力訓練を行った。疼痛が強い場合は内服もしくはヒアルロン酸注射を行った。日常生活量の評価としては、日常生活活動記録デバイスである Fitbit (google 社) を常時着用し、日常生活活動レベル (歩数、歩行距離) を 3 ヶ月の観察期間中、毎日記録し、歩数と距離に関して 1 日平均を各々求めた。研究開始後 3 ヶ月時点で、単純 X 線、MRI、採血、臨床評価、筋力評価を再度行った。

統計は研究開始、研究開始後 3 ヶ月でのそれぞれの値に対して Paired-t 検定を用いて 2 群比較した。研究開始から開始後 3 ヶ月の COMP 変化量、KOOS 変化量と各項目との相関を Pearson もしくは Spearman の相関係数を用いて算出した。いずれの変化量も、(3 ヶ月後) 値 - (研究開始時) 値 (つまり後値 - 前値) として計算した。

なお、本研究は大阪公立大学医学部倫理審査委員会の承認の下で施行した。

2. 研究結果

男性 3 例、女性 4 例、平均年齢 56.2 ± 8.2 歳、右膝 5 例左膝 2 例であった。慢性関節リウマチ該当症例は存在しなかった。KL 分類では I/II/III/IV で 1/4/1/1 であった。平均 BMI は $24.2 \pm 3.2 \text{ kg/m}^2$ であった。TAS は平均 3.3 であり、全例 low impact sports を日頃行う患者であった。3 ヶ月間の運動活動量から算出した 1 日平均歩数は 11579 歩であり、厚生労働省が推奨している歩数 (7000 ~ 10000 歩) よりも活動的であった (表 1)。

研究開始時と 3 ヶ月後のデータを表 2 および図 4 に示す。臨床スコアの IKDC スコア、KOOS において研究期間前後で有意差はなかった。ロコモ度を評価するロコモ 25 では開始時平均 14.5 点、ロコモ度 0 度 2 名、1 度 3 名、2 度 2 名であり、

表1 患者背景

	Average (SD) or number
Age(y. o.) (SD)	56.2(8.2)
Sex (Male / Female)	3/4
Height(cm) (SD)	164.4(6.5)
Weight(kg) (SD)	65.9(11.5)
BMI(kg / m ²) (SD)	24.2(3.2)
KL classification(I/II/III/IV)	1/4/1/1
歩数/日 (SD)	11579(3142)
距離(km)/日 (SD)	8.1(2.2)

3ヶ月後は平均7.4点, 0度4名, 1度2名, 2度1名となったが, 有意差はなかった. 2ステップテスト, ロコモスキャンによる筋力についても研究前後で有意差はなかった. ロコモスキャンにおいては研究前後とも患側筋力の方が健側筋力より小さかった. MRIによる軟骨体積は17678mm³から17813mm³と増加したが有意差はなかった(図5). 血清COMP値は180.8ng/mlから158.5ng/mlに減少

したが有意差はなかった. 血清COMP変化量と相関の傾向が認められたのは軟骨体積(図6), 患側筋力のみであり, 臨床成績, 日常活動量とは相関がなかった(表3). また, KOOSの変化量と相関が認められたのはIKDCスコア, ロコモ25, 2ステップテストの各変化量であり, その他, 軟骨状態, 日常活動量とは相関がなかった(表4).

3. 考 察

膝OAは著しい膝関節痛によって健康寿命を脅かされる. 健康寿命を延伸するためには膝OAをモニタリングし, オーダーメイドの保存療法介入が早急の課題である. 膝OAに対する保存療法は鎮痛薬, 関節注射, 運動療法が推奨されているが, その程度や, 軟骨の破壊レベルとの関連は不明である. 保存療法の内, 運動療法は膝OAの疼痛軽

表2 研究開始時と開始後3ヶ月の比較

	Pre (SD)	Post (SD)	P値
IKDC score	54.5(18.4)	62.7(14)	0.144
KOOS total	281.1(85.7)	284.7(79.6)	0.855
ロコモ25(点)	14.5(13.3)	7.4(7.6)	0.256
2ステップテスト(2ステップ値)	1.33(0.10)	1.28(0.22)	0.442
ロコモスキャン健患比(%)	87.4(8.9)	85.8(12.4)	0.777
ロコモスキャン体重比(患側)(N/kg)	3.98(0.5)	4.13(1.1)	0.683
ロコモスキャン体重比(健側)(N/kg)	4.64(1.0)	4.7(0.9)	0.635
MRI軟骨体積(mm ³)	17678(4362.6)	17813(4323.6)	0.235
血清COMP値(ng/ml)	180.8(104.2)	158.5(67.3)	0.493

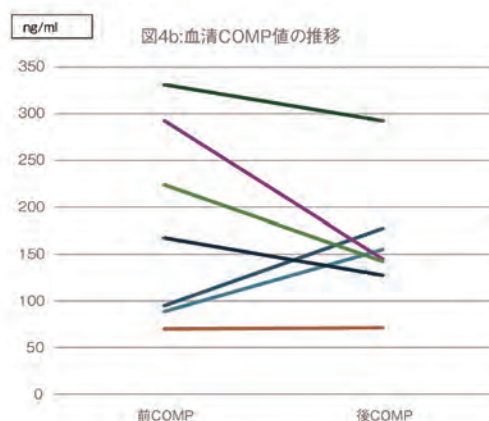
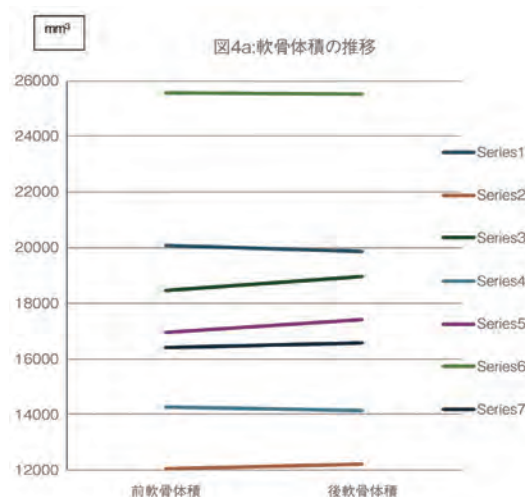


図4 軟骨体積(a), 血清COMP値(b)の各症例の推移グラフ

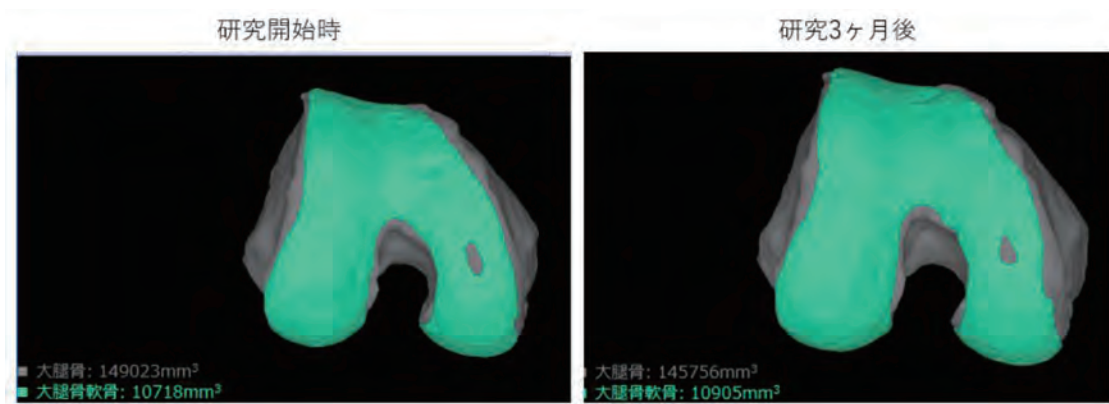


図5 51歳女性, 研究開始時, 3ヶ月後のMRI評価
わずかではあるが, 軟骨の修復が見られる

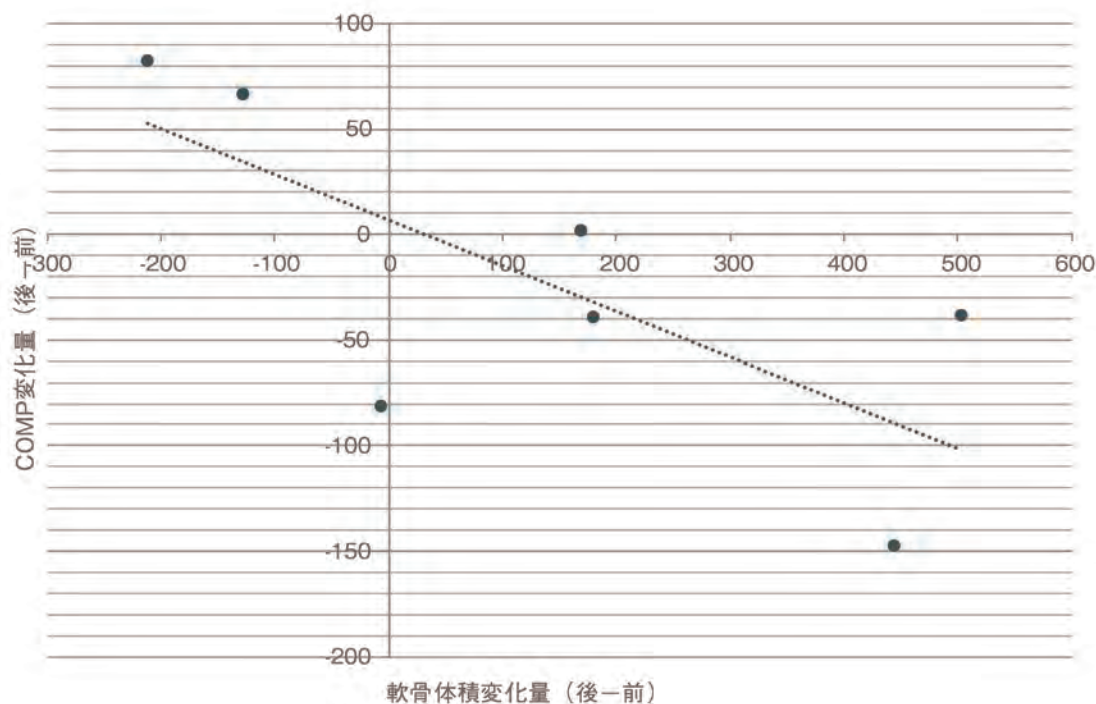


図6 COMP変化量と軟骨体積変化量の相関

表3 血清COMP変化量との相関

	相関係数	P値	95%信頼区間
ΔIKDC score	-0.556	0.194	-0.923~0.338
ΔKOOS total	-0.115	0.805	-0.799~0.698
Δロコモ25	0.0754	0.872	-0.718~0.784
Δ2ステップテスト	0.144	0.757	-0.683~0.809
Δロコモスキャン体重比(患側)	0.692	0.0851	-0.00128~0.95
Δロコモスキャン体重比(健側)	0.279	0.545	-0.6~0.853
ΔMRI軟骨体積	-0.727	0.064	-0.956~0.057
歩数/日	-0.385	0.398	-0.882~0.518
距離/日	-0.3	0.514	-0.859~0.586

表 4 KOOS変化量との相関

	相関係数	P値	95%信頼区間
ΔIKDC score	0.837	0.0188	0.227~0.975
Δロコモ25	-0.806	0.0287	-0.97~-0.133
Δ2ステップテスト	0.788	0.03535	0.0858~0.967
Δロコモスキャン体重比(患側)	-0.265	0.566	-0.849~0.61
Δロコモスキャン体重比(健側)	0.252	0.586	-0.619~0.845
ΔMRI軟骨体積	-0.376	0.406	-0.88~0.526
ΔCOMP	-0.115	0.805	-0.799~0.698
歩数/日	-0.246	0.595	-0.43~0.622
距離/日	-0.286	0.543	-0.855~0.534

減以外にも心臓血管系の健康促進、糖尿病予防、肥満の予防管理、精神的な健康向上など、全身に対する好影響が報告されており、健康寿命を延伸させる重要な方法である⁹⁾。本邦では健康寿命と平均寿命の乖離が約10年と言われており¹⁰⁾、健康寿命と平均寿命ができるだけ近づくような予防医学の推進がおこなわれている。高齢化の進む本邦で介護が必要となる最も多い原因が運動器に問題があるロコモティブシンドロームといわれている¹¹⁾。ロコモティブシンドロームの代表的な症状は、階段を自力で登り切れない、買い物袋を持ち帰れない、15分以上続けて歩けない、横断歩道を青信号のうちに渡り切れない、家の中でしばしばつまずいてしまう、など膝OAの症状と重複するものである。よってロコモの原因の一つである膝OAに対して、低コストで簡便に、病期が進行しないような運動療法の「質」を個別に処方できれば、膝OAの治療のみならず、関節の軟骨摩擦を防ぐことができ、さらに全身的にも好影響が見込まれ、個々の健康寿命延伸に寄与すると考えられる。本研究では個々の症例を軟骨変性状態、患者満足度、ロコモ度を評価した点で、有意義な研究といえる。近年3DMRI画像描出ソフト開発によって極めて容易に軟骨欠損を可視化でき、さらに軟骨体積が計測できるようになった¹²⁾。また、COMPは軟骨特異的に発現する細胞外マトリックスで、軟骨が破壊されたときに放出されるといわれているため、関節炎マーカーとして注目され、膝OAの重症度と血清COMP値に強い相関

があることが報告されている¹³⁾。現在本邦では保険収載されていないため、自らELISAで測定する必要はあるものの、軟骨変性を鋭敏に感知することが出来る方法である。今回の結果として症例数は少ないものの、血清COMP値と軟骨体積が負の相関がみられた。つまり血清COMP値が上昇すると軟骨体積が少なくなり、血清COMP値が低下すると軟骨体積が増えると言う結果であった。よって、軟骨変性状態を3DMRIと血清COMP値で検知可能であることが示された。一方血清COMP値と各種臨床評価とは相関がみられず、歩数・距離でみた日常の身体活動量とも相関がみられなかった。よって、本研究の対象者のように、日頃low impact sportsを行ったり、1日平均11000歩程度、1日8km程度歩行するような比較的活動的な日常生活を送っていても、軟骨に与える影響は大きくないと考えられた。一方、研究開始時から3ヶ月後の前後変化としては軟骨指標、臨床評価共に有意差はなかった。これは症状の増減がそれほどない慢性的な経過観察を行っている患者もしくはすでにリハビリ介入が行われていた患者が存在したため、3ヶ月という短期間での経過では症状の明らかな軽減などがそれほど見られなかったと考えられた。このようないわば定常状態の膝状態においても、血清COMPは症状として出現している軟骨損傷を感知するだけでなく、症状として自覚されないような、不顕性の軟骨へのストレス状態を鋭敏に感知する指標として使用できる可能性がある。

KOOS 変化量と相関がみられた項目は IKDC スコア、ロコモ 25、2 ステップテストそれぞれの変化量であった。IKDC スコアはスポーツ活動における膝機能評価であり、KOOS との相関は過去の報告¹⁴⁾とを支持する結果となった。またロコモ 25 と KOOS との関係は変性疾患全般に対して相関関係が認められた報告¹⁵⁾があり、本研究の膝 OA に対しても同様の結果を示した。KOOS と 2 ステップテストについては過去に報告はないが、2 ステップテストは歩行速度や多関節協調運動に関係しているとされており^{16, 17)}、単関節筋力との相関はそれ程高くないと報告されている。KOOS は膝機能の自記式質問票であるためおそらく膝機能への満足度が評価されていると考えられ、歩行や強調運動に相関がある 2 ステップテストと相関したと考えられる。よって膝機能を簡便に知る方法として 2 ステップテストは有用と考えられた。

一方、KOOS 変化量は軟骨変性評価、日常身体活動量とは相関がなかった。本症例群はすべて low impact sports もしくはスポーツをしていない患者層であったため、比較的緩やかな運動強度であった。つまり、ウォーキングレベルの運動であれば、急速な臨床的な増悪はなく、急速な軟骨破壊も見られないと考えられた。また、個々の活動性として、平均歩行距離の 2 倍程度までの変動が見られた。このことから、ウォーキングレベルであれば、平均歩行距離の 2 倍程度の強度までは膝関節の負担にとって許容される可能性が示唆された。

4. 結 論

安定状態の変形性関節症患者に対して保存療法を行い、その日常生活活動評価、画像評価、血清学的評価を行ったところ、血清 COMP 値変化量は画像的な軟骨摩耗量と相関を示し、血清 COMP 値は軟骨摩耗を鋭敏に検出できることが分かっ

た。一方、血清 COMP と臨床評価は相関しなかった。膝に関する自覚的機能評価 (KOOS スコア) の変化量はロコモティブシンドロームを検出するロコモ 25、2 ステップテストと相関したことから、膝に対する満足度が上がると運動器全体の指標となるロコモ度の改善につながる可能性がある。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり、大阪公立大学医学部整形外科大学院生に多大なご協力を頂きましたこと、心より感謝の意を表します。

文 献

- 1) Bannuru R.R., Osani M.C., Vaysbrot E.E., Arden N.K., et al., OARSI guidelines for the non-surgical management of knee, hip, and polyarticular osteoarthritis., *Osteoarthritis Cartilage.*, Nov; 27 (11) :1578-1589 (2019)
- 2) Joseph G.B., Nevitt M.C., McCulloch C.E., Neumann J., Lynch J.A., Heilmeier U., Lane N.E., Link T.M., Associations between molecular biomarkers and MR-based cartilage composition and knee joint morphology: data from the Osteoarthritis Initiative., *Osteoarthritis Cartilage.*, Aug; 26(8) :1070-1077 (2018)
- 3) Hao H.Q., Zhang J.F., He Q.Q., Wang Z., Cartilage oligomeric matrix protein, C-terminal cross-linking telopeptide of type II collagen, and matrix metalloproteinase-3 as biomarkers for knee and hip osteoarthritis (OA) diagnosis: a systematic review and meta-analysis., *Osteoarthritis Cartilage.*, May; 27(5) :726-736 (2019)
- 4) Verma P., Dalal K., Serum cartilage oligomeric matrix protein (COMP) in knee osteoarthritis: a novel diagnostic and prognostic biomarker., *J. Orthop. Res.*, Jul; 31 (7) :999-1006 (2013)
- 5) Nishida Y., Hashimoto Y., Orita K., Nishino K., Kinoshita T., Nakamura H., Serum cartilage oligomeric matrix protein is correlated with

- quantitative magnetic resonance imaging and arthroscopic cartilage findings in anterior cruciate ligament deficient knees without osteoarthritic changes., *Clin. Rheumatol.*, Nov; 40(11) :4629-4638 (2021)
- 6) Nishida Y., Hashimoto Y., Orita K., Nishino K., Kinoshita T., Nakamura H., Serum COMP Detects Early OA in Patients with ACL Deficiency., *Arthroscopy*, Mar; 38(3) :873-878(2022)
 - 7) Rossi M.J., Lubowitz J.H., Guttman D., Development and validation of the International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form., *Am. J. Sports Med.*, Jan-Feb; 30(1) :152 (2002)
 - 8) Roos E.M., Roos H.P., Lohmander L.S., Ekdahl C., Beynnon B.D., Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score(KOOS) --development of a self-administered outcome measure., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, Aug; 28(2) :88-96(1998)
 - 9) Bull F.C., Al-Ansari S.S., Biddle S., Borodulin K., Buman M.P., Cardon G. et al. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour., *Br. J. Sports Med.*, Dec; 54(24) :1451-1462(2020)
 - 10) 高齢化の状況および高齢社会対策の実施の状況に関する年次報告 高齢社会白書について
内閣府(cao.go.jp) <https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/index-w.html>
 - 11) Iizuka Y., Iizuka H., Mieda T., Tajika T., Yamamoto A., Takagishi K., Population-based study of the association of osteoporosis and chronic musculoskeletal pain and locomotive syndrome: the Katashina study., *J. Orthop. Sci.*, Nov; 20(6) :1085-1089(2015)
 - 12) Sekiya I., Kohno Y., Hyodo A., Katano H., Komori K., Koga H., Tomita M., Suzuki K., Masumoto J., Ozeki N., Interscan measurement error of knee cartilage thickness and projected cartilage area ratio at 9 regions and 45 subregions by fully automatic three-dimensional MRI analysis., *Eur. J. Radiol.*, Jun; 139:109700(2021)
 - 13) Akinmade A., Oginni L.M., Adegbehingbe O.O., Okunlola A.I., Jeje O.A., Adeyeye A.I., Serum cartilage oligomeric matrix protein as a biomarker for predicting development and progression of knee osteoarthritis., *Int. Orthop.*, 45(3) :551-557(2021)
 - 14) Hambly K., Griva K., IKDC or KOOS: which one captures symptoms and disabilities most important to patients who have undergone initial anterior cruciate ligament reconstruction?, *Am. J. Sports Med.*, Jul; 38(7) : 1395-1404(2010)
 - 15) Chiba D., Tsuda E., Wada K., Kumagai G., Sasaki E., Nawata A., Nakagomi S., Takahashi I., Nakaji S., Ishibashi Y., Lumbar spondylosis, lumbar spinal stenosis, knee pain, back muscle strength are associated with the locomotive syndrome: Rural population study in Japan., *J. Orthop. Sci.*, May; 21(3) :366-372(2016)
 - 16) 原邦夫, ロコモの下肢運動療法に対する身体能力評価とフィードバック, 日本臨床スポーツ医学会誌: 29(2) : 121-125(2021)
 - 17) 村永 信吾, 平野 清孝, 2ステップテストを用いた簡便な歩行能力推定法の開発, 昭和医学会誌 63(3) : 301-308(2003)

日本代表デフサッカー選手における スポーツ外傷・障害，疾病調査

順天堂大学 染谷 由希
(共同研究者) 順天堂大学大学院 安澤 佳樹
順天堂大学 塩田 有規

Sports Injuries in Deaf Japanese National Soccer Players

by

Yuki Someya, Yoshiki Anzawa,
Yuki Shiota
*Faculty of Health and Sports Science,
Graduate school of Health and Sports Science,
Juntendo University*

ABSTRACT

[INTRODUCTION]

Studying sports injuries is crucial to their prevention and plays a role in the continuation and promotion of sports activities. However, few studies of sports injury have been conducted on sporting events for paraspports athletes, especially deaf athletes. A clear understanding of the difference between sports injuries in deaf and hearing athletes is important for prevention of injuries in deaf athletes. The purpose of this study was to clarify the incidence and characteristics of sports injuries in deaf soccer players.

[METHODS]

Twenty-six participants (27.3 ± 4.9 years old) who attended the Japanese national training camp for deaf soccer players in 2022–2023's season were included in the study. The number of injuries, incidence (injuries/1000 player-hours [PH]), severity (number of days that the injured player can't play), and injury burden (injury incidence $\times$ mean severity) were investigated over the one-year period. In addition, injury location, re-injury incidence, mode of onset, and injury mechanism were classified according to the definitions recommended by the International Olympic Committee and the Fédération International de Football Association.

[RESULTS]

A total of 59 injuries occurred during the study period, with an incidence, severity, and injury burden of 10.1/1000 PH, 5.0 days, and 50.5 days/1000 PH, respectively. With respect to location, 89.8% of the injuries occurred in the lower extremity, with the ankle having the highest incidence and injury burden (2.7 injuries/1000 PH and 15.2 days/1000 PH). The most common diagnosis was ankle sprain, 68.8% of which were re-injuries or aggravation. The mode of onset of ankle sprain was a 50:50 ratio of contact to non-contact injuries.

[CONCLUSION]

The incidence of sports injuries in deaf Japanese national soccer players were higher to those in hearing soccer players, with a high incidence in the lower extremity. The ankle sprain had the highest incidence in deaf soccer players.

キーワード

スポーツ外傷・障害, 聴覚障がい, デフサッカー, 日本代表選手, 疫学調査

Keyword

Sports injury, Hearing impairment, Deaf Football, Japanese National Players, Epidemiology

要 旨

[背 景]

聴覚に障がいがあるデフアスリートを対象としたスポーツ外傷・障害の調査はほとんど行われていない。本研究は、デフサッカー選手におけるスポーツ外傷・障害の発生率と特徴を明らかにすることを目的とした。

[方 法]

2022 – 2023年シーズンにデフサッカーの日本代表合宿に参加した26名 (27.3 ± 4.9 歳) を対象とし、スポーツ外傷・障害の発生件数、1000Player・Hours [PH]あたりの発生率、重症度、Injury burdenなどを調査した。

[結 果]

調査期間中に合計59件の外傷・障害が発生した。発生率は10.1/1000PH、重症度は5.0日、Injury

burdenは50.5日/1000PHであった。外傷・障害の89.8%が下肢に発生し、足関節での発生率とInjury burdenが最も高かった(2.7/1000PH, 15.2日/1000PH)。

【結 論】

デフサッカー日本代表選手におけるスポーツ外傷・障害は、健聴サッカー選手よりも発生率が高く、特に足関節捻挫が多く発生していた。

緒 言

スポーツ現場における外傷・障害、疾病の予防は選手のスポーツ活動の継続だけでなく、スポーツ活動の普及においても重要な役割を担う。スポーツ現場における外傷・障害、疾病の予防策を講じるためには、各競技での外傷・障害、疾病の発生頻度や重症度などといった疫学データを明らかにすることが重要である¹⁾。オリンピックやパラリンピックなど大規模スポーツイベントでの外傷・障害、疾病調査は数多く報告され^{2,3)}、スポーツ現場におけるメディカルサポートの一助となっている。

聴覚に障がいがある者における世界規模の総合スポーツ競技大会はデフリンピックと呼ばれ、聴覚障がい者のスポーツ振興を担っている。デフリンピックはスタートの音や審判の声による合図を視覚的に工夫する以外、オリンピックと同じルールで実施されており、オリンピックでも活躍できるほど身体レベル、競技レベルが高いアスリートもいる。

聴覚に障がいがある者は、味方の声や周囲の音による認識ができないことでの突然の接触や転倒による外傷発生が多いことが報告されている⁴⁾。一方で、スポーツ外傷のひとつである脳振盪の発生率は、聴者に比べて聴覚に障がいがある者の方が低いとの報告がある⁵⁾。競技を実施していく中で視覚や運動器官等が発達することが報告されていることから^{6,7)}、外傷・障害発生率は聴者と変

わらない、あるいは低い可能性も考えられる。このように、聴覚に障がいがある者のスポーツ競技での外傷・障害、疾病の発生は不明な点が多く、スポーツ競技会でのメディカルサポートが十分であるとはいえない現状がある。

そこで、本研究では、聴覚に障がいのある者のサッカー競技(デフサッカー)に着目し、日本代表デフサッカー選手の外傷・障害、疾病の現状を調査し、それぞれの発生率を既に報告されている様々なサッカー競技での発生率と比較することを目的とした。

1. 調査方法

1. 1 対象者

2022 - 2023年シーズンにデフサッカー日本代表合宿に参加した26名を対象とした。すべての対象者は、本研究の目的及び内容に関するインフォームド・コンセントを行った上で、調査参加の同意を得た。本研究は、順天堂大学スポーツ健康科学部・大学院スポーツ健康科学研究科研究等倫理委員会の承認を得た後に実施した(承認番号：順大ス倫2022-117号)。

1. 2 データ取得期間

2022年10月から2023年10月までの1年間とした。

1. 3 データ取得方法

基本情報のアンケート調査の実施、および、日本代表メディカルスタッフが測定、管理している外傷・障害、疾病の記録、コンディション情報、フィジカルデータなどを二次利用した。期間中の練習、試合時間などを含むコンディショニング情報やフィジカルデータは、選手本人がGoogle Formに入力したものをを用いて調査した。

調査項目を下記に示す。

1. 3. 1 基本情報

年齢、身長、体重、既往歴、競技歴、利き足、

聴覚レベル，ポジションを調査した。

1. 3. 2 外傷・障害，疾病情報

外傷・障害，疾病の発生の有無，発生した外傷・障害，疾病の詳細内容（発生部位，受傷状況など），競技離脱期間を調査した。

＊スポーツ外傷・障害，疾病データは，国際オリンピック委員会が2020年に提言したスポーツ競技における外傷・障害，疾病の報告方法のコンセンサスステートメント⁸⁾に準拠して，日本代表メディカルチームの診断のもと区分した。外傷・障害，疾病の定義は，選手が練習や試合に完全に参加できない状態である「Time-loss injuries」とした。競技離脱期間は，練習への完全参加，もしくは試合の完全参加を確認するまでの期間とした。これらの記録から，スポーツ外傷・障害，疾病の発生件数，外傷・障害，疾病発生率，外傷・障害，疾病による競技への影響度の指標である Injury burden を算出した。外傷・障害発生率 (/1000PH) は，練習や試合の時間，および，その合計時間における1000PHあたりの外傷・障害の発生件数（外傷・障害発生件数÷暴露時間×1,000）として算出した。Injury burden（日/1000PH）は，外傷・障害によって生じる競技損失時間の評価指標の一つであり，1000PHあたりの発生率と平均競技離脱期間の積（外傷・障害発生率×平均競技離脱期間）で算出した。

1. 3. 3 コンディション情報

練習，試合でのプレー時間，Session-Rating of Perceived Exertion (sRPE)，疲労度を調査した。

1. 3. 4 統計解析

本研究で得られたデータはすべて記述統計にて示した。基本情報である年齢，身長，体重，聴力は平均値±標準偏差で示した。競技離脱期間は中央値（四分位範囲）で示した。

2. 調査結果

2. 1 対象者とスポーツ活動時間

本研究対象者26名の特性を表1に示す。年齢は 27.3 ± 4.9 歳，身長は 170.9 ± 4.6 cm，体重は 67.4 ± 5.6 kg，聴力レベルは 99.3 ± 10.8 dB（重度難聴）であった。

2022年10月から2023年10月までのスポーツ活動時間（暴露時間）は，合計5,863時間で試合，練習における暴露時間はそれぞれ1,118時間と，4,745時間であった。

表1 対象者特性

項目	全体 (n=26)
年齢(歳)	27.3 ± 4.9
身長(cm)	170.9 ± 4.6
体重(kg)	67.4 ± 5.6
聴力(dB)	99.3 ± 10.8
右聴力(dB)	99.6 ± 10.8
左聴力(dB)	98.9 ± 11.2

値は平均値±標準偏差で示す

2. 2 外傷・障害発生率

観察期間中に発生した外傷・障害の総件数は59件であり，1000PHあたりの発生件数（外傷・障害発生率）は10.1/1000PHであった。試合，練習に発生した外傷・障害の件数（発生率）は，試合35件（31.3/1000PH），練習24件で（5.1/1000PH）であった（図1）。

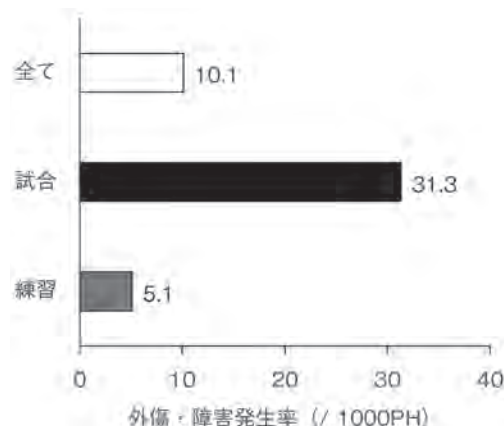


図1 外傷・障害の発生率

表2 部位別の外傷・障害発生率

	件 数	発生率 (/1000 PH)	離脱期間 (日)
頸部	1	0.2	2
肩関節	1	0.2	1
手関節/手	1	0.2	18
胸部	1	0.2	8
胸椎	1	0.2	1
要仙椎	1	0.2	3
股関節	1	0.2	4
鼠径部	6	1	1.5(1.0-2.8)
大腿	11	1.9	3.0(2.0-6.0)
膝関節	8	1.4	7.0(1.3-12.8)
下腿	8	1.4	2.5(1.0-6.0)
足関節	16	2.7	4.5(2.3-9.3)
足部	3	0.5	2.0(1.0-13.0)

値は中央値(四分位範囲)で示す

疾病に関しては、COVID-19の影響などもあり、スポーツに関連した症状であるかの判断ができなかったため、本研究では除外した。

2. 3 発生部位別の外傷・障害発生率

発生部位別の外傷・障害発生率では、下肢での発生が多く、全外傷・障害のうち53件(89.8%)が下肢で発生していた。下肢の内訳は、足関節16件(2.7/1000PH)、大腿11件(1.9/1000PH)、膝関節8件(1.4/1000PH)、下腿8件(1.4 /1000PH)の順で多く発生していた(表2)。

2. 4 外傷・障害の重症度

観察期間中に発生した外傷・障害の競技離脱期間は平均5.0日であり、試合と練習では、それぞれ5.7日、4.0日であった。

重症度の内訳は、競技離脱期間が1-3日のMinimalが33件(55.9%)、4-7日のMildが15件(25.4%)、8-28日のModerateが10件(16.9%)、28日以上のSevereが1件(1.7%)であった(図2)。

2. 5 Injury burden

観察期間中に発生した外傷・障害のInjury burdenは全体で50.5日/1000PHであり、試合で178.4日/1000PH、練習で20.4日/1000PHであった

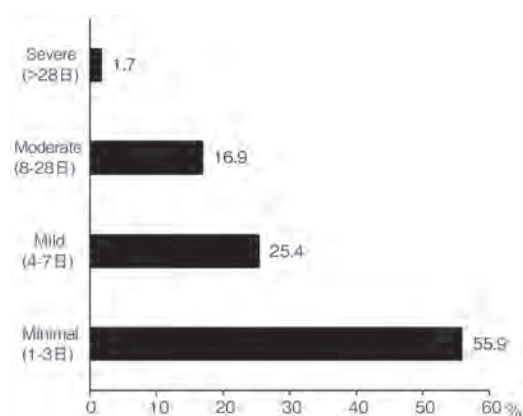


図2 外傷・障害の重症度の内訳

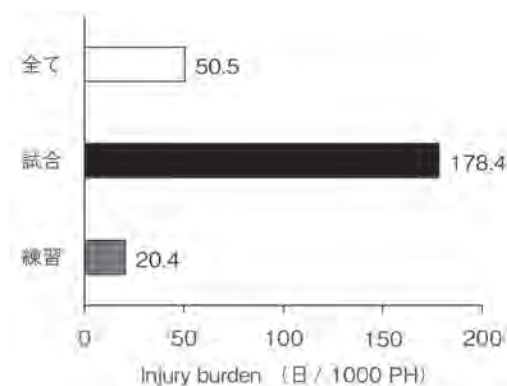


図3 外傷・障害のInjury burden

(図3)。

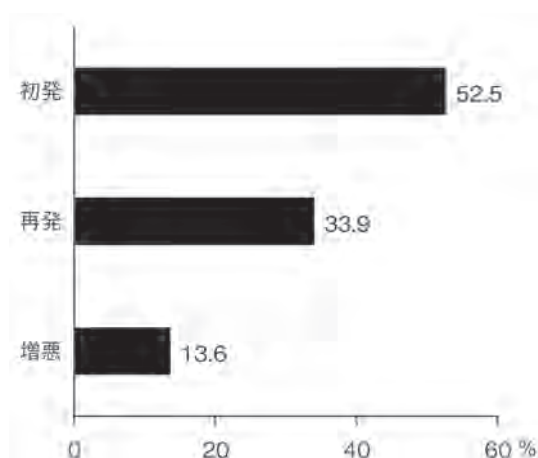


図4 外傷・障害の受傷状況の内訳

2. 6 外傷・障害の受傷状況

外傷・障害の受傷状況の内訳は，初回受傷31件（52.5%），再受傷は20件（33.9%），増悪は8件（13.6%）であった（図4）。

2. 7 外傷・障害の発生メカニズム

受傷メカニズムの内訳は，接触での受傷が26件（44.1%），非接触が32件（54.2%）であった．外傷・障害の発生メカニズムが不明のものが1件（1.7%）あった（図5）。

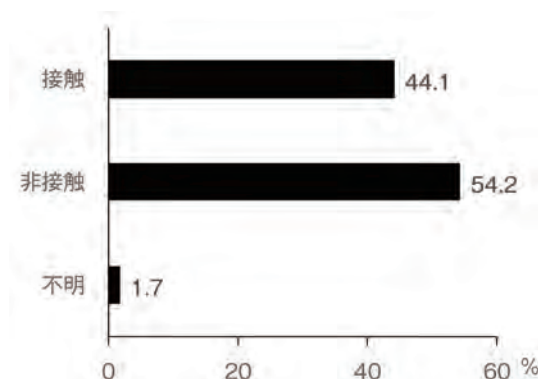


図5 外傷・障害のメカニズムの内訳

3. 考 察

本研究は，本邦におけるデフサッカー男子日本

代表サッカー選手を対象とし，活動中に発生した外傷・障害の発生状況を長期間にわたって調査した，初めての研究である．1年間の観察期間中に外傷・障害は59件発生し，試合と練習を含めた1000PHあたりの外傷・障害発生件数は10.1件であり，そのうちの89.8%が下肢に発生していた．部位別の外傷・障害では，足関節で発生件数，Injury burdenが最も高かった．また，初回受傷と再発・増悪は約半数ずつであり，接触・非接触の受傷メカニズムでの発生数も同程度であった．

先行研究において，サッカー競技における1000PHあたりの外傷・障害発生率（外傷・障害発生率）は，日本のプロ男子サッカー選手で5.8件⁹⁾，アジア人プロ男子サッカー選手で5.1件¹⁰⁾，アマチュア男子サッカー選手で5.5件¹¹⁾と報告されている．本研究では，1000PHあたりの外傷・障害発生件数は10.1件であり，競技レベルが同等と考えられるアマチュア男子サッカー選手の発生率より高い結果であった．視覚に障がいのあるブラインドサッカー選手および脳性麻痺があるPCサッカー選手といった何かしらの障害を有するサッカー選手の外傷・障害発生率¹²⁾では，練習・試合共に健聴サッカー選手と比較して外傷・障害発生率が高いことが報告されている．そのため，聴覚に障がいのあるデフサッカー選手においても，外傷・障害の発生率が高くなったのではないかと考えられ，聴覚の障がいがあるスポーツ外傷・障害の発生に何かしら関与している可能性が考えられる．

また，健聴サッカー選手における外傷・障害の発生部位別では，1000PHあたり大腿で1.8件，膝関節で1.2件，足関節で1.1件の順で多く発生していると報告されている¹³⁾．しかし，本研究では，1000PHあたり足関節2.7件，大腿1.9件，膝関節1.4件と，足関節での外傷・障害が多く発生していた．本研究における外傷・障害の中で最も多かった外傷・障害の診断名は，足関節捻挫であった．これ

らのことから、デフサッカー選手における外傷・障害の特徴として、足関節の外傷・障害（足関節捻挫）が多いのではないかと考えられる。

しかしながら、先述した通り、デフサッカー選手を対象とした先行研究はなく、なぜ、健聴サッカー選手に比べて、デフサッカー選手で外傷・障害が多いのか、足関節の外傷・障害が多いのかは不明な点が残る。外傷・障害の発生リスクには外的要因や内的要因がある。例えば、外的要因では、本研究での対象者の各所属チームに、メディカルスタッフが所属している割合は、46.1%（26名中12名）であり、日常的な外傷・障害予防への取り組みが限られていた可能性があることや、パラスポーツで多く言われているプレー環境が良いとは言えないことなどが、デフサッカー選手の外傷・障害の発生率を増加させている可能性も否定できない。また、内的要因では、聴覚に障がいのある者の特徴として、約30%に前庭機能障害が存在していること、閉眼片脚立ちテストでの持続時間が有意に短いなどバランス機能障害があることが示されていることが示されている¹⁴⁾。身体的な未熟さは、スポーツ外傷・障害のリスク因子であることが報告されていることから¹⁵⁾、外傷・障害の発生率を増加させている可能性も考えられる。これらのことから、今後は、選手のサポート体制、プレー環境、身体機能、競技レベルなども考慮して外傷・障害の発生状況を再検討していく必要があると考えられる。

今後、継続した調査を実施することで、対象者数や外傷・障害数が増加し、より詳細な分析が実施できると考えられる。また、このような調査結果が広く周知され、デフサッカーにおけるメディカルサポートが拡充することで、外傷・障害データにおいてもより正確なデータを収集できる可能性がある。引き続き、調査を継続し、デフサッカーにおける外傷・障害予防に貢献できるデータを示していきたいと考える。

4. 結 語

日本代表デフサッカー選手は健聴サッカー選手に比べて、スポーツ外傷・障害は多く、特に足関節の外傷・障害が多く発生していた。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。また、本研究を実施するにあたってご指導くださいました順天堂大学医学部スポーツ医学研究室の高澤祐治先生、長尾雅史先生に深く感謝いたします。

最後に、本調査にご協力くださいました2022-2023年日本代表デフサッカー選手の皆様、監督、メディカルスタッフの皆様に心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) van Mechelen W., Hlobil H., Kemper H.C., Incidence, severity, aetiology and prevention of sports injuries. A review of concepts., *Sports Med.*, 14(2): 82-99(1992)
- 2) Soligard T., Steffen K., Palmer D., Alonso J.M., Bahr R., Lopes A.D. et al., Sports injury and illness incidence in the Rio de Janeiro 2016 Olympic Summer Games: A prospective study of 11274 athletes from 207 countries., *Br. J. Sports Med.*, 51(17): 1265-71(2017)
- 3) Soligard T., Palmer D., Steffen K., Lopes A.D., Grant M.E., Kim D. et al., Sports injury and illness incidence in the PyeongChang 2018 Olympic Winter Games: a prospective study of 2914 athletes from 92 countries., *Br. J. Sports Med.*, 53(17): 1085-92(2019)
- 4) Mann J.R., Zhou L., McKee M., McDermott S., Children with hearing loss and increased risk of injury., *Ann. Fam. Med.*, 5(6): 528-33(2007)
- 5) Brancalone M.P., Clifton D.R., Onate J.A., Boucher L.C., Concussion Epidemiology in Athletes Who Are Deaf or Hard-of-Hearing Compared With

- Athletes Who Are Hearing., *Clin. J. Sport Med.*, 31 (2) : e80-e5 (2021)
- 6) Brancaleone M.P., Talarico M.K., Boucher L.C., Yang J., Merfeld D., Onate J.A., Hearing Status and Static Postural Control of Collegiate Athletes., *J. Athl. Train.*, 58(5) : 452-7 (2023)
 - 7) Brancaleone M.P., Boucher L.C., Yang J., Merfeld D., Onate J.A., Comparing dynamic visual acuity between athletes who are deaf or hard-of-hearing and athletes who are hearing., *J. Am. Coll. Health.*, 1-4 (2023)
 - 8) Bahr R., Clarsen B., Derman W., Dvorak J., Emery C.A., Finch C.F. et al., International Olympic Committee consensus statement: methods for recording and reporting of epidemiological data on injury and illness in sport 2020 (including STROBE Extension for Sport Injury and Illness Surveillance (STROBE-SIIS)), *Br. J. Sports Med.*, 54(7) : 372-89 (2020)
 - 9) Matsunaga R., Nagao M., Akagi R., Fukai A., Sando T., Ikeda H., Taketomi S., Impact of the COVID-19 Pandemic on Injury Incidence in Japanese Male Professional Soccer Players., *Orthop. J. Sports Med.*, 11(2) : 23259671221149373 (2023)
 - 10) Tabben M., Eirale C., Singh G., Al-Kuwari A., Ekstrand J., Chalabi H. et al., Injury and illness epidemiology in professional Asian football: lower general incidence and burden but higher ACL and hamstring injury burden compared with Europe., *Br. J. Sports Med.*, 56(1) : 18-23 (2022)
 - 11) Kekeleakis A., Kounali Z., Kofotolis N., Clemente F.M., Kellis E., Epidemiology of Injuries in Amateur Male Soccer Players: A Prospective One-Year Study., *Healthcare(Basel)*, 11(3) (2023)
 - 12) Weiler R., Verhagen E., Taylor A., Ahmed O.H., Monitoring the beautiful adapted game: a 3-year prospective surveillance study of injuries in elite English Para football., *Sci. Med. Footb.*, 6(4) : 415-20 (2022)
 - 13) López-Valenciano A., Ruiz-Pérez I., Garcia-Gómez A., Vera-Garcia F.J., De Ste Croix M., Myer G.D., Ayala F., Epidemiology of injuries in professional football: a systematic review and meta-analysis., *Br. J. Sports Med.*, 54(12) : 711-8 (2020)
 - 14) Nakajima Y., Kaga K., Takekoshi H., Sakuraba K., Evaluation of vestibular and dynamic visual acuity in adults with congenital deafness., *Percept. Mot. Skills.*, 115(2) : 503-11 (2012)
 - 15) Le Gall F., Carling C., Reilly T., Biological maturity and injury in elite youth football., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 17(5) : 564-72 (2007)

立位中の転倒恐怖心が下肢筋脊髄興奮性に与える 影響の解明

東京大学大学院	高 橋 涼 吾
(共同研究者) 同	金 子 直 嗣
同	石 川 慶 一
フリードリヒ・ シラー大学イェーナ	佐 藤 和 之
東京大学大学院	益 城 優 芽

Effects of Fear of Falling on Spinal Motoneuron Excitability of Lower-Limb Muscle During Standing Posture

by

Ryogo Takahashi, Naotsugu Kaneko,
Keiichi Ishikawa, Yume Mashiki
The University of Tokyo
Kazuyuki Sato
Friedrich Schiller University Jena

ABSTRACT

Standing posture, which is fundamental to various movements and essential for daily life, can be destabilized by various factors, ultimately increasing the risk of falling. One of the factors that increases the risk of falling is the fear of falling. Besides, the activity of the lower limb muscles is crucial for maintaining postural balance, and this muscle activity is generated by the excitation of spinal motor neurons (spinal MNs). Therefore, the purpose of this study was to investigate how fear of falling during standing posture influences the excitability of spinal MNs in the lower limb muscles. Eleven adult males participated in the experiment, performing a static standing task

for 90 seconds while wearing a head-mounted display. The task was conducted under three conditions with different levels of induced fear of falling (Low-threat, Medium-threat, and High-threat conditions). During each condition, transcutaneous spinal cord stimulation (tSCS) was applied to a lumbar region 15 times. The motor-evoked responses from the vastus lateralis, biceps femoris, tibialis anterior, soleus, medial gastrocnemius, and lateral gastrocnemius muscles were recorded as spinal reflexes. The results showed that the spinal reflex amplitude of the tibialis anterior muscle was significantly increased in the High-threat condition compared to the Low-threat condition. In contrast, no significant differences in the spinal reflex amplitudes were observed in the other muscles among conditions. Our findings indicate that the fear of falling facilitates the excitability of spinal MNs in the tibialis anterior muscle during standing posture.

キーワード

姿勢制御, 転倒恐怖心, 姿勢不安, 脊髄興奮性, 仮想空間

Keyword

Postural control, Fear of falling, Postural threat, Spinal motoneuron excitability, Virtual reality

要 旨

様々な動作の基本であり生活に必要不可欠な立位姿勢は、諸要因によってそのバランスの低下、ひいては転倒リスクの増大をもたらす。これらの要因の一つに、転倒に対する恐怖心が挙げられる。また、下肢筋の活動は立位バランスの維持に重要であり、筋活動は脊髄運動ニューロン（脊髄MN）が興奮することで生じる。よって、本研究の目的は、立位中の転倒恐怖心が下肢筋の脊髄MN興奮性に与える影響を解明することとした。11名の成人男性が実験に参加し、仮想空間に誘導するヘッドマウントディスプレイを着用して静止立位課題を90秒間行った。課題は惹起される転倒恐怖心のレベルが異なる3つの条件下でそれぞれ行われた（Low-threat条件, Medium-threat条件, High-threat条件）。各条件にて、被験者は腰部への経皮的脊髄電気刺激（transcutaneous spinal

cord stimulation: tSCS）を計15回受けた。その際、外側広筋、大腿二頭筋長頭、前脛骨筋、ヒラメ筋、腓腹筋内側頭、および腓腹筋外側頭から得られる筋応答を脊髄反射として記録した。結果として、High-threat条件にてLow-threat条件と比較して前脛骨筋の脊髄反射振幅が有意に増大した。一方で、他の筋の脊髄反射振幅については、条件間で有意差が確認されなかった。以上より、立位中の転倒恐怖心は前脛骨筋の脊髄MN興奮性を促通させることが明らかとなった。

諸 言

立位は、歩行や走行をはじめとする様々な動作に関わる基本姿勢であり、我々の生活に欠かせない。我々は立位姿勢を何気なく維持しているが、実際には脳や脊髄といった中枢神経系による骨格筋の巧緻な制御を通じて、そのバランスが保たれている^{1, 2)}。ひとたび、加齢、疾患、外部環境等

の諸要因によって立位バランスが低下すれば、転倒リスクの増大を招きかねない。転倒リスクを高める要因の一つに、「転倒に対する恐怖心」が挙げられる。実際に、転倒恐怖心が強い人ほどその後の転倒確率が高いことが示されている³⁾。したがって、転倒恐怖心が立位制御を担う中枢神経系に与える影響を解明することは、転倒恐怖心を抱く高齢者や疾患患者のリハビリテーションや治療に有用な基礎知見を提供できることから、重要な意義を持つ。

立位のバランス維持には、中枢神経系の中でも低次に分類される脊髄内の機構が深く関与する。特に、脊髄運動ニューロン（以下、脊髄MN）は、骨格筋に運動指令を発出する最終部位であり、その興奮性は最終的な筋力発揮に影響する。また、全身の骨格筋の中でも、特に下肢筋の活動は立位バランスの維持に重要であることが示されている⁴⁾。したがって、下肢筋の脊髄MN興奮性に着目することは、転倒恐怖心による中枢神経系への影響を解明する上で鍵となる。Horslenらは、背景筋活動の影響を排除した状態で、立位中のヒラメ筋のH反射を測定し、転倒恐怖心がヒラメ筋の脊髄MN興奮性に与える影響は小さいと報告している⁵⁾。後に、ヒラメ筋に加えて腓腹筋内側頭の脊髄MN興奮性も転倒恐怖心の影響を受けにくいとの報告がなされている⁶⁾。一方で、転倒恐怖心がヒラメ筋と腓腹筋内側頭以外の下肢筋の脊髄MNに与える影響については検討がなされていない。脊髄MN興奮性は上位中枢や末梢の感覚器官といった様々な起源からの入力によって変調されるが、その入力起源は下肢筋間で均一ではなく異なることが示されている。例えば、大脳皮質運動野から脊髄MNへの投射は、下肢の近位筋よりも遠位筋の方がその接続が強いことが報告されている⁷⁾。したがって、ヒラメ筋と腓腹筋内側頭とは異なる脊髄MN興奮性の変調が、他の下肢筋では観察される可能性がある。

転倒恐怖心と脊髄MN興奮性の関連についてヒラメ筋と腓腹筋内側頭のみ測定されてきた理由として、H反射は誘発可能な筋に限られていること、さらに複数筋から同時に誘発することが困難という技術的課題が関係しているかもしれない²⁾。近年、この技術的課題を解決する手法として、経皮的脊髄電気刺激（transcutaneous spinal cord stimulation: tSCS）が考案された⁸⁾。tSCSは、腰背部から経皮的に脊髄後根を電気刺激する手法であり、下肢筋から網羅的に脊髄反射を誘発することができる。tSCSによって誘発される脊髄反射は単シナプス性であることから、H反射同様に脊髄MNの興奮性の指標として使用することができる⁸⁾。tSCSを使用することで、転倒恐怖心による下肢筋全体の脊髄MN興奮性の変調を解明できると考えられる。

以上より、本研究の目的は、tSCSを使用して転倒恐怖心が下肢筋の脊髄MN興奮性に与える影響を解明することとした。本研究の達成を通じて、転倒リスク軽減に向けたリハビリテーション・治療開発に関わる基礎知見の提供を目指す。

1. 方 法

1. 1 被験者

被験者は、健康成人男性11名（平均値±標準偏差、年齢：25.2±5.2歳、身長：172.0±5.8cm、体重：64.3±8.5 kg）を対象とした。実験に先立ち、被験者に対して実験の目的、方法、および危険性について説明し、実験参加への同意を得た。本研究は、東京大学の「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施された（課題番号：533）。

1. 2 データ収集

1. 2. 1 表面筋電図

右脚の内側広筋（VM）、大腿二頭筋長頭（BF）、前脛骨筋（TA）、ヒラメ筋（SOL）、腓腹筋内側

頭 (MG), および腓腹筋外側頭 (LG) の表面筋電図を取得するために, 筋腹に2つの電極を貼付した (Vitrode F-150S, 日本光電工業社, 日本). 電極間距離は20mmとした. 筋電図信号は生体信号用アンプ (AB-611J) にて, 遮断周波数15 - 1000 Hz でフィルタリングされ, 1000 倍に増幅された. その後, AD 変換器 (PowerLab 16SP, ADInstruments 社, オーストラリア) によってコンピュータ上に記録された. サンプル周波数は4000 Hz であった.

1. 2. 2 皮膚電気活動 (Electrodermal activity: EDA)

課題中 (1. 4 参照) の交感神経系活動を定量するために, 右手の中指と人差し指に貼付した電極 (Vitrode F-150S, 日本光電工業社, 日本) から EDA を計測した. EDA の信号は専用アンプ (AP-U030, ミユキ技研社, 日本) で100倍に増幅された後, AD 変換器 (MP208, ミユキ技研社, 日本) によってコンピュータ上に記録された. サンプル周波数は1000 Hz であった.

1. 3 経皮的脊髄電気刺激 (transcutaneous Spinal Cord Stimulation: tSCS)

tSCS には, 定電流刺激装置 (DS7A, Digitimer 社, 英国) から出力されるパルス幅1msの矩形波電流刺激を使用した. 陽極 (100mm × 75mm) を胸骨剣状突起と臍の間の腹部に, 陰極 (50mm × 50mm) を背部正中線の腰椎棘突起直上の皮膚に貼付した. 実験に先立ち, 静止立位にて被験筋から最も大きな反射が得られる位置に陰極を貼付した. その結果, 全ての被験者において, 第1と第2腰椎棘突起間に陰極を貼付した.

続いて, 被験者は静止立位を保持した状態で, 刺激強度を30mA から100mA まで10mA 間隔で漸増させ, 各刺激強度で5回ずつ tSCS を受けた. 刺激強度に対する脊髄反射振幅で表される入力-出力曲線の傾斜が最大となる刺激強度を選定し,

課題で使用した.

tSCS によって得られた筋電図 (EMG) 応答が脊髄反射であることを確かめるために, 課題で使用する刺激強度にて, tSCS を50msの間隔で2連発刺激した. この2連発刺激を8回行い, 1回目と2回目の刺激に対する EMG 応答の振幅の平均値をそれぞれ算出し, 2回目の EMG 応答振幅が1回目と比較して減弱しているかを確認した. tSCS が脊髄反射を誘発している場合, 感覚神経から脊髄 MN へのシナプス伝達物質の枯渇によって, 2回目の EMG 応答は1回目と比較して減衰する. この性質を利用して, 脊髄反射が適切に誘発できているかを確認することができる⁹⁾. 2回目の EMG 応答が減弱していない被験者については, 課題中の脊髄反射の解析から除外した. その結果, 脊髄反射の解析は VM では10名分, その他の筋では11名分のデータに対して行われた.

1. 4 実験課題

被験者はヘッドマウントディスプレイ (Meta Quest 2, Meta 社, 米国) を着用し, 90秒間の静止立位課題を行った. 課題中, 被験者は快適な足幅で立ち, 両腕はリラックスさせて体幹に沿わせるように指示された. 静止立位課題は, 惹起される転倒恐怖心のレベルが異なる3つの条件下 (Low-threat 条件, Medium-threat 条件, High-threat 条件) でそれぞれ行われた. Low-threat 条件では, 被験者は実験室の床上に立ち, 低所空間に曝露される仮想空間 (VR) を体験した (図1A). Medium-threat 条件では, 被験者は高さ45cm, 縦28cm, 横90cmの台上 (DWA-2845, ピカコーポレーション, 日本) に立ち, Low-threat 条件同様に低所に曝露される VR を体験した. High-threat 条件では, Medium-threat 条件と同様に被験者は高さ45cmの台上に立ち, 高所に暴露される VR を体験した (図1B). 先行研究より, VR 上での高所への曝露は, 実空間と同様に転倒恐怖心を

(A) 低所空間



(B) 高所空間



図1 ヘッドマウントディスプレイにて実際に表示されたVRのスナップショット
(A) 低所空間はLow-threat条件とMedium-threat条件, (B) 高所空間はHigh-threat条件にて使用された。

誘発できることが報告されている¹⁰⁾。使用したVRは、ゲーム開発プラットフォームUnity (ver. 2021.3.5f1, Unity technologies 社, 米国) によって作成された。各実験条件にて、被験者はtSCSを6秒間隔で15回受けた。課題間には座位休憩を2分間設けた。

1. 5 データ解析

課題中に得られた脊髄反射が背景筋活動 (background EMG: bEMG) の影響を受けていないことを確認するために、tSCSのタイミングから50ms前までの時間窓にて、各筋の筋電図信号の二乗平均平方根 (Root Mean Square: RMS) を算出した。各実験条件にて得られた15回分のRMSを平均化することでbEMGを定量した。

脊髄反射の振幅は、tSCS後に筋電図上に出現する応答のpeak-to-peakを算出することで定量した。各実験条件にて得られた15回の脊髄反射振幅を平均化した。

EDA信号は、オフラインで遮断周波数1 Hzのローパスフィルタを適用することで高周波ノイズを除去した。次に、tSCSのタイミングから1s前までの時間窓にてEDAの平均値を算出した¹¹⁾。各実験条件にて15回分のEDA平均値を平均化することで交感神経活動を定量した。

bEMG、脊髄反射振幅、および交感神経活動について、Low-threat条件で得られた値を100%として、Medium-threat条件とHigh-threat条件を正規化した。

1. 6 統計解析

全ての実験条件間の差を検定するために、Low-threat条件 vs Medium-threat条件, Low-threat条件 vs High-threat条件、およびMedium-threat条件 vs High-threat条件にてWilcoxonの符号付順位検定を行った。p値の補正にはFalse Discovery Rateの方法を使用した。有意水準は5%未満とした。

2. 結果

表1は、bEMG、脊髄反射、および交感神経活動の統計解析の結果を示したものである。

2. 1 bEMG

表2は、Low-threat条件で正規化されていないbEMGの値を示したものである。Low-threat条件で正規化されたデータは図2に示されている。全ての筋について、正規化されたbEMGの条件間の有意差は確認されなかった (全て $p > 0.05$) [表1; 図2]。

表 1 bEMG, 脊髄反射, および交感神経活動の統計解析の結果

	Low-threat vs Medium-threat			Low-threat vs High-threat			Medium-threat vs High-threat		
	Z	p-value	r	Z	p-value	r	Z	p-value	r
bEMG									
VM	-11.0	0.158	0.600	-9.0	0.158	0.673	29.0	0.922	0.055
BF	36.0	0.831	0.091	52.0	0.305	0.576	47.0	0.360	0.424
TA	-24.0	0.465	0.273	-19.0	0.465	0.424	-23.0	0.465	0.303
SOL	-19.0	0.697	0.424	-24.0	0.697	0.273	33.0	1.000	0.000
MG	-13.0	0.125	0.606	-27.0	0.638	0.182	54.0	0.125	0.636
LG	-13.0	0.125	0.606	-11.0	0.125	0.667	-24.0	0.465	0.273
脊髄反射									
VM	31.0	0.770	0.127	-17.0	0.770	0.382	-23.0	0.770	0.164
BF	39.0	0.898	0.182	43.0	0.898	0.303	35.0	0.898	0.061
TA	-19.0	0.360	0.424	-6.0	0.041	0.818	-23.0	0.413	0.303
SOL	41.0	0.779	0.242	35.0	0.898	0.061	-21.0	0.779	0.364
MG	-32.0	0.966	0.030	34.0	0.966	0.030	-31.0	0.966	0.060
LG	-25.0	0.520	0.242	-13.0	0.249	0.606	-23.0	0.520	0.303
交感神経活動									
交感神経活動	36.0	0.831	0.091	-10.0	0.063	0.697	-7.0	0.056	0.788

Wilcoxonの符号付順位検定によって得られた統計量Z, FDR法によって補正されたp値, 効果量rが示されている. 有意なp値は太字で表記されている.

表 2 各条件におけるbEMGの平均値と標準偏差

	Conditions		
	Low-threat	Medium-threat	High-threat
bEMG [μ V]			
VM	2.68 $\pm$ 1.50	3.20 $\pm$ 1.66	3.43 $\pm$ 1.91
BF	6.07 $\pm$ 4.34	5.84 $\pm$ 5.94	4.61 $\pm$ 3.54
TA	3.94 $\pm$ 2.88	3.74 $\pm$ 1.82	4.04 $\pm$ 1.78
SOL	29.3 $\pm$ 15.0	32.0 $\pm$ 13.8	29.9 $\pm$ 10.9
MG	20.6 $\pm$ 22.8	31.6 $\pm$ 46.2	19.4 $\pm$ 16.5
LG	7.51 $\pm$ 5.03	8.32 $\pm$ 4.68	8.47 $\pm$ 4.88

Low-threat条件で正規化する前の値で記されている.

2. 2 脊髄反射

High-threat条件にてLow-threat条件と比較してTAの脊髄反射振幅が有意に大きかった ($p = 0.041$) [表 1; 図 3]. 一方で, Low-threat条件とMedium-threat条件間 ($p = 0.360$), Medium-threat条件とHigh-threat条件間 ($p = 0.413$) にはそれぞれ有意差が確認されなかった. また, VM, BF, SOL, MG, およびLGについては全ての条件間で脊髄反射の振幅に有意差は確認されなかった (全て $p > 0.05$).

2. 3 交感神経活動

EDAについて, いずれの条件間の比較においても, 有意差は確認されなかった (全て $p > 0.05$) [表 1; 図 4].

3. 考 察

本研究では, postural threatによって誘発される転倒恐怖心が, 立位中の下肢筋を支配する脊髄MN興奮性に与える影響を調べた. その結果, High-threat条件にてLow-threat条件と比較して, TAの脊髄反射が促進した [図 3]. 他の下肢筋における脊髄反射の有意な変調が認められなかったことから, 転倒恐怖心が惹起されると, TAにて選択的に脊髄MNの興奮性が促進することが示された.

これまで, 電気生理的手法を中心に, 転倒恐怖心が立位制御における神経系に与える影響の解明がなされてきた. Horslenらは, 転倒恐怖心によって, ヒラメ筋の筋紡錘の感度上昇に伴う固有感覚

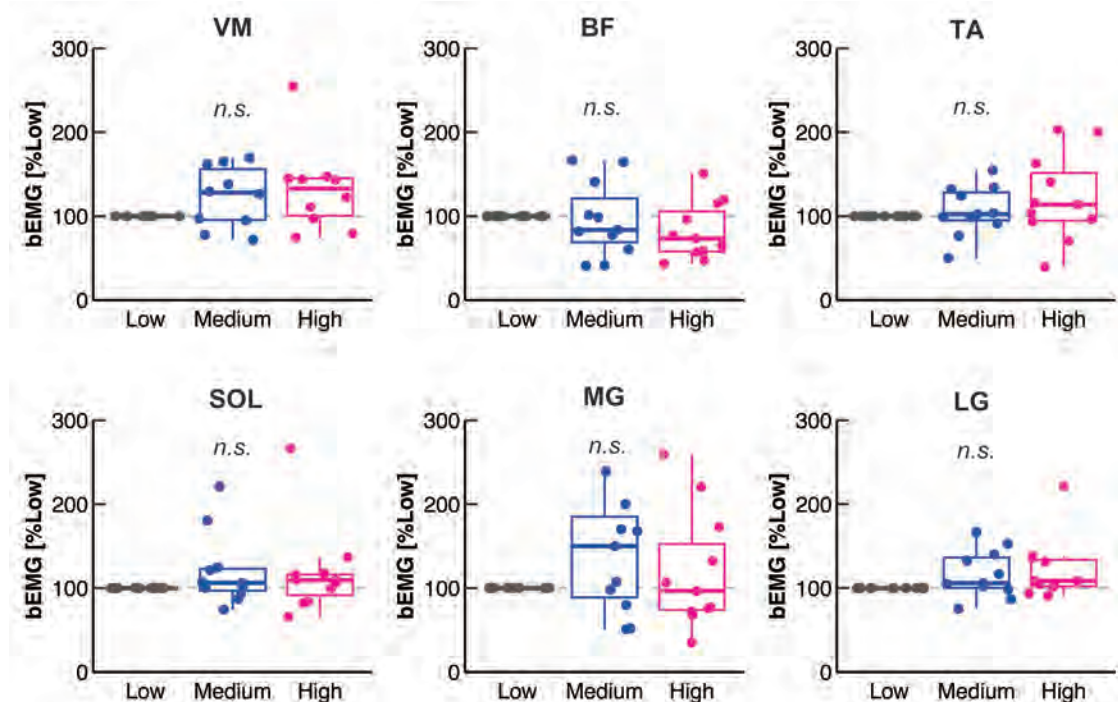


図2 各筋のbEMGの変化率

全てのデータはLow-threat条件を100%として正規化されている。箱ひげ図については、箱中の太線が中央値、箱の下端が第一四分位 (25%)、箱の上端が第三四分位 (75%)、ひげの両端が外れ値を除く最大値と最小値を示す。各点は各被験者のデータを示す。n.s.は条件間で有意差がないことを示す。

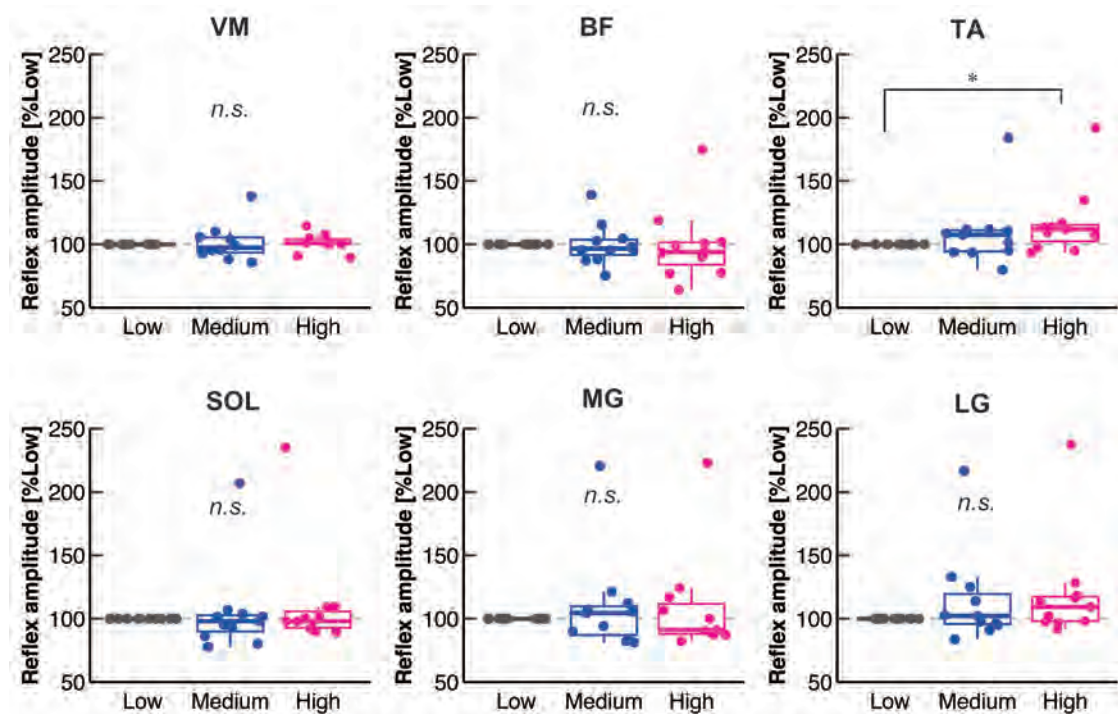


図3 各筋の脊髄反射振幅の変化率

全てのデータはLow-threat条件を100%として正規化されている。箱ひげ図については、箱中の太線が中央値、箱の下端が第一四分位 (25%)、箱の上端が第三四分位 (75%)、ひげの両端が外れ値を除く最大値と最小値を示す。各点は各被験者のデータを示す。*は条件間の有意差 (*: $p < 0.05$), n.s.は条件間で有意差がないことを示す。

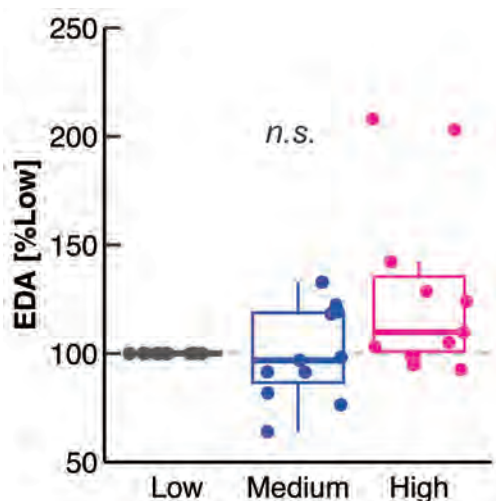


図4 各筋の交感神経活動の変化率

全てのデータは Low-threat条件を 100%として正規化されている。箱ひげ図については、箱中の太線が中央値、箱の下端が第一四分位 (25%)、箱の上端が第三四分位 (75%)、ひげの両端が外れ値を除く最大値と最小値を示す。各点は各被験者のデータを示す。n.s.は条件間で有意差がないことを示す。

フィードバックの増強を報告している^{5, 11)}。また Limらは、転倒恐怖心によって、前庭核の興奮による前庭反射の促通が下肢全体でみられると報告している¹²⁾。一方で、下肢筋において、最終的な筋への運動出力を担う脊髄MN興奮性の変調が関与するのは不明であった。本研究は、tSCSを使用することで、転倒恐怖心による脊髄MN興奮性の変調に筋特異性が存在することを初めて示すことができた。TAは、他の下肢筋とは異なるメカニズムで、転倒恐怖心に対する中枢神経系の変調が生じている可能性がある。

脊髄MNの興奮性は、末梢からの感覚入力や上位中枢からのシナプス前抑制、または運動ニューロンへの直接的な投射の影響で変調することが示されている¹³⁾。転倒恐怖心が誘発されると、立位バランスの維持は随意的・意識的に行われることから¹⁴⁾、TAの脊髄MN興奮性の変調に大脳皮質運動野からの入力である皮質脊髄路の興奮性変調が関与している可能性がある。実際に、TAを支配する脊髄MNは他の下肢筋と比較して皮質脊髄路を介した入力を強く受けることが示されて

いる¹⁵⁾。本研究の結果においてもTAでのみ脊髄MN興奮性が促通されたことは、皮質脊髄路興奮性促通の関与を示唆する。また、立位中の転倒恐怖心は足関節スティフネスの増強によって足関節を安定化させることが示されている¹⁶⁾。足関節の安定化が必要な状況では、TAの皮質脊髄路興奮性が促通することが報告されており^{17, 18)}、機能的な観点からもTAの脊髄MNと皮質脊髄路の興奮性促通の関与が示唆される。

TAの脊髄MN興奮性に影響を与える他の要因は、拮抗筋である下腿三頭筋による相反抑制機構である。下腿三頭筋のIa求心性線維は、抑制性介在ニューロンを介してTAの脊髄MNに投射する¹⁹⁾。すなわち、下腿三頭筋の脊髄反射が促通する際には、拮抗筋であるTAの脊髄反射が減弱する。しかし、本研究では下腿三頭筋、すなわち SOL, MG, およびLGの脊髄反射は転倒恐怖心によって有意に変調しなかったことから、相反抑制の影響は排除できると考えられる。

本研究の限界点として、VRによる高所刺激が交感神経系を賦活できなかった点が挙げられる。先行研究では、転倒恐怖心が交感神経系を賦活させたとしても、SOLとMGの脊髄MN興奮性は有意に変調しないことが示されている^{5, 6)}。一方で、他の下肢筋について、交感神経系の賦活が脊髄MN興奮性を変調させるかについては検討がなされていないことから、今後検討する必要がある。さらなる課題として、転倒恐怖心によるTAの脊髄MN興奮性の促通が、転倒リスク増大させるかを調べる必要がある。本研究で採用した静止立位における高所への曝露は、転倒恐怖心を誘発するパラダイムとして確立されている²⁰⁾。しかし、外乱が加わらない限りは転倒に至る可能性は低いと思われる。したがって、転倒恐怖心によってTAの脊髄MN興奮性を高めている際に外乱を加えることで、実際に転倒に至るかを調べるのが今後の課題である。

4. 結 論

本研究では、転倒恐怖心が下肢筋の脊髄MN興奮性に与える影響を調べた。その結果、TAにおいて脊髄MN興奮性が促通することが明らかとなった。本研究により得られた成果は、転倒予防に向けたリハビリテーション・治療の開発に有用な知見になりうると考えられる。

謝 辞

本研究の助成いただいた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり東京大学の中澤公孝教授、東京国際大学の一寸木洋平准教授から多大なご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) B.W. Dijkstra, E.M.J. Bekkers, M. Gilat, V. de Rond, R.M. Hardwick, A. Nieuwboer, Functional neuroimaging of human postural control: A systematic review with meta-analysis, *Neurosci. Biobehav. Rev.*, **115**, 351–362. <https://doi.org/10.1016/J.NEUBIOREV.2020.04.028> (2020)
- 2) Y.S. Chen, S. Zhou, Soleus H-reflex and its relation to static postural control, *Gait. Posture.*, **33**, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.12.008> (2011)
- 3) K. Uemura, M. Yamada, K. Nagai, B. Tanaka, S. Mori, N. Ichihashi, Fear of falling is associated with prolonged anticipatory postural adjustment during gait initiation under dual-task conditions in older adults, *Gait. Posture.*, **35**, 282–286. <https://doi.org/10.1016/J.GAITPOST.2011.09.100> (2012)
- 4) M. Saffer, T. Kiemel, J. Jeka, Coherence analysis of muscle activity during quiet stance, *Exp. Brain Res.*, **185**, 215–226. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1145-3> (2008)
- 5) B.C. Horslen, C.D. Murnaghan, J.T. Inglis, R. Chua, M.G. Carpenter, Effects of postural threat on spinal stretch reflexes: Evidence for increased muscle spindle sensitivity?, *J. Neurophysiol.*, **110**, 899–906. <https://doi.org/10.1152/jn.00065.2013> (2013)
- 6) S. Grosprêtre, P. Eon, P. Marcel-Millet, Virtual reality does not fool the brain only: spinal excitability changes during virtually simulated falling, *J. Neurophysiol.*, **129**, 368–379. <https://doi.org/10.1152/jn.00383.2022> (2023)
- 7) F. Artoni, C. Fanciullacci, F. Bertolucci, A. Panarese, S. Makeig, S. Micera, C. Chisari, Unidirectional brain to muscle connectivity reveals motor cortex control of leg muscles during stereotyped walking, *Neuroimage*, **159**, 403–416. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2017.07.013> (2017)
- 8) K. Minassian, I. Persy, F. Rattay, M.R. Dimitrijevic, C. Hofer, H. Kern, Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord, *Muscle Nerve*, **35**, 327–336. <https://doi.org/10.1002/MUS.20700> (2007)
- 9) G. Courtine, S.J. Harkema, C.J. Dy, Y.P. Gerasimenko, P. Dyhre-Poulsen, Modulation of multisegmental monosynaptic responses in a variety of leg muscles during walking and running in humans, *J. Physiol.*, **582**, 1125–1139. <https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.2007.128447> (2007)
- 10) T.W. Cleworth, B.C. Horslen, M.G. Carpenter, Influence of real and virtual heights on standing balance, *Gait. Posture.*, **36**, 172–176. <https://doi.org/10.1016/J.GAITPOST.2012.02.010> (2012)
- 11) B.C. Horslen, M. Zaback, J.T. Inglis, J.S. Blouin, M.G. Carpenter, Increased human stretch reflex dynamic sensitivity with height-induced postural threat, *Journal of Physiology*, **596**, 5251–5265. <https://doi.org/10.1113/JP276459> (2018)
- 12) S.B. Lim, T.W. Cleworth, B.C. Horslen, J.S. Blouin, J.T. Inglis, M.G. Carpenter, Postural threat influences vestibular-evoked muscular responses, *J. Neurophysiol.*, **117**, 604–611. <https://doi.org/10.1152/jn.00712.2016> (2017)
- 13) J.E. Misiaszek, The H-reflex as a tool in neurophysiology: Its limitations and uses in understanding nervous system function, *Muscle Nerve*, **28**, 144–160. <https://doi.org/10.1002/mus.10372> (2003)
- 14) J.L. Huffman, B.C. Horslen, M.G. Carpenter, A.L. Adkin, Does increased postural threat lead to more conscious control of posture?, *Gait. Posture.*, 30528–532. <https://doi.org/10.1016/J.GAITPOST.2009.08.001> (2009)

- 15) I. Eisner-Janowicz, B. Chen, S. Sangari, M.A. Perez, Corticospinal excitability across lower limb muscles in humans, *J. Neurophysiol.*, **130**, 788–797. https://doi.org/10.1152/JN.00207.2023/ASSET/IMAGES/LARGE/JN.00207.2023_F006.JPEG (2023)
- 16) M.G. Carpenter, J.S. Frank, C.P. Silcher, G.W. Peysar, The influence of postural threat on the control of upright stance, 210–218. <https://doi.org/10.1007/s002210100681> (2001)
- 17) K. Nakazawa, N. Kawashima, H. Obata, K. Yamanaka, D. Nozaki, M. Akai, Facilitation of both stretch reflex and corticospinal pathways of the tibialis anterior muscle during standing in humans, *Neurosci. Lett.*, **338**, 53–56. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(02\) 01353-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(02) 01353-8) (2003)
- 18) K. Fujio, H. Obata, T. Kitamura, N. Kawashima, K. Nakazawa, Corticospinal excitability is modulated as a function of postural perturbation predictability, *Front. Hum. Neurosci.*, **12**, 324128. <https://doi.org/10.3389/FNHUM.2018.00068/BIBTEX> (2018)
- 19) C. Crone, H. Hultborn, B. Jespersen, J. Nielsen, Reciprocal Ia inhibition between ankle flexors and extensors in man, *J. Physiol.*, **389**, 163–185. <https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.1987.SP016652> (1987)
- 20) A.L. Adkin, M.G. Carpenter, New insights on emotional contributions to human postural control, *Front. Neurol.*, **9**, 789. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00789> (2018)

COVID-19(コロナ)による外出自粛期間中, 運動できた高齢者とできなかった高齢者の4年後の体力 (体力測定会参加者の場合)

京都先端科学大学 木村 みさか
(共同研究者) 医薬基盤・健康・栄養研究所 山田 陽介
京都先端科学大学 吉田 司
同

Comparison of Fitness Between Elderly People Who Could and Those Who Could Not Exercise Due to Voluntary Stay-At-Home During the COVID-19 Pandemic after 4 Years in Participants of a Fitness Assessment Event

by

Misaka Kimura
*Institute for Active Health,
Kyoto University of Advanced Science*
Yosuke Yamada, Tsukasa Yoshida
*National Institute of Health and Nutrition,
National Institutes of Biomedical Innovation,
Health and Nutrition
Institute for Active Health,
Kyoto University of Advanced Science*

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effects of the decrease in physical activities due to voluntary or involuntary stay-at-home to prevent the spread of COVID-19 on fitness of elderly people after the pandemic. The subjects were 414 elderly people (74 males and 340 females) who participated in a fitness-assessment event in October 2023, in which they underwent fitness tests and answered a

questionnaire about physical activities during the pandemic. There were no significant differences in the mean values of fitness test results between those who decreased and those who maintained the activity level during the pandemic. This suggests that the participants may have incurred a temporary decline in fitness due to voluntary restriction of outing during the pandemic but recovered half a year after the reclassification of COVID-19 as a Class V infectious disease.

キーワード

高齢者, コロナ禍, 身体活動, with コロナ, 体力

Keyword

Elderly people, COVID-19 pandemic, physical activities, living with coronavirus, fitness

要 旨

COVID-19（コロナ）感染拡大防止のための外出制限や外出自粛などによる高齢者における身体活動が、コロナ以後の体力に与える影響を検討することを目的にした。対象者は、2023年10月の体力測定会参加高齢者414名（男性74名、女性340名）である。調査項目は、体力および質問紙によるパンデミック時身体活動量である。パンデミック時に身体活動量が減少した者と維持していた者の間で体力値を比較したところ、平均値には差が認められなかった。すなわち、本対象者の体力は、パンデミック時に外出自粛等で一時的低下があったとしても、コロナ5類以降半年後（2023年10月）には回復していたと考えられる。

緒 言

新型コロナウイルス感染症COVID-19（コロナ）については、わが国では、2020年1月に初の感染が報告され、第1波から第8波までの感染拡大期を経て、2023年5月に感染症の位置づけが2類からインフルエンザと同じ5類に変更になった¹⁾。その間、2020年4月には全国一斉の緊急事態宣言が発令され、その後は、エリアを限定した緊急事態宣言や

蔓延防止等重点措置（まん防）がとられた。とりわけ緊急事態宣言では、運動施設など各種施設の休業要請や飲食店の時短要請が出され、不要不急の外出の自粛が推奨された。そして、高齢者においては、コロナに感染すると重症化しやすいことから、緊急事態宣言やまん防の解除後も行動制限を課していることが危惧された²⁾。

パンデミック下の身体活動量については、ロックダウンによる厳しい外出制限のあった英国³⁾や中国⁴⁾、米国⁵⁾等では老若男女を問わずに著しい減少が報告されている。日本において報告されているコロナ感染拡大期の身体活動量は、女性と若齢者に大きな減少が認められる⁶⁾、あるいは、首都圏では男性および55歳未満に有意な減少が認められるが、55歳以上女性での減少は有意でない⁷⁾等、性や年齢、居住地等で異なる傾向が示されている。一方、コロナ禍の行動制限は、身体活動量に加え社会参加の減少を伴い、抑うつ・不安などの健康二次被害⁸⁾をもたらすとの報告が多い。しかしながらこれらの報告は、感染拡大の前後で比較した短期の影響である。今回のパンデミックがもたらす体力や健康（要介護を含む）への真の影響は、長期に観察することで初めて明らかになる。

我々は、2002年より毎年、地域高齢者を対象にした測定会を開催しており、体力、体組成、口腔機能などの各種身体機能と生活状況の調査を継続してきた。この測定会は、コロナにより2020年から中止してきたが、2023年10月に4年ぶりに再開することになった。測定会再開にあたり、ここに参加する高齢者に対して、コロナ自粛期間中、身体活動量に影響を及ぼすような日常生活活動行動の頻度や時間が、コロナ前に比べて変化（減少）したかを調査した。本報告では、コロナによる自粛期間中の地域高齢者におけるこのような生活行動の変化を知り、活動に変化がなかった者（運動できた者）と時間や頻度が減少した者（運動できなかった者）との間で、体力を比較検討することを目的とした。

1. 方 法

1. 1 対象者

2023年10月に開催された地域の高齢者を対象にした測定会への参加者427名のうち、65歳以上の者414名（男性74名、女性340名）を対象とした。この測定会は、2002年からコロナ禍を除き、毎年（年1回）開催されてきた。対象者は、過去（直近3年間）の測定会参加者に対して郵送で案内文を送付する形を基本に、友人・知人の参加も自

由であることを追記して募集している。毎年400～450名が参加し、うち約7割が継続参加者、約3割が新規参加者である。なお、前回の測定会の開催は2019年6月であったので、2023年の案内は、2017年～2019年の参加者に対して行った。参加された427名の内訳は、継続272名（63.7%）、新規155名（36.3%）であった。

1. 2 測定・調査項目

体格や体組成、体力の測定を実施し、質問紙を用いた日常生活状況に関する調査を行った。これら調査内容の殆どは以前より継続的に調べられているものである。本報では、このような測定・調査項目の中から、身長、体重、BMI、握力、開眼片脚立ち、10m普通歩行時間、ファンクショナルリーチ、垂直跳びを分析に用いた。また、2023年の生活状況調査票には、従来の質問項目に加え、コロナ感染拡大期間中（2020年～2021年後半頃）の生活活動における変化を調査した。表1が作成した質問項目である。ここでは、活動行動として9項目をあげ、コロナ禍の活動の頻度や時間がコロナ感染以前と比べて、「かなり減った」「やや減った」「変わらなかった」「やや増えた」「増えた」「もともと行っていない」の6つの回答肢を用意し、選択する方法をとった。また、Kimura et al⁹⁾

表1 コロナ感染拡大中の活動状況調査

コロナ前と比べて、 実施時間や頻度は	かなり 減った	やや 減った	変わらな かった	やや 増えた	かなり 増えた	もともと 行っていない
1. 散歩やウォーキング、体操など 主に一人で行う運動やスポーツ	1	2	3	4	5	6
2. ジムトレーニング、体操、球技など、 主に施設や集団で行う運動やスポーツ	1	2	3	4	5	6
3. 買い物などの外出	1	2	3	4	5	6
4. 家の中での仕事（家事、育児、大工仕事、 植木の手入れ、家庭菜園など）	1	2	3	4	5	6
5. 家の外での仕事（賃金を得る仕事、公的 な会議など）	1	2	3	4	5	6
6. 友人や知り合いと会う	1	2	3	4	5	6
7. ボランティア活動・地域活動	1	2	3	4	5	6
8. 運動以外の主に一人で行う趣味	1	2	3	4	5	6
9. 運動以外の主に集団や施設で行う趣味	1	2	3	4	5	6

新型コロナウイルス感染症の感染拡大によって、外出制限や外出自粛が求められました。

その間（2020年～2021年後半くらい）のあなたの生活は、それ以前（2019年）と比べていかがだったでしょうか。

がヒトの aging biomarker の開発方法に基づいて提案する体力5項目を用いた体力年齢指標 Fitness Age Score (FAS) を算出した。

FAS算出式

男性：FAS=-0.203X1+0.034X2+0.0064X3+0.044X4+0.046X5-3.05

女性：FAS=-0.263X1+0.033X2+0.0074X3+0.048X4+0.0079X5-2.52

X1=10m 普通歩行時間 (秒), X2=ファンクショナルリーチ (cm), X3=開眼片脚立ち (秒), X4=垂直跳び (cm), X5=握力 (kg)

※スコアが高いほど体力は高い。計算上、スコアがマイナスになることもあり得る。

1. 3 統 計

量的変数については、対象者全体、男女別、年齢階級（前期・後期の高齢者区分を用いた）別に、まず、基本統計量として平均値±SDを算出し、平均値の差の検定には独立変数の t-test を用いた。質的変数については、出現頻度（割合、%）を求め、 χ^2 検定を行った。分析は SPSS V.29 (IBM) を使用し、統計的有意水準は $p<0.05$ とした。なお、コロナの感染拡大による生活活動の変化については、各項目別に6回答肢への出現頻度を求め、その後に、「かなり減った」「やや減った」を「減少」、「変わらなかった」「やや増えた」「増えた」を「変化なし・増加」「もともと行っていない」の3群に再編して頻度（割合、%）集計を行った。また、

BMIや体力に与える行動制限の影響は、「減少」「変化なし・増加」の2群の測定値を性と年齢群（前期・後期）で調整した後に平均値を比較することで検討した。

1. 4 倫理審査

本課題は京都先端科学大学の「人を対象とする医学系研究審査委員会」の承認を受けて実施した（決定番号 23M05）。

2. 結 果

2. 1 対象者の年齢、体格、体力と生活背景

図1には、本研究の対象者の年齢分布を示し、表2には、年齢、身長、体重、BMI、体力（FAS および FAS の構成体力項目）について、男女別に平均値と SD で示し、性および年齢階級（前期・後期の高齢者区分）による平均値の差の検定結果（p 値）を併記した。また、表3には、対象者の生活背景として同居・独居、健康、体力への自信、運動習慣、趣味、家庭での役割、地域活動の状況について、男女別に回答数と%（有効回答数に対する割合）を示し、性差は χ^2 検定で検定し、結果（p 値）を併記した。

対象者の年齢は、男性67～91歳、女性66～96歳に分布し、平均年齢は、男性80.5±5.1歳が女性78.3±5.3歳を有意に上回った。本対象者の特徴を年齢構造から見ると、前期高齢者95名に対し後期高齢者が319名という高齢化の進んだ集

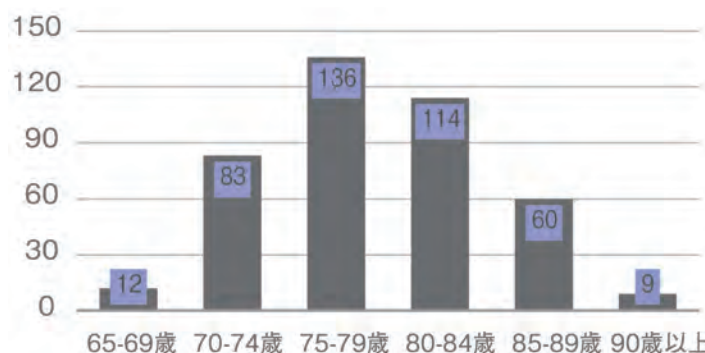


図1 年齢階級別対象者数(人)

表2 対象者の年齢, 体格, 体力

項目	単位	男性 (n=74)	女性 (n=340)	全体 (n=414)	性差 (p値)	前期・後期差 (p値)
年齢	歳	80.5 (5.1)	78.3 (5.3)	78.7 (5.3)	p<0.001	p<0.001
身長	cm	165.1 (5.8)	152.0 (5.4)	154.3 (7.4)	p<0.001	p=0.007
体重	kg	59.9 (7.3)	48.7 (6.9)	50.7 (8.1)	p<0.001	p=0.090
BMI		22.0 (2.5)	21.1 (2.8)	21.2 (2.7)	p=0.013	p=0.765
FAS		-0.774 (1.048)	-0.495 (0.938)	-0.547 (0.964)	p=0.026	p<0.001
握力	kg	31.1 (5.7)	21.0 (4.0)	22.8 (5.8)	p<0.001	p<0.001
垂直跳び	cm	23.4 (8.7)	18.2 (5.8)	19.1 (6.7)	p<0.001	p<0.001
開眼片脚立ち	秒	30.5 (45.2)	37.5 (46.8)	36.2 (46.5)	p=0.239	p<0.001
FR	cm	35.3 (7.8)	34.3 (5.9)	34.5 (6.3)	p=0.227	p<0.001
10m普通速度歩行	秒	7.848 (1.205)	7.538 (1.391)	7.593 (1.363)	p=0.078	p<0.001

数値は平均値 (±SD) FAS (体力年齢指標): Fitness Age Score, FR: ファンクショナルリーチテスト
 平均値の性および年齢階級 (高齢者区分: 前期・後期) による平均値の差の検定は独立変数の t-test で行った。

表3 対象者の生活背景

		男性	女性	全体	性差 p値
同居・独居	独居	9 (12.2)	124 (36.8)	133 (32.4)	p<0.001
	同居	65 (87.8)	213 (63.2)	278 (67.6)	
健康	健康	66 (89.2)	312 (92.0)	378 (91.5)	p=0.032
	健康でない	8 (10.8)	27 (8.0)	35 (8.5)	
体力への自信	あり	49 (66.2)	214 (63.3)	263 (63.8)	p=0.292
	なし	25 (33.8)	124 (36.7)	149 (36.2)	
運動習慣	あり	61 (82.4)	280 (84.1)	341 (83.8)	p=0.727
	なし	13 (17.6)	53 (15.9)	66 (16.2)	
趣味	ある	66 (90.4)	284 (85.0)	350 (86.0)	p=0.237
	ない	7 (9.6)	50 (15.0)	57 (14.0)	
家庭での役割	あり	66 (89.2)	315 (93.2)	381 (92.5)	p=0.237
	なし	8 (10.8)	23 (6.8)	31 (7.5)	
地域活動	あり	49 (66.2)	185 (54.7)	234 (56.8)	p=0.071
	なし	25 (33.8)	153 (45.3)	178 (43.2)	

数値は回答数 n (%:有効回答数に対する割合)
 χ^2 検定で性差が認められたのは同居と健康

団である。体格については、身長、体重は男性が女性を上回っており、BMIについても男性 22.0 ± 2.5 が女性 21.1 ± 2.8 より有意に高かった。男女別の式で求めた FAS は、男性 -0.771 ± 1.048 が女性 -0.497 ± 0.938 より有意に低い値を示したが、FAS 算出式を構成する体力項目では、握力、垂直跳びにおける男性の成績は女性を有意に上回った。年齢階級による平均値の有意差は、年齢、身長、FAS および FAS を構成する全ての体力項目に認められた。対象者の生活背景では、女性の独居 36.8% は男性 12.2% の約 3 倍、健康であるとの回答は女性 92% が男性 89.2% より高率で、両者ともに有意な性差が認められた。他の対象集団の特徴としては、約 6 割が体力に自信を持ち、約 9 割が

趣味や家庭内での役割を持ち、約 6 割が地域活動を行っていた。

2. 2 コロナ禍における活動状況 (コロナ感染拡大以前と比べて)

表4には、コロナ禍の活動状況について、それ以前と比べて頻度や時間にどのような変化があったかを、6つの回答肢で整理した結果 (出現頻度: %) で示した。また、表5には、表4の結果を、「減少」(かなり減った+やや減った) と「変化なし・増加」(変わらなかった+やや増えた+かなり増えた) に再グループ化し、「もともと行っていない」との3群の場合で示した。

6 回答肢による集計でも、「減少」「変化なし・

表4 コロナ禍の活動状況(コロナ以前と比べて)(1)

項目	かなり減った	やや減った	変わらなかった	やや増えた	かなり増えた	もともと行っていない	無回答
一人運動	44 (10.6)	124 (30.0)	199 (48.1)	24 (5.8)	11 (2.7)	7 (1.7)	6 (1.4)
施設や集団運動	62 (15.0)	110 (26.6)	148 (35.7)	19 (4.6)	5 (1.2)	68 (16.4)	3 (0.7)
外出	30 (7.2)	124 (30.0)	228 (55.1)	20 (4.8)	6 (1.4)	2 (0.5)	5 (1.2)
家の中仕事	12 (2.9)	35 (8.5)	292 (70.5)	51 (12.3)	12 (2.9)	11 (2.7)	2 (0.5)
家の外仕事	30 (7.2)	43 (10.4)	137 (33.1)	2 (0.5)	0 (0.0)	192 (46.4)	11 (2.7)
友人と会う	83 (20.0)	156 (37.7)	153 (37.0)	11 (2.7)	6 (1.4)	3 (0.7)	3 (0.7)
ボランティア活動	48 (11.6)	94 (22.7)	118 (28.5)	12 (2.9)	1 (0.2)	127 (30.7)	15 (3.6)
一人趣味	22 (5.3)	65 (15.7)	233 (56.3)	36 (8.7)	7 (1.7)	47 (11.4)	5 (1.2)
集団趣味	46 (11.1)	107 (25.8)	142 (34.3)	13 (3.1)	5 (1.2)	95 (22.9)	7 (1.7)

数値は回答数 n (%:全対象者についての割合)

全ての項目において、 χ^2 検定による性差、年齢区分差は認められなかった。

表5 コロナ禍の活動状況(コロナ以前と比べて)(2)

	減少	変化なし増加	もともと行っていない	有効回答数
一人運動	168 (41.2)	233 (57.1)	7 (1.7)	408
施設集団運動	172 (41.8)	171 (41.6)	68 (16.5)	411
外出	154 (37.7)	253 (61.9)	2 (0.5)	409
家の中仕事	47 (11.4)	354 (85.9)	11 (2.7)	412
家の外仕事	73 (18.1)	139 (34.5)	191 (47.4)	403
友人と会う	239 (58.2)	169 (41.1)	3 (0.7)	411
ボランティア活動	142 (35.6)	131 (32.8)	126 (31.6)	399
一人趣味	87 (21.3)	275 (67.2)	47 (11.5)	409
集団趣味	153 (37.6)	159 (39.1)	95 (23.3)	407

数値は回答数 n (%:有効回答数に対する割合)

全ての項目において、 χ^2 検定による性差、年齢区分差は認められなかった。

増加「もともと行っていない」の3群別集計の場合でも、性差、年齢階級差はいずれの項目においても認められなかった。表4から、もともとそのような活動は行っていないとの回答が多かったのは、家の外での仕事46.4%やボランティア活動30.7%、集団や施設で行う運動以外の趣味22.9%の順であった。また、活動の時間や頻度が増えた(やや増えた+かなり増えた)と回答が多かったのは、家の中の仕事15.2%、一人趣味10.4%、一人運動8.5%で、他の項目は0.5～5%程度であった。減少の回答は、表4の3群別集計で見ると、友人と会う58.2%、以下、施設や集団での運動41.8%、一人で行う運動41.2%、集団での趣味活動37.6%、ボランティア活動35.6%が上位であった。

2.3 コロナ禍における活動の実施状況と体力

コロナ禍における活動の実施状況として調査した9項目全てについて、それぞれの活動状況を、

もともと行っていない者を除いた、「減少」と「変化なし・増加」の2群で、年齢、BMI、体力(FASおよびFAS算出の5体力要素)について、性および年齢群を調整した後の推定値の平均値の比較を行った。表6には、「一人運動」についての2群別平均値とSEを示した。

一人運動については、減少群は変化なし・増加群に比べ、年齢、BMIがやや高く、体力ではFRを除く項目において低い傾向が見られたが、表に示す8項目(変数)全てにおいて2群の平均値には差が認められなかった。一人運動以外の他の生活活動項目についても同様な比較を行ったが、各項目ともに、結果は一人運動に一致し、2群間差は示されなかった。

3. 考 察

本研究では、コロナ感染拡大防止のための外出制限や外出自粛などによる高齢者における身

表6 コロナ禍における一人で実施できる運動実施状況と4年後のBMIと体力

項目	単位	減少(n=137/168)	変化なし・増えた(n=192/234)
BMI		21.5 (0.2)	21.0 (0.2)
FAS		-1.279 (0.061)	-1.218 (0.051)
握力	kg	22.3 (0.3)	23.1 (0.3)
垂直跳び	cm	18.8 (0.5)	19.3 (0.4)
開眼片脚立ち	秒	34.8 (3.6)	38.4 (3.0)
FR	cm	34.8 (0.5)	34.3 (0.4)
10m普通速度歩行	秒	7.57 (0.10)	7.60 (0.09)

年齢の平均値±SDは、減少群79.7±5.5歳、変化なし・増えた群78.8±5.2歳

n=女性/男女計、女性の割合は「減少群」81.5%、「変化なし・増加」群82.0%

数値は性・年齢調整後の推定値の平均値(±SE)

性・年齢調整後の群間推定値(平均値)には2群間差は認められなかった。

FR:ファンクショナルリーチテスト、FAS(体力年齢指標):Fitness Age Score, 男性式で計算

体活動が、コロナ以後の体力に与える影響を検討することを目的にした。わが国においては、COVID-19は、2023年5月に感染症法上の位置づけがインフルエンザと同じ5類相当になった¹⁾。著者らは、その6ヶ月後(2023年10月)、コロナ禍で中止していた地域在住高齢者を対象とする体力測定会を4年ぶりに再開した。この機会を捉えて、体力測定の実施とともに、コロナ禍(2020年から2021年後半くらいまで)の身体活動、正確には身体活動に関連すると思われる生活行動(散歩やウォーキングなどの一人で行う運動、ジム・体操教室や卓球など施設や集団で行う運動、友人と会う、家の中・外での仕事、ボランティア活動、趣味など)9項目について、頻度や時間が、コロナ以前と比べて減少したか否かを質問紙でretrospectiveに調査した。質問紙調査の結果では、コロナ禍ではコロナ前に比べ、「友人と会う」で58.2%、「施設集団運動」で41.8%、「一人運動」で41.2%、「集団趣味」で37.6%、「ボランティア」で35.6%が、活動の頻度や時間が減少したと回答した。

コロナ禍における身体活動量については、海外からは、WHOのCOVID-19パンデミック宣言後に行われた人の移動を厳しく制限するロックダウンとの関係で報告されている。身体活動量指標としては運動時間や歩数を、ほとんどがオンラインやスマートフォンを用いる方法で収集している。

第1波でのロックダウン中(2020年3月～5月)において、世界67カ国、10,121名を対象としたオンライン調査では、BMIが増加し、身体活動量は、18～35歳で31.25%、36～65歳で26.05%、65歳以上で30.27%の低下が示された¹⁰⁾。また、スマートフォンアプリ「Argus(アズミオ)」を使用している世界187国、455,404名を対象とし、2020年1月19日～6月1日までのデータを収集した記述的研究では、平均歩数は、パンデミック宣言から10日以内に5.5%(287歩)減少し、30日以内に27.3%(1,432歩)減少していた¹¹⁾。また、上海在住の中国人成人815名を対象に、2019年12月から2020年7月まで、202日間のスマートフォンに記録された歩数の変化を調べた研究では、平均歩数はロックダウン前には8,000歩を超えていたが、ロックダウン初日の平均歩数は3,796歩(SE=88)、その後3月23日にロックダウンが解除されるまでの間、1日あたり34歩ずつ増加し、ロックダウン解除時はロックダウン前と比べて708歩少ないだけであり、加えてその後の観察では1日あたり5歩ずつ増加していた⁴⁾。この報告において、ロックダウン初日に限ると、歩数はパンデミック前の半分に減少したことになる。

国内におけるコロナ禍の身体活動量との関係は、緊急事態宣言の前後比較の報告がいくつか見られる。横浜市民18,817人(ウォーキングポイント事業参加者)の活動量計による歩数は、緊急事

態宣言6週前から減り始め、2020年4月～5月には、特に65歳未満の女性では前年度の80%まで低下し、緊急事態宣言後も90～95%まで回復していなかった⁶⁾。また、3軸加速度計を用いた1,167名を対象とした縦断研究では、緊急事態宣言が発令された2020年4月の平均歩数は2020年1月に比べて、都市部では1,373歩有意に減少したが、農村部では202歩に留まり、都市部の有意な減少は、女性では55歳未満のみであったことが報告されている⁷⁾。高齢者1,600名を対象としたインターネット調査では、2020年4月時点の週あたりの総身体活動時間(中央値180分)は、2020年1月時点(中央値245分)に比べて65分(26.5%)有意に減少したことが示された¹²⁾。この研究では、その後の追跡調査も行っており、総身体活動時間は、2020年1月(パンデミック前)と比較して、4月(第1波)では33.3%、8月(第2波)では28.3%、2021年1月(第3波)では40.0%、それぞれ減少し、特に一人暮らしで社会的に活動していない高齢者では、42.9%(第1波)、50.0%(第2波)、61.9%(第3波)と大幅な減少が示されている¹³⁾。

上記に引用した内外の論文を参考にとすると、パンデミック下では、概ね20%～30%、多い場合は40%を越える身体活動量(歩数や活動時間)の減少があったと思われる。本研究での身体活動量は、歩数や活動時間などで量的に評価したものでない。また、コロナ禍であった2～3年前(2020年～2021年後半)を想起する質問紙によるretrospective調査で、厳密に緊急事態宣言下の状況を調べたものではない。そんな中、対象の約3割から5割が、程度の差は評価できないが、身体活動(正確には身体活動を伴う生活行動)が減少したと回答していた。逆に言えば、半分以上の方はコロナ禍においても身体活動の減少がないという結果であった。実際、ロックダウンや緊急事態制限下で、一律に誰でもが身体活動量が低下したわけではなく、地域差や年齢差、性差が認められ

ている。本研究は、京都市内在住の地域高齢者を対象にしたため、都市部・農村部のような地域比較はできないが、性差、年齢差(本研究では前期高齢者・後期高齢者の差)は検討したが認められなかった。一方、海外では、ロックダウン中にもかかわらず、徐々に身体活動量が回復することが示されている。本対象者は、平均年齢が約80歳という高齢層である。データを解析する前には、高齢になればなるほど、コロナに感染すると重症化しやすいことを恐れ、多くの方が必要以上の行動制限、外出自粛を課しているのではないかと考えた。にもかかわらず、半数以上は、コロナ禍でも身体活動に関連する生活行動を維持していたことは予想外の結果であった。先行研究に見られるように、パンデミック時の高齢者の行動制限は若齢者に比べて少ないのか、あるいは、パンデミックの初期には相応の行動制限・外出自粛があったが、比較的早い時期から「3密(密接、密集、密閉)」を避ける新しい生活様式として、徐々に日常の生活行動を回復させていたのかは、現時点では明らかにできない。

本研究の主目的は、上記で論じてきたコロナ禍の高齢者における身体活動が、コロナ以後の体力に与える影響を検討することであった。本報では、身体活動に関係する生活行動の時間や頻度で2群(「減少群」「変化なし・増加群」)を設けて、体力の2群間比較を行った。その結果、COVID-19の感染症の扱いが5類になってから半年後(2023年10月時点)の体力値には、コロナ禍(2020年～2021年後半)の身体活動量の影響は認められなかった。

体力、特に心肺持久力や筋力・筋持久力、柔軟性は身体組成とともに健康関連体力(health related physical fitness)¹⁴⁾と呼ばれ、生活習慣病の予防や治療、QOLの維持・向上に関係することが示されている。COVID-19と体力の関係については、海外から、幅広い年齢層を対象にした大規模コホー

ト研究において、コロナに感染した場合の重症化リスクとの関連が報告されている。1,559,187人のスウェーデン人徴兵隊員を対象とした前向き登録研究では、思春期後半から成人期前半の心肺機能が高いことは後年のCOVID-19の重症化に保護的な効果があり、若齢期の低い筋力はCOVID-19による入院、集中治療、死亡のリスクの上昇に関連していることを示した¹⁵⁾。欧州のコホート研究(Survey of Health, Ageing and Retirement in Europe: SHARE)参加者3,600名を対象にした研究では、50歳以上成人において、握力がCOVID-19感染の重症化の独立したリスク因子である可能性を示した(Cheval B et al., 2021)。また、UK Biobank Study参加者412,596名(データリンク時の年齢中央値68歳)を対象にした研究では、自己申告の歩行速度は、BMIで調整してもCOVID-19の重症度低下に関連することを示した¹⁶⁾。このような研究から明らかにされたのは、コロナに感染しても、年齢にかかわらず体力があれば、重症化予防になることである。今回のCOVID-19パンデミックは、感染症における体力の意味を再確認する機会になったことに注目したい。

高齢者の場合、体力は身体的自立の基盤となる。フレイルを予防し、要介護に陥らないためには、体力の加齢変化をできるだけ押さえることが重要である。高齢者におけるCOVID-19と身体活動量に関する論文の多くは、パンデミックで身体活動量が低下するとの仮説を確認した後、その結果として、体力の低下や座りがちな生活時間の増加を招く可能性を推察している。このような論文では体力をアウトカムにしていない。

わが国には、小学生から高齢者までを対象にしたスポーツ庁の「体力・運動能力調査」¹⁷⁾がある。この調査は、毎年実施され、客観的な体力指標によって国民の体力を長期にわたって経年的に把握できる。2020年はコロナの影響で、例年の6分の1のサンプル調査のため参考値として発表されて

いるが、男女ともほとんどの年代で合計点が前年度を下回っている。その後、2021年、2022年の調査では、合計点は徐々に上昇しているものの、年代によってはコロナ以前まで回復していない。特に2022年調査を見ると、高齢者の場合、女性では完全に回復・向上しているが、65～69歳男性では低下傾向のままである(スポーツ庁、2023年12月発表)。「体力・運動能力調査」は年度毎に異なる対象を抽出するサンプリング調査であるが、国全体の傾向を把握するには優れている。ただし、日本のコロナ施策は地域によって異なっていたため、一定の地域での縦断的な観察データも重要な情報源になる。笠間市の健康づくり事業に参加する高齢者240名(平均年齢73.2歳)を対象に、2016年～2020年の4年間の体力を解析した結果で、パンデミックによる有意な低下が認められたのは、男女ともにTimed Up & Go、5 m通常歩行時間、長座体前屈で、女性では握力、ペグ移動であった¹⁸⁾。スポーツ庁や寺岡らの報告を参考にすると、本対象者においても、特に運動に関連する生活行動の頻度や時間が「減少」していた者では、コロナ禍には通常の老化でみられる体力低下を越える低下があった可能性は考えられる。しかし、COVID-19が5類相当になって半年後の、少なくとも体力には、「減少」群と「変化なし・増加」群に差が認められなかったというのが本研究の結果である。

この背景として2つの要因をあげたい。一つ目はわが国の高齢者施策の広がりである。2000年の介護保険法施行以降、市町村が中心となって「介護予防・日常生活支援総合事業」¹⁹⁾が展開され、介護予防においても多くのプログラムが実施されてきた。体力の維持向上を目的にした運動プログラムの有用性を報告する論文は枚挙にいとまがなく、プログラム介入早期からその効果が確認されている。1回目の緊急事態宣言時、高齢者の著しく身体活動量が減少しているとの報告^{12, 13)}を受

け、日本老年医学会をはじめ様々な専門集団が、コロナ禍の新しい生活様式、特に3密を避けて体を動かすこと、人とコミュニケーションをとることの重要性を積極的に発信してきた⁸⁾。インターネットを介した介護予防教室や動画による運動メニューの配信などもコロナ禍で生まれた新しい形である。本対象者もおそらく意識・無意識にかかわらずこのような情報に触れていたと思われる。そのため、パンデミックの早い時期から、あるいはコロナワクチンの接種を済ませた頃から、あるいは感染症の扱いが5類相当になった以降、結果的に介護予防につながる生活行動をとっていたと推察される。このような行動を可能とするのは、2つ目の要因、すなわち対象集団の特性もあると考える。本対象者は体力測定会参加者である。一般的には、このような高齢者は、健康意識が高く、健康観が優れていることが明らかにされているが、本対象者においても約9割が健康で約6割が体力に自信があると回答していた。社会と個人の様々な要因の相互作用がパンデミック下の身体活動量減少による一時的な体力低下をカバーしてきた可能性がある。

本研究の限界としては、対象者が高齢者を代表するサンプルでないこと、コロナ禍の身体活動量を客観的手法で、感染状況や感染対策がとられた期間を的確に捉えて調査しておらず、また、コロナ感染の有無についての情報も欠落していること

などがあげられる。しかしながら、今回のコロナパンデミック下の行動制限や外出自粛の有無がその後の体力差に関係していなかったことは、地域で暮らす比較的健康な自立高齢者の実態とも考えられる。このような高齢者に対して、今後も健康や体力、生活状況の測定・調査を継続することは、極めて重要な課題であることを今回の調査を通じて再認識している。

当初、研究の計画段階では、COVID-19（コロナ）による外出自粛期間中、運動できた高齢者とできなかった高齢者の4年後の体力の変化について検討したいと考えた。本論文の対象者414名のうち、2019年と2023年の両データが揃っていたのは189名（男性46名、女性143名）である。このサブグループにおいて、2019年と2023年の測定値を比較すると、2023年は2019年に比べ、男女ともに身長、体重が有意に低下し、ほぼ全ての体力項目にも有意な低下が示された。ただし、兩年の差を算出し、その差に対して、コロナ禍の運動実施状況群（減った、変わらない・増えた）の影響を、性、年齢群調整後平均値で比較すると（表7）、BMIや体力項目の全てに群間差は示されなかった。すなわち、4年間の体力の変化量でみても、コロナ禍運動実施状況による差は認められなかったことを追記する。

本研究集団には、一部であるが縦断観察の可能な対象者を含む。表7の結果は2点の絶対値の変

表7 BMIと体力について、2019年と2023年の測定値の差をコロナ禍における一人で実施できる運動実施状況で比較した結果

項目	単位	減少(n=54/73)	変化なし・増えた(n=89/116)
BMI		-0.12 (0.13)	-0.05 (0.10)
FAS		-0.623 (0.075)	-0.613 (0.059)
握力	kg	-2.3 (0.3)	-2.1 (0.3)
垂直跳び	cm	-2.7 (0.9)	-3.9 (0.7)
開眼片脚立ち	秒	-45.4 (6.4)	-34.3 (5.1)
FR	cm	1.2 (0.8)	0.9 (0.6)
10m普通速度歩行	秒	0.61 (0.16)	0.93 (0.13)

n=女性/男女計、女性の割合は「減少群」74.0%、「変化なし・増加」群76.7%

数値は性・年齢調整後の推定値の平均値（±SE）

性・年齢調整後の群間推定値（平均値）には2群間差は認められなかった。

FR：ファンクショナルリーチテスト、FAS（体力年齢指標）：Fitness Age Score、男性式で計算

化量で検討したものであるが、老化速度の変化をみたものではない。老化速度を算出するためには最低3点以上の測定値が必要で、速度の変化を見るためには多くの時点の観察が必要となる。次の課題として、2019年以前のデータを収集して、コロナ禍で老化速度に変化があるかを検討したい。

4. 結 論

COVID-19の感染症の扱いが5類になってから半年後（2023年10月時点）の本対象者の体力値は、コロナ過（2020年～2021年後半）の身体活動量の影響は認められなかった。このような結果には、わが国における高齢者施策の広がりや本対象者の特性（健康への関心の高さ）があって、パンデミック下で低下した体力を回復させていたことが考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本調査に協力いただいた体力測定参加者の皆様に深謝致します。

文 献

- 1) 厚生労働省. 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) に係る新型インフルエンザ等感染症から 5類感染症への移行について. 001091810.pdf (mhlw.go.jp) (2021)
- 2) 日本医師会 .新型コロナ感染症 (COVID-19) の概説, 04.22. <https://www.covid19-jma-medical-expert-meeting.jp/topic/53> (2020)
- 3) Strain T, et al. Population level physical activity before and during the first national COVID-19 lockdown: A nationally representative repeat cross-sectional study of 5 years of Active Lives data in England., *Lancet. Reg. Health Eur.*, <https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2021.100265> (2022)
- 4) Ding D, et al. How COVID-19 lockdown and reopening affected daily steps: evidence based on 164,630 person-days of prospectively collected data from Shanghai, China., *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.*, **18**:40, <https://doi.org/10.1186/s12966-021-01106-x> (2021)
- 5) Hunter RF, et al. Effect of COVID-19 response policies on walking behavior in US cities., *Nat. Commun.*, Jun 16;**12** (1) :3652. doi: 10.1038/s41467-021-23937-9 (2021)
- 6) Hino K and Asami Y. Change in walking steps and association with built environments during the COVID-19 state of emergency: A longitudinal comparison with the first half of 2019 in Yokohama, Japan., *Health & Place*, **69** <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2021.102544> (2021)
- 7) Yamada, Y, et al. Age, Sex, and Regional Differences in the Effect of COVID-19 Pandemic on Objective Physical Activity in Japan: A 2-Year Nationwide Longitudinal Study., *J. Nutr. Health Aging*, **25**,1032-1033 (2021)
- 8) 飯島勝矢. Withコロナ時代のフレイル対策—日本老年医学会からの提言—. *Aging & Health*, **97**, 6-9 (2021)
- 9) Kimura M, et al. Constructing an index of physical fitness age for Japanese elderly based on 7-year longitudinal data: sex differences in estimated physical fitness age. *Age*, **34**, 203-214 (2012)
- 10) Urzeala C, et al. COVID-19 lockdown consequences on body mass index and perceived fragility related to physical activity: A worldwide cohort study., *Health Expectations*, **25**, 522-531 (2022)
- 11) Tison GH, et al. Worldwide Effect of COVID-19 on Physical Activity: A Descriptive Study., *Annals of Internal Medicine*, **173**, 767-770 (2020)
- 12) Yamada M, et al. Recovery of Physical Activity among Older Japanese Adults Since the First Wave of the COVID-19 Pandemic., *J. Nutr. Health Aging*, **24**,1036–1037 (2020)
- 13) Yamada M, et al. Effect of the COVID-19 Epidemic on Physical Activity in Community-Dwelling Older Adults in Japan: A Cross-Sectional Online Survey., *J. Nutr. Health Aging*, **24**, 948-950 (2020)
- 14) Pate RR. A new definition of youth fitness., *Physician and Sportsmed.*, **11**, 77-83 (1983)
- 15) Af Geijerstam A, et al. Fitness, strength and severity of COVID-19: a prospective register study of 1559187 Swedish conscripts., *B.M.J. Open*, **11**:e051316. doi:10.1136/bmjopen-2021-05131

- (2021)
- 16) Yates T, et al. Obesity, walking pace and risk of severe COVID-19 and mortality: analysis of UK Biobank., *Int. J. Obes.*, **45**, 1155-1159 (2021)
 - 17) スポーツ庁. 体力・運動能力調査令和 5年度 (速報). e-Stat. 3.29. http://www.mext.go.jp/sports/b_menu/toukei/chousa04/tairyoku/1368148.htm (2024)
 - 18) 寺岡かおり, 他. 新型コロナウイルス感染症流行下の高齢者の体力の変化～パフォーマンステストを用いた検討～. 日老医誌, **59**, 491-500 (2022)
 - 19) 厚生労働省. 介護予防・日常生活支援総合事業ガイドライン. 令和4年6月27日. <https://www.mhlw.go.jp/content/12300000/000957649.pdf> (2022)

ハムストリング肉離れの受傷予防と 走能力向上の両方を満たす走動作の予測

鹿屋体育大学 宮崎 輝 光

Optimizing Running Mechanics for Hamstring Strain Prevention and Sprint Performance Enhancement

by

Terumitsu Miyazaki

National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

ABSTRACT

Hamstring muscle strain injuries would occur during the late swing phase of high-speed running. Biceps femoris long head (BFlh) is the most common injured muscle among hamstring muscles. Here, we aimed to examine the influence of pelvic and lower limb joint kinematics on the BFlh muscle-tendon kinematics using an angle-driven simulation method. Forty male collegiate athletes performed maximal effort 50-60 m sprinting while capturing their motion with a three-dimensional motion capture system. Using this captured sprint data, we simulated the sprint motion that increased and decreased their BFlh muscle-tendon unit (MTU) length during the late swing phase of sprinting. This simulation revealed that the pelvic anterior-posterior and knee extension-flexion motions affect the BFlh MTU length, whereas hip extension-flexion motion has smaller contributions to the MTU length compared to the pelvic and knee joint motions. Thus, our result suggests that modifying the sagittal plane motions of the pelvis and knee joint would be beneficial for preventing hamstring muscle strain injuries.

キーワード

大腿二頭筋長頭, シミュレーション, スプリント, 筋骨格モデル, 伸張性収縮

Keyword

Biceps femoris long head, Simulation, Sprint, Musculoskeletal model, Eccentric contraction

要 旨

ハムストリングス肉離れは、疾走動作中の遊脚期後半に発生する。特に、ハムストリングス構成筋の中でも、大腿二頭筋長頭での肉離れの発生が多い。そこで、本研究では、疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減に影響する骨盤・下肢関節運動の特徴を角度入力による動作シミュレーションから明らかにすることを目的とした。40名の男性大学アスリートの走動作データを三次元動作計測した。そして、測定した走動作データをもとに、大腿二頭筋長頭の筋腱長を増加させた走動作および減少させた走動作を推定した。結果として、大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減に対して、膝関節の屈曲伸展運動と骨盤の前傾後傾運動が最も影響することが明らかとなった。一方で、筋腱長の増減に対して、股関節の屈曲伸展運動の影響は少なかった。したがって、ハムストリングス肉離れの受傷リスク減少を目指すための走動作として、大腿二頭筋長頭の筋腱長を制御するためには膝関節の屈曲伸展運動および骨盤の前傾後傾運動の制御が寄与する可能性がある。

背 景

ハムストリングス肉離れは、陸上競技のみならず、サッカーや野球などあらゆるスポーツ競技で発生するスポーツ傷害である¹⁻⁵⁾。ハムストリングス肉離れの受傷動作として、高速度の疾走動作中に発生することが多い⁵⁾。また、ハムストリングスは、大腿二頭筋長頭・短頭、半膜様筋、半腱

様筋の4つの筋から構成され、この中でも、大腿二頭筋長頭で肉離れの発生が多い^{2,5)}。これまでの研究から、筋が伸長されるタイミングで筋収縮が発生することによって、肉離れが発生する可能性が指摘されている⁶⁻⁸⁾。したがって、疾走動作においてもハムストリングスが伸張性収縮しているタイミングが肉離れの発生リスクが高い可能性がある。

疾走動作におけるハムストリングスの筋腱動態について、遊脚期後半では筋腱が伸長され、かつ筋張力が発揮される⁹⁻¹¹⁾。これらの先行研究から、疾走動作中の遊脚期後半において、ハムストリングスは伸張性収縮状態であり、肉離れの発生リスクが高い区間であると考えられる。この遊脚期後半において、ハムストリングス肉離れの受傷リスクの減少を達成するためには、どのような動作がハムストリングスの筋腱動態に影響するかを明らかにする必要がある。特に、遊脚期後半のハムストリングスの力発揮は、股関節伸展動作や膝関節屈曲動作に貢献し、遊脚側の脚の制御を担う。そのため、ハムストリングスの筋張力を維持しつつ、筋腱長や筋腱伸長速度を減少させることが肉離れの受傷リスクの減少に加えて、走パフォーマンスの維持にも貢献すると考えられる。

ハムストリングス肉離れの受傷者および既往者が有する走動作の特徴として、骨盤や上部体幹のキネマティクスや大殿筋や体幹筋群の表面筋電図に関する報告がある^{12,13)}。一方で、疾走動作中遊脚期後半におけるハムストリングスの筋腱長や筋腱伸長速度に影響する体幹および下肢関節の動作の特徴はいまだ不明である。この点を解決する

ことは、ハムストリングス肉離れの受傷リスクの減少を期待できる走動作の特徴が明らかになり、受傷予防のための走動作の修正トレーニングにつながる。特に、ハムストリングスは二関節筋であるため骨盤前傾、股関節屈曲、および膝関節伸展によって筋腱長は増大する。この3つの運動が、ハムストリングスの筋腱長の増減にどの程度影響し、どの運動が最も影響するかが明らかになれば、トレーニング計画のうえで重要な知見となり得る。

したがって、本研究の目的は、角度入力による動作シミュレーション方法を用い、疾走動作中の遊脚期後半におけるハムストリングスの筋腱長の増減に影響する骨盤と下肢関節運動を明らかにすることを目的とした。特に、骨盤の前傾運動の修正がハムストリングス肉離れの予防につながる可能性¹⁴⁾や肉離れ受傷者の走動作の特徴として過度な骨盤前傾角度が報告されている¹³⁾ことから、本研究の仮説として、「ハムストリングスの筋腱長の増減に対して、股関節屈曲や膝関節伸展と比べて、骨盤前傾が最も影響する」とした。本研究で扱う角度入力による動作シミュレーション方法の結果は、測定した走動作データをもとにするため、疾走速度が変化しない(≒走パフォーマンスが変化しない)状態で、肉離れの受傷リスクを増減させる身体運動の特徴を示唆するものである。

1. 研究方法

1. 1 研究対象者およびデータ測定

本研究の研究対象者は、健常の男性大学生40名とした(年齢, 20.1 ± 1.2 years; 身長, 170.5 ± 5.5 cm; 身体質量, 70.5 ± 7.4 kg)。40名のうち、13名はサッカー、15名は野球、および12名は陸上競技短距離種目を専門とする大学生アスリートであった。すべての対象者は、最大努力におけるスポーツ動作中に疼痛が発生しない者であった。すべての対象者に実験に関する口頭説明を実施し、

承諾を得た。本研究は筑波大学倫理審査委員会の承認を得て実施した(承認番号: 020-9)。また、本研究で扱う対象者および走動作データは、先行研究と同様である^{10, 15)}。

本研究の実験試技は、屋外の全天候型の陸上走路における50-60mの最大努力のスプリント試技であった。対象者は、普段使用しているランニングシューズを着用した。なお、陸上競技短距離選手については、スパイクありのシューズとした。対象者の身体各部分の特徴点に赤外線反射マーカーを47点貼付した¹⁵⁾。十分なウォーミングアップ後に、50-60mの最大努力のスプリント試技を2-3回実施した。試技間は5分以上の休憩を設けた。スプリント動作の測定範囲は、スタートから40-50m地点であり、測定後には減速するための走路を10m以上設定した。スプリント動作中の赤外線反射マーカーの3次元座標値は、3次元動作計測装置(250Hz, VICON-MX, Vicon Motion Systems Ltd., UK)を使用した。同様に、接地中の地面反力データを測定するために、地面に固定した3枚の地面反力計(1000Hz, 9287 B and two 9281 A, Kistler, Switzerland)を使用した。なお、3次元動作測定装置と地面反力計は同期させた。

1. 2 データ処理および角度入力による走動作シミュレーション

データ分析は、演算用ソフトウェア(MATLAB 2020b, MathWorks Inc., USA)を使用した。測定した3次元座標値は、18Hzを遮断周波数とした位相ずれのない4次のローパスバターワースフィルタ¹⁶⁾を使用し、平滑化した。接地および離地の判定は、地面反力の鉛直成分の20Nを閾値とし、20N以上のタイミングを接地期とした。分析対象とした走行区間は、膝関節が最大屈曲位となるタイミングから接地までの遊脚期後半とした(図1)。本研究では、分析区間の疾走速度が最も大きかった1試技を対象試技とした。

本研究では、大腿二頭筋長頭の筋腱長を増減させる動作を角度入力による動作シミュレーションから推定した。ここでは、目的とする筋腱長を任意に設定し、その設定した筋腱長となる走動作を推定した。加えて、推定した走動作データが、測定した走動作データから過度に逸脱しないようにするため、測定データと推定データの動作の違いが最小となるような動作を探索した。

はじめに、測定した走動作データから骨盤と右下肢（大腿、下腿、および足部）の4セグメントからなる剛体リンクモデルを構築した。加えて、OpenSimのgait2392モデル^{17, 18)}をもとに大腿二頭筋長頭の筋腱をモデル化し、大腿二頭筋長頭の筋腱長や筋腱伸長速度を推定した。剛体リンクモデルにおいて、各セグメントの重心位置や慣性モーメントといった身体部分慣性係数はDumasら^{19, 20)}が報告した係数を使用した。次に、測定した走動作データにおける大腿二頭筋の筋腱長をもとにして、目的とする筋腱長を設定した。本研究では、筋腱長が増加した条件と減少した条件の2条件を設定した（以下、筋腱長増大条件と筋腱長減少条件とする）。基準となる大腿二頭筋長頭の筋腱長最大値は、 $0.499 \pm 0.006\text{m}$ であった。筋腱長増大条件における最大値は $0.507 \pm 0.005\text{m}$ 、筋腱長減少条件の最大値は $0.491 \pm 0.005\text{m}$ であった。この2条件で設定した筋腱長に合致した走動作を推定するうえで、式(1)で示した目的関数 J を設定した。動作シミュレーションにおける最適化計算では、目的関数が最小となる、かつ推定する筋腱長が目的とする筋腱長に一致するという制約条件を満たす動作データを探索した。なお、最適化計算では遊脚期後半全体を対象としている。

最適化計算の目的関数は、推定する動作データが測定データから過度に逸脱しないように右辺の第一項と第二項に、セグメントの角加速度と各関節の関節トルクが推定データと測定データの差が小さくなるような項を設けた。また、本研究では

反対側の脚と体幹の動きを考慮していないため、腰仙椎関節および左脚股関節から骨盤に入力される正味の力とモーメントが推定データと測定データの差が小さくなるような項を設けた（右辺第三項）。

$$J = \sum_{ifr=1}^{nf} \sum_{idof=1}^q \left(\frac{\dot{\omega}_{idof}^{exp} ifr - \dot{\omega}_{idof}^{sim}}{\dot{\omega}_{idof}^{exp, max}} \right)^2 + w_1 \cdot \sum_{ifr=1}^{nf} \sum_{kdof=1}^6 \left(\frac{jt_{kdof}^{exp} ifr - jt_{kdof}^{sim}}{jt_{kdof}^{exp, max}} \right)^2 + w_2 \cdot \sum_{ifr=1}^{nf} \sum_{jdof=1}^6 \left(\frac{fr_{jdof}^{exp} ifr - fr_{jdof}^{sim}}{fr_{jdof}^{exp, max}} \right)^2 \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 nf および ifr は、遊脚期後半のフレーム数および各フレームを表している。右辺第一項において、 $\dot{\omega}_{idof}^{exp}$ 、 $\dot{\omega}_{idof}^{sim}$ 、および $\dot{\omega}_{idof}^{exp, max}$ は、ある自由度（ $idof$ ）における測定データの角加速度、推定データの角加速度、および推定データの角加速度の最大値である。右辺第二項において、 jt_{kdof}^{exp} 、 jt_{kdof}^{sim} 、および $jt_{kdof}^{exp, max}$ は、ある自由度（ $kdof$ ）における測定データの関節トルク、推定データの関節トルク、および推定データの関節トルクの最大値である。右辺第三項において、 fr_{jdof}^{exp} 、 fr_{jdof}^{sim} 、および $fr_{jdof}^{exp, max}$ は、ある自由度（ $jdof$ ）における測定データの残差力と残差モーメント、推定データの残差力と残差モーメント、および推定データの残差力と残差モーメントの最大値である。

1. 3 評価項目および統計処理

大腿二頭筋長頭の筋腱長に影響する動作要因の中でも、どの運動が最も影響するかを明らかにするために、測定した走動作データと推定した走動作データ（2条件）から骨盤前傾後傾角度、股関節屈曲伸展角度、および膝関節屈曲伸展角度を算出した。これらの角度について、遊脚期後半における筋腱長が最大となるタイミングでの角度を算出し、測定した走動作データから推定した走動作データへの変化率を算出した。

記述したデータは、平均値と1標準偏差を示している。統計処理は、SPSSを使用し、すべての

検定で有意水準は5%とした。評価項目における角度の変化率について、骨盤、股関節、および膝関節間で比較した。はじめに、反復測定 の1元配置分散分析を実施した。主効果が認められた場合、事後検定として各ペアで対応のあるt検定を実施し、Bonferroni法によって危険率を補正した。

2. 研究結果

測定した疾走動作における走速度は、 $8.95 \pm 0.6\text{m/s}$ (range, $7.88 - 10.23\text{m/s}$) であった。図1に、測定した走動作中、および推定した走動作中の大腿二頭筋長頭の筋腱長と筋腱伸長速度を示した。筋腱長増大条件および筋腱長減少条件では、筋腱長と筋腱伸長速度ともに基準データと比べて、増加および減少していた(図2)。

角度の時系列変化から、筋腱長増大条件では、

骨盤の前傾角度、股関節の屈曲角度、および膝関節の伸展角度の増大が認められた(図3)。筋腱長減少条件においても、骨盤の前傾角度、股関節の屈曲角度、および膝関節の伸展角度の減少が認められた(図3)。さらに、大腿二頭筋長頭の筋腱長が最大となるタイミングにおける角度について、骨盤の前傾後傾角度は筋腱長増大条件ではほぼ変化していなかったが、筋腱長減少条件では前傾角度の減少傾向が認められた(図4a)。股関節と膝関節については、筋腱長減少条件では屈曲角度の減少傾向、筋腱長増大条件では屈曲角度の増加傾向が認められた(図4bとc)。

角度の変化率については、筋腱長増大条件と筋腱長減少条件において、有意な主効果が認められた(図5；筋腱長増大条件： $F=39.1, p<0.001$, 偏 $\eta^2=0.77$ ；筋腱長減少条件： $F=126.9, p<0.001$, 偏 η^2

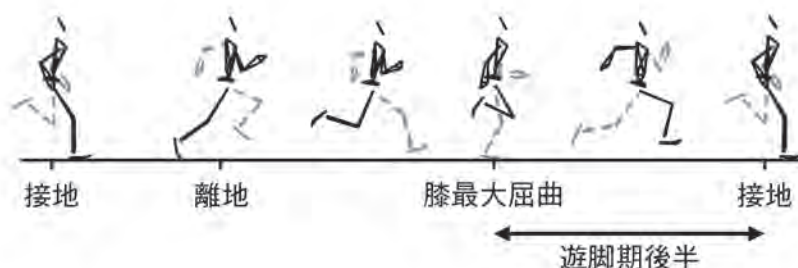


図1 疾走動作における遊脚期後半の定義

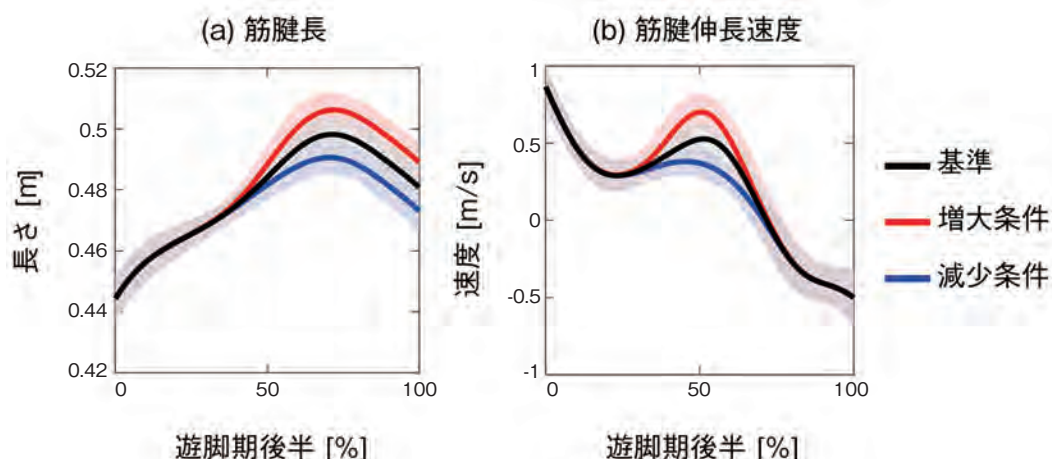


図2 遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の (a) 筋腱長と (b) 筋腱伸長速度の時系列変化

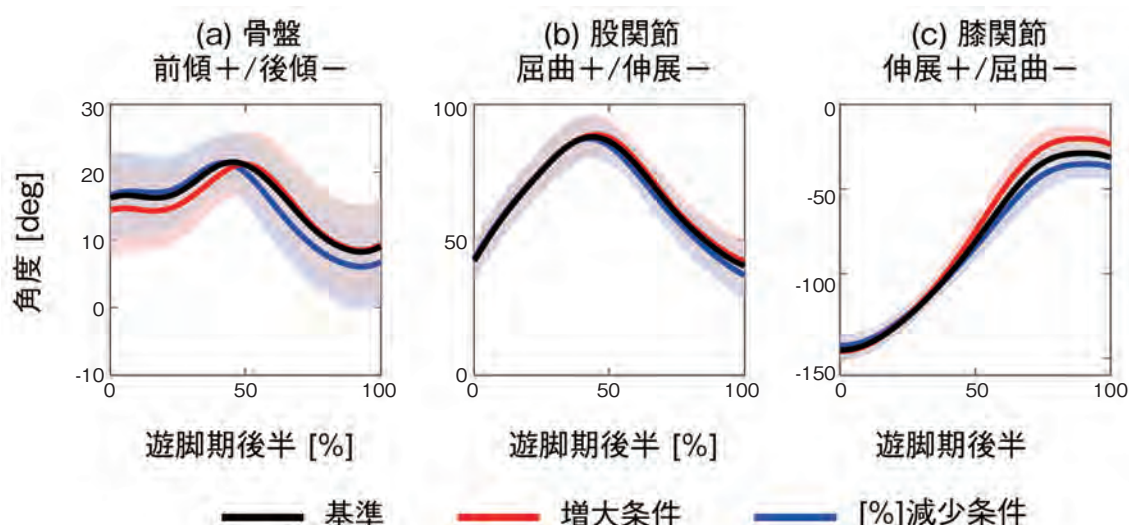


図3 遊脚期後半における(a) 骨盤の前傾後傾角度、(b) 股関節の屈曲伸展角度、および(c) 膝関節の屈曲伸展角度の時系列変化

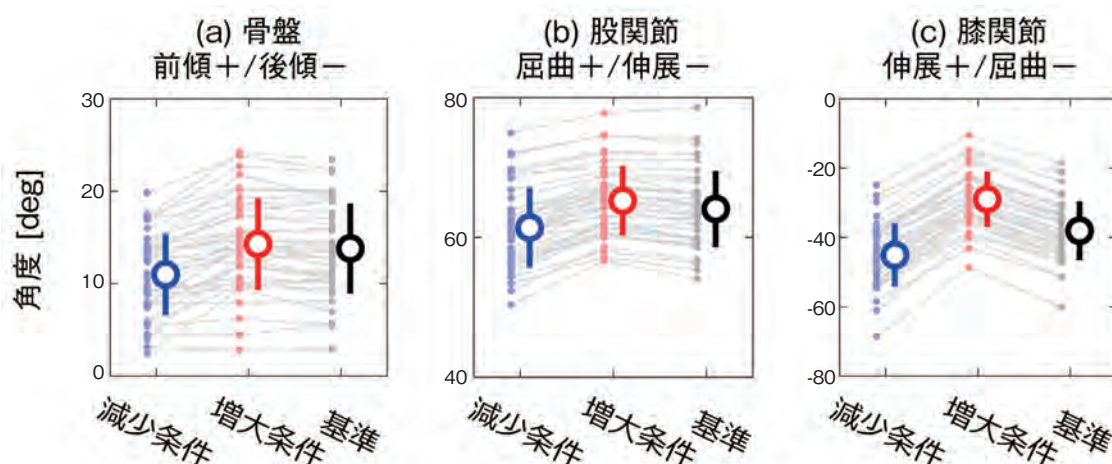


図4 大腿二頭筋長頭の筋腱量が最大となるタイミングにおける(a) 骨盤の前傾後傾角度、(b) 股関節の屈曲伸展角度、および(c) 膝関節の屈曲伸展角度

=0.50). 筋腱長減少条件では、股関節と比較して、骨盤と膝関節の変化率が有意に大きく、骨盤と膝関節間では有意な差は認められなかった(図5a). 筋腱長増大条件では、骨盤と股関節と比較して、膝関節の変化率が有意に大きかった。また、骨盤の変化率は、股関節と比べて、有意に大きかった(図5b).

3. 考 察

本研究は、疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長に影響する骨盤・下肢関節運動を角度入力による動作シミュレーションから検討した。解剖学的な起始停止点から、大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減には、骨盤の前傾後傾、股関節の屈曲伸展、および膝関節の屈曲伸展が関わる。本研究から、疾走動作中遊脚期後半において、大

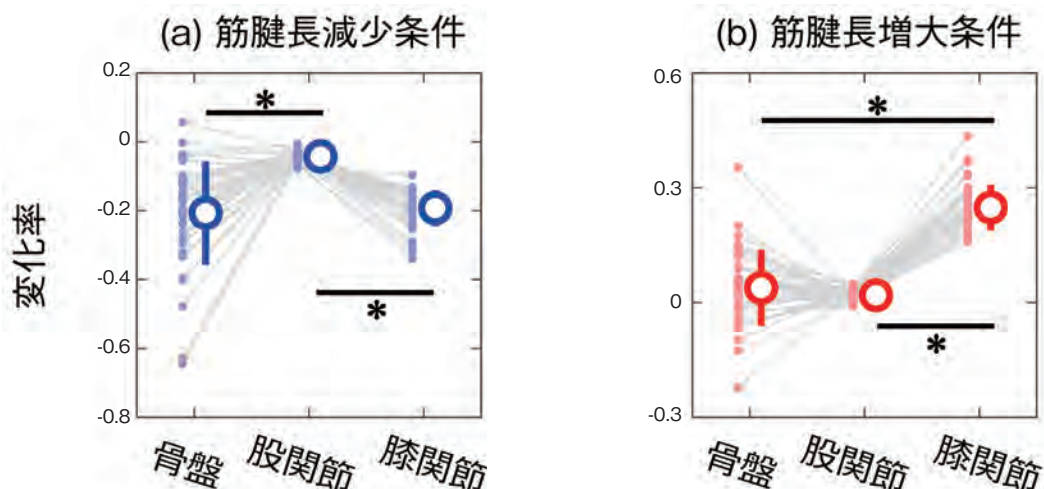


図5 大腿二頭筋長頭の筋腱量が最大となるタイミングにおける各角度の基準データからの変化率: (a) 筋腱長減少条件および (b) 筋腱長増大条件
変化率が正 (+) は、骨盤の前傾角度、股関節の屈曲角度、および膝関節の伸展角度の増加を示している。
アスタリスク (*) は、有意な差が認められた群間を示している ($p<0.05$)。

腿二頭筋長頭の筋腱長の増大には膝関節伸展運動が最も影響し、筋腱長の減少には膝関節伸展運動と骨盤の前傾運動が最も影響することが明らかとなった。さらには、股関節の屈曲伸展運動は、疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減への影響は少ないことが考えられた。以上の結果は、当初の研究仮説を一部支持するものであった。このことから、ハムストリングス肉離れの受傷リスク減少を目指すための走動作として、大腿二頭筋長頭の筋腱長を制御するためには膝関節の屈曲伸展運動および骨盤の前傾後傾運動の制御が寄与する可能性がある。

大腿二頭筋長頭の筋腱長増大条件では、遊脚期後半の後半部分において、骨盤の前傾、股関節の屈曲、および膝関節の伸展が増加していた。筋腱長減少条件では、骨盤の前傾、股関節の屈曲、および膝関節の伸展は減少が生じていた。これらのことから、従来の解剖学的な起始停止点からわかるように、大腿二頭筋長頭の筋腱長の制御には、骨盤の前傾後傾、股関節の屈曲伸展、および膝関節の屈曲伸展の3つの運動が関わることがわかった。加えて、本研究の結果から、これら3つの運

動の中でも、骨盤の前傾後傾運動と膝関節の屈曲伸展運動が筋腱長の増減への影響が大きいことが明らかとなった。一方で、股関節の屈曲伸展運動の変化率は、他の運動と比較して小さく、筋腱長への影響は少ない可能性がある。したがって、大腿二頭筋長頭の筋腱長を減少させ、肉離れの受傷リスクを減少させるためには、膝関節の伸展角度および骨盤前傾角度を減少させる方略が重要であると考えられる。

推定した走動作における骨盤前傾角度の変化率は、そのほかの変化率と比較して、個人間のばらつきが大きかった (図5)。特に、筋腱長減少条件では骨盤前傾角度が増大する対象者も存在し、筋腱長増大条件では骨盤前傾角度が減少する対象者も存在した。骨盤の運動は、体幹と両側股関節からのトルクおよび力入力によって制御される。そのため、骨盤の運動の個人差は、3つの関節からの入力に個人差があるため生じたと考えられる。加えて、これまでの研究から、骨盤の前傾角度の増大がハムストリングス肉離れの受傷リスクに関係がある可能性が報告されている¹³⁾。また、骨盤の前傾運動の修正がハムストリングス肉離れの

予防につながる可能性もある¹⁴⁾。そのため、骨盤前傾後傾運動の制御は、肉離れの受傷予防に貢献する可能性もある。本研究結果から、膝関節の過度な伸展運動と骨盤の過度な前傾運動の修正を同時に進める必要があることが示唆された。

本研究では、測定した走動作データを基準とし、大腿二頭筋長頭の筋腱長が増大する走動作と減少する走動作を推定した。結果として、それぞれの条件では、大腿二頭筋長頭の筋腱長および伸長速度の増大が認められた(図2)。そのため、本研究で適用した角度入力による動作シミュレーションは、大腿二頭筋長頭の筋腱長を増減させる走動作を推定できることを示している。ハムストリングス肉離れは伸張性収縮状態で発生する⁶⁻⁸⁾ことから、大腿二頭筋長頭の筋腱長が増大した走動作は肉離れの受傷リスクが増大した動作、および大腿二頭筋長頭の筋腱長が減少した走動作は肉離れの受傷リスクが減少した動作を模擬していると考えられる。一方で、本研究で適応した動作シミュレーションでは、肉離れの受傷リスクに関わり得る大腿二頭筋長頭の筋張力を制御していない。そのため、本研究で推定された走動作が、十分に肉離れの受傷リスクの増減を表現していない可能性もある。

4. 結 論

本研究は、動作シミュレーションを使用し、疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長に影響する骨盤・下肢関節運動を明らかにすることを目的とした。本研究のシミュレーションによって、大腿二頭筋長頭の筋腱長が増大した走動作および減少した走動作を推定することができた。結果として、疾走動作中遊脚期後半において、大腿二頭筋長頭の筋腱長の増大には膝関節伸展運動が最も影響し、筋腱長の減少には膝関節伸展運動と骨盤の前傾運動が最も影響することが明らかとなった。以上から、ハムストリングス肉離れの

受傷リスク減少を目指すための走動作として、大腿二頭筋長頭の筋腱長を制御するためには膝関節の屈曲伸展運動および骨盤の前傾後傾運動の制御が寄与する可能性があり、股関節の屈曲伸展運動は筋腱長の制御への寄与は少ないことが考えられた。

謝 辞

本研究は、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成に支援いただきました。また、筑波大学体育系スポーツバイオメカニクス研究室に所属する学生の多大な協力を得て行われました。

文 献

- 1) Ahmad C.S., Dick R.W., Snell E. et al., Major and Minor League Baseball Hamstring Injuries: Epidemiologic Findings From the Major League Baseball Injury Surveillance System., *Am. J. Sports Med.*, **42**(6): 1464-70(2014)
- 2) Brooks J.H.M., Fuller C.W., Kemp S.P.T., Reddin D.B., Incidence, Risk, and Prevention of Hamstring Muscle Injuries in Professional Rugby Union., *Am. J. Sports Med.*, **34**(8): 1297-306(2006)
- 3) Opar D.A., Drezner J., Shield A. et al., Acute hamstring strain injury in track-and-field athletes: A 3-year observational study at the Penn Relay Carnival: Hamstring injury in track-and-field athletes., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **24**(4): e254-9(2014)
- 4) Orchard J.W., Intrinsic and Extrinsic Risk Factors for Muscle Strains in Australian Football., *Am. J. Sports Med.*, **29**(3): 300-3(2001)
- 5) Woods C., Hawkins R.D., Maltby S., Hulse M., Thomas A., Hodson A., The Football Association Medical Research Programme: An audit of injuries in professional football - Analysis of hamstring injuries., *British Journal of Sports Medicine.*, **38**(1): 36-41(2004)
- 6) Lieber R.L., Friden J., Muscle damage is not a function of muscle force but active muscle strain., *Journal of Applied Physiology.*, **74**(2): 520-6(1993)
- 7) Brooks S.V., Zerba E., Faulkner J.A., Injury to

- muscle fibres after single stretches of passive and maximally stimulated muscles in mice., *Journal of Petrology*., **488**(2) : 459–69(1995)
- 8) Warren G., Hayes D., Lowe D., Armstrong R., Mechanical factors in the initiation of eccentric contraction-induced injury in rat soleus muscle., *Journal of Physiology*., **464**:457–75(1993)
 - 9) Chumanov E.S., Heiderscheit B.C., Thelen D.G., Hamstring musculotendon dynamics during stance and swing phases of high-speed running., *Medicine and Science in Sports and Exercise*., **43**(3) : 525–32 (2011)
 - 10) Miyazaki T., Fujii N., Intermuscular differences in force generation ability among biarticular hamstring muscles during the late swing phase in maximal speed sprinting., *Sports Biomechanics*., 1–18(2023)
 - 11) Schache A.G., Dorn T.W., Blanch P.D., Brown N.A.T., Pandy M.G., Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting., *Medicine and Science in Sports and Exercise*., **44**(4) : 647–58 (2012)
 - 12) Schuermans J., Danneels L., Van Tiggelen D., Palmans T., Witvrouw E., Proximal Neuromuscular Control Protects Against Hamstring Injuries in Male Soccer Players: A Prospective Study With Electromyography Time-Series Analysis During Maximal Sprinting., *Am. J. Sports Med.*, **45**(6) : 1315–25(2017)
 - 13) Schuermans J., Van Tiggelen D., Palmans T., Danneels L., Witvrouw E., Deviating running kinematics and hamstring injury susceptibility in male soccer players: Cause or consequence? *Gait & Posture*., **57**:270–7(2017)
 - 14) Mendiguchia J., Gonzalez De La Flor A., Mendez-Villanueva A., Morin J.-B., Edouard P., Garrues M.A., Training-induced changes in anterior pelvic tilt: potential implications for hamstring strain injuries management., *Journal of Sports Sciences*., **39**(7) : 760–7(2021)
 - 15) Miyazaki T., Fujii N., Effects of changes in optimal muscle fibre length in the biceps femoris long head on muscle force during the late swing phase of maximal speed sprinting: a simulation study., *Sports Biomechanics*., 1–16(2022)
 - 16) Winter D.A., Biomechanics and Motor Control of Human Movement: *Fourth Edition*., 1–370 p(2009)
 - 17) Delp S.L., Anderson F.C., Arnold A.S. et al., OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement., *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*., **54**(11) : 1940–50(2007)
 - 18) Hamner S.R., Seth A., Delp S.L., Muscle contributions to propulsion and support during running., *Journal of Biomechanics*., **43**(14) : 2709–16 (2010)
 - 19) Dumas R., Chèze L., Verriest J.P., Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters., *Journal of Biomechanics*., **40**(3) : 543–53(2007)
 - 20) Dumas R., Chèze L., Verriest J.P., Corrigendum to “Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters” [J. Biomech.(2006) in press](DOI:10.1016/j.jbiomech.2006.02.013)., *Journal of Biomechanics*., **40**(7) : 1651–2(2007)

ジャンプ着地動作時のアキレス腱張力に関する 足部三次元運動の解明

北海道大学大学院 保健科学研究所	越 野 裕 太
(共同研究者) 同	石 田 知 也
同	渡 邊 謙太郎
同	寒 川 美 奈
同	遠 山 晴 一

Three-Dimensional Foot Kinematics Associated with Achilles Tendon Force During Jump Landing

by

Yuta Koshino, Tomoya Ishida,
Kentaro Watanabe, Mina Samukawa, Harukazu Tohyama
*Faculty of Health Sciences,
Hokkaido University*

ABSTRACT

Managing the load on the Achilles tendon (AT) during jump landing is important in preventing AT injuries. Although foot kinematics may be associated with AT loading, these relationships are unclear during landing. The purpose of the present study was to determine the forefoot, midfoot, and rearfoot kinematics associated with AT force during a drop vertical jump (DVJ). Thirty-five participants (25 males, age: 21.8 ± 1.9 years old) performed the DVJ from a 30-cm high box. The landing phase was assessed using a three-dimensional motion analysis system. Dorsiflexion, eversion, and abduction of the forefoot, midfoot, and rearfoot were calculated using a multi-segment foot model. The AT force was estimated from the ankle flexion angle and plantarflexion

moment. The relationship between the peak AT force and each foot angle was evaluated using correlation analysis and multivariate regression analysis. In correlation analysis, the AT force and rearfoot abduction were negatively correlated ($\rho = -0.355$, $P = 0.036$). No other significant correlations were found. In multivariate regression analysis, the variance inflation factors for forefoot dorsiflexion and abduction angles were large, so these variables were excluded due to multicollinearity. The rearfoot abduction ($\beta = -0.523$, $P = 0.004$) and forefoot eversion ($\beta = -0.445$, $P = 0.012$) were factors significantly associated with the AT force ($R^2 = 0.273$, $P = 0.006$). The present study found that the increase in AT force during the landing task was associated with a decrease in rearfoot abduction and forefoot eversion. Foot orthoses that modify these kinematic characteristics may be useful in managing the AT loading during jump landings.

キーワード

アキレス腱障害, 動作解析, 足関節, 足部運動, キネマティクス

Keyword

Achilles tendinopathy, motion analysis, ankle, foot motion, kinematics

要 旨

本研究の目的は, drop vertical jump (DVJ) 中のアキレス腱張力に関係する前・中・後足部運動を解明することとした。運動経験のある健常者 35 名を対象とし, 赤外線カメラおよび床反力計を用いて DVJ を計測した。アキレス腱張力は足関節矢状面角度および底屈モーメントから推定した。また, 前・中・後足部の三次元角度を算出した。DVJ の着地相におけるアキレス腱張力最大値と各足部角度との関係を, 相関分析および重回帰分析により評価した。アキレス腱張力と後足部外転は負の相関を示した ($\rho = -0.355$, $P = 0.036$)。また, 後足部外転 ($\beta = -0.523$) と前足部外がえし ($\beta = -0.445$) が, アキレス腱張力に有意に関係する因子であった ($R^2 = 0.273$, $P = 0.006$)。着地動作時のアキレス腱張力の増大には, 後足部外転および前足部外がえしの減少が関係することが明らかになった。

かになった。

緒 言

アキレス腱は, オーバーユース障害が頻繁に発生する部位の一つであり, 様々なスポーツ種目で障害が発生する¹⁾。スポーツ活動中にアキレス腱が繰り返し大きな負荷に晒され, 負荷が過度になるとアキレス腱障害を発症する²⁾。アキレス腱障害は一度発症すると, 慢性化しやすく, 再発率も高い²⁾。そして, 長期に渡るアキレス腱周囲の疼痛により, スポーツ活動が制限される³⁾。したがって, アキレス腱障害の発症を予防すること, さらに慢性化・再発を予防することは重要である。

アキレス腱障害の発症予防や再発予防に向けて, アキレス腱にかかる負荷の管理が重要であるため, どのような動作パターンがアキレス腱負荷の増大に繋がるかを理解することが必要である。例えば, 着地動作時の床反力の大きさや足底圧中

心位置、股関節や膝関節の屈曲角度は、アキレス腱張力の増大に有意に関係する⁴⁾。また、体幹の前傾角度や足部接地パターン（後足部接地または前足部接地）といった運動特徴もアキレス腱張力の増大に関係する^{5,6)}。しかしながら、アキレス腱障害の発症に関わると考えられている足部運動に関しては、アキレス腱負荷の増大に関するかどうかは調べられていないため不明である。

足部運動に関して、歩行中の足部回内の増大は、アキレス腱負荷の増大因子である足関節底屈モーメントを増大させる⁷⁾。それゆえ、足部回内を制御するインソールを用いることで、アキレス腱負荷を減少できることが報告されている⁸⁾。これらの研究から、足部運動がアキレス腱負荷に関係する可能性が考えられものの、着地動作時の足部運動とアキレス腱負荷との関係を調べた研究はない。また、アキレス腱負荷を修正するためのインソール介入を発展させるためには、アキレス腱負荷と関係する詳細な足部運動を明らかにする必要がある。そこで本研究の目的は、着地動作時の前足部、中足部、後足部の三次元運動とアキレス腱張力との関係を明らかにすることとした。本研究の仮説は、足部回内に関与する前足部、中足部、後足部の外がえしや外転がアキレス張力と関係するとした。

1. 研究方法

1. 1 対 象

対象はスポーツ競技活動の経験がある健康成人

35名（男性25名、女性10名、年齢： 21.8 ± 1.9 歳、身長： 166.3 ± 9.3 cm、体重： 59.0 ± 7.5 kg）とし、全例利き脚である右脚を対象とした。除外基準は、下肢の骨折歴・手術歴、過去6カ月以内における下肢の筋骨格系疾患の既往を有することとした。本研究は所属機関の倫理委員会の承認を受け実施され（承認番号：23-96）、対象者には書面および口頭にて本研究に関する説明を十分に行い、書面による同意を得た。

1. 2 計 測

計測する着地動作課題はdrop vertical jumpとした。対象者は30cm台に両脚で立ち、台から前下方にある床反力計に両脚で着地してから直ちに最大垂直ジャンプを行い、第1回目の着地を解析対象とした（図1）。この動作を、三次元動作解析システムを用いて（Cortex version 5.5, Motion Analysis社製, Santa Rosa, CA, USA）、同期した赤外線カメラ7台（Motion analysis社製, Santa Rosa, CA, USA）および床反力計2枚（Kistler社製, Winterthur, Switzerland）を用いて計測し、それぞれサンプリング周波数は200Hzと1000Hzとした。成功3試行を記録した。

動作計測前に、赤外線反射マーカーを以下の身体ランドマークに貼付した。両側の上前腸骨棘、上後腸骨棘、大腿外側、大腿骨内側上顆・外側上顆、下腿外側、内果、外果、踵骨、第1・2・5中足骨頭、右下肢には脛骨粗面、腓骨頭、載距突起、



図1 Drop vertical jump

30cm台に両脚で立ち（A）、前下方にある床反力計に両脚で着地してから（B）、直ちに垂直ジャンプ（C）を行うdrop vertical jump課題。本研究では図1Bの着地時を解析の対象とした。



図2 赤外線反射マーカ貼付位置

腓骨筋滑車，舟状骨，第1・2・5中足骨底，母趾を追加した（図2）。右下腿および足部に追加で貼付したマーカ配置は，計測信頼性が確認されている Rizzoli foot model を参考にした⁹⁾。

1. 3 データ解析

Visual3D software（version 6, C-Motion 社 製，Inc, Germantown, MD, USA）を用いて，三次元動作解析で計測されたマーカ座標と床反力データそれぞれを，カットオフ周波数12Hzと50Hzで4次の Butterworth low-pass filter による処理を施した。Rizzoli foot model に準じて，下腿に対する後足部，後足部に対する中足部，中足部に対する前足部の背屈/底屈，外がえし/内がえし，外転/内転角度を算出した⁹⁾。なお，全てのセグメントにおいて背屈・外がえし・外転を正の値とした。アキレス腱張力の算出には MATLAB2021b（MathWorks 社製，Natick, MA, USA）を用いた。

まず，先行研究の MRI データを基に¹⁰⁾，着地動中の足関節矢状面角度（ θ ）の関数としてアキレス腱モーメントアーム（ATma）を算出した（ $ATma = -0.591 + 0.08297 \theta - 0.0002606 \theta^2$ ）。次に，足関節底屈モーメントを ATma で除すことによりアキレス腱張力を算出した。アキレス腱張力は各対象者の体重（Body weight: BW）で除すことで標準化した（%BW）。

Drop vertical jump の着地相（垂直床反力が初めて10Nを超えてから10Nを下回るまでの相）における，アキレス腱張力の最大値を抽出した。また，アキレス腱張力が最大になった時点の前足部，中足部，後足部の角度を抽出した。これらの変数については，3試行の平均値を統計解析に使用した。

1. 4 統計解析

アキレス腱張力最大値と前足部，中足部，後足部の背屈，外がえし，外転角度との関係を調べるための多変量回帰分析を実施する前に，Spearman の順位相関係数を用いて解析した。これは単相関の評価に加えて，多変量回帰分析における多重共線性の可能性を減らす目的で行われた。相関係数が0.7以上の組み合わせが存在した場合，本研究に重要と判断された変数を残し，多変量解析に使用した¹¹⁾。

従属変数をアキレス腱張力最大値，独立変数を前足部，中足部，後足部の角度とし，Akaike's Information Criterion に基づく変数減少法による重回帰分析を実施した。分散拡大係数が3.3を超えた場合，多重共線性と解釈され，その変数は独立変数から除外された¹²⁾。統計解析はすべて JMP Pro17（SAS Institute Inc., Cary, NC, USA）を用いて実施された。有意水準は0.05とした。

2. 研究結果

相関解析の結果，アキレス腱負荷の最大値と後足部外転角度との間に有意な負の相関を認めた

($\rho = -0.355$, $P = 0.036$). 他に有意な相関は認められなかった(表1). また, 足部セグメント角度において相関係数が0.7以上であった組み合わせは認められなかった.

重回帰分析において, 前足部の外転角度および背屈角度の分散拡大係数がどちらも3.3を超えていたため, この2つの変数は除外した. したがって, 前足部外がえし, 中足部背屈・外がえし・外転, 後足部背屈・外がえし・外転の計7つを独立変数として投入した. その結果, アキレス腱張力に有意に関係する因子として, 前足部外がえし($\beta = -0.445$, $P = 0.012$)と, 後足部外転($\beta = -0.523$, $P = 0.004$)が選択された($R^2 = 0.273$, $P = 0.006$)(表2). どちらの独立変数も標準化係数が負の値であることから, アキレス腱張力の増大には, 前足部外がえしが小さいこと, 後足部外転が小さいことが有意に関係した. アキレス腱張力最大値と後足部外転, 前足部外がえしの関係については図3に示す.

考 察

本研究は足部マルチセグメントモデルを用いて, 着地動作時の前足部, 中足部, 後足部の三次元運動とアキレス腱張力との関係を検討した. その結果, アキレス腱張力と後足部外転角度が相関することが明らかとなった. さらに, 重回帰分析の結果から, アキレス腱張力には前足部外がえし角度と後足部外転角度が有意な関係することが明らかとなった.

表1 アキレス腱張力最大値と各足部角度との相関解析の結果

	相関係数	P値
前足部背屈	-0.140	0.421
前足部外がえし	-0.171	0.325
前足部外転	-0.147	0.398
中足部背屈	-0.140	0.421
中足部外がえし	0.103	0.555
中足部外転	-0.083	0.634
後足部背屈	-0.045	0.797
後足部外がえし	-0.090	0.609
後足部外転	-0.355	0.036

太字で示した部分は有意な相関を示す.

表2 アキレス腱張力最大値との関係を調査した重回帰分析の結果

	B	β	P値	VIF
前足部外がえし	-0.424	-0.445	0.012	1.223
後足部外転	-0.224	-0.523	0.004	1.223

B:非標準化係数, β :標準化係数, VIF:分散拡大係数

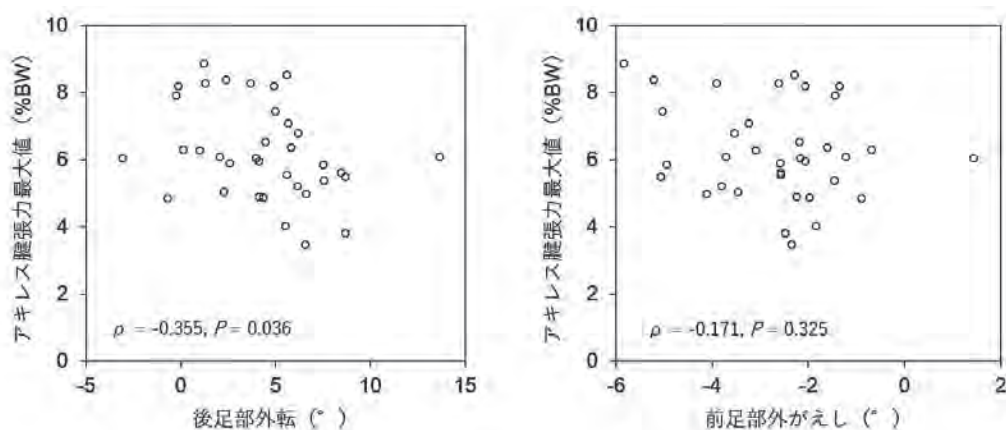


図3 アキレス腱張力最大値と後足部外転, 前足部外がえしとの関係

相関解析および重回帰分析の結果から、アキレス腱張力と後足部外旋角度には負の関係を認めることが明らかとなった（相関分析： $\rho = -0.355$ ，重回帰分析： $\beta = -0.523$ ）。これはアキレス腱張力の増大には、後足部外転角度の減少が関係することを示している。本研究の仮説として、足部回内に関係する後足部外転の増大がアキレス腱張力の増大に関係することを挙げていたが、この仮説は支持されなかった。荷重位における後足部外転の増大は長腓骨筋活動の増大をもたらすことから¹³⁾、後足部外転角度が大きい例では、着地の衝撃吸収において下腿三頭筋の他に長腓骨筋の関与が大きくなると考えられる。これにより下腿三頭筋の寄与が減少した結果、後足部外転角度が大きい例ではアキレス腱張力が減少したと考えられる。本研究において、多くの例が後足部内転（負の値）ではなく外転（正の値）を示していたことから（図3）、後足部外転角度が小さいことは内外転中間位に近づくことを示す。したがって、後足部外転角度が小さい例では衝撃吸収に対する下腿三頭筋の寄与が大きくなり、アキレス腱張力の増大に繋がったと考えられた。

重回帰分析の結果から、アキレス腱張力と前足部外がえし角度には負の関係を認めることが明らかとなった。本研究において、前足部外がえし（正の値）の減少は前足部内がえし（負の値）の増大を示している（図3）。したがって、この結果は、アキレス腱張力の増大には、前足部内がえし角度の増大が関係することを示している。着地動作では最初に前足部から接地するため、前足部は常に床と接地した状態となる。その際に、前足部内がえし角度が増大することは、前足部に対し中足部外がえしが増大することを意味する。着地動作時や歩行時の前足部内がえしの増大は足部回内に関係し^{14,15)}、また、足部回内が大きい例は足関節底屈モーメントが増大する⁷⁾。したがって、着地動作時の前足部内がえしの増大は、アキレス腱張

力の増大に関係したと推察された。

アキレス腱障害の予防や症状改善のためにインソールが使用されており、その有効性は確認されている¹⁾。これまでのインソールは、後足部外がえしを減少させ足部回内を制動するタイプや、踵部を補高し足関節底屈モーメントを減少させるタイプが使用されてきた⁸⁾。これらのインソールはランニング時のアキレス腱負荷を減少させることが明らかにされている⁸⁾。一方で、着地動作時のアキレス腱負荷を減らすための介入手段は不明である。本研究から、着地動作時のアキレス腱負荷を減らすためには、前足部外がえしおよび後足部外転を制御するインソールが有効である可能性が示唆された。または、着地動作時の前足部や後足部に対する運動指導を実施することでアキレス腱負荷を修正できる可能性もある。今後、着地動作時のアキレス腱負荷を減らすための介入法について、さらなる研究が必要である。

本研究にはいくつか考慮すべき限界がある。第1に、研究対象者が健常例であったことが挙げられる。アキレス腱障害例では足部運動が健常例と異なる可能性があるため¹⁶⁾、アキレス腱障害例においてアキレス腱張力に関係する足部運動を検討する必要がある。第2に、Drop vertical jumpのみ動作課題としたことである。片脚着地動作やセカンドジャンプがない両脚着地動作では異なる特徴を示す可能性がある。第3に、アキレス腱張力の計算において、対象者の解剖学的特徴に合わせたモーメントアームを求めていることが挙げられる。

結 論

両脚着地動作時の前足部、中足部、後足部の三次元運動とアキレス腱張力との関係を検討した。アキレス腱張力と後足部外転角度は有意に相関することが明らかとなった。また、重回帰分析により、アキレス腱張力には前足部外がえし角度と後

足部外転角度が有意な関係する因子であることが明らかとなった。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Martin R.L., Chimenti R., Cuddeford T. et al., Achilles Pain, Stiffness, and Muscle Power Deficits: Midportion Achilles Tendinopathy Revision 2018., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, **48**(5): A1-a38(2018)
- 2) Silbernagel K.G., Hanlon S., Sprague A., Current Clinical Concepts: Conservative Management of Achilles Tendinopathy., *J. Athl. Train.*, **55**(5): 438-447(2020)
- 3) Nielsen R.O., Rønnow L., Rasmussen S., Lind M., A prospective study on time to recovery in 254 injured novice runners., *PLoS One*, **9**(6): e99877(2014)
- 4) Koshino Y., Ishida T., Taniguchi S., Samukawa M., Kasahara S., Tohyama H., Hip and knee kinematics, center of pressure position, and ground reaction force are associated with Achilles tendon force during jump landing., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **34**(1): e14510(2024)
- 5) Rice H., Patel M., Manipulation of Foot Strike and Footwear Increases Achilles Tendon Loading During Running., *Am. J. Sports Med.*, **45**(10): 2411-2417(2017)
- 6) Atkins L.T., Lowrey M., Reagor S., Walker K., Cage D., The Effects of Increasing Trunk Flexion During Stair Ascent on the Rate and Magnitude of Achilles Tendon Force in Asymptomatic Females., *J. Appl. Biomech.*, **39**(1): 10-14(2023)
- 7) Hunt A.E., Smith R.M., Mechanics and control of the flat versus normal foot during the stance phase of walking., *Clin. Biomech.(Bristol, Avon.)*, **19**(4): 391-397(2004)
- 8) Lee K.K.W., Ling S.K.K., Yung P.S.H., Controlled trial to compare the Achilles tendon load during running in flatfoot participants using a customized arch support orthoses vs an orthotic heel lift., *B.M.C. Musculoskelet. Disord.*, **20**(1): 535(2019)
- 9) Leardini A., Benedetti M.G., Berti L., Bettinelli D., Natio R., Giannini S., Rear-foot, mid-foot and fore-foot motion during the stance phase of gait., *Gait. Posture*, **25**(3): 453-462(2007)
- 10) Rugg S.G., Gregor R.J., Mandelbaum B.R., Chiu L., In vivo moment arm calculations at the ankle using magnetic resonance imaging (MRI)., *J. Biomech.*, **23**(5): 495-501(1990)
- 11) Hair J.A., R. Babin, B. Black, W. Multivariate Data Analysis (8th)., *Cengage Learning EMEA*;(2018)
- 12) Kock N., Lynn G.S., Lateral Collinearity and Misleading Results in Variance-Based SEM: An Illustration and Recommendations. *Econometrics: Multiple Equation Models eJournal*.(2012)
- 13) Akuzawa H., Imai A., Iizuka S., Matsunaga N., Kaneoka K., The influence of foot position on lower leg muscle activity during a heel raise exercise measured with fine-wire and surface EMG., *Phys. Ther. Sport.*, **28**:23-28(2017)
- 14) Ezawa Y., Koshino Y., Yamanaka M. et al., Foot flexibility and alignment are weakly correlated with multi-segment foot kinematics during the landing task., *J. Am. Podiatr. Med. Assoc.*,(in press) (2024)
- 15) Hösl M., Böhm H., Multerer C., Döderlein L., Does excessive flatfoot deformity affect function? A comparison between symptomatic and asymptomatic flatfeet using the Oxford Foot Model., *Gait. Posture*, **39**(1): 23-28(2014)
- 16) Ryan M., Grau S., Krauss I., Maiwald C., Taunton J., Horstmann T., Kinematic analysis of runners with achilles mid-portion tendinopathy., *Foot Ankle Int.*, **30**(12): 1190-1195(2009)

後期高齢者のバスキュラー・ストレッチング介入における 柔軟性および動脈硬化度への影響

京都先端科学大学 新 野 弘 美

Effects of Vascular Stretching Intervention on Flexibility and Arterial Stiffness in Latter-Stage Elderly People

by

Hiromi Shinno

*Department of Health and Sport Sciences,
Faculty of Health and Medical Sciences,
Kyoto University of Advanced Science*

ABSTRACT

We investigated the effects of continuous vascular (static) stretching on flexibility, vascular endothelial function and arterial stiffness in latter-stage elderly people. Flexibility and vascular endothelial function and arterial stiffness significantly improved after three months of vascular stretching. After six months, further improvements were observed in flexibility, vascular endothelial function and arterial stiffness. However, six months after discontinuing vascular stretching, the flexibility, endothelial function, and arterial stiffness returned to the preintervention levels, thereby indicating that the effects of vascular stretching are reversible. These results suggest that vascular stretching may contribute as an anti-atherosclerotic exercise in latter-stage elderly people, as it improves flexibility, vascular endothelial function, and arterial stiffness.

キーワード

スタティック・ストレッチング, 柔軟性, 血管内皮機能, 動脈ステイフネス, 可逆性

Keyword

static stretching, flexibility, vascular endothelial function, arterial stiffness, reversibility

要 旨

後期高齢者を対象とし、バスキュラー（スタティック）・ストレッチングの継続実施による、柔軟性、血管内皮機能および動脈スティフネスに及ぼす影響を検討した。その結果、介入3ヶ月後は柔軟性の改善、血管内皮機能および動脈スティフネスにおいて有意な改善を認め、介入6ヶ月後ではさらに柔軟性の改善、血管内皮機能および動脈スティフネスにおいて有意な改善を認めた。しかしながら、6ヶ月間の脱介入後では、柔軟性、血管内皮機能および動脈スティフネスは介入前の状態に戻り、獲得した効果の可逆性を認めた。バスキュラー・ストレッチングの継続実施は柔軟性を改善し、抗動脈硬化の運動種目の一つとして貢献する可能性が示唆された。

1. Introduction

老化は遺伝的要因以上に環境的要因の影響を受け、各自の生活様式が進行を決定づける。加齢変化や廃用の程度は個人差が大きく、生活習慣病等の疾患においても多様である¹⁾。加齢に伴い血管は、エラスチンの減少と伸縮性のないコラーゲンの増加など、構造的および機能的に変化をきたす。血管内皮を介した血管拡張は低下し、大動脈のような弾性型動脈では、血管内膜が肥厚し血管壁が厚くなることで、血管コンプライアンスは低下する。動脈コンプライアンスが低下するとウインドケッセル機能が低下し、収縮期血圧上昇、拡張期血圧低下をきたし脈圧を増加させる^{2,3)}。脈圧増大は末梢動脈を障害し、さらに動脈硬化を進行させる。動脈コンプライアンス低下は脈波速度も促進させ、反射波をより早期に出現させる。性差に

においては、女性ホルモンが血圧の上昇に防御的に働いており、閉経とともに血圧が上昇し、動脈硬化度の亢進が顕著になる^{4,5)}。これらのことから動脈硬化を基盤とする疾患が増加し、虚血性心疾患、また脳血管障害においては血管性認知症やうつ病の原因にもなりうる¹⁾。

運動能力の一つである柔軟性と動脈硬化度の関連性は、高齢者においても柔軟性に優れている者に比し、優れていない者は上腕-足首脈波伝播速度 brachial-ankle Pulse Wave Velocity (baPWV) や頸動脈-大腿動脈脈波伝播速度 carotid-femoral Pulse Wave Velocity (cfPWV) が増大しているという報告⁶⁾がある。このことから柔軟性の低下は、動脈硬化度の増大と関係する可能性を示しており、柔軟性の維持・向上は抗動脈硬化に貢献することになりうる。

高齢者が一般的な有酸素運動を継続実施するには持久力や脚筋力が必要であり、レジスタンス運動を実施するにも関節への負担や負荷に対しての配慮が必要である。高齢者が実施するのに容易と考えられる運動の一つにスタティック・ストレッチングがある。実施姿勢は立位だけでなく椅座位または臥位でも可能で、怪我のリスクも少ない低強度運動である。正しい方法を習得できれば、特別な道具も必要なく、自宅においても個人で実施しやすいことが最大の利点であり、継続することによる身体機能向上に寄与することが報告⁷⁾されている。

これまでも抗動脈硬化の運動として有酸素運動⁸⁻¹¹⁾、レジスタンス運動とレクリエーションプログラムの複合的な運動効果の報告¹²⁾は散見される。我々はこれまでに中年女性を対象とし、スタティック・ストレッチングの実施により、骨格

筋と並走する血管が同等に伸張していること¹³⁾、血管内皮機能の改善^{14, 15)} および動脈ステイフネスの改善効果¹⁴⁾ を報告している。実施したスタティック・ストレッチングが動脈硬化度に影響がみられたことから、バスキュラー・ストレッチングと名付けた（以下バスキュラー・ストレッチングと表示）。これまでに高齢者を対象とし、スタティック・ストレッチングのみに特化した介入が柔軟性、血管内皮機能、動脈ステイフネスに及ぼす影響の検証は少ない。

そこで本研究は高齢者の日常生活において、取り組みやすいエビデンスのある運動処方確立が必要であると考え、後期高齢者を対象とし、バスキュラー・ストレッチングのみに特化した継続実施が柔軟性および血管内皮機能、動脈硬化度に及ぼす影響を検討することを目的とした。

2. Methods

2. 1 対象者及び介入期間

対象者は75歳以上の後期高齢者で、医師からの運動制限がなく、自力で設定会場までの移動が可能であり、他の研究に参加していないこととした。対象者のうち介入期間中にバスキュラー・ストレッチングを継続実施し、全回の測定が可能であった18名（年齢 79.8 ± 3.3 歳、男性2名・女性16名）を介入群（ $n = 9$ 名のうち男性1名・年齢 79.2 ± 2.7 歳）とコントロール併用群（ $n = 9$ 名のうち男性1名・ 80.4 ± 4.1 歳）の2群に無作為に群分けし、比較検討した。

介入期間は6ヶ月間とし、介入群は毎日15分以上のバスキュラー・ストレッチングを1日1回以上実施した。コントロール併用群は3ヶ月間を未介入とし、その後3ヶ月間は介入群と同様に毎日15分以上のバスキュラー・ストレッチングを1日1回以上実施した。両群共に介入前、介入3ヶ月後および6ヶ月後、さらに脱介入3ヶ月後と6ヶ月後に同様の測定項目を評価した。任意ではあつ

たが6ヶ月の介入期間中に、19回バスキュラー・ストレッチングの講座を開催し、正しい実施方法を確認した。更に健康に関わる情報（A4用紙1枚程度）を計10回、電子メールか郵送にて発信をした。

2. 2 測定項目

2. 2. 1 体組成

体組成は、身長、体重、BMI、体脂肪率、筋肉量を測定した。体重、体脂肪率、筋肉量はInBody 720（BIOSPACE社製）を用い測定した。

2. 2. 2 身体活動量

基本的な日常活動と酸素摂取量に対応している問診表形式の身体活動能力指標Specific activity scale（SAS）は、自記式にて記入依頼し、結果から算出した。身体活動量は、国際標準化身体活動質問票International Physical Activity Questionnaire short version, usual week 2002年8月版（IPAQ）の質問紙に自記式にて記入依頼し、結果から算出した。

2. 2. 3 柔軟性

長座体前屈は竹井機器工業株式会社製、長座体前屈計T.K.K5112で測定した。壁に後頭部と背面および臀部を付け、足関節の角度は固定しない長座姿勢をとる。上肢は肩幅の広さで両手のひらを下に向け、台の上に置き、両肘を伸ばした状態を初期姿勢とする。膝関節を伸展したままゆっくりと前屈し、初期姿勢から最大に前屈した時の距離を2回測定し、その最長距離を採用した。

2. 2. 4 血管内皮機能

血管内皮機能は、Itamar Medical社製Endo-PAT2000を用いて反応性充血指数Reactive Hyperemia Peripheral Arterial Tonometry index（RH-PAT index）を測定した。空腹時かつ安静時に仰臥位で、両手中指の指尖にPATプローブを装着し、左上腕にマンシエットを巻いた。マンシエットは駆血時、被験者の安静時の拡張期血圧

+60mmHgで加圧した。測定プロトコルは、駆血前に5分間のPATシグナルの平均振幅を測定した後、5分間の駆血を行い、駆血解放後5分間のブローブ内空気圧変化を脈波として検出し、PATシグナルの平均振幅を測定した。RH-PAT indexは、駆血側と非駆血側のPATシグナル比により算出し、データはEndo-PAT2000ソフトウェアによって自動解析した。

2. 2. 5 動脈スティフネス

動脈スティフネスの指標であるbaPWVは、オムロンコーリン社製血圧脈波検査装置BP-203RPEⅢを用いて測定した。仰臥位にて安静状態にした後、両上腕と両下腿遠位部に血圧測定用マンシエット、両手関節部に心電図クリップ、第4肋間胸骨左縁付近に心音マイクロフォンを装着した。測定時に4つのマンシエットが同時に締め付けること、測定中は動いたり会話が出来ないことを口頭で説明し、心電図信号の安定を確認してから測定した。上腕と下腿部の脈波を採取し、2点間の時間差と距離を求めることにより、速度を算出し、左右の平均値を採用した。

2. 3 バスキュラー・ストレッチング

バスキュラー・ストレッチングの部位は、立位、椅座位、座位もしくは臥位姿勢で僧帽筋、前腕屈筋群、三角筋、上腕三頭筋、上背部（僧帽筋・菱形筋）、大胸筋、広背筋、腓腹筋、ヒラメ筋、股関節外転筋群、股関節内転筋群、大腿四頭筋、ハムストリングス、大臀筋、脊柱起立筋下部で全身の骨格筋を網羅するような15部位とした。伸張時間は、各部位20秒～30秒間、伸張時は気持ち良い感覚を残しつつ、Rating of Perceived Exertion (RPE) では少しきつからきつい感覚で、ストレッチングを実施した。介入時の実施記録は、記入用紙を配布し自記式にて記入依頼した。

2. 4 統計処理

測定値はすべて平均値±標準偏差で示した。介入群とコントロール併用群の介入前については、正規性を確認した後、両側t検定にて群間差を確認した。介入群とコントロール併用群の介入前、介入3ヶ月後、介入6ヶ月後、脱介入3ヶ月後、脱介入6ヶ月後においては二元配置分散分析を用いた。

統計学的解析は統計解析ソフトSPSS 27.0 J for Windows用い、全ての検定において危険率5%未満を有意水準とした。

本研究は、帝塚山学院大学倫理委員会の承認(2020-1)を得て、帝塚山学院大学倫理規定に則り、すべての対象者に対して本研究の主旨、実施内容及び注意点について説明し、参加については書面にて同意を得て実施した。

3. Results

3. 1 対象者特性と身体活動量

表1に対象者特性として体組成、SAS、IPAQを示した。介入群およびコントロール併用群の体組成、SAS、IPAQは介入前に比し、全ての測定回において有意な差を認めなかった。

3. 2 柔軟性

表1に柔軟性の値を示した。介入群の6ヶ月間のバスキュラー・ストレッチング実施率は、介入3ヶ月間が105.5±24.0%、4ヶ月から6ヶ月までが94.0±8.1%であった。介入群の長座位前屈は、介入前に比し介入3ヶ月後、6ヶ月後に有意な高値を認めた。介入6ヶ月後に比し、脱介入3ヶ月後および6ヶ月後にも有意な低値を認めた。

コントロール併用群の3ヶ月間のバスキュラー・ストレッチング実施率は、92.0±10.9%であった。コントロール併用群の長座位前屈は、介入前に比し介入3ヶ月後に有意な高値を認めた。介入3ヶ月後に比し、脱介入3ヶ月後および6ヶ月

表 1 Changes in body composition, Specific activity scale, International physical activity questionnaire and flexibility during the study period

	介入群 (n=9)					コントロール併用群 (n=9)				
	Pre	3months	6months	3 detraining	6 detraining	Pre	3months	6months	3 detraining	6 detraining
Age (years)	79.2±2.5					80.4±3.8				
Height (cm)	154.8±5.8					151.4±7.8				
Weight (kg)	53.2±8.4	53.1±8.5	53.2±8.5	53.4±8.3	52.9±8.2	50.3±6.1	50.4±6.0	50.4±5.9	50.6±6.0	50.5±6.2
Body Mass Index (kg/m ²)	22.1±2.1	22.1±2.1	22.2±2.2	22.2±2.2	22.0±2.2	21.9±1.6	22.0±1.5	22.0±1.3	22.0±1.3	21.9±1.3
Body fat percentage (%)	30.1±4.8	29.7±3.2	30.0±3.8	29.9±4.6	29.3±4.1	30.7±5.0	30.6±4.4	30.7±3.7	30.6±3.8	30.4±3.7
Lean Mass (kg)	34.7±5.7	35.2±5.8	35.4±5.6	35.0±5.6	34.8±5.8	32.8±4.3	32.7±4.1	33.3±4.3	33.0±4.3	33.0±4.2
SAS (Mets)	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9	7.1±0.9
IPAQ (kcal/day)	532.5±522.1	532.5±522.1	532.5±522.1	532.5±522.1	532.5±522.1	302.9±496.2	302.9±496.2	302.9±496.2	302.9±496.2	302.9±496.2
Trunk flexion (cm)	37.1±6.2	43.0±5.8**	47.4±6.4**	42.8±7.8**	39.3±7.4**	36.5±9.1	37.3±9.6	45.1±8.5**	38.2±9.1**	36.7±8.1**

Results are expressed as means ± SD. Asterisks show statistically significant difference (**p<0.01)

表 2 Changes in blood pressure, Reactive Hyperemia Peripheral Arterial Tonometry index, brachial-ankle Pulse Wave Velocity during the study period

	介入群 (n=9)					コントロール併用群 (n=9)				
	Pre	3months	6months	3 detraining	6 detraining	Pre	3months	6months	3 detraining	6 detraining
Pulse Rate (bpm)	73.4±10.9	72.3±10.0	73.6±11.3	73.9±10.7	74.8±10.5	76.3±7.6	76.7±7.1	75.9±8.9	77.4±8.0	77.2±7.7
SBP (mmHg)	138.3±16.1	136.1±14.3	136.6±14.7	137.4±17.4	137.8±16.6	135.1±10.4	134.3±9.7	134.0±8.4	134.6±8.8	135.3±8.8
DBP (mmHg)	78.4±10.8	79.2±10.3	77.6±10.0	78.2±11.2	76.1±10.2	76.1±8.2	77.1±7.1	76.9±7.8	77.1±7.0	76.8±8.0
RH-PAT index	1.3±0.1	1.6±0.1**	1.8±0.1**	1.4±0.2**	1.3±0.2	1.3±0.1	1.3±0.1	1.7±0.1**	1.4±0.1**	1.3±0.1
baPWV (cm/sec.)	1883.1±197.8	1828.0±269.3	1775.9±190.1	1859.0±213.0	1885.1±197.5	1777.6±251.0	1779.9±250.3	1741.1±246.2	1775.9±246.3	1785.6±255.7

Results are expressed as means ± SD. Asterisks show statistically significant difference (**p<0.01) SBP: Systolic blood pressure, DBP: Diastolic blood pressure

月後にも有意な低値を認めた。

3. 3 血管内皮機能

表2にRH-PAT indexの値を示した。介入群のRH-PAT indexは、介入前に比し介入3ヶ月後および6ヶ月後に有意な高値を認めた。介入6ヶ月後に比し、脱介入3ヶ月後には有意な低値を認めた。

コントロール併用群のRH-PAT indexは、介入前に比し介入3ヶ月後に有意な高値を認めた。介入3ヶ月後に比し、脱介入3ヶ月後には有意な低値を認めた。

3. 4 血圧・動脈スティフネス

表2に脈拍、血圧、baPWVの値を示した。介入群およびコントロール併用群の脈拍と血圧は、介入前に比し、全ての測定回において有意な差を認めなかった。

介入群のbaPWVは、介入前に比し介入3ヶ月後、

6ヶ月後に有意な低値を認めた。介入6ヶ月後に比し、脱介入3ヶ月後および6ヶ月後にも有意な高値を認めた。

コントロール併用群のbaPWVは、介入前に比し介入3ヶ月後に有意な低値を認めた。介入6ヶ月後に比し、脱介入3ヶ月後および6ヶ月後にも有意な高値を認めた。

4. Discussion

4. 1 柔軟性の向上

ストレッチングによる関節可動域の変化には、大きく分けて2要因が関与すると考えられている。要因のひとつは、筋腱複合体のスティフネスや筋長をはじめとする、物理的な変化である。筋腱複合体の物質的な硬さや組織の伸張性の変化が、関節可動域の値に影響を与えることは、多くの先行研究で報告¹⁶⁾されている。もうひとつの要因は感覚の変化であり、多くの場合は関節可動域の最終域は被験者の主観によって決定される。そのた

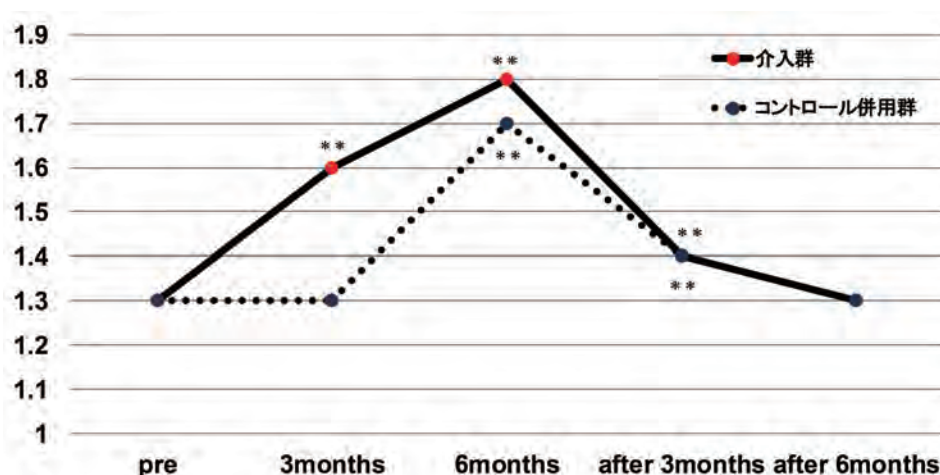


図1 Change in the Reactive Hyperemia Peripheral Arterial Tonometry index of the intervention group and the control combination group.

**p<0.01, significant difference between the full and half groups.

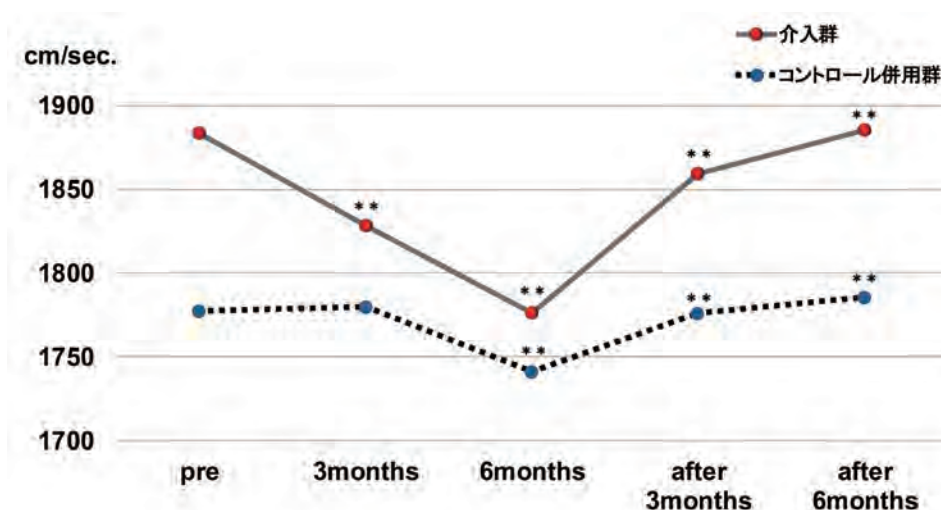


図2 Change in brachial-ankle Pulse Wave Velocity of the intervention group and the control combination group.

**p<0.01, significant difference in the full group

め、被験者の痛み感覚や許容できる最大限の伸張感の変化が、関節可動域に影響を与えることが考えられ、stretch toleranceの変化と表現される。ストレッチ後の関節可動域の変化は筋腱複合体の物理的な変化が伴わなくとも生じる場合があることから、stretch toleranceの変化が主たる要因とする報告^{17,18)}もある。

健常高齢者を対象とし、股関節伸展可動域および足関節背屈可動域の改善を目的としたストレッチ

チングを8週間および10週間実施した結果、可動域が向上した報告^{19,20)}がある。高齢女性(平均年齢71.8歳)20名を対象とした週に3回10週間の柔軟性トレーニングの報告では、脊柱屈曲可動域が有意に改善した²¹⁾。

バスキュラー・ストレッチング実施率は、両群共に1週間当たり5回以上に相当する。1部位に対しての伸張時間は20～30秒とし、1回あたりの実施時間も推奨されている時間²²⁾以上であった。

スタティク・ストレッチングは健康日本21(第二次)の推進に資する。身体活動の具体的数値目標を示した健康づくりのための身体活動基準2013²³⁾では、65歳以上に対し強度を問わず1日40分程度の身体活動を推進しており、スタティク・ストレッチングは3メッツ未満の身体活動の1つとして、毎日の実施が推奨されている。怪我のリスクが少なく、高齢者が自宅においても安全に取り組むことができる運動である。定期的なスタティク・ストレッチング実施は、高齢者の歩行能力低下²⁴⁾や転倒リスク²⁵⁾との関連し、柔軟性への効果²⁶⁾も多く報告されている。

関節可動域の向上のためには、筋の伸張時に関節可動域の最終域あたりに生じる最終域感を1つの目安として強度を決定する必要がある、適切な方法での実施が重要であると報告²⁷⁾されている。また実施頻度は週3日以上、伸張時間は1種目30秒を1セット以上実施することが有効であるとも報告^{28,29)}されている。

伸張強度に関しては、痛みを伴う強度のストレッチング方法が関節可動域改善には有効であり、60%の伸張に比し85～100%の伸張時に優位に大きな柔軟性が得られたという報告³⁰⁾もあるが、ストレッチング時の伸張強度は主観的な感覚である為、数値化するのには困難で、組織が耐えられる限界を越すような強度での実施は、怪我が生じる可能性も考えられる。1週間で約5回以上の実施頻度、1部位に対して20～30秒という伸張時間、少し痛いから痛い、もしくはすこしきつからきついという感覚での伸張強度、3ヶ月以上の実施期間が、柔軟性の改善に貢献したと示唆された。

本研究では、日記や日誌および自身の客観的な記録をし、行動の実施状況を自ら把握する行動療法の一つとして活用されているセルフモニタリング技法を実施した。これまでも高齢者を対象とした運動習慣を定着させる取り組みとして、活動

量計と記録用ノートを用いたセルフモニタリング技法を取り入れた健康教育プログラムにより、歩数が増加した報告^{31,32)}、看護師らによる指導と歩数計や日誌などのセルフモニタリングを取り入れたウォーキングプログラムにより、歩数が増加した報告³³⁾がある。これらのことから高齢者の運動習慣を定着させるためには、セルフモニタリング技法を活用した介入が有効であったと考えられる。

介入期間中の記録シートの配布、バスキュラー・ストレッチングの実施方法について写真や説明文を記載したハンドブックとバスキュラー・ストレッチング動画を収録したDVDの配布、電子メールもしくは郵送にて健康関連の情報を10回発信したこと、また任意ではあったがバスキュラー・ストレッチングの講習会を19回開催したことが、対象者の正しい実施方法の習得、実施の定着、実施頻度の増加に結び付いた可能性がある。

4. 2 血管内皮機能の改善

加齢や肥満によって、動脈血管の構造および機能は変化し、内皮細胞の機能障害へと繋がるということが報告³⁴⁾されている。酸化ストレスの蓄積が血管内皮機能の低下^{35,36)}、動脈血管の弾性機能に関与するエラスチンの減少^{37,38)}、血管内腔の拡大³⁹⁾、動脈血管の線維化したコラーゲン量の増大^{38,39)}、石灰化などによる血管壁の肥厚⁴⁰⁾、そして動脈血管内腔に粥腫形成を促進⁴¹⁾させる。さらには、血圧を上昇させ、血圧と動脈硬化の悪循環も生じることも報告⁴²⁾されている。

RH-PAT indexの自動解析では、臨床試験に基づきRHI < 1.67を血管内皮障害存在のカットオフ値⁴³⁾としている。両群の介入前のRH-PAT indexは、1.67以下⁴⁴⁾を示していた。両群共に介入期間後には有意な改善を認め、基準値の1.68以上の値を示した。血管は壁周張力による変化によって血管平滑筋に伸張刺激が加わり、血管内腔

に面している内皮細胞には血流の増加によるシェアストレスが加わる。ストレッチングの実施により長軸上に筋繊維が伸張し、筋形状変化に伴い、筋と並走している血管も伸張される。その為、血管形状の物理的变化として血管径が減少し、一時的な血流制限が起こる⁴⁵⁾。ストレッチング実施後に筋血流量が増加するのは、一時的な血液遮断の解放後の血流増加であり、反応性充血が生じたと考えられる。血流が作り出す血管内皮に作用する刺激は、シェアストレスと伸展張力、そして血圧により生じる圧縮である⁴⁶⁾。筋束長の伸張が大きいほど筋血流量は減少し、開放による血流増加により血管内皮細胞にシェアストレスがかかり^{47, 48)}、血管内皮細胞からNOやEndothelium-Derived Hyperpolarizing Factor (EDHF)などの血管拡張因子が放出される。Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS)法を用いた先行研究においても、ストレッチング後に安静レベルよりも筋組織酸素飽和度Muscle Oxygen Saturation (SmO₂)が増加、筋酸素化ヘモグロビンMuscle Oxygen-Hemoglobin (MO₂-Hb)が増加し、SmO₂とMO₂-Hbは、筋組織への酸素供給と消費のバランスに依存して変動する。このことから、ストレッチングの実施により伸張部位の筋血流量が増加して、筋組織への酸素供給が消費酸素を上回り、SmO₂が増加したことを示唆⁴⁹⁾している。

NOとEDHFの作用の寄与度の違いは動脈血管の内腔の太さに依存していると考えられており、動脈血管の内腔が細い微小血管(抵抗血管)ではNOよりもEDHFの寄与が大きいが、大動脈のような内腔の太い動脈血管(導管血管)ではEDHFよりもNOの寄与が大きく、血管弛緩反応を惹起していることが明らかにされている⁵⁰⁾。

全身の骨格筋を網羅するような15部位を伸張させたことにより、伸張部位へのメカニカルストレスがストレッチング後の筋血流量の充進に寄与し、シェアストレスとの相乗効果も内皮細胞に対

して影響をもたらしたと推察される。

4. 3 動脈スティフネス

脈波伝播速度は脈波が血管壁を伝播する速度で、動脈スティフネスの標準的な臨床指標として認められている⁵¹⁾。動脈硬化度も加齢に伴い、男女ともに増大する一方、60歳以下の各年代の男性と比較して各年代の女性の動脈硬化度は低値を示すことが報告⁵²⁾されている。女性ホルモンであるエストロゲンは、動脈硬化度を低下させる作用を有する⁵³⁾が、女性の閉経により急速な分泌低下が生じると報告⁵⁴⁾されているため、60歳以降では動脈硬化度に性差が認められなくなる機序に閉経が関与すると考えられている。血圧が正常な閉経後の50～70歳代の女性における脈波伝播速度と頸動脈内径は、高齢になるに従い優位に高値を示したが、頸動脈のコンプライアンスには年代間の有意差は認められなかったという報告⁵⁵⁾がある。これらのことから今回の検討では、性差を分けずに検討した。

動脈の伸張・伸展性やスティフネスは、動脈の弾性機能に影響を及ぼす様々な因子と関連があり、特に血管内皮由来弛緩因子としてNO⁵⁶⁾や血管内皮由来収縮因子であるEndothelin-1 (ET-1)⁵⁷⁾が、血管内皮細胞の収縮・弛緩両面に寄与している。平滑筋弛緩作用を持つNOの血管内皮細胞での産生能は加齢に伴って低下する⁵⁸⁾。一方、血管収縮因子であるAngiotensin IIは血管内皮での発現は増加し、ET-1の血中濃度は増加する⁵⁹⁾。これらの機能的因子における加齢変化は、個々にあるいは相互に影響しながら働いて、動脈壁の伸張・伸展性に影響を及ぼす。

身体活動と動脈スティフネスとの関連では、高齢者においては3METs未満の低強度の身体活動量もcfPWVとの間に負の関係^{60, 61)}がみられる。中高齢者の男女が週に3日、1回につき30～45分の全身にわたるストレッチングを13週間実施

した結果、頸動脈コンプライアンスが有意に増加⁶²⁾したことが、一過性のスタティック・ストレッチング直後のbaPWVが改善したことを報告⁶³⁾している。

片脚の下腿三頭筋に対して1回30秒のストレッチングを休息10秒を挟み6セット実施した結果、実施脚の大腿動脈-足首間脈波伝搬速度femoral-ankle Pulse Wave Velocity (faPWV)は、運動前に比し運動直後および1分後に低下した報告⁶⁴⁾もある。このことから一過性のストレッチングによる動脈硬化度の低下効果は、運動後にストレッチングを実施した部位でのみ生じる可能性が示唆される。

介入前のbaPWVの値は介入群1883.1cm/s、コントロール併用群1777.6cm/sであった。介入群の値は、同年齢の基準値の上限値を上回っていた。中年女性では3ヶ月間の介入ではbaPWVは有意な改善を認めず、介入群の6ヶ月間の介入後に有意な低値が認められた¹⁴⁾。血管内皮機能が向上し、それに伴い同時期に血管性状が変化し、動脈ステイフネスの改善⁶⁵⁾に寄与するものと考えられる。全身に対する習慣的にストレッチング実施が動脈硬化度を低下させる機序の一つ⁶⁶⁾として考えられ、抹消の動脈に対して局所的な機械刺激メカニカルストレスが加わって生じた可能性⁶⁷⁾がある。今回は、両群共に介入3ヶ月後に有意な低値を認めたことから、今回の対象者は頻度が高い反復運動による効果⁶⁸⁾として改善した可能性がある。

高齢期になってから運動を開始しても動脈硬化予防に効果的なことが報告^{69, 70)}されており、柔軟性を高めるストレッチングにおいて、動脈硬化度の増加を減弱させる効果が認められたことから、高齢者や低体力者に対する運動導入時には、ストレッチングを取り入れることは有効であるかもしれない。その際は、全身性ストレッチングを1日30～45分、週に3日以上、4週間以上

の継続実施⁶²⁾が望ましい。

4. 5 限界と課題

高齢者を対象としたバスキュラー・ストレッチングを継続実施することによる抗動脈硬化作用を示唆した知見は、臨床的意義が高いと考えられる。しかしながら本研究の結果には、課題が存在する。今後の課題として、サンプルサイズを増やすこと、そしてバスキュラー・ストレッチングの介入成果については1ヶ月程度の短期間ごとの検討が必要である。

5. Conclusion

後期高齢者を対象とし、バスキュラー・ストレッチングの継続実施による、柔軟性、血管内皮機能および動脈ステイフネスに及ぼす影響を検討した。その結果、介入3ヶ月後は柔軟性の改善、血管内皮機能および動脈ステイフネスにおいて有意な改善を認め、介入6ヶ月後ではさらに柔軟性の改善、血管内皮機能および動脈ステイフネスにおいて有意な改善を認めた。しかしながら、6ヶ月間の脱介入後では、柔軟性、血管内皮機能および動脈ステイフネスは介入前の状態に戻り、獲得した効果の可逆性を認めた。バスキュラー・ストレッチングの継続実施は柔軟性を改善し、抗動脈硬化の運動種目の一つとして貢献する可能性が示唆された。

Declaration of Conflicting Interests

著者は本論文の研究内容について他者との利害関係を有しない。

Acknowledgements

本研究を行うにあたり、研究趣旨をご理解いただき、快く協力してくださった全参加者の皆様、測定機器のご提供いただきました関西医科大学健康科学センター、ご教示いただきました木村稜先

生に深謝いたします。

本研究は公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の助成を受けたものです。本研究の成果は著者自らの見解等に基づくものであり、所属研究機関、資金配分機関及び国の見解等を反映するものではありません。

文 献

- 1) 新井智之. 高齢者のリスクとその対応, 理学療法, 臨床・研究・教育. 24(1) 12-17(2017)
- 2) Shumpei Fujie S., Iemitsu M., Anti-aging effects for arteriosclerosis by exercise and nutrition., *Glycative Stress Research*, 6(4) : 219-226(2019)
- 3) 松岡博昭. 循環器疾患の加齢による変化. *Dokkyo Journal of Medical Sciences*, 5(3) : 197-201(2008)
- 4) Sumino H., Ichikawa S., Kasama S., Takahashi T., Kumakura H., Takayama Y., Kanda T., Sakamaki T., Kurabayashi M., Elevated arterial stiffness in postmenopausal women with osteoporosis., *Maturitas*, 55:212-218(2006)
- 5) Zaydun G., Tomiyama H., Hashimoto H., Arai T., Koji Y., Yamabe M., Motobe K., Hori S., Yamashina A., Menopause is an independent factor augmenting the age-related increase in arterial stiffness in the early postmenopausal phase., *Atherosclerosis*, 184:137-42(2006)
- 6) Yamamoto K., Kawano H., Gando Y., et al., Poor trunk flexibility is associated with arterial stiffening., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 297:1314-1318(2009)
- 7) 山口太一, 石井好二郎. ストレッチングは健康の保持増進に寄与する., *Creative Stretching*, 23:1-8(2012)
- 8) Ashor A.W., Lara J., Siervo M., et al., Effects of exercise modalities on arterial stiffness and wave reflection: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials., *PLoS One*, 9:e110034(2014)
- 9) Fujie S., Hasegawa N., Sato K., et al., Aerobic exercise training-induced changes in serum adiponectin level are associated with reduced arterial stiffness in middle-aged and older adults., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 309:1642-1647(2015)
- 10) Hasegawa N., Fujie S., Kurihara T., et al., Effects of habitual aerobic exercise on the relationship between intramyocellular or extramyocellular lipid content and arterial stiffness., *J. Hum. Hyper.*, 30:606-612(2016)
- 11) Hasegawa N., Fujie S., Horii N., et al., Aerobic exercise training-induced changes in serum C1q/TNF-related protein levels are associated with reduced arterial stiffness in middle-aged and older adults., *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 314:94-101(2018)
- 12) Miura H., Nakagawa E., Takahashi Y., et al., Influence of group training frequency on arterial stiffness in elderly women., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 104:1039-1044(2008)
- 13) Shinno H., Kurose S., Yamanaka Y., et al., Evaluation of Extension of Blood Vessels during Static Stretching Using Ultrasound 2D Speckle Tracking Imaging., *Global Journal of Health Science*, 9(8) : 1-9(2017)
- 14) Shinno H., Kurose S., Yamanaka Y., et al., Evaluation of a static stretching intervention on vascular endothelial function and arterial stiffness., *Eur. J. Sport Sci.*, 17:586-592(2017)
- 15) 新野弘美, 山中裕, 黒瀬聖司 他. スタティックストレッチング介入による動脈ステイフネス及び血管内皮機能への効果の検討. 日本臨床運動療法学会. 19(2) : 27-31(2018)
- 16) Weppeler C.H., Magnusson S.P., Increasing muscle extensibility: a matter of increasing length or modifying sensation?, *Phys Ther.*, 90:438-449(2010)
- 17) Ben M., Harvey L.A.: Regular stretch does not increase muscle extensibility: a randomized controlled trial., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 20:136-144(2010)
- 18) Mizuno T., Matsumoto M., et al.: Viscoelasticity of the muscle-tendon unit is returned more rapidly than range of motion after stretching., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 23:23-30(2013)
- 19) Christiansen C.: The effects of hip and ankle stretching on gait function of older people., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 89:1421-1428(2008)
- 20) Kerrigan D., Xenopoulos-Oddsson A., Sullivan M., et al.: Effect of a Hip Flexor-Stretching Program on Gait in the Elderly., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 84(1) : 1-6(2003)
- 21) Rider R., A., and J. Daly., Effects of flexibility training on enhancing spinal mobility in older

- women., *J. Sports Med. Phys. Fitness.*, 31:213-217 (1991)
- 22) Bandy W.D., Irion J.M., The effect of time on static stretch on the flexibility of the hamstring muscle., *Physical therapy.*, 4(9) : 845-850(1994)
- 23) 厚生労働省: 健康づくりのための身体活動基準 2013. <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xp1e-att/2r9852000002xpqt.pdf>(閲覧日 2024年5月6日)
- 24) 田井中幸司, 青木純一郎. 高齢女性の歩行速度の低下と体力. *体力科学*. 51:245-252(2002)
- 25) 田井中幸司, 青木純一郎. 在宅高齢女性の転倒経験と体力. *体力科学*. 56:279-286(2007)
- 26) Stathokostas L., Little R., Vandervoort A., et al.: Flexibility Training and Functional Ability in Older Adults: A Systematic Review., *Aging Research*, Article ID 306818(2012)
- 27) 鈴木重行, ストレッチングの科学. 三輪書店. 2-15(2013)
- 28) Marques A., Vasconcelos A., Cabral C., et al., Effect of frequency of static stretching on flexibility, hamstring tightness and electromyographic activity., *Braz. J. Med. Biol. Res.*, 42(10) : 949-953(2009)
- 29) Walter J., Figoni S.F., Andres F.F., et al., Training intensity and duration in flexibility., *Clinical Kinesiology*, 50(2) : 40-45(1996)
- 30) Kataura S., Suzuki S., Matsuo S., Hatano G., et al., Acute Effects of the Different Intensity of Static Stretching on Flexibility and Isometric Muscle Force., *J. Strength. Cond. Res.*, 31(12) : 3403-3410 (2017)
- 31) C・エイブラハム, M・クルーズ. 行動変容を促すヘルスコミュニケーションー根拠に基づく健康情報の伝え方ー. 北大路書房. 103-120(2018)
- 32) Uemura K., Yamada M., Okamoto H.: Effects of active learning on health literacy and behavior in older adults: a randomized controlled trial., *J. Am. Geriatr. Soc.*, 66(9) : 1721-1729(2018)
- 33) Mutrie N., Doolin O., Fitzsimons C., et al.: Increasing olderadults' walking through primary care: results of a pilot randomized controlled trial., *Family Practice*, 29: 633-642(2012)
- 34) Palombo C., Kozakova M., Arterial stiffness, atherosclerosis and cardiovascular risk: Pathophysiologic mechanisms and emerging clinical indications., *Vascul. Pharmacol.*, 77:1-7(2016)
- 35) van der Loo B., Labugger R., Skepper J.N., Bachschmid M., Kilo J., Powell J.M., Palacios-Callender M., Erusalimsky J.D., Quaschnig T., Malinski T., Gygi D., Ullrich V., Lüscher T.F., Enhanced peroxynitrite formation is associated with vascular aging., *J. Exp. Med.*, 192(12) : 1731-1744 (2000)
- 36) Ungvari Z., Bailey-Downs L., Sosnowska D., Gautam T., Koncz P., Losonczy G., Ballabh P., de Cabo R., Sonntag W.E., Csiszar A., Vascular oxidative stress in aging: a homeostatic failure due to dysregulation of NRF2-mediated antioxidant response., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 301(2) : H363-H372(2011)
- 37) Sandberg L.B., Soskel N.T., Leslie J.G., Elastin structure, biosynthesis, and relation to disease states., *N. Engl. J. Med.*, 304(10) : 566-579(1981)
- 38) Gu Q., Wang B., Zhang X.F., Ma Y.P., Liu J.D., Wang X.Z., Chronic aerobic exercise training attenuates aortic stiffening and endothelial dysfunction through preserving aortic mitochondrial function in aged rats., *Exp. Gerontol.*, 56:37-44 (2014)
- 39) Looker T., Berry C.L., The growth and development of the rat aorta. II. Changes in nucleic acid and scleroprotein content., *J. Anat.*, 113(Pt1) : 17-34 (1972)
- 40) Lakatta E.G., Arterial and cardiac aging: major shareholders in cardiovascular disease enterprises: Part III: cellular and molecular clues to heart and arterial aging., *Circulation*, 107(3) : 490-497(2003)
- 41) Liviakis L., Pogue B., Paramsothy P., Bourne A., Gill E.A., Carotid intima-media thickness for the practicing lipidologist., *J. Clin. Lipidol.*, 4(1) : 24-35 (2010)
- 42) Laurent S., Boutouyrie P., The structural factor of hypertension: large and small artery alterations., *Circ. Res.*, 116(6) : 1007-1021(2015)
- 43) Bonetti P.O., Pumper G.M., Higano S.T., et al., Noninvasive identification of patients with early coronary atherosclerosis by assessment of digital reactive hyperemia., *J. Am. Coll. Cardiol.*, 4:2137-2141(2004)
- 44) Maiorana A., et al.:Exercise and the nitric oxide vasodilator system., *Sports Med.*, 33:1013-1035 (2003)
- 45) Cui J., Blaha C., Moradkhan R., et al., Muscle sympathetic nerve activity responses to dynamic

- passive muscle stretch in humans., *J. Physiol.*, 576:625-634 (2006)
- 46) Takeda H., Komori K., Nishikimi N., et al., Bi-pasic activation of eNOS in response to uni-axial cyclic stretch is mediated by differential mechanisms in BAECs., *Life Sci.*, 79(3) : 233-239 (2006)
 - 47) Ando J., Kamiya A., Blood flow and vascular endothelial cell function., *Med. Biol. Eng.*, 5:245-264 (1993)
 - 48) Yamamoto K., Takahashi T., Asahara T., et al., Proliferation differentiation and tube formation by endothelial progenitor cells in response to fluid shear stress., *J. Appl. Physiol.*, 2081-2088 (2003)
 - 49) McCully K.K., Hamaoka T., Near-infrared spectroscopy what can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle?., *Exercise Sport Science Rev.*, 28(3) : 123-127 (2000)
 - 50) Luksha L., Agewall S., Kublickiene K., Endothelium-derived hyperpolarizing factor in vascular physiology and cardiovascular disease., *Atherosclerosis*, 202(2) : 330-344 (2009)
 - 51) 大石 充, 萩原俊男, PWVの定義と測定. 血圧. 14:13-6 (2007)
 - 52) Tomiyama H., Yamashina A., Arai T., Hirose K., Koji Y., Chikamori T., Hori S., Yamamoto Y., Doba N., Hinohara S., Influences of age and gender on results of noninvasive brachial-ankle pulse wave velocity measurement--a survey of 12517 subjects., *Atherosclerosis*, 166(2) : 303-309 (2003)
 - 53) Skafar D.F., Xu R., Morales J., Ram J., Sowers J.R., Clinical review 91: Female sex hormones and cardiovascular disease in women., *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 82(12) : 3913-8 (1997)
 - 54) Moreau K.L., Hildreth K.L., Vascular Aging across the Menopause Transition in Healthy Women., *Adv. Vasc. Med.*, 204390 (2014)
 - 55) Jun Sugawara 1, Takeshi Otsuki, Seiji Maeda, Takumi Tanabe, Shinya Kuno, Ryuichi Ajisaka, Mitsuo Matsuda, Effect of arterial lumen enlargement on carotid arterial compliance in normotensive postmenopausal women., *Hypertens. Res.*, 28(4) : 323-9 (2005)
 - 56) Palmer R.M., Ferrige A., Moncada S.: Nitric oxide release accounts for the biological activity of endothelium-derived relaxing factor., *Nature*, 327:524-526 (1987)
 - 57) Yanagisawa M., Kurihara H., Kimura S., Tomobe Y., Kobayashi M., et al.: A novel potent vasoconstrictor peptide produced by vascular endothelial cells., *Nature*, 332: 411-415 (1988)
 - 58) Luscher T.F., Tanner F.C., Endothelial regulation of vascular tone and growth., *Am. J. Hypertens.*, 6:283S-293S (1993)
 - 59) Wang M., Takagi G., Asai K., Resuello R.G., Natividad F.F., Vatner D.E., Vatner S.F., Lakatta E.G., Aging increases aortic MMP-2 activity and angiotensin II in nonhuman primates., *Hypertension*, 41(6) : 1308-1316 (2003)
 - 60) Gando Y., et al., Longer time spent in light physical activity is associated with reduced arterial stiffness in older adults., *Hypertension*, 56:540-6 (2010)
 - 61) Parsons T.J., et al., Objectively measured physical activity, sedentary time and subclinical vascular disease: Cross-sectional study in older British men., *Prev. Med.*, 89:194-199 (2016)
 - 62) Cortez-Cooper M.Y., Anton M.M., Devan A.E., et al., The effects of strength training on central arterial compliance in middle-aged and older adults., *Eur. J. Cardiovasc. Prev. Rehabil.*, 15:149-155 (2008)
 - 63) Hotta K., Kamiyama K., Shimizu R., et al., Stretching exercises enhance vascular endothelial function and improve peripheral circulation in patients with acute myocardial infarction., *Int. Heart J.*, 54(2) : 59-63 (2013)
 - 64) Yamato Y., Hasegawa N., Fujie S., et al., Acute effect of stretching one leg on regional arterial stiffness in young men., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 117:1227-1232 (2017)
 - 65) Wallance S.M., Yasmin, McEniery C.M., et al., Isolated systolic hypertension is characterized by increased aortic stiffness and endothelial dysfunction., *Hypertension*, 50(1) : 228-233 (2007)
 - 66) Kevin S. Heffernan 1, David G. Edwards, Lindy Rossow, Sae Young Jae, Bo Fernhall External mechanical compression reduces regional arterial stiffness., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 101(6) : 735-41 (2007)
 - 67) Tyler Thacher 1, Veronica Gambillara, Rafaela F da Silva, Paolo Silacci, Nikos Stergiopoulos. Reduced cyclic stretch, endothelial dysfunction, and oxidative stress: an ex vivo model Cardiovasc Pathol., 19(4) : 91-98 (2010)
 - 68) 川崎新太郎, 萩原礼紀, 久保達郎. 後期高齢者における継続的反復運動が身体機能に及ぼす影響.

埼玉理学療法. 11:38-44(2004)

- 69) Gregg E.W., Cauley J.A., Stone K.: Relationship of changes in physical activity and mortality among older women., *JAMA.*, **289**(18) : 2379-2386(2003)

- 70) Stessman J., Hammerman-Rozenberg R., Cohen A., et al.: Physical Activity, unction, and Longevity Among the Very Old., *Arch. Intern. Med.*, **169**(16) : 1476-1483(2009)

高頻度・伸張性収縮トレーニング負荷量の下限の検討

西九州大学 中村雅俊

(共同研究者) Edith Cowan University Kazunori Nosaka

Investigation of The Minimum Intensity of High-Frequency Eccentric Contractions Training

by

Masatoshi Nakamura

Faculty of Rehabilitation, Sciences,

Nishi Kyushu University

Kazunori Nosaka

Centre for Human Performance,

School of Medical and Health Sciences,

Edith Cowan University

ABSTRACT

We have previously shown that high-frequency (daily six maximal eccentric contractions x 5 times per week) training at maximal load and eccentric contraction training could increase muscle strength and muscle thickness of elbow flexors. In the present study, we aimed to extend this knowledge and clarify the effects of high-frequency training using a submaximal load, i.e., 2/3 and 1/3 of the maximal eccentric contraction strength. Thirty-six healthy university students were randomly divided into three groups: 2/3 group (n=12), 1/3 group (n=12), and control group (n=12) : The 2/3 and 1/3 groups that performed six eccentric contractions with 2/3 or 1/3 maximal eccentric contraction torque using a dumbbell 5 days a week for 4 weeks or control

group that did not perform any training. We measured muscle strength and muscle thickness of elbow flexors before and after the 4 weeks intervention period. The results showed a significant ($p<0.05$) increase in muscle strength and thickness in only the 2/3 group but no significant change in the 1/3 group nor the control group. Also, there were no significant differences in muscle strength and thickness increases between the 2/3 group and maximal eccentric contraction training group shown in the previous study. Therefore, using more than 2/3 of the maximal eccentric contraction torque for high-frequency, eccentric contraction resistance training is necessary.

キーワード

伸張性収縮, 等尺性収縮, 短縮性収縮, 筋厚, 超音波画像診断装置

Keyword

Eccentric contraction, isometric contraction, eccentric contraction, muscle thickness, ultrasound

要 旨

我々はこれまで最大負荷を用いた高頻度(週5回)・伸張性収縮トレーニングを行うことで筋力増加・筋肥大効果が生じることを明らかにしてきた。本研究ではこの知見を拡大し、最大下の負荷量、つまり全力2/3および1/3の負荷量を用いた場合での高頻度・伸張性収縮トレーニングの効果を明らかにすることを目的とした。対象は健康成人大学生36名を無作為に2/3の負荷量でトレーニングを行う2/3群、1/3の負荷量でトレーニングを行う1/3群、トレーニングを行わないコントロール群にそれぞれ12名ずつ群わけを行った。2/3群および1/3群はそれぞれの最大伸張性収縮筋力の2/3および1/3の負荷量のダンベルを用いて1日6回、週5回、4週間のトレーニングを実施した。コントロール群はトレーニングを行わなかった。4週間の介入期間の前後で肘関節屈曲筋力および筋厚を測定した。その結果、2/3群では筋力および筋厚の有意な増加が認められたが、1/3群およびコントロール群では有意な変化は認められなかった。2/3群の筋力増加および筋肥大効果は、先行

研究における最大負荷を用いた群と同程度であったため、高頻度・伸張性収縮トレーニングでは最大筋力の2/3以上の負荷量を用いる必要があることが示唆された。

緒 言

加齢および不活動、様々な疾患により筋力低下や筋萎縮が進行することが周知の事実であり、これらの諸問題に対する対応策として筋力トレーニング(レジスタンストレーニング)が重要である。レジスタンストレーニングの効果を規定する因子として様々な因子の重要性が述べられているが、その中で近年、収縮様式による効果の違いが着目されている。具体的には、伸張性収縮を用いたレジスタンストレーニングは他の収縮様式である短縮性収縮や等尺性収縮を用いたトレーニングよりも大きな筋力増加や筋肥大効果などがあることが示されている^{1,2)}。また我々は健康若年大学生の肘屈曲筋群を対象に以下の3つのレジスタンストレーニングの効果を比較した³⁾。1つ目の群は短縮性収縮と伸張性収縮を組み合わせた通常のレジスタンストレーニングを実施した群、2つ目の群は

伸張性収縮のみを行った群、3つ目は短縮性収縮のみを行った群で比較を行った。その結果、短縮性収縮と伸張性収縮を行った群と伸張性収縮のみを行った群で大きな筋力増加および筋肥大効果が認められた。この結果より、レジスタンストレーニングによる筋力増加および筋肥大効果は短縮性収縮よりも伸張性収縮を強調することが重要であることが示唆された。

興味深いことに伸張性収縮を用いたトレーニングの場合、1日のトレーニング(収縮)回数が少ない場合においても高頻度で行うことで筋力増加効果が期待できることが明らかになっている。具体的には、1日3秒間の全力の伸張性収縮を週5回(月曜日から金曜日)、4週間実施することで肘屈曲筋群の最大等尺性収縮筋力(maximal voluntary isometric contraction torque, MVC-ISO)は $10.2 \pm 6.4\%$ 、最大短縮性筋力(maximal voluntary concentric contraction torque, MVC-CON)は $12.8 \pm 9.6\%$ 、最大伸張性収縮筋力(maximal voluntary eccentric contraction torque, MVC-ECC)は $12.2 \pm 7.8\%$ 増加した⁴⁾。一方、肘関節屈曲筋群の筋肉量の指標である筋厚には有意な変化は認められなかった。また、Yoshidaら⁵⁾は、同様に健康若年者の肘屈曲筋群を対象に1日3秒間の全力の伸張性収縮を1日6回、週5回(合計30回)実施する群と週に1回だけ6回もしくは30回の全力の伸張性収縮を行う群で筋力及び筋厚の変化を検討した。その結果、週1回6回のみ全力の伸張性収縮を行う群では有意な筋力および筋厚の変化は認められなかった。一方、週1回30回のみ全力の伸張性収縮を行う群では筋力に有意な変化は認め等なかったものの、筋厚は有意に増加した。また、1日6回、週5回、全力の伸張性収縮を行う群では有意な筋力増加及び筋肥大効果を認めた。以上より、伸張性収縮をレジスタンストレーニングとして用いた場合、1日で行う回数は少なくとも、高頻度で行うことで筋力増加・筋肥大効果が期待

できることが明らかとなった。

一方、これらの知見を社会実装する際の大きな障壁として、最大での伸張性収縮を行っている点が挙げられる。実際にこれらの先行研究では等速性の筋力測定装置を用いているため、全力での伸張性収縮が可能であるが、実際にトレーニングを行う現場では、この方法は不可能である。そのため、最大ではなく、より負荷を下げた状態においても全力で伸張性収縮を行ったものと同じ効果があるか否かを明らかにすることは、トレーニング処方において重要な情報となる。そこで本研究の目的は、最大下の負荷量、つまり全力2/3および1/3の負荷量を用いた場合における高頻度・伸張性収縮トレーニングの効果を検討し、その効果が先行研究⁵⁾で明らかにした全力での伸張性収縮トレーニングにおける効果との差異を比較することである。また、実際のトレーニング処方を見据えて、本研究では等速性筋力測定装置ではなくダンベルを用いたトレーニングでの効果を検討することで、より現場への還元性の高い情報となると考えた。

1. 方法

1. 1 対象および実験プロトコル

対象は上肢に整形外科的な疾患及び神経学的疾患を有さず、ここ半年間、定期的なレジスタンストレーニングを行っていない健康若年男女36名の利き腕側の肘関節屈曲筋群とした。図1に示すように初期評価の1週間前に筋力測定の練習を行い、その後、初期評価(PRE)を実施した。その後、無作為に最大伸張性収縮筋力の2/3の負荷量でレジスタンストレーニングを行う2/3 MVC-ECC群(n=12)と1/3の負荷量でレジスタンストレーニングを行う1/3 MVC-ECC群(n=12)、トレーニングを行わないコントロール群(n=12)に無作為に群分けを行った。なお、2/3 MVC-ECC群と1/3 MVC-ECC群は1日6回の伸張性収縮を週5回、4

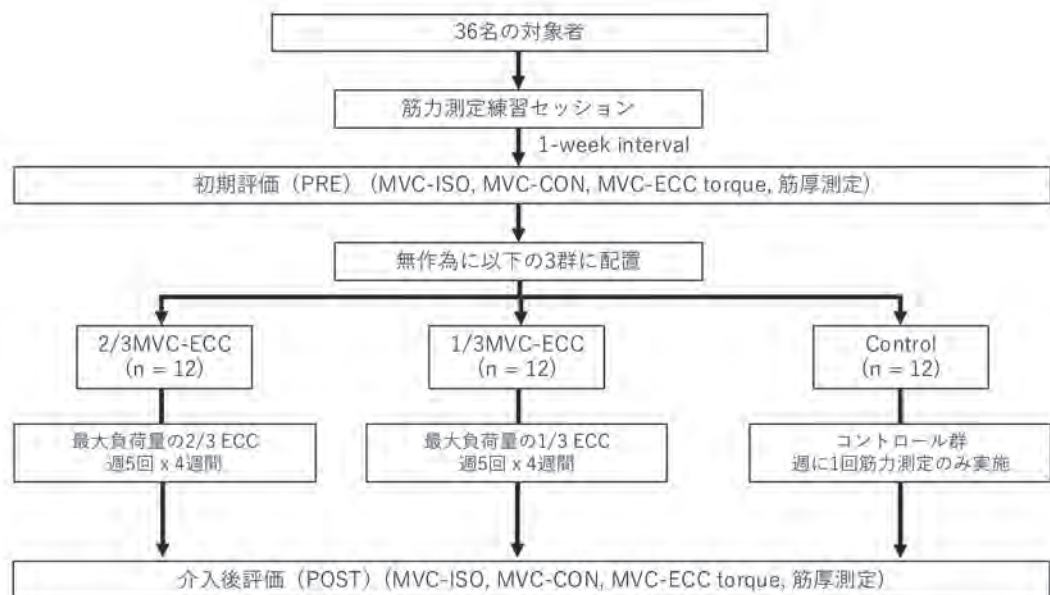


図1 実験プロトコル

週間実施した。なお、これらの負荷量の設定に用いる MVC-ECC 測定は週の最初に行い、トレーニングで用いる重量の調整を行った。なお、コントロール群は週に1回の MVC-ECC 測定のみ実施した。初期評価後、4週目に介入後の測定 (POST) を実施した。なお、これら3群間の身体属性において一元配置分散分析の結果、有意な差は認められなかった。なお、本研究は所属機関の倫理審査の承認を得て、ヘルシンキ宣言に則り研究の説明を行い、書面にて実験の同意を得て実施した。

1. 2 筋力測定

先行研究^{4,5)}と同様に等速性筋力測定装置 (Biodex system 3.0, Biodex Medical Systems Inc., Shirley, NY, USA) を用いて、体幹および骨盤をバクローテープにて強固に固定し、肩関節45°屈曲位における肘屈曲筋力を測定した。MVC-ISO 筋力は3つの角度 (肘関節屈曲20°, 55°, 90°, それぞれ MVC-ISO₂₀, MVC-ISO₅₅, MVC-ISO₉₀) を無作為な順番で測定した。なお、それぞれの角度で45秒間の休憩を挟み、2回ずつ3秒間の最

大等尺性収縮を実施した。また MVI-ISO 全体の筋力変化を検討するために、MVC-ISO₂₀, MVC-ISO₅₅, MVC-ISO₉₀ の平均値を MVC-ISO_{AVE} とした。

なお、解析にはこれら2回測定した値の大きな方を採用した。その後、MVC-CON および MVC-ECC の順番で測定を実施した。MVC-CON および MVC-ECC は肘関節10°から100°の範囲で、角速度30°/秒 (MVC-CON₃₀ および MVC-ECC₃₀) および180°/秒 (MVC-CON₁₈₀ および MVC-ECC₁₈₀) の2つの速度で測定した。なお、それぞれの速度で3回ずつ、測定し、最大値を解析に用いた。MVC-ISO と同様に MVC-CON および MVC-ECC の筋力の平均値をそれぞれ MVC-CON_{AVE} および MVC-ECC_{AVE} とした。

1. 3 筋厚測定

先行研究^{4,5)}と同様に超音波画像診断装置 (LOGIQ e V2; GE Healthcare Japan, Tokyo, Japan) を用いて、上腕二頭筋と上腕筋の合計の筋厚を測定した。測定は熟練した理学療法士1名が実施し、測定部位は肩峰から外側上顆を結ぶ線の50%,

60%, 70%の部位で測定をした (MT_{50} , MT_{60} , MT_{70} と表記). またこれら全ての筋厚の平均値を MT_{AVE} とした.

1. 4 トレーニング方法

前述のMVC-ECCを参考に2/3 MVC-ECC群および1/3 MVC-ECC群の負荷量を設定した. なお, 両群ともにそれぞれの週の最初にMVC-ECCの数値を測定し, トレーニング負荷量を再設定した. トレーニング方法は図2に示す通り, プリーチャーカール台を用いて, 肩関節 45° 屈曲位, 肘関節 90° 屈曲位から3秒かけて肘関節 0° 位まで肘関節屈曲筋群の伸張性収縮を実施した. なお, 短縮性収縮のフェーズ, つまり肘関節 0° 位から肘関節 90° 屈曲位まで戻る際には測定者がダンベルを持ち上げて, 被験者には重力以外の外部の負荷がかからないようにした.



図2 ダンベルを用いたトレーニング風景

1. 5 統計処理

統計処理にはSPSS 28.0 (IBM Japan, Inc., Tokyo, Japan)を用いた. Shapiro-Wilk検定により正規性を確認後, PREにおける筋力及び筋厚の比較を一元配置分散分析を用いて比較した. また, 2/3MVC-ECC群および1/3 MVC-ECC群それぞれにおいて, トレーニングで用いたダンベルの重量の経時的な変化を明らかにするために1週目の値と2, 3, 4週目の比較をBonferroni補正を用いた対応のあるt検定を用いた. またトレーニング介入による筋力増加および筋肥大効果を明らかにするために, 各筋力指標および $MVC-ISO_{AVE}$, $MVC-CON_{AVE}$, $MVC-ECC_{AVE}$ および MT_{AVE} について, 分割プロット分散分析(時期 [PRE] vs [POST] × 群 [2/3 MVC-ECC群 vs 1/3 MVC-ECC群 vs Control群])を用いて比較した. なお, 有意な交互作用が認められた項目においては, 各群における介入前後の比較を対応のあるt検定を用いて検討した. また, これら介入前後の変化の効果量についてはCohenのdを用いて算出した.

また, 介入前後において筋力増加が認められ群のみにいて, $MVC-ISO_{AVE}$, $MVC-CON_{AVE}$, $MVC-ECC_{AVE}$ および MT_{AVE} の介入前後の変化率同士の関係性および1週目から4週目までのトレーニング重量の増加率 (Δ training weight) と関係性の検討をSpearmanの順位相関係数を用いて検討した. なお, 有意水準は5%未満とした.

2. 結果

一元配置分散分析の結果, PREの値において全ての筋力および筋厚の値において群間に有意な差は認められなかった. またトレーニングで用いたダンベルの重量の経時的変化に関して図3に示す. 統計処理の結果, Aの2/3 MVC-ECC群では1週目に対して3および4週目において有意に高値を示したのに対して, Bの1/3 MVC-ECC群では4週目のみ1週目に対して有意に高値を示した.

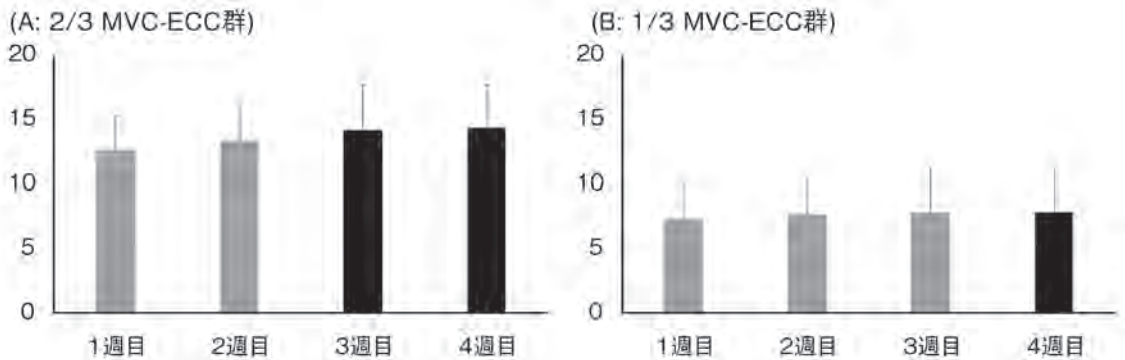


図3 トレーニングに用いたダンベルの経時的な変化について

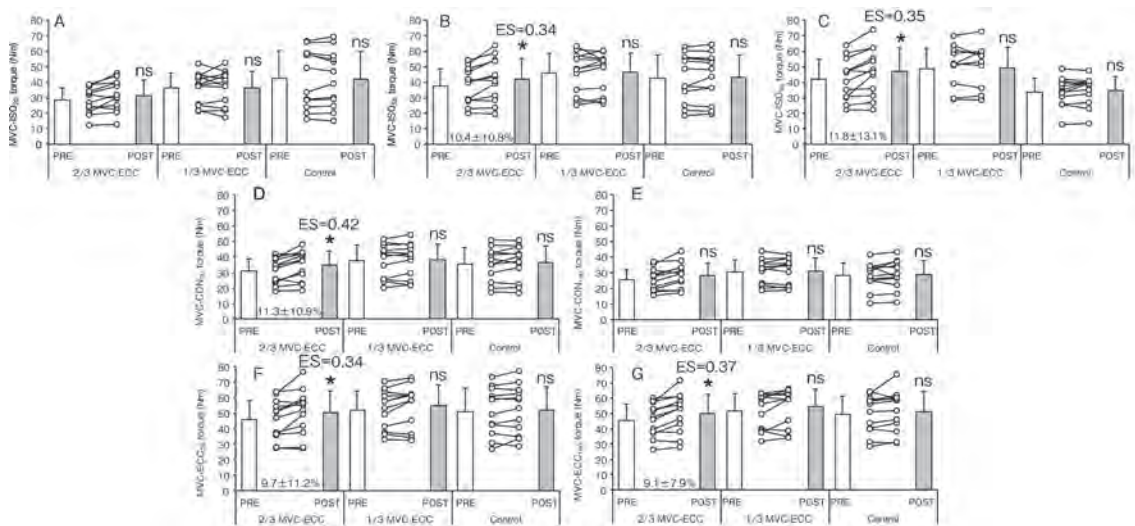


図4 介入前後における最大等尺性収縮筋力 (MVC-ISO) および
短縮性収縮筋力 (MVC-CON), 伸張性収縮筋力 (MVC-ECC) の変化
*: $p < 0.05$, ES=効果量

また、図4に介入前後におけるMVC-ISO、MVC-CONおよびMVC-ECCの測定結果を示す。分割プロット分散分析の結果、MVC-ISO₂₀およびMVC-CON₁₈₀では有意な交互作用は認められなかったが(それぞれ $F=2.48$, $p=0.099$, $F=2.69$, $p=0.082$)、その他の項目においては有意な交互作用を認めた。事後検定の結果、2/3 MVC-ECC群のみにおいて有意な筋力増加効果が認められた。

また図5にはMTの変化を示す。MT₅₀、MT₆₀、MT₇₀の全てにおいて有意な交互作用を認め、2/3 MVC-ECC群のみ有意な筋厚の増加効果を認めた。

また、図6には各群における介入前後のMVC-ISO_{AVE}、MVC-CON_{AVE}、MVC-ECC_{AVE}およびMT_{AVE}の変化率(%)の比較を示す。統計処理の結果、全ての項目において有意な交互作用を認め、2/3 MVC-ECC群のみ介入後に有意な増加を示した(Δ MVC-ISO_{AVE}: $10.3 \pm 11.4\%$, Δ MVC-CON_{AVE}: $10.9 \pm 9.5\%$, Δ MVC-ECC_{AVE}: $9.3 \pm 8.8\%$, Δ MT_{AVE}: $10.1 \pm 9.2\%$)。また2/3 MVC-ECC群におけるこれら変化率同士の相関分析の結果、 Δ MVC-ISO_{AVE}と Δ MVC-ECC_{AVE}、 Δ MVC-CON_{AVE}と Δ MVC-ECC_{AVE}にはそれぞれ有意な相関関

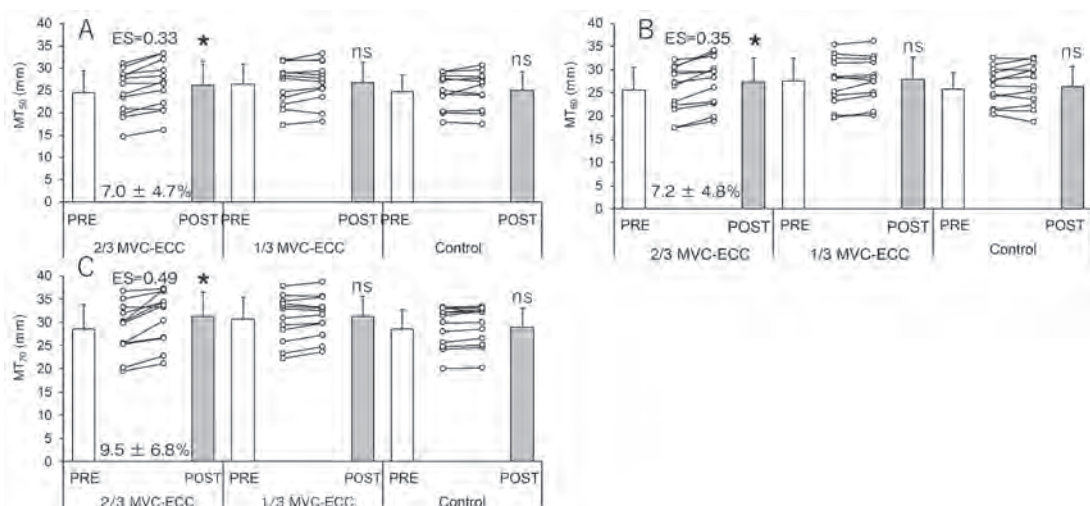


図5 介入前後における筋厚 (MT) の変化

*: $p < 0.05$, ES=効果量

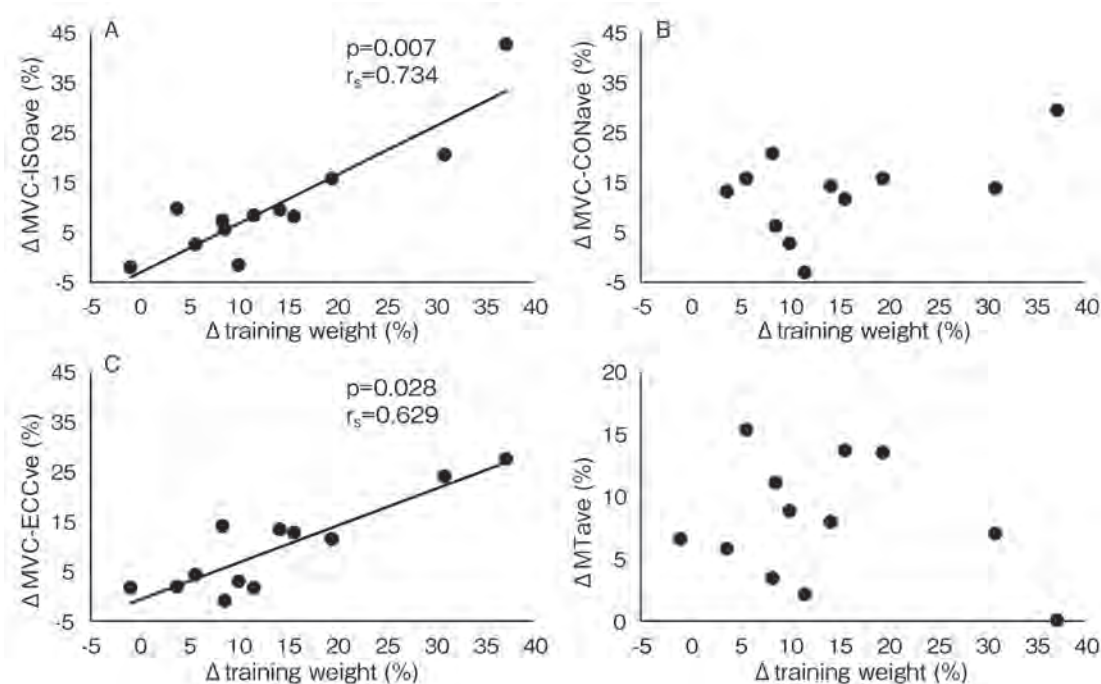


図6 1から4週目のトレーニング重量の変化率と筋力の変化率の関係性

係が認められた (それぞれ $r_s = 0.580$, $p = 0.048$, $r_s = 0.769$, $p = 0.003$). なお, $\Delta \text{MVC-ISO}_{\text{ave}}$ と $\Delta \text{MVC-ECC}_{\text{ave}}$ には有意な相関傾向が認められた ($r_s = 0.566$, $p = 0.055$). 一方, MT_{ave} とは全ての項目と有意な相関関係は認められなかった

($\Delta \text{MVC-ISO}_{\text{ave}}$: $r_s = -0.343$, $p = 0.276$, $\Delta \text{MVC-CON}_{\text{ave}}$: $r_s = -0.056$, $p = 0.863$, $\Delta \text{MVC-ECC}_{\text{ave}}$: $r_s = -0.154$, $p = 0.633$)

また, 2/3 MVC-ECC群における介入前後の $\text{MVC-ISO}_{\text{ave}}$, $\text{MVC-CON}_{\text{ave}}$, $\text{MVC-ECC}_{\text{ave}}$

および MT_{AVE} の変化率(%)と1週目から4週目にかけのトレーニング重量の変化率との相関分析の結果を図6に示す。統計処理の結果、 $\Delta MVC-ISO_{AVE}$ ($r_s=0.734$, $p=0.007$) および $\Delta MVC-ECC_{AVE}$ ($r_s=0.629$, $p=0.028$) とは有意な正の相関関係を認め、 $\Delta MVC-CON_{AVE}$ ($r_s=0.413$, $p=0.183$) および ΔMT_{AVE} ($r_s=-0.042$, $p=0.897$) とは有意な相関関係を認めなかった。

3. 考 察

本研究では、4週間の一日6回、週5回(合計30回/週)の伸張性収縮トレーニングの効果について、最大下の負荷量で検討した。その結果、最大伸張性収縮筋力の1/3の重量でトレーニングを行った場合、筋力増加および筋肥大効果は生じなかったが、2/3の重量でトレーニングを行った場合は有意な筋力増加および筋肥大効果が生じた。興味深いことに、この筋力増加および筋肥大効果は、先行研究⁵⁾で最大伸張性収縮を用いたトレーニングの結果と比較すると、 $\Delta MVC-ISO_{AVE}$ において、2/3 MVC-ECC群は $10.3 \pm 11.4\%$ に対してMVC-ECC群： $8.3 \pm 4.9\%$ 、 $\Delta MVC-CON_{AVE}$ において2/3 MVC-ECCは： $10.9 \pm 9.5\%$ に対して、MVC-ECC群： $11.1 \pm 7.4\%$ 、 $\Delta MVC-ECC_{AVE}$ において2/3 MVC-ECC群では $9.3 \pm 8.8\%$ 、MVC-ECC群は $13.5 \pm 11.5\%$ 、 ΔMT_{AVE} では $10.1 \pm 9.2\%$ に対して、MVC-ECC群は $10.6 \pm 5.1\%$ であった。すべての項目において統計的に有意な差は認められなかった。この結果より、高頻度・伸張性収縮トレーニングを行う場合、最大筋力の2/3以上の負荷量を用いることが筋力増加および筋肥大には必要なことが明らかとなった。

本研究では1/3 MVC-ECC群では筋力増加および筋肥大効果は認められなかった。Chenら⁶⁾は、本研究と同様に上腕屈筋群を対象にMVC-ISOの10%のダンベルを用いて6回の伸張性収縮トレーニング

を5セット、週2回の頻度で実施した結果、4週間で16%のMVC-ISO筋力が増加することが報告されている。本研究では、1/3 MVC-ECC群ではこの先行研究より負荷量が大きかったが、1セッションのトレーニング数が少なかったことが筋力増加を引き起こせなかった可能性がある。また、1週間あたりのトレーニング数も本研究では30回であるのに対して、先行研究では60回であった。一方、同じトレーニング回数である2/3 MVC-ECC群では有意に筋力増加および筋肥大効果が認められた。これらの結果より、1日6回の収縮しか行わない場合、最大筋力の2/3以上の負荷が必要であることが明らかとなった。しかし、トレーニング重量とトレーニング頻度が筋力増加および筋肥大効果に及ぼす影響については十分明らかではないため、今後、さらなる研究が期待される。

また興味深いことに、筋力増加および筋肥大効果が認められた2/3 MVC-ECC群においてこれらの変化率の相関分析の結果、全ての収縮様式の増加率と筋厚の増加率に有意な相関関係は認められなかった。この結果は筋力増加に筋肥大の要素の影響が少ない可能性が示されている。レジスタンストレーニングの初期における筋力増強には運動単位の動員や発火頻度の増加などに代表される神経筋機能の変化が関連していると報告されている⁶⁾。また伸張性収縮を用いたレジスタンストレーニングは運動野や脊髄レベルでの興奮性の変化を引き起こす可能性が示されている^{7,8)}。そのため、本研究では特に、2/3 MVC-ECC群ではこれらのメカニズムにより筋力が増加した可能性がある。また、代表的なトレーニングの原則として特異性の原則があり、本研究では伸張性収縮のみを用いたトレーニングであるため、MVC-ECCのみが増加する可能性もあった。しかし、本研究の結果から、全ての収縮様式で同程度の筋力増加効果を認めた。この結果は伸張性収縮トレーニングの効果

を検討した先行研究結果^{4,5)}を支持するものであり、伸張性収縮を用いたトレーニングの場合、特異性の原則に従わず、様々な収縮様式の筋力を増加させることが明らかとなった。

またそれぞれの筋力増加率およびトレーニング負荷量の増加率と筋力増加率との相関分析の結果、個人間のばらつきは多く、4週間の介入期間で筋力増加が大きい対象者ほど、筋力が増加し、その筋力増加は全ての収縮様式で生じているということが考えられる。レジスタンストレーニングの効果については効果の出やすいresponderと出にくいnon-responderがいることが知られている。この個人差についての要因は本研究では明らかにできていないため、今後、この個人差に関連する要因の検討を行っていく必要がある。

本研究では全力の2/3の負荷量を用いた伸張性収縮を行うことで1日6回、週5回という頻度で筋力増加および筋肥大効果が生じることが明らかとなった。実際のトレーニング場面を想定すると、両腕でダンベルを持ち上げて、片腕で伸張性収縮を行うことで応用が可能である。また本研究では下肢の筋肉での検討ができていないため、同様の効果が生じるかは議論の予定が残るが、スクワットやカーフレイズ動作において伸張性収縮の局面のみ片脚で実施し、短縮性収縮の局面は両足で行うなどの応用が可能である。今後は、下肢や高齢者、有患者などでの検討を進め、より実現可能な伸張性収縮トレーニングプログラムの立案につなげていきたい。

4. 結 論

1日6回、週5回の伸張性収縮トレーニングを行う場合、最大伸張性収縮の2/3の負荷量を用いることで、全力でのトレーニングと同程度の筋力増加・筋肥大効果が期待できることが明らかとなった。

謝 辞

本研究の実施にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心より御礼申し上げます。また本研究へ参加協力を快諾してくださった被験者の皆様にも感謝を申し上げます。

文 献

- 1) Roig M., O'Brien K., Kirk G., Murray R., McKinnon P., Shadgan B., Reid W.D., The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis., *Br. J. Sports Med.*, **43** (8) :556-68(2009)
- 2) Chen T.C., Tseng W.C., Huang G.L., Chen H.L., Tseng K.W., Nosaka K., Superior Effects of Eccentric to Concentric Knee Extensor Resistance Training on Physical Fitness, Insulin Sensitivity and Lipid Profiles of Elderly Men., *Front Physiol.*, **10**:8:209(2017)
- 3) Sato S., Yoshida R., Murakoshi F., Sasaki Y., Yahata K., Kasahara K., Nunes J.P., Nosaka K., Nakamura M., Comparison between concentric-only, eccentric-only, and concentric-eccentric resistance training of the elbow flexors for their effects on muscle strength and hypertrophy., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **122** (12) :2607-2614(2022)
- 4) Sato S., Yoshida R., Murakoshi F., Sasaki Y., Yahata K., Nosaka K., Nakamura M., Effect of daily 3-s maximum voluntary isometric, concentric, or eccentric contraction on elbow flexor strength., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **32** (5) :833-843(2022)
- 5) Yoshida R., Sato S., Kasahara K., Murakami Y., Murakoshi F., Aizawa K., Koizumi R., Nosaka K., Nakamura M., Greater effects by performing a small number of eccentric contractions daily than a larger number of them once a week., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **32** (11) :1602-1614(2022)
- 6) Chen T.C., Tseng W.C., Chen H.L., Tseng K.W., Chou T.Y., Huang Y.C., Nosaka K., Striking muscle adaptations induced by volume-dependent repeated bouts of low-intensity eccentric exercise of the elbow flexors., *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **46** (8) :897-905(2021)

- 7) Pearcey G.E.P., Alizedah S., Power K.E., Button D.C., Chronic resistance training: is it time to rethink the time course of neural contributions to strength gain? *Eur. J. Appl. Physiol.*, **121** (9) :2413-2422(2021)
- 8) Duchateau J., Baudry S., Insights into the neural control of eccentric contractions., *J. Appl. Physiol.* (1985), **1**;116 (11) :1418-25(2014)
- 9) Aagaard P., Spinal and supraspinal control of motor function during maximal eccentric muscle contraction: Effects of resistance training., *J. Sport Health Sci.*, **7** (3) :282-293(2018)

陸上競技長距離選手における重ね着を 活用した持久性トレーニングの効果

立 命 館 大 学 後 藤 一 成
(共同研究者) 同 岡 本 紗 弥
同 鈴 木 妙 実

The Effect of Endurance Training with Heat Stress Added by Layered Clothing in Long Distance Runners

by

Kazushige Goto
*Faculty of Sport and Health Science,
Ritsumeikan University*
Saya Okamoto, Taemi Suzuki
*Graduate School of Sport and Health Science,
Ritsumeikan University, Japan*

ABSTRACT

The purpose of the present study is to clarify the effects of heat stress added by layered clothing during 3 days of endurance training on thermoregulatory during exercise in a hot environment among long-distance runners.

Nine male long-distance runners conducted three consecutive days of endurance (cycling) training at 50% $\dot{V}O_{2max}$ for 90 min/day at 15°C with layered clothing (WEAR condition) or short-sleeve shirts and short (CON condition). Each condition was separated six weeks between conditions. Before and after training period, heat stress test (HST), consisting of 40 min of endurance (cycling) exercise in a hot environment (35°C, 50%RH), were conducted. During HST, core temperature, plasma volume, heart rate, sweat rate, sweat sodium concentration, score of thermal sensation and rate of perceived exertion were evaluated.

Peak core temperature during training session was 38.39°C in WEAR and 38.31°C in CON, with no significant difference between conditions. The mean heart rate during training session was 126 bpm in WEAR and 120 bpm in CON ($P>0.05$ between conditions). The average sweat rate during training sessions was significantly higher in WEAR (2.45%) vs. CON (1.31%) ($P<0.001$ between conditions). The absolute changes in resting core temperature before and after training period were -0.97% (from 37.22°C to 36.85°C) in WEAR and -0.82% (from 37.19°C to 36.88°C) in CON, with no significant difference between conditions. The relative change in sweat rate after HST was 0.01% (from 1.01% to 1.03%) in WEAR and 8.87% (from 1.03% to 1.12%) in CON, with no significant difference between conditions.

In conclusion, three consecutive days of endurance training adding heat stress by wearing layers didn't improve thermoregulatory ability in a hot environment.

キーワード

暑熱馴化, 持久性トレーニング, 体温調節, 発汗率, 深部温

Keyword

Heat acclimation, Endurance training, thermoregulation, Sweat rate, Core temperature

要 旨

本研究では、重ね着を用いた3日間連続での持久性トレーニングが、暑熱環境下での運動時の体温調節能に及ぼす影響を検討することを目的とした。

男性陸上競技長距離選手9名を対象に、室温15°C環境で90分間のペダリング運動を3日間連続で実施した。この際、重ね着を用いて暑熱ストレスを課す条件（着衣条件）と軽装（半袖・短パン）

を着用する条件（通常条件）を設けた。3日間のトレーニング期間前後で、暑熱環境（室温35°C）で40分間のペダリング運動を実施し（暑熱耐性テスト）、運動時の体温調節能を評価した。

トレーニング時の発汗量は、着衣群が通常群に比較して有意に高値を示した（ $P<0.05$ ）。トレーニング期間前後での深部温や血漿量の変化、暑熱耐性テスト時の発汗量や汗中ナトリウム濃度の変化には、いずれも条件間での有意差がみられなかった。

以上の結果から、重ね着を用いた3日間連続での持久性トレーニングによって、暑熱環境での運動時の体温調節能の改善は認められなかった。

緒 言

暑熱環境で繰り返し運動する「暑熱馴化トレーニング」の結果、体温調節能が改善し、暑熱環境での運動パフォーマンスが向上することが知られている¹⁾。暑熱馴化を獲得する上では、暑熱環境下（室温35℃前後）で1日あたり60～90分間のトレーニングを2週間程度継続することが推奨されている²⁾。一方、この際には、室温を制御することのできる特別な施設（人工気象室）と10～14日間に及ぶトレーニング期間が必要になる³⁾。また、通常のトレーニングに加えて、アスリートは暑熱馴化トレーニングを試合の前に取り入れる必要がある⁴⁾。このことが、暑熱馴化トレーニングをスポーツ現場で取り入れる上での大きな障壁となっている。

そこで本研究では、暑熱環境下と類似した環境を簡易に作り出すために、着衣による熱ストレスの付加に着目する。寒冷環境下（17～19℃）において着衣による熱ストレスを付加しながら1日あたり50分間のトレーニングを10日間行った結果、暑熱環境下（35℃）で運動した場合と同様に、暑熱環境下における持久性パフォーマンスが改善された²⁾。一方で、温帯環境下（平均18℃）において着衣による熱ストレスを付加しながら1日あたり60～90分間のサイクリングおよびランニング運動を2週間行ったところ、深部温、心拍数、発汗量といった体温調節機能に関する生理的指標に改善はみられなかった⁵⁾。これらのように、1～2週間程度の持久性トレーニング時における着衣による熱ストレスの付加の影響が報告される一方で、一致した結果が得られていない。また、1週間以内の短期間の影響を示した研究は未だみられない。これに対して、我々がこれまでに実施した

研究では、寒冷環境下（10℃）での5日間の持久性トレーニング時の重ね着によって熱ストレスを付加することで、トレーニング期間前後で有酸素性能力の向上が認められた。しかしながら、この研究では暑熱耐性に関わる詳細な情報は得られなかった。また、さらに短期間（<5日間）での持久性トレーニングの効果についても不明である。数日間の持久性トレーニングに重ね着を行うことによって熱ストレスの適切に付加することができれば、人工気象室のない環境や比較的冷涼な環境であっても試合や普段の練習に大きな影響を与えることなく暑熱馴化トレーニングを導入し、体温調節能を改善できるかもしれない。

そこで本研究では、陸上長距離選手を対象に、3日間の持久性トレーニング中の着衣による熱ストレス付加が暑熱環境での体温調節能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

1. 方 法

1. 1 被験者

男子陸上長距離選手9名（平均値±標準誤差、年齢：20.6±0.5歳、身長：171.7±2.0 cm、体重：57.7±1.5 kg、 $\dot{V}O_{2max}$ ：57.8±2.0 mL/kg/min）を対象とした。被験者は実験の主旨、内容および危険性についてあらかじめ説明を受け、それらを十分に理解し、同意書に署名した上で実験に参加した。本研究は、立命館大学倫理審査委員会の承認をもとに実施された。

1. 2 実験デザイン

各被験者は、以下の2条件の持久性トレーニングを3日間連続で行い、各トレーニングの前後に暑熱耐性テストを実施した。各条件間は1ヶ月の間隔を設けた。

- ①着衣条件・・・毎回のトレーニング（3日間）
時に重ね着をする条件
- ②通常条件・・・毎回のトレーニング（3日間）

時に通常の衣服（半袖・半ズボン）を着用する条件

実験期間を通して、被験者は合計12回実験室へ来室した。まず、最初の来室時には、インフォームドコンセントを実施し、同意書への署名を得た。2回目の来室では、暑熱耐性テストおよび毎回の持久性トレーニング時の負荷を決定するために、 $\dot{V}O_{2max}$ を測定した。3回目の来室では、1条件目のトレーニング期間における事前の暑熱耐性テストを実施した。4～6回目の来室では、1条件目のトレーニングを3日間連続して実施した。7回目の来室では、1条件目のトレーニング期間における事後の暑熱耐性テストを実施した。8回目の来室では、2条件目のトレーニング期間における事前の暑熱耐性テストを実施した。9～11回目の来室では、2条件目のトレーニングを3日間連続して実施した。12回目の来室では、2条件目のトレーニング期間における事後の暑熱耐性テストを実施した。

3日間の持久性トレーニングは、冷涼環境（室温15℃，相対湿度50％）に設定された人工気象室内で連続して実施した。トレーニングは1回あたり90分間とし、自転車エルゴメーター（エアロバイク 75XLM，株式会社コナミスポーツライフ）を用いてペダリング運動を実施した。運動負荷は、 $\dot{V}O_{2max}$ 測定から算出した50％ $\dot{V}O_{2max}$ に設定した。なお、毎回のトレーニング終了直後には、糖質（10.5g）およびタンパク質（15.0g）を含有した飲料を提供した。これは、暑熱環境での持久性トレーニングに伴う血漿量の増加が運動後の糖質およびタンパク質摂取によって充進することを示した先行研究の結果に基づくものである。また、トレーニング期間中における慢性的な脱水を防ぐために、毎回のトレーニング開始前には尿比重を尿比重計（PAL-09S，株式会社アタゴ社製）によって確認した。

暑熱耐性テストの実施前には、前日22時以降

に食事を摂取しない状態で前腕静脈から採血を実施した。採血終了後、暑熱環境（室温35℃，相対湿度50％）に設定した人工気象室内で自転車エルゴメーターを用いて60分間のペダリング運動を実施した（暑熱耐性テスト）。運動負荷は、65％ $\dot{V}O_{2max}$ に設定し、体温調節に関わる運動中の生理的指標を測定した。

1. 3 測定項目

1. 3. 1 トレーニング期間中

1. 3. 1. 1 発汗量（毎日）

インピーダンス式体組成計（Inner scan 50V BC-622タニタ社製）を用いて運動前後の体重を測定し、飲水量を除いた値を運動中の発汗量として算出した。

1. 3. 1. 2 深部体温（トレーニング1日目）

トレーニング1日目に、運動時の深部体温を測定した。深部体温の測定には、飲用可能なカプセル型の深部温計（e-Celsius，Body CAP社製）を用いた。

1. 3. 1. 3 心拍数（毎日）

無線型心拍計（RCX5，Polar社製）を用いて心拍数を測定した。

1. 3. 1. 4 主観的指標（毎日）

運動中の主観的運動強度、主観的温冷感を20分ごとに測定した。

1. 3. 2 トレーニング期間前後（暑熱耐性テスト）

1. 3. 2. 1 発汗量

インピーダンス式体組成計（Inner scan 50V BC-622タニタ社製）を用いて運動前後の体重を測定し、発汗量として算出した。

1. 3. 2. 2 深部体温

飲用可能なカプセル型の深部温計（e-Celsius，Body CAP社製）を用いて、深部温の変化を測定した。

1. 3. 2. 3 心拍数

無線型心拍計（RCX5，Polar社製）を用いて心

拍数を測定した。

1. 3. 2. 4 主観的指標

主観的運動強度, 主観的温冷感を10分ごとに測定した。

1. 3. 2. 5 汗中のNa濃度

背中に小型のガーゼを貼付し, 汗を採取した。運動終了後にガーゼに含まれた汗を回収し, 汗中のNa濃度を計測した。

1. 3. 3 血液指標

前腕静脈から採血を行い, ヘモグロビン濃度およびヘマトクリット値から血漿量を算出した。

1. 4 統計解析

すべての測定値は, 平均値 $\pm$ 標準誤差(SE)で示した。平均値の差の検定には, 反復測定による二元配置の分散分析(two-way ANOVA)を用い, 交互作用および主効果(条件, 時間)の有無を検定した。ANOVAにより交互作用または主効果が認められた場合には, Tukey-Kramer法により多重比較検定を行った。なお, 有意性の検定には危険率5%未満を採用した。

2. 結 果

2. 1 トレーニング期間中の各指標の変化

表1には, トレーニング期間中の平均深部温, 最高深部温, 平均心拍数の変化を示した。90分間の持久性運動中, 重ね着をして運動を行った着衣条件と半袖半ズボンで運動を行った通常条件との間で深部温に差は認められなかった。また, 運動中の心拍数においても条件下で差はみられなかった。図1には, トレーニング中の発汗量を示

表1 トレーニング期間中の平均深部温, 最高深部温, 平均心拍数

	着衣	通常
平均深部温(℃)	37.88 $\pm$ 0.17	37.91 $\pm$ 0.18
最高深部温(℃)	38.39 $\pm$ 0.22	38.31 $\pm$ 0.16
平均心拍数(bpm)	126 $\pm$ 6	120 $\pm$ 4
平均値 $\pm$ 標準誤差		

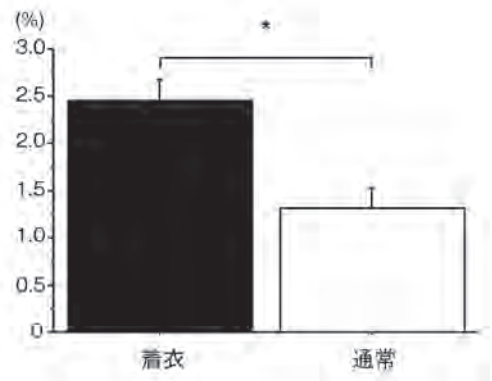


図1 トレーニング期間中の平均発汗量
平均値 $\pm$ 標準誤差, *: $P < 0.05$

した。着衣条件において通常条件と比較して有意に高値を示した($P < 0.05$)。

2. 2 トレーニング期間前後での各指標の変化

図2には, 暑熱耐性テスト時の安静時深部温を

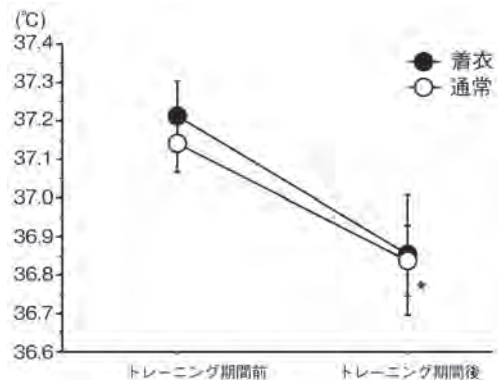


図2 暑熱耐性テスト時の安静時深部温
平均値 $\pm$ 標準誤差, *: $P < 0.05$

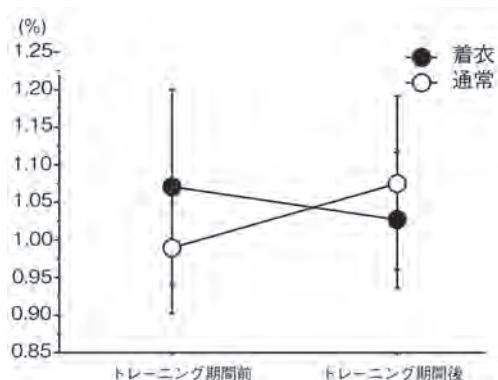


図3 暑熱耐性テスト時の発汗量
平均値 $\pm$ 標準誤差

示した。安静時深部温は、通常条件においてトレーニング期間後に有意な低下が認められたが ($P<0.05$)、条件間で有意差は認められなかった。図3には、暑熱耐性テスト中の発汗量を示した。トレーニング期間の前後および条件間で、発汗量に有意差は認められなかった。図4には、トレーニング期間前後における暑熱耐性テスト中の汗中のNa濃度の変化を示した。トレーニング期間の前後および条件間で有意差は認められなかった。

図5には、トレーニング期間前後の血漿量の変化を示した。トレーニング期間の前後および条件間で有意差は認められなかった。

考 察

本研究では、3日間の持久性トレーニング中の着衣による熱ストレスの付加が暑熱環境での体温

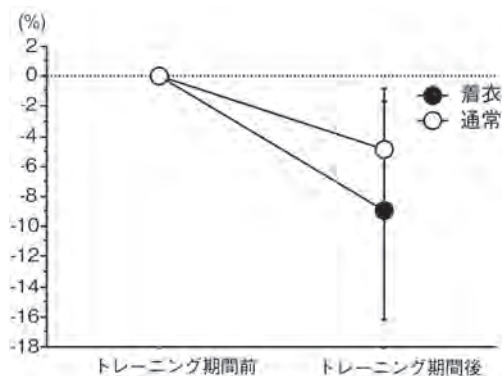


図4 暑熱耐性テスト時の汗中のNa濃度
平均値±標準誤差

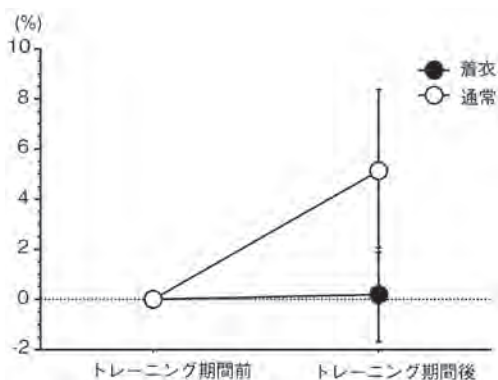


図5 トレーニング期間前後の血漿量
平均値±標準誤差

調節能に及ぼす影響を検討した。その結果、着衣による熱ストレスを付加した3日間の持久性トレーニングの前後において、着衣による熱ストレスを付加しなかった場合と比較して体温調節能の改善はみられなかった。

着衣による熱ストレスを付加した3日間の持久性トレーニング期間の前後で、暑熱環境下における運動時の体温調節機能が改善されなかった要因として、熱ストレスが身体へ十分に付加されていない可能性が考えられる。持久性トレーニング期間中の1日目には、身体への熱ストレスを評価する目的で90分間の運動中の深部温を測定した。その結果、予想に反して、平均深部温および最高深部温には、条件間で有意な差は認められなかった。このことから、着衣条件における熱ストレスが十分に付加されていないことが示唆される。先行研究では、持久性運動中の深部温が38.5℃以上で約20分維持されたことによって暑熱耐性が獲得されることが指摘されている²⁾。しかしながら、本研究の着衣条件では平均深部温が $37.88 \pm 0.17^\circ\text{C}$ 、最高深部温が $38.39 \pm 0.22^\circ\text{C}$ を示し、先行研究で報告された深部温までの上昇はみられなかった。これらの要因としては、①着衣の量、②運動強度と時間、③運動中の飲水の3点が考えられる。本研究における着衣の量は、先行研究 (Okamoto et al. 2024)⁶⁾の結果をもとに決定された。運動したことで発生する熱を外に逃さぬように、身体に密着するロングタイツとロングシャツを身につけた上に、保温性が高いとされる中綿のジャケットとズボンを上下身につけた。さらに、隙間から熱が逃げるのと外気の流入を防ぐためにネックウォーマー、帽子、手袋を着用した。一方で、適切な衣服の形態は運動実施環境や対象者の特性によって異なる可能性があり、この点は今後、改めて検討する必要がある。

本研究における運動負荷は、事前に測定した $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の50%に規定した。一般には、低～中強

度に該当するが、本研究の対象者では運動の後半から負荷を下げた例もみられた。そのため、エネルギー消費量が減少し、身体から十分に熱が発せられなかった可能性が考えられる。また、軽強度の運動であっても運動時間を伸ばすことによって緩やかな体温の上昇が期待できる。従来の暑熱馴化の方法は60～90分間の運動が一般的であるが¹⁾、本研究で同様の現象はみられなかった。その他、トレーニング中の飲水の影響も考慮すべきである。暑熱馴化期間中における体水分量は、発汗機能や深部温の上昇の度合いに関わるため慎重に調整する必要がある。本研究では、運動中の安全性を考慮して90分間のトレーニング中は自由飲水とし、運動後に飲水量を算出する方法を採用した。その結果、3日間平均で着衣条件では766mL、通常条件は319mLの飲水が確認された。飲水を積極的に行った着衣条件で発汗量の増加がみられた一方で、深部温の上昇を妨げる一因となった可能性も考えられる。

着衣による熱ストレスを付加した3日間の持久性トレーニング期間の前後で、暑熱環境下における体温調節機能を評価した際には、深部温、発汗量、汗中のNa濃度および血漿量に有意な変化はみられなかった。このことには上述した通り、毎回の持久性運動時に着衣による十分な熱ストレスが付加されなかったことが関与していると推察される。暑熱馴化に伴う生理応答の一つとしては、血漿量の増加が挙げられる。血漿量の増加は暑熱環境下での持久性運動時の心血管系へのストレス軽減に重要な役割を担う。暑熱馴化トレーニングに伴う変化には個人差が大きいが、暑熱馴化を開始して2,3日目から増加が認められる¹⁾。また、暑熱環境での持久性運動後にタンパク質と糖質を含む飲料を摂取することにより、血漿量の増加が亢進することも報告されている⁶⁾。そこで、本研究ではいずれの条件においても、90分間の持久性運動後にタンパク質を15g、糖質を10.5g含む

飲料を提供した。しかしながら、血漿量の有意な増加には至らなかった。その要因として、着衣条件のトレーニング期間中の飲水量が発汗量に対して不足していた可能性が考えられる。毎日のトレーニング前には尿比重の測定を行い、脱水状態(<1.030)でないことを確認してから運動を実施していた。一方で、血漿量の増加を誘発する上では、飲水量が不足していた可能性は否定できない。そのため、短期間の暑熱馴化トレーニングによって血漿量の増加を図る上では、運動中の飲水量のみならず、運動後における飲水量の管理まで行う必要があると考えられる。

まとめ

3日間の持久性トレーニング中の着衣による熱ストレス付加は、暑熱環境下における運動中の体温調節機能の改善に影響を及ぼさなかった。

謝 辞

本研究を委託いただきました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心からの御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Racinais S., Sawka M., Daanen H., Périard J.D., Heat acclimation., *In Heat stress in Sport and Exercise*, (pp.159-178). Springer, Cham (2019)
- 2) Lundby C., Svendsen I.S., Urianstad T., Hansen J., Rønnestad B.R., Training wearing thermal clothing and training in hot ambient conditions are equally effective methods of heat acclimation., *Journal of Science and Medicine in Sport*, 24 (8), 763-767 (2021)
- 3) Périard J.D., Racinais S., Sawka M.N., Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: applications for competitive athletes and sports., *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25, 20-38 (2015)
- 4) Benjamin C.L., Sekiguchi Y., Struder J.F., Szymanski M.R., Manning C.N., Grundstein A.J., ... Casa D.J., Heat acclimation following heat

- acclimatization elicits additional physiological improvements in male endurance athletes., *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18** (8), 4366(2021)
- 5) Stevens C.J., Heathcote S.L., Plews D.J., Laursen P.B., Taylor L., Effect of two-weeks endurance training wearing additional clothing in a temperate outdoor environment on performance and physiology in the heat., *Temperature*, **5** (3), 267-275 (2018)
- 6) Okamoto S., Yamaguchi K., Makino A., Lin C., Yabuuchi R., Goto K., Effect of adding stress by wearing layers during endurance training on improvement of exercise performance., *The 2024 American College of Sports Medicine (ACSM) Meeting*, Boston, USA. (2024)
- 7) Goto M., Okazaki K., Kamijo Y.I., Ikegawa S., Masuki S., Miyagawa K., Nose H., Protein and carbohydrate supplementation during 5-day aerobic training enhanced plasma volume expansion and thermoregulatory adaptation in young men., *Journal of Applied Physiology*, **109** (4), 1247-1255(2010)
- 8) Okazaki K., Hayase H., Ichinose T., Mitono H., Doi T., Nose H., Protein and carbohydrate supplementation after exercise increases plasma volume and albumin content in older and young men., *Journal of Applied Physiology (1985)*, **107** (3) :770-779(2009)

片麻痺のパラアスリートにおける ランニングフォームの特徴

帝 京 大 学 佐 賀 典 生
(共同研究者) 同 佐 保 泰 明

Characteristics of The Running Form of A Para-Athlete with Hemiplegia

by

Norio Saga
*Teikyo University,
Institute Sports Science & Medicine*
Yasuaki Saho
*Teikyo University,
Faculty of Medical Technology*

ABSTRACT

We present here a case study of the characteristics of the running form in a para-athlete with hemiplegia (track and field, standing, cerebral palsy) to provide relevant information to para-athletes and coaches. The participant performed a multistep progressive load running test on a treadmill. Oxygen uptake, carbon dioxide output, respiratory rate, expired gas volume, heart rate, and blood lactate concentration were measured to determine running speeds equivalent to 2 mmol/L (LT speed) and 4 mmol/L (OBLA speed) blood lactate concentrations. The participant ran at determined speeds, and foot pressure measurements and 3-D motion analysis were performed. Differences in foot pressure were observed between left and right feet, revealing a bimodal foot pressure curve on the paralyzed side. The 3D motion analyses also revealed disparities in left and right trunk rotation in response to arm swinging.

The findings of this study imply that hemiplegic para-athletes develop high levels of motor control over asymmetric movements and rotations by modifying and/or repressing the influence of the paralyzed side.

キーワード

パラアスリート, 脳原性麻痺, 片麻痺, 乳酸閾値, ランニング

Keyword

Para athlete, cerebral palsy, hemiplegia, Lactate Threshold, running motion analysis

要 約

本研究の目的は、片麻痺のパラアスリート1名（陸上競技、立位・脳原性麻痺）を対象としたランニングフォームの特徴に関する事例を提示して、パラアスリートや指導者の一助となるような情報を提供することであった。対象者は、トレッドミルを用いた多段階漸増負荷ランニングテストを行い、酸素摂取量、呼吸交換比、換気量、心拍数、血中乳酸濃度を測定し、血中乳酸濃度が2mmol/L (LT) および4mmol/L (OBLA) 相当の走速度を求めた。対象者は求めた速度でランニングを行い、足圧測定および3次元動作分析を行った。その結果、足圧や足圧中心の軌跡に左右差が認められ、麻痺側では2峰性の足圧曲線となった。また、3次元動作分析により、腕を振る際の体幹部の回旋には左右差が認められた。本研究の結果より、片麻痺パラアスリートにおけるランニング動作は、麻痺側の影響を修正・抑制することによって、アシンメトリーな動作や回旋に対して、高いレベルで運動を調節している可能性が示唆された。

緒 言

近年、パラリンピックやその他の障がい者スポーツイベントが注目を集め、参加者が増加している。パラアスリートの競技パフォーマンスが向上している競技もあるが、向上していない競技も

ある¹⁾。競技パフォーマンスを上げるためには、選手のフィットネスレベルや特徴を把握して、トレーニングに活かす必要がある。特にパラスポーツにおいては、個々の選手の能力を適切に評価するためにも、安全性が高く個性も強くありつつも汎用性が高い測定方法の確立や指標が必要となる。我々は、陸上の中長距離種目を専門とするパラアスリートの有酸素性作業能力に関する測定を行っている。今回はその中でも片麻痺のパラアスリートについての取り組みに焦点を当てる。

脳性麻痺は、日常生活活動における障害がほとんどない症状から、多くの介助が必要である症状、さらには生命維持に危険をとまなう症状まであり、非常に幅広い²⁾。片麻痺を持つパラアスリートは、身体の一部に麻痺が生じる状態となっているが、その麻痺の程度によって個々のアスリートへの身体能力や運動パターンに対する影響は多様なものとなることが予想される。これまでの研究では、片麻痺患者の歩行動作に関する分析は多く行われているが、ランニングに特化した研究は少なく、情報が不足しているのが現状である³⁾。片麻痺のある子どもの先行研究では、歩行と比べて、ランニング動作は非対称性が増大するが、ステップ時間においては非対照性が減少する可能性も報告されている⁴⁾。ランニング動作は、筋力、持久力、協調性など多くの身体的要素を必要とする動作様式であると考えられ、片麻痺のあるアスリー

トにとって、これらの要素がどのように変化するのか、どのような代償動作が生じるのかを理解することは、競技レベル向上だけではなく、リハビリテーションにおいても非常に重要であると思われる。脳性麻痺のあるヒトが競技だけではなく日常生活において直面する課題を軽減し、可能性を最大限に引き出すための科学的根拠を提供することは重要である。

本研究は、片麻痺のパラアスリートを対象としたランニングフォームの特徴に関する事例を提示して、パラアスリートや指導者の一助となるような情報を提供することを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 対象者

対象者は、陸上競技種目、立位・脳性麻痺の分野のパラアスリート男性1名（世界パラ陸上競技選手権出場レベル）で、年齢30歳代、身長168.5cm、体重55.3kg、麻痺側は右側であった。日本パラ陸上競技連盟のクラス分け⁵⁾では、トラック・跳躍、障害種別：筋緊張亢進アテトーゼ失調（立位）、クラス：T37であり、歩行および走行が可能な片麻痺の選手であった。本研究において、対象者が使用したランニングシューズは、Nike、ヴェイパーフライネクストパーセント3であった。

測定を実施するにあたり、測定の趣旨、方法、危険性等について書面および口頭で説明を行い、対象者から参加の同意を得て行われた。また、選手には食事の影響を避けるために、運動の3時間前までに食事を済ませ、それ以後は水のみの摂取とするよう依頼した。

1. 2. 1 テスト①：多段階漸増負荷ランニングテスト

対象者は、トレッドミルを用いたランニングによる多段階運動負荷試験を行った。多段階漸増負荷試験は、トレッドミルの傾斜を1%に設定し、初速度170m/分から開始した。各ステージの運動

継続時間は3分間とし、次のステージは、前のステージより20m/分漸増した速度で行った。選手はこれを繰り返して、安全に走行でき、選手が申告した速度のステージまで行った。測定項目は、心拍数、呼気ガス分析（酸素摂取量、二酸化炭素排出量、呼吸交換比、換気量）、であった。また、各ステージ間の休憩は1分間として、その間に血中乳酸濃度を測定し、自覚的運動強度の確認を行った。測定を行う環境制御室の気温と湿度の設定は、それぞれ気温22℃、湿度40%で行った。トレッドミル走行中の安全のため、選手は安全ベルトを装着して行った。

1. 2. 1. 1 測定項目および方法

多段階漸増負荷ランニングテスト中、呼気ガス分析装置（AE-300s、ミナト医科学社製、日本）を用いて酸素摂取量、二酸化炭素排出量、換気量を測定した。なお、呼気ガス分析器は、測定前に標準ガスを用いて校正を行った。

1) 最大酸素摂取量

呼気ガス分析より、①酸素摂取量のプラトーの出現、②呼吸交換比 >1.10 、③予測される最大心拍数（HRmax： $220 - \text{年齢}$ ） ± 10 bpmに到達、④疲労困憊まで達した直後の自覚的運動強度が18以上、のうち、3つ以上を満たしたときに最大酸素摂取量として採用した。

2) 血中乳酸濃度

血中乳酸濃度は、運動開始前と、漸増負荷ランニングテストにおける各ステージ運動直後に、対象者の指先より約0.3 μl の血液を採取した。血中乳酸濃度は、簡易型自動血中乳酸濃度測定器（Lactate Pro2 LT-1730、アークレイファクトリー社製、日本）を用いて測定した。また、LT・OBLA速度におけるランニング動作分析のために、乳酸閾値として血中乳酸濃度2mmol/L（Lactate Threshold: LT）および4mmol/L（Onset Blood Lactate Accumulation: OBLA）相当の走速度を算出した。

3) 心拍数

心拍数は、胸部の心拍センサー (H10, Polar, Finland) を用いて測定し、各ステージの50-60秒での心拍数を1分間の平均心拍数として採用した。

4) 自覚的運動強度

運動における自覚的な強度は、6～20の数字で表した、Borgスケールを用いて、各ステージの運動終了直後に記録した。

1. 2. 2. テスト②：LT・OBLA速度におけるランニング動作分析

また、走行時の分析は、足底圧計測が可能なトレッドミル (Win FDM-T, zebris Medical GmbH, ドイツ) を用いて計測した。走行速度は、漸増負荷試験を元に算出された、LT速度：222m/minおよびOBLA速度：254m/minとした。対象者がランニングを行い、規定速度に達した1分後から20秒間の計測を行った。

1. 2. 2. 1 測定項目および方法

1) ランニングの評価指標

測定項目は、ステップ長 (m)、ストライド長 (m)、スタンス期およびスイング期 (%), ステップ時間 (sec), ストライド時間 (sec), ケイデンス (steps/min), とした。また、足圧 (N), および足圧中心の軌跡の測定を行った。

2) 3次元動作分析

ランニング動作は、ハイスピードカメラ (Miaus Video, Qualisys社製, スウェーデン) を用いて、各速度で15秒間、サンプリング周波数120Hzで撮影した。3次元動作動作分析には、マーカーレスモーションキャプチャシステム Theia3D (Theia3D, Theia Markerless社製, カナダ) を用いた。

データ分析には、動作解析ソフトウェア (Visual3D, C-Motion社製, アメリカ) を用いて、15秒間中に出現したサイクル、22歩分のデータの解析を行った。分析項目は体幹回旋、肩関節、

股関節、膝関節、足関節として、最大・最小角度から求めた。データは平均値±標準偏差で求めた。

1. 3 ジャンプテスト

1) スクワットジャンプおよびカウンタームーブメントジャンプ

ジャンプ測定は、マットスイッチ計測システム (マルチジャンプテスト, DKH社製, 日本) を用いて計測をした。スクワットジャンプはマット上で両足を肩幅に開き、手を腰に当て、膝を90°に曲げた姿勢から、股関節や膝関節の反動動作を用いずに最大努力で跳躍するように指示した。カウンタームーブメントジャンプは、マットスイッチ計測システムを用いて跳躍高を測定した。手を腰に当てた状態から、沈み込んで跳躍を行うよう指示した。測定はそれぞれ3回行った。

2) 立ち2段跳び

麻痺側および非麻痺側のそれぞれの影響をみるため、立ち二段跳びを行った。選手は両足で前方への跳躍し、右足、両足着地、および、両足、左足、両足着地の両方で行い、前方への跳躍距離を各3回ずつ実施した。

2. 結 果

2. 1 多段階漸増負荷ランニングテスト

最大酸素摂取量は、67.0 mL/kg/minであった。その際の心拍数は195 bpm, 最大換気量138.3 L/minは、呼吸交換比は1.15であった。

オールアウト時の血中乳酸濃度は、12.4 mmol/L, 終了5分後の血中乳酸濃度は15.4 mmol/Lであった。また、自覚的運動強度は19であった。本測定では、最大酸素摂取量の基準を満たした。

測定された血中乳酸濃度から、2mmol/L相当 (LT速度) は、4mmol/L相当 (OBLA速度) の速度を求めた。LT速度は222.0 m/min, OBLA速度は254.3 m/minであった。

表1 片麻痺ランナーにおける2種類の速度における各キネマティクス変数

			LT速度 (222m/min)	OBLA速度 (254m/min)
ステップ長	(m)	左	1.23±0.02	1.38±0.01
		右	1.26±0.02	1.41±0.01
ストライド長	(m)		2.50±0.03	2.79±0.02
スタンス期	(%)	左	26.2±1.2	25.8±1.3
		右	28.1±1.4	26.7±1.2
スイング期	(%)	左	73.8±1.2	74.2±1.3
		右	71.9±1.4	73.3±1.2
ステップ時間	(sec)	左	0.34±0.01	0.33±0.01
		右	0.34±0.01	0.33±0.01
ストライド時間	(sec)		0.67±0.01	0.66±0.01
ケイデンス	(step/min)		178±3	183±3

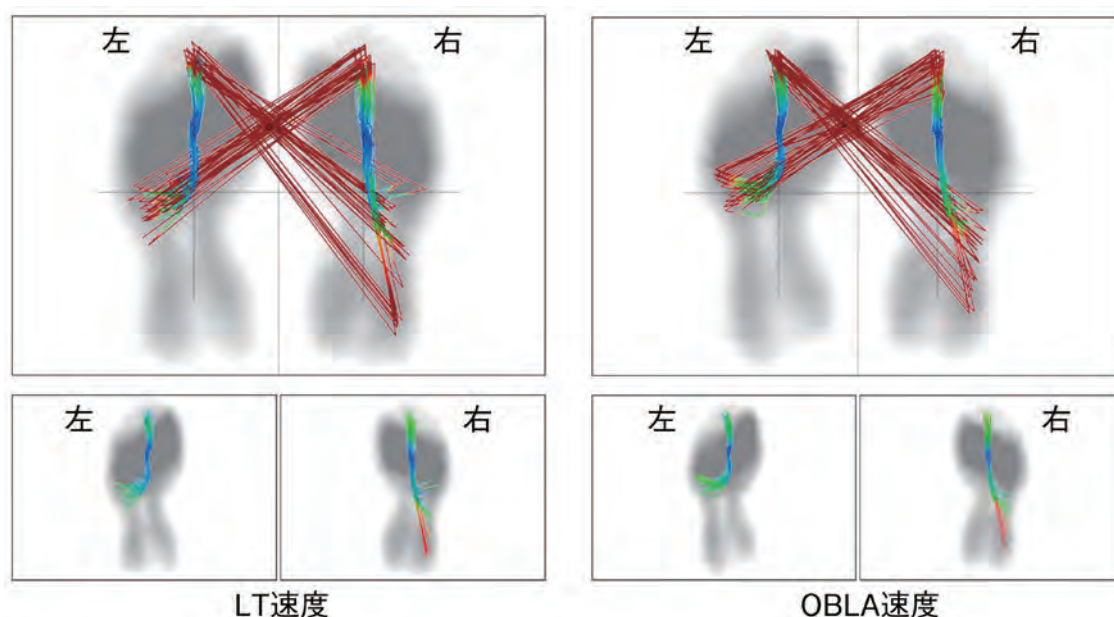


図1 LT・OBLA速度におけるランニング中の足圧中心軌跡 麻痺側は右(左図: LT速度, 右図: OBLA速度)

2. 2. 1 LT・OBLA速度におけるランニング動作分析

表1に片麻痺ランナーにおける2種類の速度における各キネマティクス変数を示した。速度に応じてステップ長、ストライド長ともに長くなり、ケイデンスも増加した。左右差について、LT速度およびOBLA速度の両方でわずかではあるが麻痺側(右)のステップ長が長かった。スタンス期では、麻痺側(右)の時間の割合が高く、スイング期の時間の割合が減る傾向にあった。

2. 2. 2 足圧分析

図1に各速度におけるランニングにおける足圧

中心の軌跡を示した。単脚支持期中の踵接地から離床までの足圧中心の軌跡長に左右差(LT速度: 非麻痺側116.2±13.5mm, 麻痺側146.9±41.3mm, OBLA速度: 非麻痺側110.8±9.6mm, 麻痺側142.7±28.6mm)が観察された。また、接地時のばらつきが認められ、非麻痺側では、中足部で接地をしていたが、麻痺側では後足部から接地している時もあり、ばらつきが観察された。この点に関しては、両速度で同様の傾向であったが、OBLA速度時ではばらつきが小さくなった。

図2にLT・OBLA速度時の足圧の力曲線を示した。足圧の力曲線のピークは、LT速度時で非

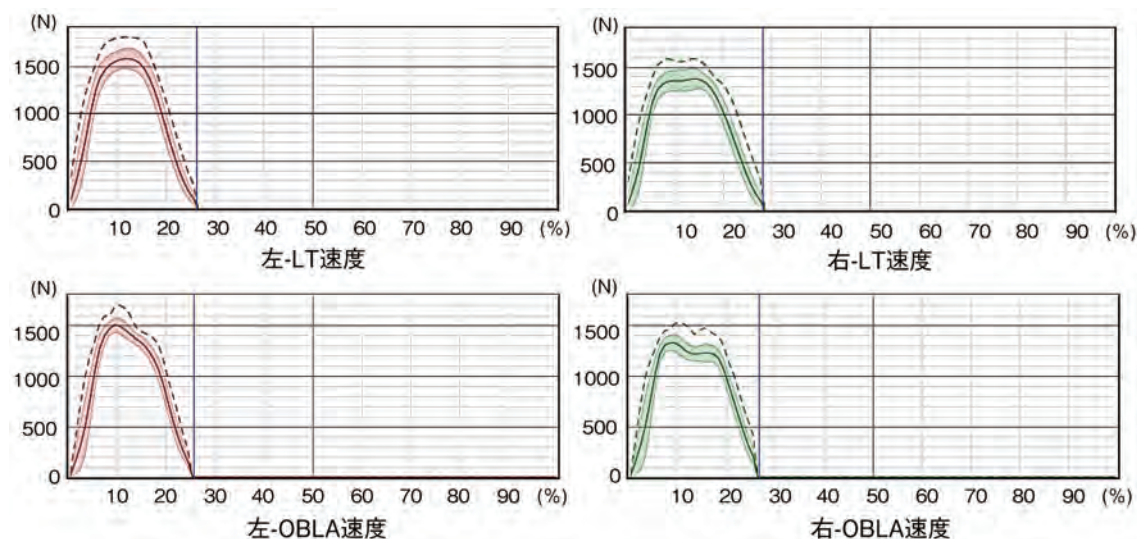


図2 LT速度およびOBLA速度時の足圧 非麻痺側(左)と麻痺側(右)

麻痺側(左)が1578.6N, 麻痺側(右)は1379.3N, OBLA速度時で非麻痺側が1509.0N, 麻痺側が1332.4Nとなり, 両速度ともに非麻痺側と比較して麻痺側の最大値は低値を示した. また図2の力曲線をみると, 非麻痺側とは異なり, 麻痺側では2峰性の曲線となり, 速度によってピークが出現する位置が異なった.

2. 2. 3 3次元動作分析

LT速度およびOBLA速度におけるランニング時の各関節可動域を表2および表3に示した. ま

たLT速度におけるランニング中の上方からみた肩関節の伸展/屈曲動作を図3に示した. 非麻痺側の左肩(図3-1, 図中A)は矢状面上で後方に肘を後方に引いていたが, 麻痺側の右肩(図3-2, 図中a)は肘を後方に引かず, 伸展が小さかった. また, 肩関節の屈曲動作は非麻痺側の左肩(図3-1, 図中B)よりも麻痺側の右肩(図3-2, 図中b)で大きかった. この傾向はOBLA時でも同様であった.

表2 LT速度ランニング時の各関節可動域

	屈曲(背屈)(deg)		伸展(底屈)(deg)	
	麻痺側(右)	非麻痺側(左)	麻痺側(右)	非麻痺側(左)
肩関節	34.9±3.8	-6.2±3.5	22.4±2.1	45.1±2.7
股関節	44.8±1.7	48.1±1.1	14.0±1.0	13.3±1.0
膝関節	120.9±3.9	131.0±12.8	-9.9±1.6	-16.3±1.4
足関節	22.8±1.4	18.1±0.8	25.5±2.1	26.5±1.8
体幹	右回旋	14.4±1.0	左回旋	17.4±0.9

表3 OBLA速度時の各関節可動域

	屈曲(背屈)(deg)		伸展(底屈)(deg)	
	麻痺側(右)	非麻痺側(左)	麻痺側(右)	非麻痺側(左)
肩関節	32.4±5.5	-8.2±5.7	27.7±1.9	40.4±6.1
股関節	47.2±1.0	50.6±1.5	16.5±1.4	16.3±1.0
膝関節	126.9±1.7	135.4±1.5	-11.2±1.8	-15.3±1.6
足関節	24.4±1.1	18.0±0.9	30.1±1.7	31.7±1.4
体幹	右回旋	16.3±0.8	左回旋	15.8±0.8

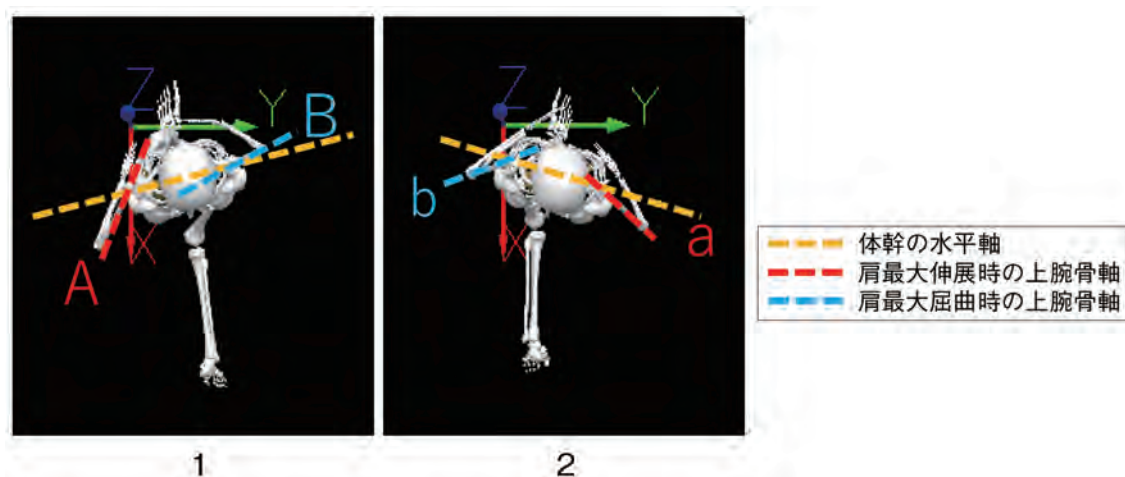


図3 LT速度ランニング中の上方からみた肩関節の伸展/屈曲動作 麻痺側は右

2. 3 ジャンプテスト

スクワットジャンプの跳躍高は 31.2 ± 0.7 cm, 最大値は31.7cmであった. カウンタームーブメントジャンプの跳躍高は 42.9 ± 0.9 cm, 最大値は44.0cmであった.

立ち2段跳びの最大跳躍距離は, 左 361.0 ± 29.1 cm, 最大値は393cm, 右 359.0 ± 19.5 cm, 最大値は379cmであった.

3. 考 察

本研究は, 片麻痺のパラアスリート1名(トラック・跳躍, 障害種別: 筋緊張亢進アテトーゼ失調(立位), クラス: T37)を対象としたランニングフォームの特長を観察するため, ランニング時の呼気ガス分析, 足圧, 動作分析を行った. その結果, 足圧と圧力中心の軌跡に左右差が認められ, 麻痺側では2峰性の足圧曲線となった. また, ランニングフォームの3次元動作分析により, 腕振り, および, 体幹部の回旋には左右差が認められた.

脳性麻痺は, 運動と姿勢の発達の異常の1つの集まりを説明するものであり, 活動の制限を引き起こすが胎児または乳児の脳で生じた非進行性の障害に起因すると考えられ, 運動障害には感覚,

認知などが加わるとされている^{2,6)}.

これまでの先行研究⁷⁾では, 12名の痙直型脳性麻痺児の等速性筋力, 有酸素パワーについて検討し, 軽度から中等度の脳性麻痺児であれば, 十分に再現性のある値を得ることができることを報告している. 本研究に参加したパラアスリートはこれまでも複数回の有酸素能力測定やジャンプ測定を行ってきたが今回と同様に大きなばらつきは認められなかった. しかしながら, 手を腰に当てた状態でジャンプを測定したが, 麻痺側の腰から手が離れ, 腕をスイングをしている場面もあった. 項目によっては動作のコントロールが難しい場合もあるため実施するには麻痺側の動きをコントロールする工夫が必要であると思われる.

また立ち二段跳び測定では, 麻痺側脚での支持局面でより深く股関節と膝関節を屈曲して沈み込む様子が観察された. 要因は複数あると思われるが, 健常アスリートと同様に筋力トレーニングも必要かもしれない. また, 非麻痺側の反動利用能が高いようにも思われた. しかし動作に慣れ, 腕のスイングや非麻痺側の動作が変化していったようにも思われた. パラアスリートにおいて新たな測定項目を行う際には, 健常者以上に十分な練習を行うことがデータの再現性のためには重要であ

ると推測された。

本研究における有酸素作業能力測定において、本研究の対象者のパラアスリートの酸素摂取量としては、傾斜と速度から推定される値よりもやや高値であった。この要因の一つにはケイデンスのばらつきが考えられる。走行時のエネルギーコストの増加は、ピッチのばらつきの増加に影響を受けることが報告されている⁸⁾。推測の域をでないが、本研究では、より速い速度になった際にはスイング期とスタンス期の左右差が減少していたことから考えるとLTおよびOBLA速度付近でのランニングの場合にはエネルギーコストは高くなっている可能性もある。二つ目の要因として、弾性エネルギーの損失の可能性も考えられる。ケイデンスが不規則である場合には弾性エネルギー損失が大きくなる可能性があり、エネルギー消費量の増加を引き起こすと報告されている⁸⁾。また、脚のスティフネスを測定していないため推測の域をでないが、立ち2段跳び時の麻痺側の片脚接地時には沈み込むような動作が観察され、跳躍距離が低値であったことから、麻痺側脚では弾性エネルギーが非麻痺側脚よりも低い可能性もある。片麻痺のランナーでは、弾性エネルギーの使用が左右で異なった状態で、ランニング動作をコントロールしている可能性も考えられた。これらを検討するには、より時間的に長く計測を行って、ケイデンスのばらつきを観察するとともに、酸素摂取量の関係をみていく必要があるだろう。

さらに本研究はLTおよびOBLA相当の速度で3次元動作分析を行った。ランニング中の動作は、左肩は矢状面上で後方に肘を後方に引くが、麻痺側の右肩は肘を後方に引かず、伸展動作が小さかった。また、肩関節の屈曲動作は左肩よりも麻痺側の右肩で大きかった。これらは腕振りの影響を体幹部で代償するように片麻痺による回旋動作に左右差が生じ、ケイデンスのばらつきが生じる原因の一つになっている可能性が示唆された。し

かし、本研究に参加した対象者は比較的症状が軽度のクラス⁵⁾で、あったため、症状が異なれば、本研究の結果とは異なる可能性もある。

片麻痺のランナーにおいて、ランニング中に麻痺側脚が支持している際、非麻痺側脚の動作に影響を受け、反対に、非麻痺側脚が支持している際には麻痺側の動作に影響を受けると考えられる。この一連の動作において、麻痺側の影響による負の運動学習を修正・抑制するにより、麻痺側の影響によるアシンメトリーな負荷や回旋に対して、非常に高いレベルで柔軟に運動を調節し、非麻痺側の動きによって運動調節するように運動学習をしている可能性がある。一般的に麻痺側は色々な制限を受けるようになっていると考えられるが、麻痺による強い動きを非麻痺側では制御することが必要になると思われる。非麻痺側は麻痺の動きを予測・調整するなど、健常ランナー以上に高度に適切に調節しているのかもしれない。そのためにも、麻痺側の共同運動における分離の運動学習を行うことの重要性が高く、必要となると考えられた。今後は、単に麻痺側・非麻痺側という観点から左右の能力差をみるのではなく、動作や運動制御の特性の違いを考慮して、それぞれの特徴を伸ばすという観点で研究やサポートが行われることが求められる。

本研究における動作分析での走行時間は各速度で2分以内と短い時間であった。脳性麻痺のパラアスリートでは、疲労が生じている状態では、麻痺側の共同運動の制御が困難となる可能性もあるため、より長時間の疲労状態の有無によるランニング動作を観察することが脳性麻痺アスリートにとって有益な情報となるかもしれない。

また、対象者はフォアフットしやすくなるとされる厚底シューズを着用していた。靴の形状は足圧やランニング動作に影響を与える可能性も考えられる。先行研究^{4,9)}では多くの子供の麻痺のランナーはフォアフットであったことを報告してい

る。左右差がある片麻痺のランナーにおいて、フットコンタクト時の足圧中心の軌跡が異なる可能性を考えると、ランナーそれぞれにとってよりよいシューズの選択を考える必要があるかもしれない。ランニング動作に対してどのようなシューズの形状や特徴が適しているか、水平および垂直方向の分力も含めて検討することも今後の課題の一つになると考えられた。

4. まとめ

本研究は、片麻痺のパラアスリートのランニング時の呼気ガス分析、足圧、動作分析を行った結果、足圧やその圧力中心の軌跡に左右差が認められ、麻痺側では2峰性の足圧曲線となった。また、腕振りと体幹部の回旋には左右差が認められた。麻痺側・非麻痺側が相互に代償動作を行い、ランニング動作をコントロールしていることが推察された。本研究の結果が脳性麻痺などのランニング愛好家、アスリートやその指導者だけではなく、リハビリテーション指導まで、脳性麻痺の影響による外傷・障がいにつながる動作を予防・改善する情報を提供できる一助となることが期待される。

謝 辞

本研究の実施にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団様に厚く御礼申し上げます。また、ご協力いただきました選手と指導者の方々に深く御礼申し上げます。

また、測定のご協力いただきました帝京大学の加藤基先生、多くの助言を頂きました帝京大学スポーツ医科学センターの廣重陽介先生、武末大藏先生に感謝申し上げます。

文 献

- 1) de Macedo T.A., Aguiar SdS., Sousa C.V., Barbosa L.P., Deus L.A., Santos P.A., Maciel L.A., Nikolaidis P.T., Knechtle B., Simões H.G., Performance trends in Paralympic athletes in sprint, middle-distance and endurance events., *Sport Sci. for Health*, **16**: 485-49 (2020)
- 2) 公益財団法人日本リハビリテーション医学会 監修. 脳性麻痺リハビリテーションガイドライン第2版. 金原出版株式会社 (2014)
- 3) Chappell A., Gibson N., Morris S., Williams G., Allison G.T., Running in people with cerebral palsy: A systematic review., *Physiother Theory Pract.*, **35**: 15-30 (2019)
- 4) Bohm H., Doderlein L., Gait asymmetries in children with cerebral palsy: do they deteriorate with running?, *Gait. Posture*., **35**: 322-327 (2012)
- 5) 日本パラ陸上競技連盟. 2021年度版日本パラ陸上競技連盟クラス分け説明表. (2021)
- 6) Bax M., Goldstein M., Rosenbaum P., Leviton A., Paneth N., Dan B., Jacobsson B., Damiano D., Proposed definition and classification of cerebral palsy., *Dev. Med. Child. Neurol.*, **47**: 571-571 (2007)
- 7) van den Berg-Emons R.J., van Baak M.A., de Barbanson D.C., Speth L., Saris W.H., Reliability of tests to determine peak aerobic power, anaerobic power and isokinetic muscle strength in children with spastic cerebral palsy., *Dev. Med. Child. Neurol.*, **38**: 1117-1125 (1996)
- 8) Candau R., Belli A., Millet G.Y., Georges D., Barbier B., Rouillon J.D., Energy cost and running mechanics during a treadmill run to voluntary exhaustion in humans., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **77**: 479-485 (1998)
- 9) Davids J.R., Bagley A.M., Bryan M., Kinematic and kinetic analysis of running in children with cerebral palsy., *Dev. Med. Child. Neurol.*, **40**: 528-535 (1998)

セルロースを原料とした サステナブルなひずみ可視化シートの創成と応用

東京理科大学 古海 誓 一

Sustainable Strain-Visualizable Sheets Fabricated from Cellulose

by

Seiichi Furumi
Tokyo University of Science

ABSTRACT

Real-time visualization of the flexion and extension status in joints of athletes is of prime importance for improving their performance and skill. Furthermore, when the injured athletes or elderly person carry out rehabilitation, the visualization of joint flexion status by color changes would motivate them to overcome their injuries and illnesses too.

In this report, we designed and synthesized the cellulose-based liquid crystal materials (hereinafter called “cellulose liquid crystal elastomers”), which exhibit both reflection colors and lithe elasticity in order to produce the sustainable strain-visualizable sheets. For example, when a cellulose liquid crystalline elastomer film with red reflection was compressed by a transparent plastic spoon, the reflection color in only the compressed area changed from red to yellowish green. Although this yellowish green reflection was maintained as long as the pressure remained constant, the reflection color immediately recovered to the original red by releasing the compressed pressure. This happened from because the elasticity of cellulose liquid crystalline elastomer film. Such pressure-induced color changes of cellulose liquid crystalline elastomer films exhibited the correlation between pressure and reflection color change. Therefore, the reflection color of cellulose liquid crystalline elastomer films allows us

to quantitatively visualize the degree of pressure or strain at a glance.

キーワード

セルロース, コレステリック液晶, エラストマー, ブラッグ反射, ひずみ

Keyword

Cellulose, Cholesteric Liquid Crystal, Elastomer, Bragg Reflection, Strain

要 旨

アスリートの関節における屈曲と伸展の状態をリアルタイムに可視化することは、パフォーマンスやスキルの向上において重要である。これだけでなく、怪我を負ったアスリートや身体が不自由になってしまった高齢者がリハビリを行うとき、関節の屈曲状態を色の変化で可視化できれば、怪我や病気の克服へのモチベーションに繋がるはずである。

本研究では、材料化学の観点から、バイオマスであるセルロースを原料にして、カラフルな反射色だけでなく、やわらかいゴム弾性も示す液晶材料（以降、「セルロース液晶エラストマー」と呼ぶ）の分子デザインと合成を進め、サステナブルなひずみ可視化シートの創成を行った。たとえば、赤色の反射を呈するセルロース液晶エラストマー膜を透明なプラスチックスプーンで圧縮すると、押し付けた部分だけが赤色から黄緑色に変化した。一定の圧力が加え続けている間は黄緑色の反射を維持しているものの、力を取り除けばセルロース液晶エラストマーのゴム弾性により、速やかに元の赤色に回復した。この膜の変色において、圧縮の力と反射色の変化には相関があるため、セルロース液晶エラストマー膜が示す反射の変色を見れば、どの程度の力やひずみが加わっているか露見でき、多種多様なニーズに沿った新しいひずみ可視化シートへの応用が期待できる。

緒 言

私たち人類の生活は、19世紀後半の第二次産業革命以降、石油資源の恩恵を受けて豊かになった。石油資源は、その精製によってガソリンなどの液体燃料を抽出し利用するだけでなく、石油資源の化学反応によって合成されたプラスチックなどの化成品は今日の日常生活で幅広く使われている。このような石油資源の活用技術は、オイルリファイナリーと呼ばれている。20世紀になると社会的な状況は一転し、高度経済成長によって世界中で石油資源が大量に消費され、それに伴って温室効果ガスが増加した結果、地球温暖化が急速に進んでしまったことに疑いの余地はない。ここ最近では、私たち人間が大量に作ったプラスチック製品が海洋中に流出したことで、生態系の破壊や人体への悪影響をもたらす海洋マイクロプラスチックごみ問題もクローズアップされ、環境問題として深刻化している¹⁾。

地球上の石油資源の埋蔵量に目を向けてみると、2014年にピークを迎え、現時点ではすでに減少傾向である²⁾。あと50年分の石油資源しか残されていないとも予想されている³⁾。将来、持続可能な社会を実現するためには、貴重な石油資源への依存から脱却できる抜本的な技術改革が渴望されている。現在、天然資源を活用した技術であるバイオマスリファイナリーは注目されている。なぜならば、バイオマスを作り出す植物は大気中の二酸化炭素を吸収して成長しており、温室

効果ガスである二酸化炭素の排出量と吸収量が相殺されるというカーボンニュートラルの考えに基づくからである。

このような社会的な課題や要請がある中、筆者は2014年から、代表的なバイオマスであるセルロースを原料にして、周期的な分子らせん構造を自己組織的に形成するコレステリック液晶の合成とそのブラッグ反射を利用したフルカラー材料への展開に関する研究を進めている(図1)⁴⁻⁶⁾。セ

ルロースは、地球上で最も豊富に存在する炭水化物である。植物の光合成で二酸化炭素と水から生成したグルコースが脱水縮合することで、セルロースやデンプンが作り出される。セルロースの化学構造は、 β -グルコースがグリコシド結合を介して連なっており、隣り合う β -グルコースユニットは交互に環平面の上下の向きを変えながら結合しているため、全体としてほぼ直線状に伸びた化学構造になっている(図2)。セルロースは、

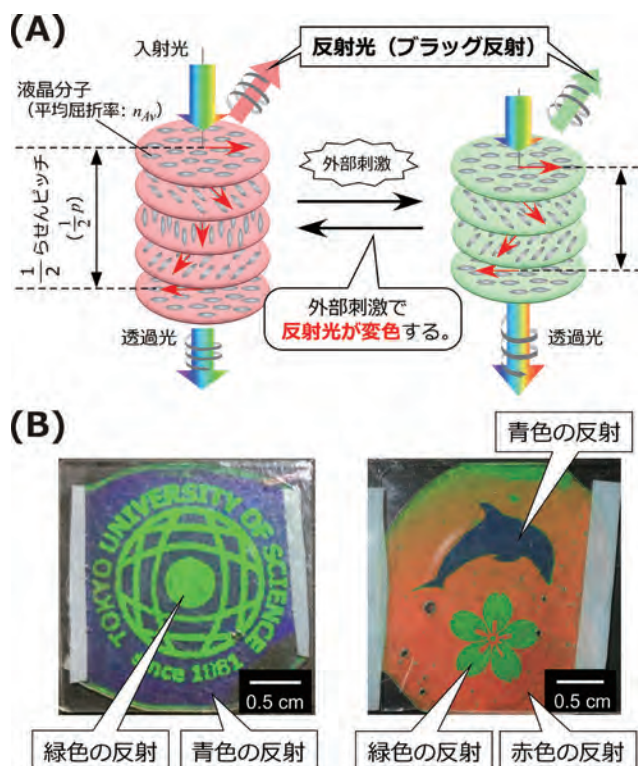


図1 (A) コレステリック液晶の分子らせん構造と光の反射特性に関する模式図
(B) 筆者らが取り組んだセルロース誘導体を用いたフルカラーイメージ材料への応用例。

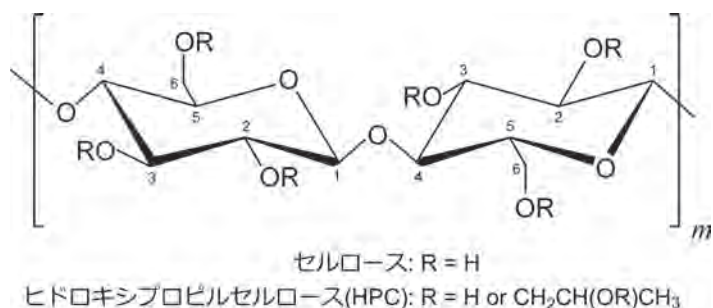


図2 セルロースとヒドロキシプロピルセルロースの化学構造式

ポリマーネットワーク間で働く多数の水素結合により、セルロース主鎖が強固に結びついた結晶領域が存在している結果、機械的に高い強度を持つ「かたい」材料と広く知られている。ここ最近の研究のトレンドとして、鉄鋼よりも1/5の軽さでありながら5倍の機械的強度を持つセルロースナノファイバー（CNF）は構造材料として注目を浴びている⁷⁾。

本研究では、前出のCNFのようなセルロースで「かたい」材料を目指す研究とは対照的に、セルロースの側鎖を適切に化学修飾することでコレステリック液晶由来のブラッグ反射の色を示すだけでなく、ゴム弾性にも富んだ「やわらかい」コレステリック液晶エラストマーの創製を目指した。これまで、セルロース誘導体そのものがコレステリック液晶エラストマーになるという研究は未開拓である。筆者らの研究を進める中で、ある種のセルロース誘導体がコレステリック液晶エラストマーになることを発見したので、その研究成果の一例をここでは紹介したい。

1. 実験方法

1. 1 セルロース誘導体の合成

筆者らは、コレステリック液晶エラストマーの出発原料としてセルロースそのものでなく、ヒドロキシプロピルセルロース（HPC）を使用した（図2）。このHPCとは、セルロースのヒドロキシ基をプロピレンオキシドでエーテル化したセルロース誘導体であり、水に可溶になるだけでなく、高濃度のHPC水溶液において鮮やかな反射色を示すリोटロピック・コレステリック液晶になることが古くから知られている⁸⁾。筆者らは、HPCの側鎖にあるヒドロキシ基を多種多様な官能基で化学修飾すると、温度変化で液晶相が発現するサーモトロピック・コレステリック液晶を自己組織的に形成する特徴に着眼して、系統的な研究を進めてきた。

たとえば、HPCのヒドロキシ基をアルキルカルボン酸塩化物で化学修飾したHPCエステル化物については、既報にしたがって合成した^{4, 9-11)}。HPC誘導体を用いて、ブラッグ反射だけでなくゴム弾性も示すコレステリック液晶エラストマー（以降、「セルロース液晶エラストマー」と呼ぶ）を調製するときには、HPCの側鎖に架橋性官能基を導入した¹²⁾。

1. 2 セルロース誘導体の物性評価

前述のように合成したHPC誘導体は、赤外吸収スペクトルと核磁気共鳴スペクトルから同定した。HPC誘導体の重量平均分子量と分子量分布は、高速ゲル浸透クロマトグラフィーを用いて測定した。

HPC誘導体の反射特性を評価するために、サンプルを2枚のガラス基板の間に挟んだ液晶セルを作製した。白色光源の光を液晶セルに法線方向から照射して、2枚のアクロマティック集光レンズで集光した透過光を小型分光器で透過スペクトルを測定した。さらに、液晶セルの温度を顕微鏡用ホットステージで精密に制御しながら、透過スペクトルの測定も行った。ここでは、5℃の温度変化を行った後、少なくとも30秒間、保持してから、透過スペクトルを測定した。

2. 実験結果と考察

2. 1 セルロース誘導体のコレステリック液晶

HPCの全てのヒドロキシ基をプロピオニル基で完全にエステル化したHPCプロピオニルエステル化物（HPC-Pr）は、室温で反射色を示さずに透明であった。これを2枚のガラス基板の間に挟み込んだ液晶セルを作製し、温度を変化させながら透過スペクトルを測定してみると、90℃まで加熱しても透過スペクトルは350nmから750nmまでの可視光線の波長範囲で光の透過率が80%以上のほぼフラットなスペクトル形状を示した。と

ころが、温度を90℃にすると紫外線の波長領域である390nm付近に特徴的なピークが現れた。これはまさに、コレステリック液晶相の分子らせん構造に由来した光の反射現象、いわゆるブラッグ反射である。この反射ピークの中心波長 (λ_{Ref}) は、コレステリック液晶の平均屈折率 (n_{AV}) と分子らせんピッチ (p) を含む次の式 (1) から、およそ求めることができる¹³⁾。

$$\lambda_{\text{Ref}} = n_{\text{AV}} \cdot p \quad \text{式 (1)}$$

90℃から引き続き昇温していくと、その反射ピークの波長は連続的に長波長側にシフトし、緑色の500nmを経て、130℃では赤色の620nmまで長波長側にシフトした。これは、HPC-Prがサーモトロピック・コレステリック液晶の特性を示した結果、昇温によって分子らせんピッチ〔式 (1) の p 〕が広がり、これに付随して反射ピーク〔式 (1) の λ_{Ref} 〕も長波長側にシフトしたと解釈できる。つまり、反射によるコレステリック液晶の色づき

具合で温度を検知できるのである。

2. セルロース液晶エラストマー膜の特徴

末端に不飽和結合を有する架橋性官能基などでHPCの水酸基を化学修飾した架橋性HPC誘導体は、コレステリック液晶相を示す温度に加熱しながら紫外線を照射すると、ポリマーネットワーク間で架橋することによって、室温で反射色を保持した固定化膜になった (図1B)。筆者らは、ある種の架橋性セルロース誘導体を光架橋すると、反射色のみならずゴム弾性も示す新しいセルロース液晶エラストマー膜になることを発見した¹⁴⁾。

このセルロース液晶エラストマー膜は、興味深い刺激応答性を示す。たとえば、初期状態で赤色の反射、つまり約630nmに反射ピークを示すセルロース液晶エラストマー膜に、透明なプラスチックスプーンで押しつけてみた (図3A・左の写真)。すると、圧縮した部分だけが赤色から青緑色の反射に変化したのである (図3A・右の写真)。この

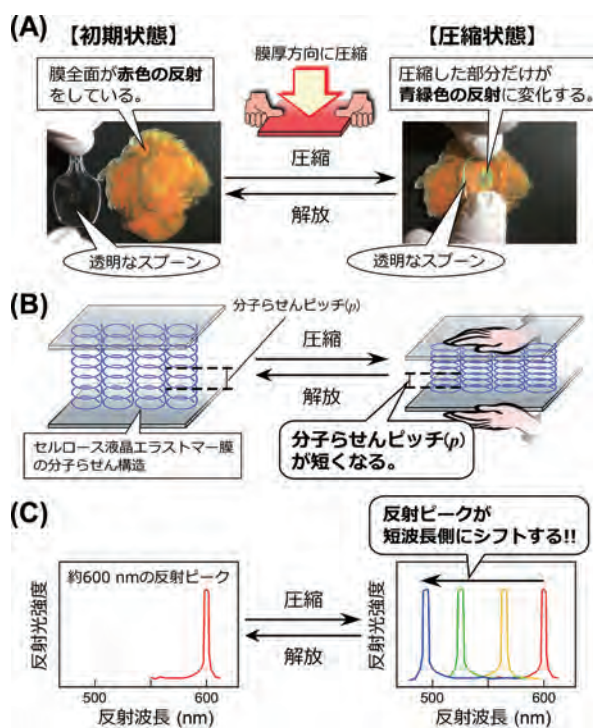


図3 (A)セルロース液晶エラストマー膜を透明なプラスチックスプーンで圧縮した際の反射色の変化。(B,C)セルロース液晶エラストマー膜を圧縮した際の分子らせん構造変化(B)と反射スペクトル変化(C)に関する模式図

とき、反射ピークの波長は約480nmであり、初期状態の約630nmから短波長側にシフトしていた。しかも、押しつけていたプラスチックスプーンを膜表面から取り去ったところ、青緑色の反射は速やかに元の赤色に瞬時に戻った。この圧縮と解放のプロセスを何度も繰り返しても、この反射色の変化が可逆的であることも確認した。

この膜の変色は、機械的な圧縮によりセルロース液晶エラストマー膜の膜厚を縮まったことで、コレステリック液晶の分子らせんピッチ〔式(1)の p 〕が同時に収縮し、その結果、反射ピークの波長〔式(1)の λ_{Ref} 〕も式(1)にしたがって短波長側にシフトしたと推察できる(図3B・3C)。その後、圧縮の力を取り去ると、セルロース液晶エラストマー膜のゴム弾性により元の膜厚に回復し、分子らせんピッチも戻ることで、反射ピークは初期状態の波長に長波長側にシフトするというメカニズムになる。

このように、圧縮のひずみや力に対して反射色の変化は相関があるため、セルロース液晶エラストマー膜が示す反射の変色を見れば、どの程度の圧縮のひずみや力が加わっているか一目瞭然になり、色の変化でひずみや力を定量的に検知できる。しかしながら、これまでのセルロース液晶エラストマー膜は圧縮と解放の繰り返しに耐えられるほど丈夫であるものの、伸ばそうとすると、数%の延伸ひずみ(延伸率)で破断してしまい、膜の延伸方向の柔軟性がなかった。つまり、延伸のひずみや力を変色で可視化し定量することがセルロース液晶エラストマー膜の研究課題として残されていた。

2. 3 延伸可能なセルロース液晶エラストマー膜への展開

一般的に、高分子のみならず金属やセラミックスにおいても、延伸過程における強度は圧縮過程と比較すると大幅に低くなる特性がある。圧縮過

程と延伸過程の応力-ひずみ曲線を比較すると、座屈するひずみまでは同様なプロファイルを示すが、圧縮過程の場合、座屈した後はひずみが増大するとともに圧縮応力の方が大きくなる特性を示す。つまり、ひずみで発生するクラックは、延伸の力が大きいとクラックが発生して容易に破壊してしまうが、圧縮過程ではクラックが発生しにくいので破壊に至らない。高分子の延伸過程では、それぞれのポリマーネットワークが離れるようになるので、分子間力は弱くなりクラックが発生して破壊する。一方で、圧縮過程ではポリマーネットワーク同士が近づくようになるので、クラックが発生しにくいと想像できる。

延伸可能なセルロース液晶エラストマー膜を実現するために、当初、種々の添加剤を検討したが、残念ながら、セルロース液晶エラストマー膜に延伸できるほどの柔軟性を付与することはできなかった。そのため筆者らは、添加剤の検討ではなく、これまでに母材として使用してきた架橋性HPC誘導体そのものの化学構造を改良した結果、鮮やかな反射色だけでなく延伸方向の柔軟性に富んだセルロース液晶エラストマー膜を実現できたのである。

たとえば、赤色の反射を示すコレステリック液晶エラストマー膜をJIS規格の7号形ダンベル状に切り出した後、一軸的に延伸してみると、4%のひずみで橙色、15%のひずみで黄緑色、30%のひずみで緑色に変化した(図4A)。ここで、セルロース液晶エラストマー膜を一軸延伸しながら反射スペクトルを測定してみると、反射ピークが約630nmから約530nmまで連続的に短波長側にシフトしていた。その後、延伸していた力を取り除くと、セルロース液晶エラストマー膜は速やかに元の赤色に戻り、延伸と解放のプロセスにおいても反射色の変化は可逆性を有していることを確認した。

このセルロース液晶エラストマー膜をセンサーとしてデバイス応用するためには、繰り返しの伸縮

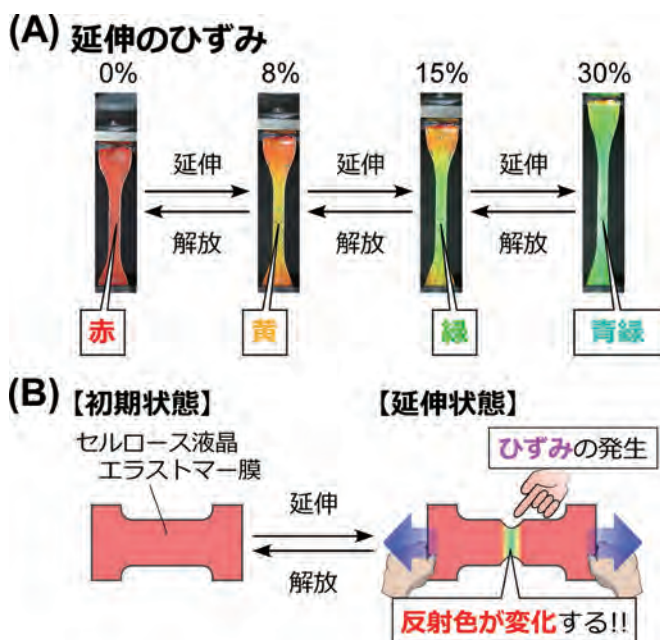


図4 (A)セルロース液晶エラストマー膜を一軸的に延伸した際の反射色の変化。
(B)セルロース液晶エラストマー膜を延伸した際の反射色変化に関する模式図

耐久性が必要になるが、驚くべきことに、このセルロース液晶エラストマー膜は少なくとも100回の延伸と解放のサイクル試験をした後でも破断することなく、延伸によるブラッグ反射の変色特性を維持していた。可逆的に変色するだけでなく、優れた繰り返し伸縮耐性も有するセルロース液晶エラストマー膜は、延伸過程のひずみや力を反射色の変化で検知できる。言い換えると、セルロース液晶エラストマー膜に微小なひずみが発生したら、反射色の変化によって、膜の力学的な状態を可視化することができることになる(図4B)。

最後に、筆者らのセルロース液晶エラストマー膜を使って、ウェアラブルセンサーとしての簡単なデモンストレーションを行ってみた。初期状態で赤い反射色を示すコレステリック液晶エラストマーを手指の第2関節付近の皮膚に貼り付けた後、指の関節を屈曲させると、反射色は赤から緑に変色した。この屈曲状態から、初期の関節を伸ばした状態に戻せば、反射色はすぐに緑から赤に回復した。このように、手指の関節の動きに応じて、

リアルタイムで可逆的に変色することを実証できた。この関節の屈曲による変色は、スポーツ障害の予防や高齢者のリハビリテーションなどへの応用が期待できる。

このようなウェアラブルセンサーだけでなく、社会インフラにおける老朽化検知のセンサーとしても応用の可能性を秘めている。橋梁やトンネルなどの社会インフラの多くは、高度型成長期に整備されたもので、現在、耐久年数を過ぎており、経年的な劣化や突然の地震によって、これら社会インフラがいつ崩壊してもおかしくない。このような構造物の外壁に、筆者らのセルロース液晶エラストマー膜を貼り付けておけば、微小なひずみが増えるだけで反射色が変わるため、経年劣化によるひずみや荷重の増加を誰でも速やかに見つけることができる。さらに、対象物にセルロース液晶エラストマー膜をかぶせて押しつけると、わずか数十 μm の凹凸によって変色することから、構造物表面の微小なクラックを迅速に検知できるようになる。

3. 結 論

筆者らが開発したセルロース液晶エラストマーは、電力を使わずに対象物に貼り付けるだけで、その反射色の変化を通じて圧縮や延伸のひずみや力を定量的に可視化できる。さらに、柔軟性に富んだシート状態なので、ひずみや力の大きさに加えて、それらの二次元的な分布や範囲を可視化できるようになる。この特徴を応用すれば、物体表面の凹凸やねじりの強さなども変色で検知できる。このセルロース液晶エラストマー膜だけでなく、派生的な研究成果として、バイオマスのセルロースを活用して、破断しても加熱によって修復できるリサイクル可能な自己修復材料の創製にも成功している^{15~17)}。これらセルロースの自己修復材料に、コレステリック液晶の機能を組み込むことができれば、サステナブルな材料開発において新たな研究展開が期待できる。

ものづくりは昨今、地球と共存共栄できるカーボンニュートラル、サステナビリティ、サーキュラーエコノミーが求められている。筆者らが開発したセルロースを利用したコレステリック液晶エラストマーは安全で環境低負荷であるため、国連総会が掲げた持続可能な開発目標（SDGs）における第12番目の開発目標「つくる責任 つかう責任」に貢献できる。このようなセルロース由来のコレステリック液晶エラストマーは、次世代のサステナブルなセンシングデバイスとして応用できる高いポテンシャルを有している。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました公益財団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本稿で紹介した研究成果は、古海研究室メンバーの皆さんの日々の努力によるものであり、心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) Marfella R. et al., Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events, *N. Engl. J. Med.*, **390**, 900 (2024)
- 2) Nashawi I. S., Malallah A., Al-Bish M., Forecasting World Crude Oil Production Using Multicyclic Hubbert Mode, *Energy Fuels*, **24**, 1788 (2010)
- 3) エネルギー白書 2019 (経済産業省 資源エネルギー庁), 第2部 第2章 第2節
- 4) Ishizaki T., Uenuma S., Furumi S., Thermotropic Properties of Cholesteric Liquid Crystal from Hydroxypropyl Cellulose Mixed Esters, *Kobunshi Ronbunshu*, **72**, 737 (2015)
- 5) 古海誓一, 鈴木花菜, 府川将司, ゴム弾性を有するセルロース誘導体の新しい圧力センシング, 日本ゴム協会誌, **91**, 49 (2018)
- 6) 府川将司, 古海誓一, 架橋性セルロース誘導体によるフルカラーイメージングと圧力センシング, 液晶, **22**, 214 (2018)
- 7) Saito T., Kimura S., Nishiyama Y., Isogai A., Cellulose Nanofibers Prepared by TEMPO-Mediated Oxidation of Native Cellulose, *Biomacromolecules*, **8**, 2485 (2007)
- 8) Werbowyj R. S., Gray D. G., Liquid Crystalline Structure in Aqueous Hydroxypropyl Cellulose Solutions, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **34**, 97 (1976)
- 9) Matsumoto K., Ogiwara Y., Iwata N., Furumi S., Rheological Properties of Cholesteric Liquid Crystal with Visible Reflection from an Etherified Hydroxypropyl Cellulose Derivative, *Polymers*, **14**, 2059 (2022)
- 10) Ogiwara Y., Suzuki T., Iwata N., Furumi S., Room-Temperature Cholesteric Liquid Crystals of Cellulose Derivatives with Visible Reflection, *Polymers*, **15**, 168 (2023)
- 11) Ogiwara Y., Iwata N., Furumi S., Dominant Factors Affecting Rheological Properties of Cellulose Derivatives Forming Thermotropic Cholesteric Liquid Crystals with Visible Reflection, *Int. J. Mol. Sci.*, **24**, 4269 (2023)
- 12) 早田健一郎, 岩田直人, 古海誓一, 力やひずみを可視化するセルロース液晶ゴム, 高分子, **70**, 430 (2021)
- 13) De Vries, H., Rotatory Power and Other Optical Properties of Certain Liquid Crystals, *Acta. Cryst.*, **4**, 219 (1951)

- 14) 古海誓一, 鈴木花菜, 石崎拓郎, 液晶材料, 液晶フィルム及びその製造方法, センサー, 並びに, 光学素子, 特許第6782485号
- 15) 古海誓一, 馬場蓉, 岩田直人, 自己修復性高分子, 自己修復性材料, 及び液晶膜, 特願2022-185974
- 16) 古海誓一, 金田隆希, 岩田直人, 自己修復性高分子を製造するための組成物, 自己修復性高分子及び自己修復性材料, 特願2022-185974
- 17) 古海誓一, 馬場蓉, 岩田直人, チオール化合物, 架橋剤, 硬化性組成物及び硬化物, 特願 2023-044719

オープンウォータースイマーの皮膚温度感覚特性と ウェットスーツ普及のための基礎的研究

新潟医療福祉大学 藤 本 知 臣
(共同研究者) 日 本 大 学 原 怜 来
新潟医療福祉大学 馬 場 康 博
同 松 浦 由生子

Characteristics of Skin Thermal Sensitivity in Open-Water Swimmers -Basic Research for Wetsuit Promotion-

by

Tomomi Fujimoto,
Yasuhiro Baba, Yuiko Matsuura
*Department of Health and Sports,
Faculty of Health Sciences,
Niigata University of Health and Welfare*
Reira Hara
College of Sports Sciences, Nihon University

ABSTRACT

In open water swimming (OWS) in cold water (water temperature:16-18℃), swimmers are allowed to wear a wetsuit. Given that wetsuits retain heat, the wearing a wetsuit during OWS in cold water is considered to have a significant effect on the swimmer's body core temperature and thermal sensation. However, it is unclear how wearing a wetsuit affects body core temperature during OWS in cold water. Therefore, in the present study, we examined (1) the local skin thermal sensitivity of OWS swimmers, and (2) the effect wetsuit on body core temperature during OWS in cold

water. In experiment 1, local skin warm and cool sensitivities were measured in 8 OWS swimmers (OWS group) and 15 healthy adults (Control group). Although local skin warm sensitivity did not differ between groups, the OWS group tended to be less cold-sensitive than the Control group ($P = 0.075$). In experiment 2, four OWS swimmers performed two 2-hour OWS trials in cold water (water temperature: 15-16°C) with (wetsuit trial) and without wetsuits (swimsuit trial). Body core temperature was measured during OWS by ingestible thermometer. Body core temperature during OWS was higher in wetsuit trial than swimsuit trial ($P = 0.046$). These results suggest that OWS swimmers tend to be more tolerant of cold than non-swimmers. In addition, wearing a wetsuit can prevent decrease in body core temperature during OWS in cold water.

キーワード

マラソンスイミング, 耐寒性, 深部体温, 温度感覚, スポーツセーフティ

Keyword

Marathon swimming, Cold tolerance, Core temperature, Thermal sensation, Sports safety

要 旨

ウェットスーツの着用が低水温下（水温 16-18°C）でのオープンウォータースイミング（OWS）中の体温にどのような影響を及ぼすかは明らかではない。本研究では、①OWS スイマーの皮膚温度感覚特性および②ウェットスーツ着用がOWS 競技中の深部体温に及ぼす影響を検討した。実験①では、OWS 選手8名（OWS 群）および健常成人15名（Control 群）において皮膚温度感覚を測定し、OWS 群でControl 群よりも冷感受性が鈍い傾向にあった（ $P = 0.075$ ）。実験②では、OWS 選手4名において低水温下（水温 15-16°C）におけるOWS 中の深部体温をウェットスーツの着用の有無で比較し、OWS 中の深部体温はウェットスーツ着用時に高かった（ $P = 0.046$ ）。これらの結果から、OWS 選手は寒冷に強い傾向があり、ウェットスーツの着用により低水温下でのOWS 中の深部体温低下を防ぐことができることが示唆

された。

諸 言

オープンウォータースイミング（OWS）は、海や川で5-25kmといった長距離を最大5時間程度泳ぐ水泳競技であり、2008年北京オリンピックから正式種目として採用されて以来、その人気と競技人口は世界中で増加している。その一方で、OWSのレースが行われる水温の範囲は16-31°Cと非常に幅広く、体温の変化による様々な弊害も生じる。特に低水温環境下では、深部体温の低下を防ぐためのふるえなどによって運動中に過度に代謝が増加し、持久性の運動パフォーマンスが低下する¹⁾。また、過度に体温が低下する場合には低体温症を発症し、レース中の事故やリタイアにつながる事が報告されている²⁻⁴⁾。そのため、OWSレース時の安全性の向上だけでなく、レースにおいて高い運動パフォーマンスを発揮する上でも、過酷なレース中の体温を適切に管理・維持

する衣服戦略が非常に重要である。

低水温環境下（水温16-18℃）でのOWS競技時には、保温用スーツであるウェットスーツの着用が国際水泳連盟により許可されている。プール（水温29℃）でのOWSを模した泳運動時には、ウェットスーツを着用することで通常水着着用時より体温が上昇することが報告されているが⁵⁾、これまでウェットスーツの着用が低水温環境下（水温18℃以下）での泳運動時の体温に及ぼす影響は十分に明らかになっていない。また、ウェットスーツを着用することで推進効率が向上することが報告されているにも関わらず⁶⁻⁸⁾、ウェットスーツ着用による不快感の増加のために着用を避ける選手が多くいる⁹⁾。そのため、OWS競技におけるウェットスーツ普及のためには、OWS選手の感覚特性に合わせたウェットスーツの開発が求められる。OWS選手の感覚特性、とりわけ温度感覚特性を明らかにし、ウェットスーツの快適性を向上させることが求められるが、OWS選手の皮膚温度感覚特性についてはこれまで明らかではない。

そこで本研究では、OWS競技におけるウェットスーツ普及のための基礎的研究として、①OWSスイマーの皮膚温度感覚特性を明らかにし、②ウェットスーツ着用が低水温環境下でのOWS中の深部体温に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。本研究では、OWS選手は日ごろから海やプールといった熱伝導率が高い水中において低温ストレスに曝されていることから、一般健常成人よりも皮膚の冷感受性（冷たさに対する敏感さ）が鈍くなる、また、低水温環境下でのOWS時においてウェットスーツを着用することで体温の低下を防ぐことができると仮説を立てた。

1. 研究方法

1. 1 研究①

1. 1. 1 研究対象者

研究対象者は、OWS選手8名（OWS群、23 ± 3歳）および一般健常成人15名（Control群、21 ± 1歳）とした。OWS選手は日本水泳連盟OWSナショナルチームに所属する選手を対象とし、一般健常成人は新潟医療福祉大学に所属する学生から機縁法を用いて募集した。いずれの研究対象者も喫煙歴、心血管疾患および皮膚感覚障害はなかった。全ての研究対象者に対して、研究内容に関する説明を行い、研究への参加に同意を得た後に実験を実施した。本研究は新潟医療福祉大学研究倫理委員会の承認を得て行われた（課題番号:1884-220525）。

1. 1. 2 実験プロトコル

研究対象者には、実験当日の激しい運動と測定前2時間の水以外の飲食を控えるように指示した。研究対象者は空調で気温を管理した実験室（約25℃）に来室後、30分間の安静座位を維持した。その後、局所皮膚温冷感受性をそれぞれ3回ずつ測定した。

局所皮膚温冷感受性は、25 × 25mm (6.25cm²) のペルチェ素子でできた測定プローブ、温度センサーおよび熱流速センサーで構成された局所皮膚温冷覚閾値測定器（Intercross-210, Intercross, Japan）を用いて測定した^{10, 11)}。測定時には、測定プローブを前腕部の測定箇所（肘）に押し当て、皮膚温と同様の温度〔初期皮膚温: Initial skin temperature (Tsk)〕に設定し、熱流速が30W/m²以下になることを確認して測定を開始した。測定開始後、温覚閾値測定時には0.1℃/s、冷覚閾値測定時には-0.1℃/sで温度を徐々に上昇もしくは低下させ、研究対象者が測定箇所において「温かさ」もしくは「冷たさ」を感じた時点でボタンを押すことで感知皮膚温（Noticeable Tsk）を測定し

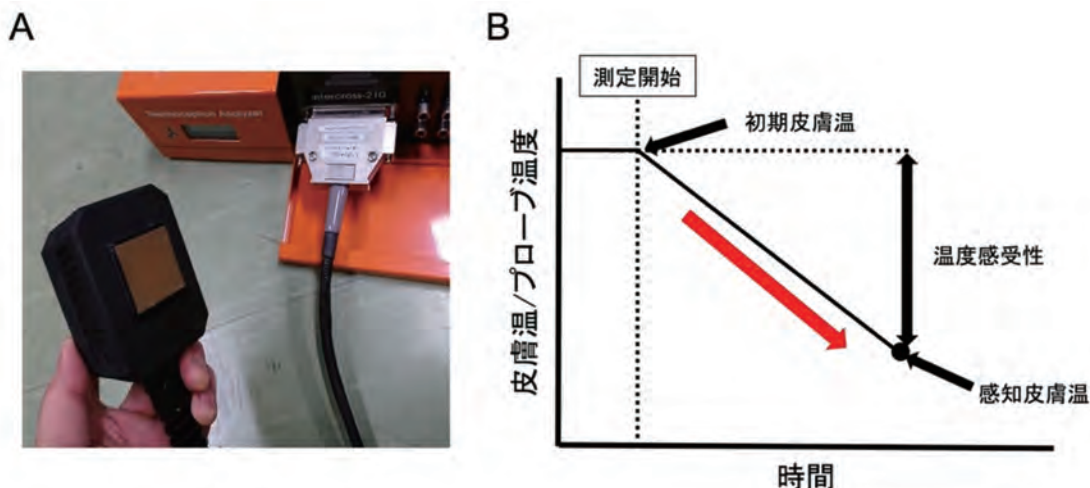


図1 皮膚温冷覚閾値測定器(A)および局所皮膚温冷感受性の測定原理(B)

た(図1)。また、Initial TskおよびNoticeable Tskの差分(温かさもしくは冷たさを感じるまでに要した温度変化量)を局所皮膚温冷感受性として評価した。本研究では、温かさもしくは冷たさを感じるのに要した温度変化量が小さい場合に敏感、大きい場合に鈍感であると評価した。局所皮膚温冷感受性はそれぞれ3回ずつ行い、値の近い2つの値の平均値を解析に用いた。

1. 1. 3 統計解析

全てのデータは平均値および95%信頼区間で示した。局所皮膚温冷感受性のデータは、Shapiro-Wilk検定を用いて正規性を確認し、正規性が得られなかったため、Mann-Whitneyのノンパラメトリック検定を用いて分析した。有意水準は5%未満とした。作図および統計解析にはGraphPad Prism 10 (version 10.2.3)を用いた。

1. 2 研究②

1. 2. 1 研究対象者

研究対象者は、日本水泳連盟OWSナショナルチームに所属するOWS選手6名(22±3歳)とした。いずれの研究対象者も喫煙歴、心血管疾患および皮膚感覚障害はなかった。全ての研究対象者に対して、研究内容に関する説明を行い、研究へ

の参加に同意を得た後に実験を実施した。本研究は新潟医療福祉大学研究倫理委員会の承認を得て行われた(課題番号: 1884-220525)。

1. 2. 2 実験プロトコル

研究対象者は水温15-16℃の湖において、約2時間のOWSを競泳水着もしくはウェットスーツを着用した2条件で行った。2条件は別日に行うものとし、本研究では競泳水着着用条件を初日に行った。

実験当日、研究対象者には激しい運動と測定前2時間の水以外の飲食を控えるように指示した。また、研究対象者は実験の3時間前に経口摂取可能なピル型温度計(e-Celsius, BodyCap, France)を水と共に摂取した。研究対象者は実験1時間前に湖に移動し、各自ウォーミングアップおよび水着の着用を行った。いずれの条件も同時刻(およそ午前10時)にスタートし、湖を周回するOWSを行った。給水は各自で自由に行うものとし、約2時間のOWS中の深部体温を2分毎に計測した。

1. 2. 3 統計解析

全てのデータは平均値および95%信頼区間で示した。また、本研究では2名の研究対象者において試技開始前にピル型体温計を排出してしまったため、4名の研究対象者のデータを分析した。

深部体温のデータは、Shapiro-Wilk検定を用いて正規性を確認した。本研究では、深部体温の低下および強い疲労感により試技を終了した研究対象者がいたため、試技開始直前から102分目（1時間42分目）までのデータで2要因（条件および時間）の分散分析を行った。有意水準は5%未満とした。作図および統計解析にはGraphPad Prism 10 (version 10.2.3) を用いた。

2. 研究結果

2. 1 研究①

図2に局所皮膚温度感受性の結果を示す。温

かさを感じるまでに要した温度変化量はOWS群およびControl群で差は見られず ($P > 0.05$, 図2A), 局所皮膚温感受性に差は見られなかった。一方、冷たさを感じるまでに要した温度変化量はOWS群でControl群よりも大きい傾向があり ($P = 0.0755$, 図2B), 局所皮膚冷感受性はOWS群でControl群よりも鈍感な傾向が見られた。

2. 2 研究②

図3にOWS試技開始直前から終了時までの深部体温を示す。深部体温は給水によって一時的に低下する傾向が見られた。また、競泳水着条件

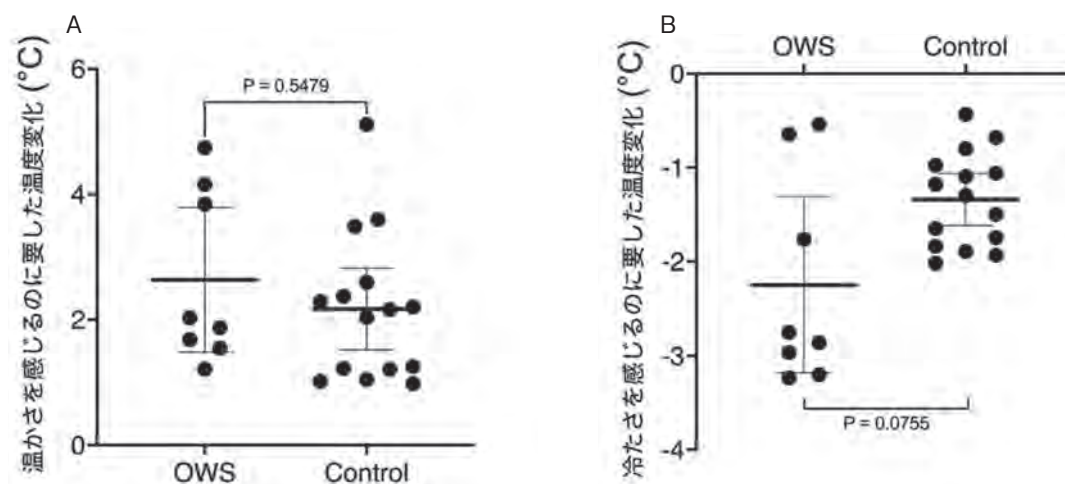


図2 OWS群およびControl群における局所皮膚温感受性(A)および冷感受性(B)

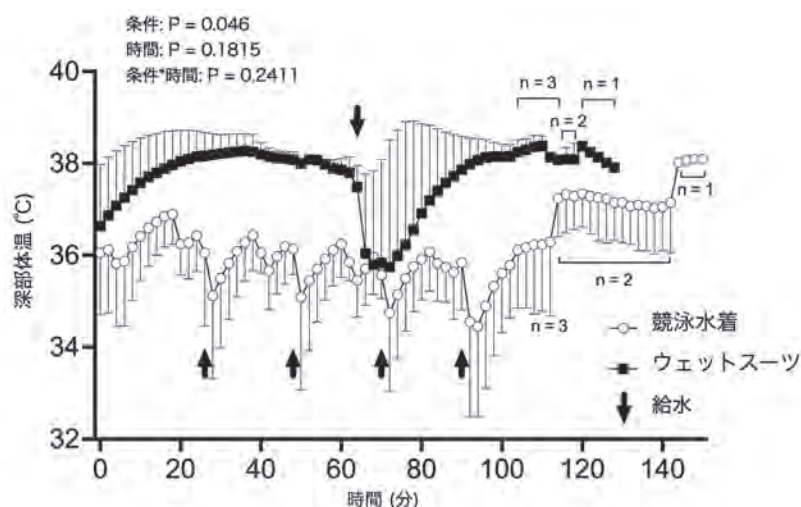


図3 低水温環境下におけるOWS中の深部体温動態

では一部の研究対象者で低体温症の基準となる35℃を下回っていた。また、深部体温には条件間の主効果が見られ ($P = 0.046$)、OWS中の深部体温はウェットスーツ条件で競泳水着条件よりも高値を示した。一方、時間の主効果および条件と時間の相互作用は見られなかった。

3. 考 察

本研究では、エリートOWS選手を対象として、OWS選手の皮膚温度感覚特性と低水温環境下におけるOWS時のウェットスーツ着用が深部体温に及ぼす影響を検討した。その結果、OWS選手は一般健常成人と比較して皮膚の冷感受性が鈍い傾向が見られた。また、低水温環境下でのOWS中のウェットスーツの着用により、競泳水着着用時よりも体温が高値を示した。これらの結果から、OWS選手は寒冷耐性が高いという特性を持つこと、さらに、低水温環境下におけるOWS中のウェットスーツの着用は高体温の維持に効果的であることが示唆された。

低水温環境下におけるOWS中には、体温の低下によって持久性パフォーマンスが低下するだけでなく¹⁾、レースのリタイアが多く発生する。Drigny et al.¹²⁾ は、25kmのOWSレース中にリタイアした選手は、深部体温が低体温症レベル (35℃未満) まで低下していないにもかかわらず、強い寒さ感覚が生じていたことを示している。また、Fujimoto et al.¹⁰⁾ は水温22℃の環境下における10kmのOWS中に深部体温は低下しないものの、皮膚冷感受性が高い選手はOWS後に寒さを感じやすいことを報告している。このことから、OWSの安全性を考える上で、深部体温だけでなく皮膚の温度感覚が重要であると言える。そこで、本研究ではOWS選手の皮膚温度感覚特性について検討したところ、OWS選手は一般健常成人よりも皮膚冷感受性が鈍く、高い耐寒性を持つ可能性が示された。これには2つのメカニズムが

関連していると考えられる。1つ目のメカニズムとして、OWS選手の高い有酸素能力が挙げられる。Maeda et al.¹³⁾ は基礎代謝が高い個人は寒冷暴露時に高い耐寒性を有することを示している。本研究では、OWS群およびControl群の有酸素能力に関する測定は行なっていないが、OWSは水泳競技の中でも最も競技時間が長く、持久力を要する競技であることから、OWS選手は高い有酸素能力を有していたと考えられる。そのため、皮膚への冷刺激に対して耐性が高かったのかもしれない。

2つ目のメカニズムとして、OWS選手における寒冷順化が考えられる。Tipton et al.¹⁴⁾ は、5回程度の冷水への浸水によって皮膚温および深部体温の低下を繰り返し経験することで、冷水浸水時の過換気反応やふるえを減弱させ、浸水時間を延長させることを報告している。本研究では、各選手のトレーニング環境の調査までは行っていないが、日頃からプールや屋外水中環境下でのトレーニングを繰り返し行なっているOWS選手は一般健常成人よりも寒冷環境に多く曝されていたと考えられる。それにより、OWS選手では寒冷順化が生じ、皮膚の冷感受性が鈍化していたのかもしれない。今後は、OWS選手の競技レベルや男女差、日頃のトレーニング環境などが皮膚冷感受性に及ぼす影響などを検討し、耐寒性の程度が皮膚冷感受性から評価できるようになれば、低水温環境下で行われるOWS時のスクリーニング手法の開発に繋がり、OWSの安全性向上に寄与できると考えられる。

OWS選手は高い耐寒性を有しているにも関わらず、ウェットスーツの着用が義務付けられている水温16-18℃の低水温環境下では深部体温が低下し、低体温症を生じる可能性がある¹⁵⁾。本研究では、競泳水着条件では4名中2名の選手が寒さによりOWSを中断した。この2名の選手は、低体温症のレベルまで深部体温が低下していな

かったものの、一時的に深部体温が35℃台まで下がっていた。一方、ウェットスーツ着用条件では、上述した2名の選手を含めた4名の選手全員が深部体温38℃付近を推移していた。このことから、ウェットスーツの着用は深部体温低下および低体温症予防として有用であると考えられる。これまで、低水温環境下でのウェットスーツ着用が深部体温に及ぼす影響については明らかになっておらず、特に日本人選手はウェットスーツに慣れていないことでウェットスーツを避ける傾向にあった。ウェットスーツの着用は深部体温の維持だけでなく、推進効率の改善などにもつながることから、日頃から行うプールでのトレーニングにおいても着用してウェットスーツに慣れることで、低水温環境下でのOWS時に最大限の効果を得られると考えられる^{5,9)}。

本研究の限界として、局所皮膚温冷感受性の評価を前腕のみで行ったことが挙げられる。局所温度感受性には部位差があることも報告されていることから¹⁶⁾、今後の研究では複数の部位において局所温度感受性を測定し、本研究において得られた前腕部の結果と比較することで、OWS選手の局所温度感受性が全身で同様に生じているのかを明らかにできると考える。

4. 結 論

本研究の結果から、OWS選手は皮膚冷感受性が鈍化し高い耐寒性を有すること、低水温環境下で行われるOWSにおけるウェットスーツの着用が体温の維持に貢献し、OWSの安全性とパフォーマンスを高める可能性が示唆された。本研究はウェットスーツ普及のための基礎的研究であることから、今後更なる研究を行う必要がある。

謝 辞

本研究の実施に当たり、研究デザインの考案やデータ収集を始め、多くの建設的な意見をいただ

いた共同研究者の原 怜来氏、馬場 康博氏、松浦 由生子氏、さらに、研究に参加していただき、現場の貴重な意見をくださったOWSナショナルチームの選手とコーチの皆様に感謝の意を表す。また、本研究の遂行にあたり助成金によって支援してくださった公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団（第46回課題学術研究）に深く御礼を申し上げる。

文 献

- 1) Fujimoto T., Sasaki Y., Wakabayashi H., Sengoku Y., Tsubakimoto S., Nishiyasu T., Maximal workload but not peak oxygen uptake is decreased during immersed incremental exercise at cooler temperatures., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **116**(9): 1819-1827(2016)
- 2) Asplund C.A., Creswell L.L., Hypothesised mechanisms of swimming-related death: a systematic review., *Br. J. Sports Med.*, **50**(22): 1360-1366(2016)
- 3) Chamberlain M., Marshall A.N., Keeler S., Open water swimming: Medical and water quality considerations: Medical and water quality considerations., *Curr. Sports Med. Rep.*, **18**(4): 121-128(2019)
- 4) Murphy M., Polston K., Carroll M., Alm J., Heat injury in open-water swimming: A narrative review., *Curr. Sports Med. Rep.*, **20**(4): 193-198(2021)
- 5) Fujimoto T., Matsuura Y., Baba Y., Hara R., Effect of wetsuit use on body temperature and swimming performance during training in the pool: Recommendations for open-water swimming training with wetsuits., *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, **19**(4): 407-411(2024)
- 6) Gay A., Zacca R., Abalades J.A., et al., Swimming with swimsuit and wetsuit at typical vs. Cold-water temperatures(26 vs. 18°C) ., *Int. J. Sports Med.*, **42**(14): 1305-1312(2021)
- 7) Chatard J.C., Senegas X., Selles M., Dreanot P., Geysant A., Wet suit effect: a comparison between competitive swimmers and triathletes., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **27**(4): 580-586(1995)
- 8) Tomikawa M., Nomura T., Relationships between swim performance, maximal oxygen uptake and

- peak power output when wearing a wetsuit., *J. Sci. Med. Sport.*, **12**(2) : 317-322(2009)
- 9) Quagliarotti C., Cortesi M., Gatta G., et al., Wetsuit use during open water swimming. Does it “suit” everybody? A narrative review., *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, **16**(9) : 1217-1224(2021)
- 10) Fujimoto T., Matsuura Y., Baba Y., Hara R., Thermal sensation after the 10-km open-water swimming in cool water depends on the skin’s thermal sensitivity rather than core temperature., *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, **19**(1) : 28-33(2024)
- 11) Fujimoto T., Fujii N., Dobashi K., et al., Effects of low-intensity exercise on local skin and whole-body thermal sensation in hypothermic young males., *Physiol. Behav.*, **240**(113531) : 113531(2021)
- 12) Drigny J., Rolland M., Pla R., et al., Risk factors and predictors of hypothermia and dropouts during open-water swimming competitions., *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, **16**(11) : 1692-1699(2021)
- 13) Maeda T., Fukushima T., Ishibashi K., Higuchi S., Involvement of basal metabolic rate in determination of type of cold tolerance., *J. Physiol. Anthropol.*, **26**(3) : 415-418(2007)
- 14) Tipton M.J., Wakabayashi H., Barwood M.J., Eglon C.M., Mekjavic I.B., Taylor NAS., Habituation of the metabolic and ventilatory responses to cold-water immersion in humans., *J. Therm. Biol.*, **38**(1) : 24-31(2013)
- 15) Castro RRT., Mendes FSNS., Nobrega ACL., Risk of hypothermia in a new Olympic event: the 10-km marathon swim., *Clinics(Sao Paulo)*, **64**(4) : 351-356(2009)
- 16) Inoue Y., Gerrett N., Ichinose-Kuwahara T., et al., Sex differences in age-related changes on peripheral warm and cold innocuous thermal sensitivity., *Physiol. Behav.*, **164**(Pt A) : 86-92(2016)

衣服内および衣服外の温湿度を局所的に評価する 安価で簡便な新手法の開発

新潟大学 天野達郎
(共同研究者) 同 加藤はなの
同 岡本優美
同 大塚純都

Development of A Novel Method to Assess The Intra- and Extra-Clothing Microenvironments

by

Tatsuro Amano, Hanano Kato,
Yumi Okamoto, Junto Otsuka
*Laboratory for Exercise and Environmental Physiology,
Faculty of Education, Niigata University*

ABSTRACT

Developing a device that can easily evaluate the intra-clothing microenvironment is important for developing new garments to prevent heat-related illness in summer periods. We evaluated the effectiveness of an originally developed fixture assessing the intra-clothing microenvironments during outdoor exercise on summer days. Eleven long- and middle-distance runners participated in a two-day summer experiment on the same schedule. The originally developed fixture was attached to participants on their chest and back skin sites using collodion to measure the temperature and humidity inside their clothing. The experiment consisted of two bouts of 30-minute moderate-intensity running, with the first bout wearing a conventional polyester fabric T-shirt (CON) on both experimental days. The second bout was conducted by wearing a

commercially available T-shirt with high breathability (Dry Aero Flow, DAF) or CON. We showed that the intra-clothing temperature and relative humidity were successfully measured using the developed fixture in all participants. We also found that although there was no difference in intra-clothing temperature and relative humidity between conditions during the first bout of exercise, the DAF attenuated intra-clothing humidity than the CON in the second bout. These results suggest that the fixture developed in the present study is effective to assess the intra-clothing environment during outdoor exercise in summer periods.

キーワード

体温調節, 機能性衣服, 衣服内環境, 発汗, iButton

Keyword

thermoregulation, functional clothing, intra-clothing environment, sweating, iButton

要 旨

衣服内環境を簡便かつ安価に評価するデバイスの開発は、熱中症予防等を目指した新たな衣服開発にとって重要である。本研究では、我々が開発した衣服内環境を評価する固定具の有効性を、屋外での運動時の測定から明らかにする。陸上競技部に所属する長距離選手11名が、全員同じ日程で夏季2日間の実験に参加した。研究参加者は開発した固定具をコロジオンで胸部と背部に貼り付け、衣服内温湿度を測定した。研究参加者は屋外で30分間の中強度ランニングを2セット実施し、1セット目は2日間とも一般的なポリエステル生地 of Tシャツを着用した (CON)。2セット目は通気性の高い比較的新しい市販Tシャツ (Dry Aero Flow, DAF) あるいはCONを着用した。その結果、研究参加者全員において衣服内環境を測定することができた。1セット目の衣服内温湿度は条件間で差がなかったものの、2セット目の衣服内湿度はDAFがCONより低値を示した (全て $P \leq 0.048$, 衣服の主効果)。これらの結果は、本研究で開発した固定具は屋外における衣服内環境の測定に有

用であることを示している。

緒 言

近年地球の気温上昇が急速に進み、地球温暖化時代が終わり地球沸騰化時代に突入したと言われるようになった。しかし、夏季オリンピックや世界陸上、あるいは学校の部活動といったスポーツイベントは夏の暑熱環境下で行われることが多い。暑熱環境下で運動を行うとアスリートの過度な体温上昇を誘発し、身体パフォーマンスの低下や熱中症のリスクを高める。特に衣服を着用すると発汗による熱放散が阻害されることから、熱放散効果の高い衣服を開発することが求められている。

これまで多くの研究によって衣服が運動時の衣服内環境や体温調節に及ぼす影響が検討されてきた^{1,2)}。熱中症予防や夏のスポーツパフォーマンス向上に向けて今後もより効果の高い衣服を開発することが期待される。衣服の機能性を評価する上で重要な測定項目に衣服内の温度や湿度の変化 (衣服内環境) がある。実験的に衣服の評価を行う場合、人工気象室などで運動実験が行われるこ

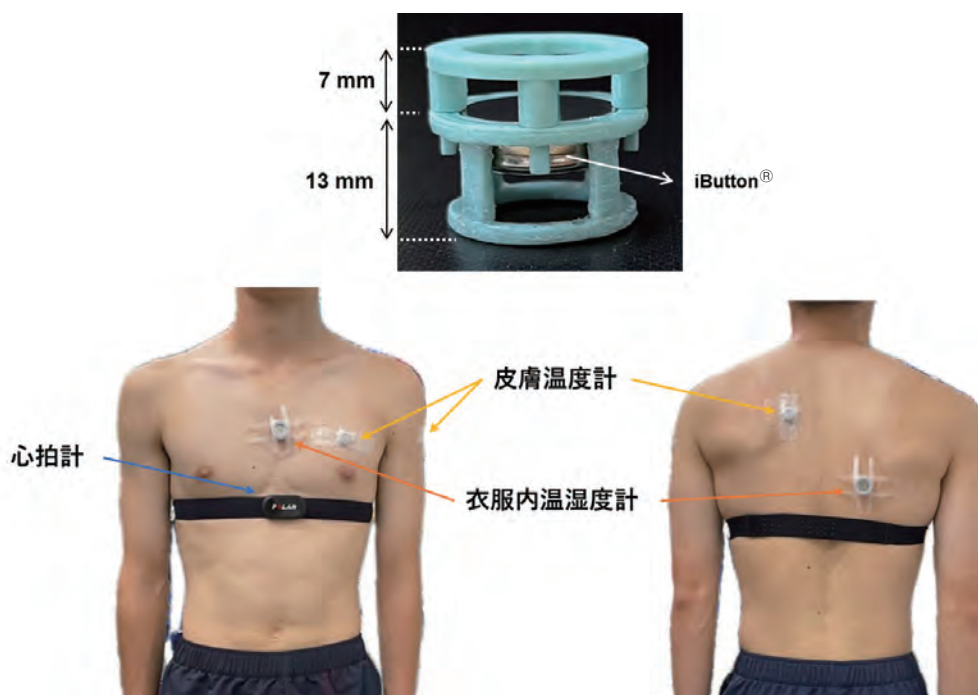


図1 The newly developed fixture to assess intra-clothing environments (upper) and their attachments to the skin (lower)

とが多いものの，人工環境は必ずしもその運動が行われる屋外フィールドの環境を模擬できているとは限らない．そのため屋外でも衣服評価を実施することが重要となるものの，有線センサーなどの身体の拘束を伴わずに，衣服内環境を評価する適切な方法の検討は十分ではない．

近年温湿度をワイヤレスで測定できる小型のデバイスが多く開発されており，環境生理学分野においても導入が進められている³⁾．我々はその一つである iButton[®] を使って衣服内環境を測定できる無拘束の固定具を3Dプリンターで製作した(図1上)．しかし，この固定具を用いて屋外で運動時に衣服内環境を測定できるのかどうかは明らかではない．そこで本研究では，我々が開発した新たな固定具を用いて，夏の屋外で運動時に衣服内環境を測定できるかどうかを明らかにする．生地を通気性が大きく異なる2種類の衣服を着用した時の応答を比較することで，衣服内環境を評価できているかどうかの指標とした．

1. 研究方法

1. 1 研究倫理

研究参加者には事前に目的，方法および生じうる危険を説明し，書面にて研究参加の同意を得た．本研究は新潟大学研究倫理審査委員会の承認を得て実施した(2021-0195)．

1. 2 研究参加者

研究参加者は新潟大学陸上競技部に所属する中・長距離ランナー 11名であった(年齢：20 ± 1 歳，身長：1.69 ± 0.5m，体重：56.3 ± 6.0kg)．実験は2023年9月4日および11日の9時から行った．研究参加者は全員同じ日程で実験に参加した．

1. 3 試験衣服

試験衣服はコントロール条件として一般的なポリエステル素材のTシャツ(CON)を，高通気性素材として疎水・撥水素材が配合された市販T

シャツ（ミズノ社製；Dry Aero Flow, DAF）を用いた。衣服が湿潤した状態で、DAFはCONより通気性がおよそ500倍高くなる⁴⁾。

1. 4 実験手順

本研究は衣服条件を変えて異なる日程で2日間実施した。日程の違いによる環境の違いを考慮するため、全て同じスケジュールで実施している。研究参加者は本実験を行う前日の就寝前および実験室来訪2時間前に水を500ml飲水した。また、実験前日および当日は激しい運動、アルコールおよびカフェインの摂取を控え、当日の実験室来訪2時間前までに食事を済ませるよう指示した。

研究参加者は実験前日に実験室に来訪し、経口投与するピル型体温計および試験用のランニングパンツを受け取り、身長測定を行った。実験当日の朝、実験開始4時間前にピル型体温計を経口投与した。試験用ランニングパンツを着用した状態で実験室に来てもらい、採尿（尿比重測定）を行い、続いて心拍計、局所皮膚温センサーおよび衣服内温湿度計を各身体部位に取り付けた。その後、グラウンドに移動し、体重測定を行った。衣服内環境の測定に用いた固定具の概要とその貼付け位置を図1に示した。

グラウンドのテント内で5分間座位姿勢を保持してベースライン（BL）を測定した後、心拍数120～130拍/分を目安とした強度で30分間の自由走を行った（EX1）。EX1では、両実験日ともに研究参加者は全てCON条件の衣服を着用した。EX1終了後25分間の休息を挟み、EX1と同じ運動を繰り返した（EX2）。25分間の休息中に感覚評価と体重測定を行った後、研究参加者の半数が再度新しいCONを着用し、残る半数がDAFを着用した。その後、EX2開始5分前までに500mlのスポーツ飲料（大塚製薬株式会社：ポカリスエット）を飲水した。EX2終了後には、EX1と同じ感覚評価と体重測定を行った。

1. 5 測定項目

本研究では尿比重、心拍数、胃腸温、局所皮膚温、衣服内温湿度、体重（全身発汗量）を測定した。尿比重はデジタル尿比重計（アタゴ社製：UG-D）を用いて測定した。心拍数は心拍計（ポラール・エレクトロ社製：H10心拍センサー）を用いて測定し、研究参加者はペアリングされたスマートウォッチ（ポラール・エレクトロ社製：Unite）を装着してリアルタイムで心拍数を確認できるようにした。胃腸温はピル型体温計（BodyCap社製：e-Celsius[®]）を用いて1分間ごとに測定した。局所皮膚温は上腕、胸、大腿、下腿、背中5か所にiButton[®]（胸、背中：DS1922L-F5#、上腕、大腿、下腿：DS1921H-F5#）を貼付けて胸と背中では5秒ごと、他の3か所は1分ごとに測定した。胸、上腕、大腿、下腿の皮膚温から平均皮膚温を算出した⁵⁾。衣服内温湿度はiButton[®]（DS1923-F5#）を取り付けるための固定具を胸部および右背部にコロジオン5%（ナカライテスク）で貼り付けて装着し、5秒ごとに測定した。固定具を皮膚に貼り付ける際には、ドライヤーを用いてコロジオンを乾燥させながら行うことで、装着時間をできるだけ短縮するようにした（～5分/個程度）。本研究で用いたiButtonの性能はそれぞれ次の通りであった：DS1922L-F5#（温度測定、精度±0.5℃、分解能0.0625℃）、DS1921H-F5#（温度測定、精度±1℃、分解能0.5℃）、DS1923-F5#（温度・相対湿度測定、精度±1℃・±5%、分解能0.5℃・0.04%）。

全身発汗量はBLからEX2終了時の体重変化から算出し、運動間の休息時に摂取した飲料500ml分を引いて決定した（A&D社製：HW-100KC、±0.01kg）。体重測定は身体および衣服の汗を十分拭きとり、半裸体（下着、ランニングパンツ、靴下、測定機器）で実施した。

主観的感覚として温熱感（－10寒い～25とても暑い）、湿潤感（0とても乾いている～30とても濡れている）、べたつき感（0全くべたつかない

～12とてもべたつく), 肌触り(－9とても滑らか～9とても粗い), 着用不快感(1快適～7とても不快)を評価した⁶⁾。なお温熱感のみ「とても(暑い)」の指標が含まれていなかったため, 他の感覚尺度との整合性を考慮して, 先行研究の指標(－10寒い～20暑い)を改変して用いた。

1. 6 データ解析および統計処理

本研究は屋外で別日に実施することから, 天候が結果に影響する可能性があった。そのため, EX1では研究参加者全員がCONを着用し, その応答に実験日間で差が生じないことを確認することで, 実験日の違いの影響を確認できると考えた。もしEX2のみ衣服条件間の差が認められる場合には, 衣服の影響のみを評価することができていると考えられる。そのため, 本研究ではEX1とEX2を分けて統計分析を行った。衣服内温湿度, 胃腸温, 心拍数, 平均皮膚温, 局所皮膚温について, それぞれ繰り返しのある2要因の分散分析(時間×運動条件)を用い, 多重比較には各時点の条件間を比較するSidak testを用いた。すべてのデータは平均±標準偏差で示した。いずれの場合も有意水準を $p \leq 0.05$ とした。

2. 結 果

9月4日はやや曇り, 11日は晴れであった。実験を行った時間帯の平均気温および相対湿度は4日がそれぞれ31.1℃および57%, 11日が33.3℃および51%であった。

各測定項目のBL(実験開始前の値)は衣服条件間(2セット目でCONを着用した日のBLとDAFを着用した日のBLの比較)で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.057$)。走行速度の平均値はCONが $9.79 \pm 0.95 \text{ km/h}$ で, DAFが $9.82 \pm 1.06 \text{ km/h}$ であり, 衣服条件間で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.705$)。運動時の心拍数も衣服条件間で有意な差は認められなかった(衣服の主効果,

全て $P \geq 0.278$)。

全員CONを着用したEX1では, 胸部の衣服内温度および湿度, 背部の衣服内温度は条件間で差は認められなかった(全て $P \geq 0.193$, 図2)。背部の衣服内湿度は交互作用($P=0.014$)が認められたものの, 各時点で差は認められなかった(全て $P \geq 0.515$, 図2)。一方, EX2では胸部および背部の衣服内温度は条件間で差は認められなかったものの(全て $P \geq 0.139$), 両部位共にDAFの衣服内湿度はCONと比較して低下した(全て $P \leq 0.048$, 衣服の主効果, 図2)。

EX1において平均皮膚温, 胸部皮膚温, 背部皮膚温, 上腕皮膚温は条件間で差は認められなかった(全て $P \geq 0.122$)。EX2においても平均皮膚温, 胸部皮膚温, 背部皮膚温は条件間で差は認められなかったものの(全て $P \geq 0.204$), 上腕皮膚温で衣服の主効果が認められ, DAFがCONと比較して低値を示した($P=0.033$)。胃腸温および全身発汗量はEX1, EX2ともに衣服条件間で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.065$)。

EX1において温熱感, べたつき感, 肌触り, 着用不快感は条件間で有意な差は認められなかった(全て $P \geq 0.126$)。EX1の湿潤感はEX2でCONを着用した群がDAFを着用した群と比較して高い値を示した($P=0.016$)。一方, EX2では全ての感覚パラメーターは衣服条件間で差が認められなかった(全て $P \geq 0.166$)。RPEも同様に, EX1, EX2ともに衣服条件間で差は認められなかった(全て $P \geq 0.103$)。

3. 考 察

本研究で開発した衣服内温湿度を計測するiButton[®]を用いた固定具は皮膚に直接取り付けことができ, 汗を多量にかくような屋外の運動中にも外れることがなく, 衣服内温湿度を計測できることが明らかになった。実際に, 通気性が高い生地を着用すると衣服内湿度が低下することを屋

外環境下で確認することができた。これらの結果は、本研究で開発した固定具は屋外運動時の衣服内環境を評価する新たな手段になることを示している。

本研究で用いた固定具は筆者らがデザインし

てASE技研(株)に製作を依頼した。研究実施時の単価は30個(上下セット)で単価が2,000円程度であった。一方、iButton®は昨今の円安もあり価格が高騰しており、衣服内温湿度の測定に使用した精度の高いDS1923-F5は2024年6月18日

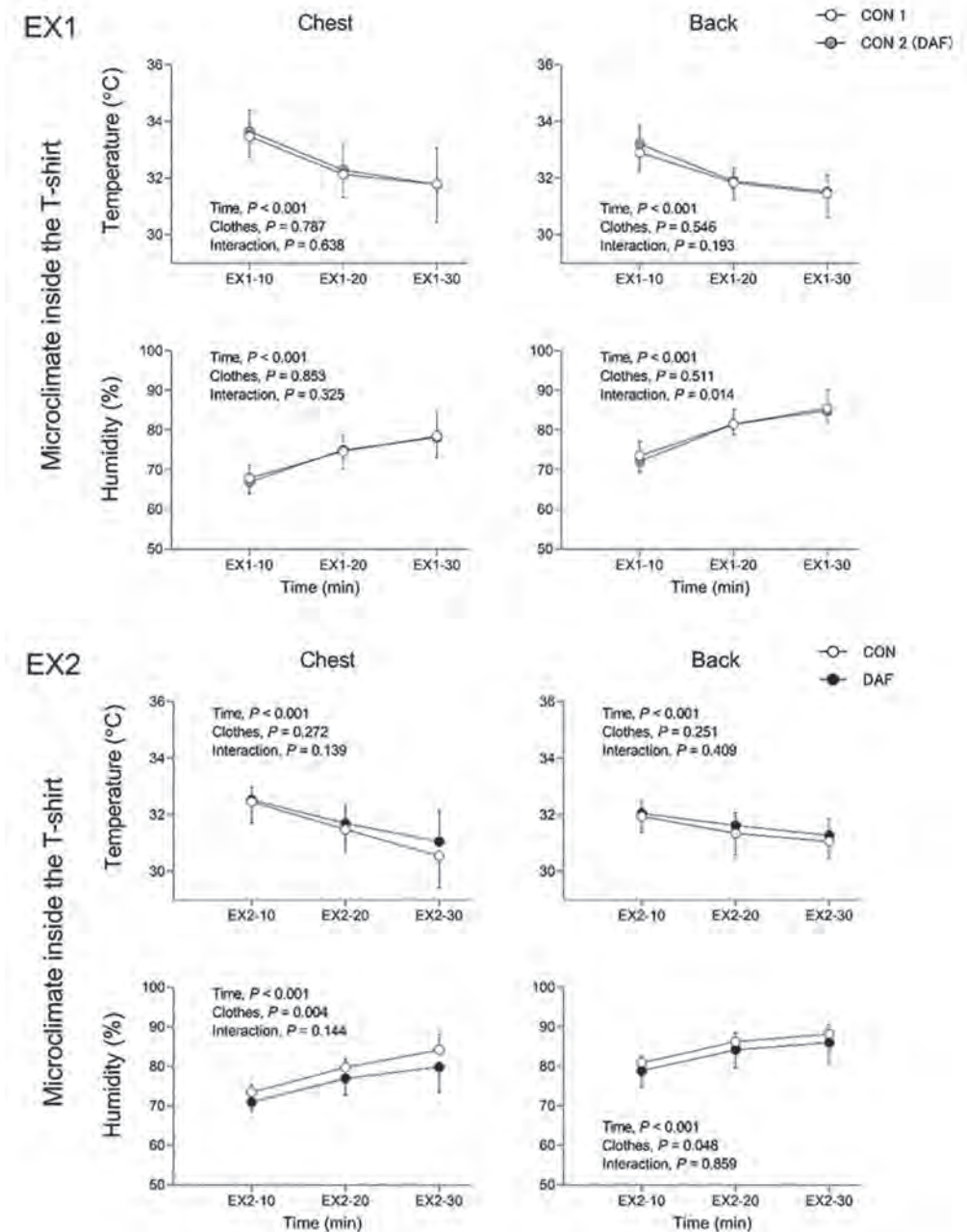


図2 Microclimates inside the T-shirt during EX1 (upper) and EX2 (lower).

CON1 indicates exercise to wear a control T-shirt in both 1st and 2nd bouts.

CON2 (DAF) indicates exercise to wear a control T-shirt in the 1st exercise bout, but to wear DAF in the 2nd bout.

現在で単価がおよそ23,000円であった (Mouser Electronicsの通販サイトで確認)。そのため、研究開始当初の想定 (固定具とiButton[®]合わせて10,000円強) よりも予算がかかってしまうものの、比較的安価といえる範囲で衣服内環境を無拘束で計測することができるようになった。

本研究ではコロジオンを用いて固定具を皮膚に直接貼り付けた。このような方法は局所発汗量を計測する際に発汗カプセルを皮膚に貼り付ける手法として昔から国内外の多くの研究室で実施されている。コロジオンは絆創膏などにも使われる粘着成分で人体への害は最小限である (使用後皮膚に赤みを観察することがあるが、早期に消失する)。本研究で開発した固定具を皮膚に貼り付ける場合には、所属機関における研究倫理審査が必要になると考えられるものの、前例の多い手法であるため、高い汎用性が期待できる。

本研究で開発した固定具は、皮膚と衣服の間の微小環境を測定できるデザインになっており、センサー自体が皮膚にも衣服にも当たらず空間に位置している。また衣服あるいは皮膚からの正確な距離も分かる。さらに、体動が伴うような時でもセンサーの位置が変わらないため、ピンポイントで衣服内環境を計測できる特徴がある。皮膚以外にも、衣服に直接縫い付けることで、重ね着をした時の衣服と衣服の間の微小環境を計測することも可能となる。これらのことから、本研究の応用範囲はスポーツ科学、衣服科学、生活科学など多方面に期待できる。

本研究では屋外で衣服内環境を測定することの重要性を考慮して、人工気象室ではなくグラウンドで長距離走をした時の衣服内環境を測定した。しかし、人工気象室とは異なり、異なる日程で実験を行う場合には、天候の変化が結果に影響すると考えられる。本研究ではあらかじめ実験の日程と予備日を決めた上で研究参加者をリクルートした。そのため、全ての参加者が同じ日程で実

験を行うことができた。日程による天候の違いを考慮するため、運動を2セット実施し、第1セット目には全員が同じ衣服を着用した。第2セット目には異なる衣服を着用した。この方法を用いることで、1セット目の応答に差がなく、2セット目に差が観察される場合に、日程 (天候) の違いに関わらず、衣服の効果を検証できると考えた。実際に、衣服内湿度においてこのような反応が認められたことから、本研究デザインは屋外での衣服評価に有用であると考えられる。前述のように本研究で開発した固定具は比較的安価であることから、本研究のような大人数の同時測定が可能になった。この方法は研究参加者ごとに実験を実施するデザインと比べて、実験にかかる時間の大幅な短縮につながる点で画期的である。ただし、天候の違いの影響を完全に排除できたわけではないため、例えば人工気象室内で同じ実験を繰り返して再現性を確認するなど、今後の検証が必要かもしれない。

本研究では主要評価項目ではないものの、深部体温や皮膚温といった生体パラメーターの測定も実施した。衣服の違いによる影響は一部皮膚温を除いて認められなかったことから、本研究で用いた衣服の通気性の違いは体温調節反応に大きく影響しなかったと考えられる。体温調節反応が大きく改善されるような衣服を開発することができれば、夏の運動の安全性やスポーツパフォーマンス向上に寄与できると考えられる。今後、本研究の成果がその一助になれば幸いである。

結 論

本研究で開発した衣服内環境を無拘束で計測する比較的安価な固定具は、夏の屋外でランニング時の衣服内環境を計測でき、通気性の異なる衣服の衣服内湿度の違いを評価できる。

謝 辞

本研究は石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成を基に行われました。助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝いたします。また、実験に協力して頂いた研究参加者の皆様に厚く御礼申し上げます。スマートウォッチを貸与して頂いたポラール・エレクトロ・ジャパン株式会社に感謝申し上げます。

文 献

- 1) Di Domenico I., Hoffmann S.M., Collins P.K., The Role of Sports Clothing in Thermoregulation, Comfort, and Performance During Exercise in the Heat: A Narrative Review., *Sports Medicine-Open*, 8: 58 (2022)
- 2) Wei H.T., Chan W.S., Chow D.H., Systematic review of selecting comfortable sportswear: Predicting wearing comfort based on physiological responses and materials properties., *Textile Research Journal*, 00405175231167863 (2023)
- 3) Smith A.H., Crabtree D., Bilzon J., Walsh N., The validity of wireless iButtons® and thermistors for human skin temperature measurement., *Physiol. Meas.*, 31: 95 (2009)
- 4) Kato H., Okamoto Y., Otsuka J., Tajima K., Shiraishi A., Shiramoto A., Amano T., Wearing a breathable T- shirt does not affect thermoregulatory responses during exercise under hot conditions., *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*
- 5) Ramanathan N.L., A new weighting system for mean surface temperature of the human body., *J. Appl. Physiol.*, 19: 531-533 (1964)
- 6) Raccuglia M., Heyde C., Lloyd A., Ruiz D., Hodder S., Havenith G., Anchoring biases affect repeated scores of thermal, moisture, tactile and comfort sensations in transient conditions., *Int. J. Biometeorol.*, 62: 1945-1954 (2018)

ファン付きベストの着用が 夏季の屋外練習時における高校生アスリートの パフォーマンスと熱中症予防効果に及ぼす影響

姫路獨協大学 大谷 秀 憲

Effects of The Fan Cooling Vest Use on Endurance Performance and Prevention of Heat-Related Illnesses in High School Athletes During Outdoor Training Sessions in The Summer Heat

by

Hidenori Otani
*Faculty of Health Care Sciences,
Himeji Dokkyo University*

ABSTRACT

The fan cooling garments are coming into very common use by Japanese outdoor manual workers. This study investigated the effects of the fan cooling vest use on endurance performance and prevention of heat-related illnesses in high school athletes during high-intensity training sessions under the clear sky in the summer heat. Ten male soccer players in high school conducted two high-intensity soccer training sessions for 2-h with (VEST) or without (CON) a commercially available fan cooling vest on a soccer uniform. These sessions commenced at 9 a.m. on separate days in late August. Increases in mean skin temperature, heart rate and thermal sensation were attenuated (all $P < 0.05$) in VEST than CON during exercise. Rating of perceived exertion was lower ($P < 0.05$) in VEST than CON during exercise. Total distance measured with a global positioning system was lower (both $P < 0.05$) in VEST than CON. Body fluid responses were not different between trials (all $P > 0.05$). This study indicates that the use of the fan cooling vest would alleviate thermal strain and risks of heat-related illnesses in high school athletes during high-intensity training sessions under the clear

sky in the summer heat. Meanwhile, it is likely that endurance performance is limited by using the fan cooling vest under our experimental conditions compared to when no vest is used.

キーワード

ファン付きウェア, 暑熱ストレス, 体温調節, 持久性パフォーマンス, 熱中症

Keyword

The fan cooling garments, Heat stress, Thermoregulation, Endurance performance, Heat-related illnesses

要 旨

本研究では、ファン付きベストの着用が夏季快晴条件下の屋外での高強度部活動練習時における高校生アスリートの持久性パフォーマンス及び熱中症予防効果に及ぼす影響について検証することを目的とした。被験者は高等学校サッカー部に所属する男性10名とした。被験者は8月下旬の快晴の日に、2時間のサッカーの練習を、ファン付きベストを着用した条件 (VEST) 及び着用していない条件 (CON) の2条件で、それぞれの別の日に同じ練習内容で実施した。平均皮膚温、心拍数、温熱感はVEST群がCON群よりも有意 (全て $P<0.05$) に上昇が抑制された。自覚的運動強度は、VEST群がCON群よりも有意な低値 ($P<0.05$) を示した。GPS測定による総移動距離は、VEST群がCON群よりも有意な低値 ($P<0.05$) を示した。本研究の結果から、高校生アスリートにおける夏季快晴条件下の屋外での高強度部活動練習時には、ファン付きベストの着用により体温調節系の負担が軽減し、熱中症予防に効果的であることが確認された。一方、ファン付きベストを着用した時は着用しない時と比べ、練習中の持久性パフォーマンスは制限される可能性が示唆された。

緒 言

近年の地球温暖化による暑熱ストレスの増大は、身体作業能力と認知機能を低下させ、ヒトの健康と経済の発展を脅かす大きな脅威となっている¹⁾。今後は、1年間に少なくとも20日間程度は世界人口の約30%の人々が高温に耐えうる生理的限界を超えた厳しい環境に曝露されることになり、死亡率の大幅な増加が予想されている²⁾。また、世界のいくつかの地域では、日中の労働時間の30 - 40%は労働の実施が不可能な酷暑環境となると考えられている³⁾。このような暑熱ストレスを軽減するための持続可能な冷却手法としては、エアコンよりも電力消費と温室効果ガスの発生が少ない扇風機の活用が期待されている⁴⁾。

暑熱環境下の運動時には、全身への気流の増加に伴い深部体温、平均皮膚温及び心拍数の上昇と持久性パフォーマンスの低下が抑制されることが知られている⁵⁻⁷⁾。これは主に、気流の増加に伴う蒸発性熱放散量⁵⁻⁷⁾と対流性熱放散量の増加⁵⁾によるものと考えられる。このような暑熱環境下の運動時には、気流が増加すればするほど、皮膚の表面からは汗の蒸発による蒸発性熱放散が非蒸発性熱放散 (対流性熱放散 + 放射性熱放散) よりも多くの熱を逃がすことが可能となる⁸⁾。

近年、我が国では主に屋外で働く労働者を中心

に、衣服に小型の扇風機が内蔵されたファン付きウェアの着用が、夏季の労働現場における熱中症予防のために広く用いられている⁹⁾。なかでも、実際の労働現場で最も一般的に使用されているのは、ファン付きベストである^{9, 10)}。これまでに、ファン付きジャケット（長袖・半袖）の着用が、暑熱環境下の運動中¹¹⁻¹³⁾における体温調節系に及ぼす影響については、人工気象室を用いた検証が行われている。その結果、ファン付きジャケットの着用は、深部体温、平均皮膚温、心拍数、温熱感及び自覚的運動強度（RPE）を低下させ、熱中症予防に効果的であることが報告されている。しかし、これらの研究は、気象条件をコントロールされた日射のない人工気象室内で実施された研究であり、屋外環境下で行われたものではない。また、これらの先行研究は全て実際の労働現場で最も使用されているファン付きベストではなく、ジャケットタイプの効果を検証したものである。

これまでに、夏季快晴条件下の屋外の暑熱環境下において、ファン付きベストの着用が運動中の熱中症予防効果に及ぼす影響について検証した研究は、我々の報告¹⁰⁾のみである。研究では、夏季における部活動練習時の熱中症予防の観点から、高校生アスリートを対象に8月上旬の2時間の屋外野球練習時におけるファン付きベストの着用が、体温調節、持久性パフォーマンス及び熱中症予防効果に及ぼす影響について検証した。その結果、野球のような中等度強度運動時におけるファン付きベストの着用は、深部体温、平均皮膚温、心拍数、温熱感及びRPEを低下させ、体温調節系の負担を軽減し、熱中症予防に非常に有効であることを報告している¹⁰⁾。一方、GPS測定による総移動距離は、ベストの着用時と非着用時で有意な差は認められなかったことから、持久性パフォーマンスについてはファン付きベストを着用しても影響は認められないことを報告している¹⁰⁾。暑熱環境下の運動時における熱中症は、運

動強度が高ければ高いほど危険性が增大すること¹⁴⁾が知られている。しかし、これまでにファン付きベストの着用が夏季屋外の暑熱環境下の高強度運動時における熱中症予防効果に及ぼす影響について検証した研究は見当たらない。暑熱環境下の運動時には、日射量の増加¹⁵⁾と日射量の増加及び気流の減少の複合作用⁶⁾により、体温調節系の負担が増大するため、直射日光を受ける屋外での運動は屋内に比べ熱中症の危険性が增大する^{16, 17)}ことが知られている。したがって、屋外の直射日光条件下におけるファン付きベストの着用が夏季の暑熱環境下の高強度運動時における体温調節系への影響を検証することは、夏季における部活動練習時の熱中症予防の観点から重要性が高いものと考えられる。

そこで本研究は、ファン付きベストの着用が高校生アスリートの夏季快晴条件下の屋外での高強度部活動練習時における持久性パフォーマンスと熱中症予防効果に及ぼす影響について検証することを目的とした。研究仮説は、そのような環境下では、ファン付きベストの着用により、持久性パフォーマンスの低下と体温調節系の負担が軽減され、熱中症予防に効果が高いものと仮定した。

1. 研究方法

1. 1 倫理申請

本研究は、姫路獨協大学生命倫理委員会の承認を得て実施した。また、本研究は、ヘルシンキ宣言及び人を対象とする医学系研究に関する倫理指針に従って実施した。全ての被験者とその保護者は、実験開始前に実験に関する説明を受けた後、インフォームドコンセントに署名を行った。

1. 2 被験者

被験者は、高等学校のサッカー部に所属する男性10名（平均値±標準偏差；年齢 17.1 ± 0.9 歳、身長 173.2 ± 7.6 cm、体重 56.9 ± 5.8 kg、BMI 18.9 ± 0.7 ）。

kg/m²)とした。被験者は、週6回の練習を4カ月以上継続して実施し、過去に内科的疾患の既往歴のない者を選定した。

1. 3 実験設定

被験者は、2時間の通常のサッカー練習を、サッカーのユニフォームの上にファン付きベストを着用した条件 (VEST) 及び着用していない条件 (CON) の2条件で、それぞれの別の日に同じ練習内容で実施した。サッカーのユニフォームは、丸首半袖シャツ、短パン、ブリーフ、すね当て (レガース)、膝下丈のソックス及びスパイクにより構成され、総重量は1.702 kg、衣服面積比は1.15、衣服熱抵抗は0.073 W/ (m²・℃)、衣服蒸発性熱抵抗は0.012 W/ (m²・kPa) であった¹⁸⁾。丸首半袖シャツ、短パン及び膝下丈のソックスの素材は、ポリエステルであった。ブリーフの素材は、綿約95%とポリウレタン約5%であった。すね当ての素材は、すねに面する裏面がポリウレタンで、表面が合成樹脂またはプラスチックであった。実験は、8月下旬の快晴の日に両条件ともに午前9時から開始した。実験は、始めにVEST条件を実施

し、翌日にCON条件を実施した。実験に用いたグラウンドは、北緯34° 38' 東経135° 00' に位置し、地面が黒土で半径100 m以内に日射を遮る建物のない環境であった。

1. 4 ファン付きベスト

被験者は、VEST条件ではサッカーユニフォームの上に市販のファン付きベスト (KU92140; 空調服) を着用した (図1)。ベストの素材はポリエステル製で、重量は0.65 kgであった。ベストの左右の腰部には、直径8 cm、重量0.44 kg (1台0.22 kg) の小型扇風機 (FA01012; 空調服) が2台装着されており、腰部から外気を衣服内に取り入れ、首回りから空気を排出する構造であった。扇風機の衣服内への吸気量は、62 L・s⁻¹または131 CFMであった。扇風機は、14.4Vのリチウムイオンバッテリー (9.8 cm × 8.5 cm × 2.7 cm: 0.29 kg: BT01412; 空調服) からの電力供給を受けた。衣服内の気流速度は、首の前部が11-12 km・h⁻¹、後部が8-9 km・h⁻¹であった。衣服内気流速度は、気流計 (AM-4214SD; マザーツール) で測定した。測定は、気流計のセンサー部分を首の前部と後部



図1 ファン付きベスト
赤矢印はファン、青矢印はリチウムイオンバッテリーを表す

の皮膚に接触させ、排気される空気の風速を安静立位の状態で計測した。

1. 5 実験手順

実験当日の朝、被験者は、実験開始時間の4時間前までに食事を済ませ、運動前の脱水を抑制するために実験開始1時間前に500 mlの水を摂取した。研究室に到着後、被験者は排尿を済ませ、尿は尿比重の分析（屈折計：D04-650-0、アズワン）に使用された。尿比重は、1.025以下を脱水の無い状態とした。その後、被験者は裸体で体重測定（体重計：±10g; AD6205B, A&D）を行った。皮膚温の測定には、サーミスタプローブ（ITP082-25, 日機装サーモ）を用い、胸部、上腕部、大腿部、下腿部の4箇所貼付し、データロガー（N543R; 日機装サーモ）で記録した。身体4箇所の皮膚温は、平均皮膚温の算出に用いた。心拍数の測定には、胸部ストラップ（H10 transmitter, Polar Electro Oy, Kempele, Finland）を用い、モニター（Polar Team, Polar Electro Oy, Kempele, Finland）にて記録した。温熱感の測定には、9点のアナログスケール（-4 [極めて寒い] ~ 4 [極めて暑い]）¹⁹⁾を用いた。運動前の各項目の測定は、室温28-29℃の研究室内で実施した。

練習開始5分前に、被験者はグラウンドへ移動した。練習開始直前に、被験者はサッカーユニフォームの上に周波数帯5 HzのGPS（GPS; SPI HPU, GPSport, Canberra, Australia）を装着し、VEST条件ではその上にさらにファン付きベストを着用した後、練習を開始した。2時間の練習内容は、ウォーミングアップ20分、休憩5分、パス練習20分、休憩5分、シュート練習20分、休憩5分、シュートゲーム20分、休憩5分、ゲーム20分であった。皮膚温は、運動中60分間隔で記録した。心拍数は、運動中5分間隔で記録した。運動中の疲労感の測定には、6-20RPEスケール（6 [何も感じない] ~ 20 [限界]）²⁰⁾を用いた。温

熱感とRPEの測定は60分間隔で行い、測定時はグラウンド脇に設置した日除けタープまで被験者に来てもらい、立位の状態で測定した。練習中は約30℃の水が入ったボトルを用意し、被験者の水分補給は自由とした。

練習終了後は、研究室（室温28-29℃）に戻り、全ての装備を取り外した後、裸体で体重を測定した。

1. 6 環境測定

全ての環境条件の測定項目は、地上1.5mの高さで30分間隔で測定した。乾球温度と湿球温度の測定には、アスマン通風乾湿計（080310-06; 柴田科学）を用いた。黒球温度の測定には、直径150 mmの黒球温度計（CK-T-D; 安藤計器）を用いた。気流の測定には、気流計（AM-4214SD; マザーツール）を用いた。全天日射量の測定には、日射計（MS-01; 英弘精機）を用いた。

1. 7 算出項目

平均皮膚温の算出には、Ramanathanの式²¹⁾（ $=0.3 \times \text{胸部} + 0.3 \times \text{上腕部} + 0.2 \times \text{大腿部} + 0.2 \times \text{下腿部}$ ）を用いた。全身発汗量の算出には、次の式（ $= \text{体重減少量} + \text{水分補給量}$ ）を用いた。WBGTの算出には、次の式（ $=0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$ ）を用いた²²⁾。

1. 8 統計処理

データの正規性の検定には、Shapiro-Wilkテストを用いた。また、等分散性の検定には、Leveneテストを用いた。ノンパラメトリックの経時的データである温熱感の統計処理には、統計ソフトR（version 4.0.2; R Core Team, Vienna, Austria）のパッケージnpard（version 2.1）のLD-F2式²³⁾を用いた反復測定2元配置分散分析を行った。その後、多重比較検定にはTukey法を用いた。パラメトリックの経時的データである平均皮膚温、

表1 練習時の環境条件

	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	黒球温度 (℃)	WBGT (℃)	相対湿度 (%)	気流 (km/h)	日射量 (W/m ²)
VEST条件							
0 分	30.5	26.7	43.5	30.4	75	5	650
30分	31.3	26.5	44.3	30.5	69	2	697
60分	31.5	26.9	46.2	31.2	70	3	775
90分	31.8	26.8	45.2	31	68	6	837
120分	32.1	26.5	47.2	31.2	65	5	867
平均値±SD	31.4±0.6	26.7±0.2	45.3±1.5	30.9±0.4	69±4	4.2±1.6	765±92
CON条件							
0 分	31	26	46.3	30.6	67	5	679
30分	31.5	26	45.8	30.5	65	3	744
60分	31	26	41.5	29.6	67	4	688
90分	32	26.5	43.7	30.5	65	1	660
120分	31.5	26	41.8	29.7	65	9	571
平均値±SD	31.4±0.4	26.1±0.2	43.8±2.2	30.2±0.5	66±1	4.4±3.0	669±63
危険率	0.906	0.002	0.254	0.031	0.067	0.898	0.088
効果量	0	3	0.8	1.55	1.03	0.08	1.22

SD:標準偏差

心拍数, RPEの統計処理には, 統計ソフトSPSS (version 21; IBM Corp., Armonk, N.Y., USA) を用い, 反復測定2元配置分散分析を行った. その後, 多重比較検定にはTukey法を用いた. 運動前体重, 尿比重, 総移動距離, 体液指標の統計処理には, 対応のあるt検定を用いた. 環境条件の測定項目の統計処理には, 対応の無いt検定を用いた. 危険率は5%未満を有意水準とした. 効果量の算出には, Cohenのd (d) を用いた. 効果量の目安は, 小さい ($d = 0.2 - < 0.5$), 中程度 ($d = \geq 0.5 - < 0.8$), 大きい ($d \geq 0.8$) とした²⁴⁾. データは全て平均値±標準偏差 (SD) で表した.

2. 研究結果

2. 1 運動前の各指標

運動前の体重 (VEST 条件; 58.8 ± 6.2 kg, CON 条件; 57.1 ± 5.4 kg; $P=0.41$, $d=0.29$), 尿比重 (VEST 条件; 1.018 ± 0.003 , CON 条件; 1.020 ± 0.003 ; $P=0.07$, $d=0.67$), 平均皮膚温 (VEST 条件; 33.0 ± 0.4 °C, CON 条件; 32.9 ± 0.2 °C; $P=0.49$, $d=0.32$), 心拍数 (VEST 条件; 90 ± 7 bpm, CON 条件; 88 ± 8 bpm; $P=0.43$, $d=0.27$), 温熱感 (VEST 条件; -0.2 ± 1.8 , CON 条件; -0.6 ± 1.2 :

$P=0.37$, $d=0.26$) は, 条件間に有意差は認められなかった.

2. 2 環境条件

練習時における環境条件を表1に示した. 湿球温度とWBGTは, VEST 条件がCON 条件よりも有意な高値 (共に $P<0.05$) を示した.

2. 3 平均皮膚温

平均皮膚温は, 時間の経過に伴い条件間の差が有意 ($P<0.05$) に大きくなった (時間と条件の交互作用) (図2A). このため, 練習中の平均皮膚温は, VEST 条件がCON 条件よりも有意に上昇が抑制されたと解釈される.

2. 4 局所皮膚温

胸部皮膚温, 上腕部皮膚温, 下腿部皮膚温は, 時間の経過に伴い条件間の差が有意 ($P<0.05$) に大きくなった (時間と条件の交互作用) (表2). このため, 練習中の平均皮膚温は, VEST 条件がCON 条件よりも有意に上昇が抑制されたと解釈される. また, 上腕部皮膚温は, 練習中, VEST 条件がCON 条件よりも有意な低値 ($P<0.001$: 条

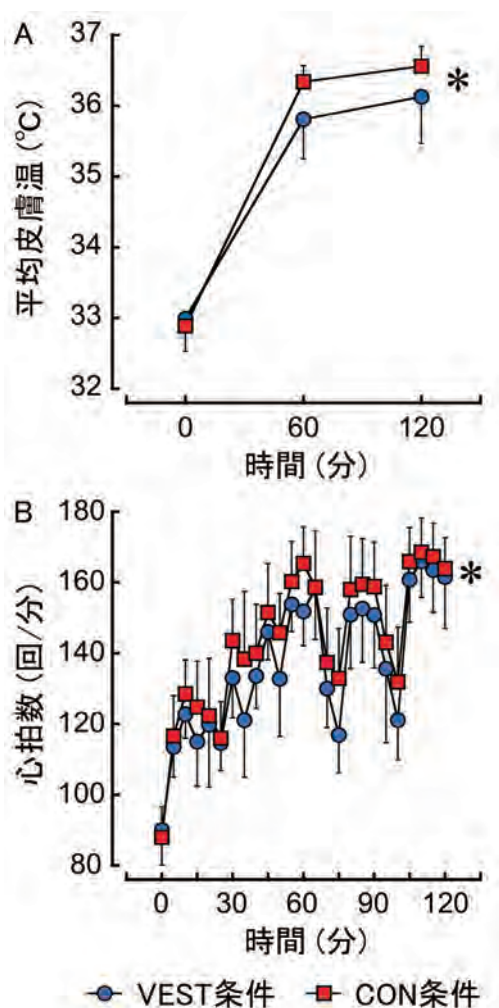


図2 練習時の平均皮膚温(A)及び心拍数(B)の変化
* $P<0.05$ (交互作用[時間×条件])

件の主効果)を示した(表2)。

2. 5 心拍数

心拍数は、時間の経過に伴い条件間の差が有意($P<0.05$)に大きくなった(時間と条件の交互作用)(図2B)。このため、練習中の心拍数は、VEST条件がCON条件よりも有意に上昇が抑制されたと解釈される。年齢別予測最大心拍数を基準とした練習中の平均心拍数は、VEST条件が $70 \pm 3\%$ 、CON条件が $74 \pm 5\%$ であり、条件間に有意差は認められなかった($P=0.25$, $d=0.97$)。

2. 6 温熱感

温熱感は、時間の経過に伴い条件間の差が有意($P<0.05$)に大きくなった(時間と条件の交互作用)(図3A)。このため、練習中の温熱感は、VEST条件がCON条件よりも有意に上昇が抑制されたと解釈される。

2. 7 自覚的運動強度(RPE)

RPEは、練習中、VEST条件がCON条件よりも有意な低値($P<0.001$:条件の主効果)を示した(図3B)。

表2 練習時の局所皮膚温

	胸部皮膚温* (°C)	上腕部皮膚温* (°C)	大腿部皮膚温 (°C)	下腿部皮膚温* (°C)
VEST条件				
0分	32.7 ± 0.8	32.7 ± 0.6	33.6 ± 0.6	33.1 ± 0.5
60分	35.3 ± 0.6	35.3 ± 0.7	36.4 ± 0.6	36.5 ± 0.7
120分	35.8 ± 0.5	35.7 ± 1.1	36.7 ± 0.6	36.8 ± 0.9
平均値±SD	34.6 ± 1.5	34.6 ± 1.6	35.7 ± 1.6	35.4 ± 1.8
CON条件				
0分	32.5 ± 0.3	32.7 ± 0.5	33.5 ± 0.5	33.1 ± 0.5
60分	35.9 ± 0.4	36.4 ± 0.6	36.5 ± 0.5	36.5 ± 0.4
120分	35.9 ± 0.2	36.7 ± 0.4	36.6 ± 0.5	37.3 ± 0.7
平均値±SD	34.8 ± 1.6	35.3 ± 2.0	35.6 ± 1.6	35.6 ± 2.0
危険率	0.147	<0.001	0.445	0.052
効果量	0.13	0.4	0.06	0.11

SD:標準偏差. * $P<0.05$, 交互作用(時間×条件)

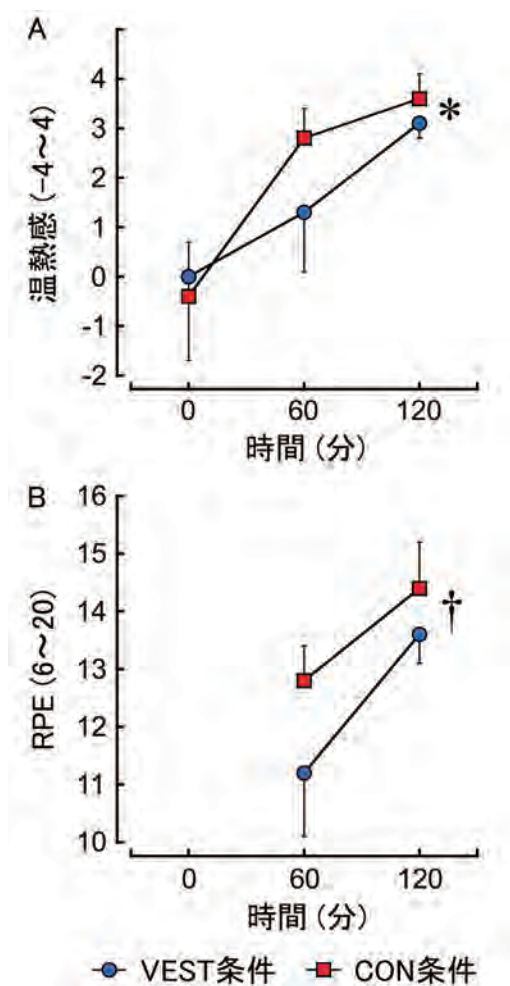


図3 練習時の温熱感(A)及び自覚的運動強度(RPE: B)の変化

* $P < 0.05$ (交互作用[時間×条件]),
† $P < 0.05$ (主効果[条件]).

2. 8 総移動距離

総移動距離は、VEST条件がCON条件よりも有意な低値 ($P < 0.001$) を示した (表3)。

2. 9 体液動態

体重減少量、脱水率、水分摂取量、全身発汗量は、条件間に有意差は認められなかった (表3)。

3. 考 察

本研究では、夏季における部活動練習時の熱中症予防の観点から、高等学校に所属するサッカー部員を対象に、ファン付きベストの着用が快晴の屋外高強度練習時における持久性パフォーマンスと熱中症予防効果に及ぼす影響について検証を行った。練習中の暑熱ストレスは、VEST条件がCON条件よりも有意に高い結果となったが、平均心拍数は、条件間に有意差は認められなかった。練習中の平均皮膚温、心拍数及び温熱感は、VEST条件ではCON条件に比べ有意に上昇が抑制された。RPEは、VEST条件がCON条件よりも有意な低値を示した。一方、練習中の総移動距離は、VEST条件がCON条件よりも有意な低値を示した。したがって、ファン付きベストの着用が体温調節系の負担を軽減する効果については研究仮説を支持する結果であったが、持久性パフォーマンスについては研究仮説とは反対の結果となった。

本研究では、湿球温度 (VEST; $26.7 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, CON; $26.1 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$) とWBGT (VEST; $30.9 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$, CON; $30.2 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$) はVEST条件の方がCON条件よりも有意に高かった (表1) ことから、練習中の暑熱ストレスはVEST条件の方が大きかったと考えられる。WBGTの値は、両条件共に熱中症の危険性が極めて高い 28°C 以上¹⁴⁾ に該当して

表3 練習時の体液バランス

	総移動距離 (m)	体重減少量 (kg)	脱水率 (%)	水分補給量 (ml)	全身発汗量 (kg)
VEST条件	5852 ± 241	0.52 ± 0.45	0.9 ± 0.9	1529 ± 277	2.1 ± 0.5
CON条件	6595 ± 328	0.73 ± 0.58	1.3 ± 0.9	1598 ± 443	2.3 ± 0.6
危険率	<0.001	0.205	0.205	0.443	0.116
効果量	2.58	0.38	0.45	0.19	0.36

平均値 ± 標準偏差

いた。このため、本研究では両条件共に運動を実施するには極めて厳しい環境条件下で練習を行っていたと考えられる。

本研究では、練習中の平均心拍数は、VEST条件が $70 \pm 3\%$ でCON条件が $74 \pm 5\%$ であり(図2B)、VEST条件は中等度強度運動に該当し、CON条件は高強度運動に該当した²⁵⁾。しかし、条件間に有意差は認められなかったことから、練習中の運動強度は条件間でほぼ同様であったと考えられる。一方、練習中の総移動距離は、VEST条件がCON条件よりも743 m短く、有意な低値を示した(表3)。ファン付きベストの着用が、高校生アスリートの夏季快晴時の屋外での中等度強度部活動練習時における持久性パフォーマンスと熱中症の危険性について検証した我々の先行研究¹⁰⁾では、練習中の総移動距離はベストを着用した条件と着用しなかった条件の間に有意な差は認められなかった。本研究と先行研究¹⁰⁾の結果の違いが生じた理由としては、野球とサッカーの競技特性の違いが挙げられる。本研究はサッカーの競技特性上、移動距離が長く、2時間の練習中、VEST条件が 5852 ± 241 m、CON条件が 6595 ± 328 m移動したが、先行研究は2時間の野球練習中、ベストを着用した条件が 3704 ± 293 m、着用しなかった条件が 3936 ± 501 m程度の移動であった。したがって、練習中のポジションが固定されている野球では、ファン付きベストの着用による選手の移動距離の違いが結果として顕著には表れなかったが、野球に比べると練習中のポジションが固定されていないサッカーでは、ベストの着用によりある程度身体の自由が制限されたことから、VEST条件がCON条件よりも移動距離が少なかった可能性が考えられる。このため、サッカーのように練習中の移動が自由な競技においては、ファン付きベストの着用は選手の移動をある程度制限し、持久性パフォーマンスを制限する可能性が示唆された。また、可能性としては低いものと考え

られるが、本研究における条件間の総移動距離の違いは、暑熱ストレスがVEST条件の方がCON条件よりも高かったことが影響した可能性も考えられる。一方、練習中の平均心拍数は条件間に有意差が無かったため運動強度には影響しなかったと考えられることから、総移動距離の違いは生理的指標には影響しなかったものと推察される。

本研究では、練習中の平均皮膚温、心拍数、温熱感は時間と条件の交互作用が認められた(図2A・Bと3A)ことから、練習中の皮膚温、心拍数、暑さの感覚は、ファン付きベストの着用により有意に上昇が抑制されたと考えられる。また、RPEはVEST条件がCON条件よりも有意な低値を示した。このため、練習中の疲労感は、ファン付きベストの着用により着用しなかった時に比べ有意に低かったと考えられる。これらの結果は、屋外における我々の先行研究¹⁰⁾だけでなく、ファン付きジャケットの着用が、暑熱環境下の運動中¹¹⁻¹³⁾における熱中症の危険性に及ぼす影響について検証した人工気象室内での研究と同様の結果であった。これらの研究では、ファン付きベストまたはジャケットの着用により、運動中の平均皮膚温、心拍数、温熱感及びRPEの上昇が抑制され、熱中症予防に効果的であることが報告されている。したがって、本研究の結果から、暑熱環境下の運動中は、ファン付きジャケットだけでなくベストの着用も熱中症の予防に効果的であることが確認された。さらに、直射日光下の夏季屋外の暑熱環境下では、ファン付きベストの着用は中等度強度運動時だけでなく高強度運動時にも体温調節系の負担を軽減し、熱中症予防に効果的であることが初めて確認された。

ファン付きベストによる身体冷却の効果は、主に衣服内の気流の循環による蒸発性熱放散の促進によるもの⁹⁾と考えられる。暑熱環境下の運動時には、気流の増加に伴い体温調節系の負担は軽減し⁵⁻⁷⁾、皮膚の表面からは汗の蒸発による蒸発性

熱放散が非蒸発性熱放散よりも多くの熱を逃がすことが可能となる⁸⁾。また、気流による身体冷却効果は、皮膚が濡れている時の方が濡れていない時よりも高く、暑熱環境下の運動時には皮膚温、深部体温及び心拍数の上昇を抑制することが可能となる^{26, 27)}。Tokizawa¹³⁾は、暑熱環境下の運動時において、ファン付きジャケットの下に着用するアンダーシャツを水で濡らした時と濡らさなかった時の体温調節反応について比較を行った。その結果、水で濡らしたアンダーシャツの上にファン付きジャケットを着用した際の方が、蒸発性熱放散の促進により皮膚温、深部体温及び心拍数の上昇が有意に抑制されたことを報告している¹³⁾。本研究は、極めて厳しい暑熱ストレス条件下で運動を行っていることから、被験者は練習開始後すぐに汗をかき、アンダーシャツが十分濡れた状態でファン付きベストを着用していたものと考えられる。一方、Rowellら²⁸⁾は、運動中に水循環スーツにより全身の皮膚を冷却し皮膚温を低下させると、静脈収縮の増強により中心循環への静脈還流が促進されることを報告している。これにより、運動中の大動脈圧、一回拍出量、心拍出量が低下し、心拍数と深部体温の上昇が抑制されることを報告している²⁸⁾。本研究で使用したファン付きジャケットの気流は、全身を冷却している訳ではないが、汗で濡れている体幹部を流れる気流により蒸発性熱放散が促進され、皮膚温の上昇が抑制された結果、心拍数の上昇が軽減された可能性が考えられる。

本研究では、ファン付きベストの着用により温熱感の上昇が有意に抑制された。暑熱環境下の運動時には、暑熱ストレスと体温調節系の負担の増大に伴って温熱感の上昇が起こることが知られている^{5, 6, 29)}。また、暑熱環境下では、顔への送風により温熱感と皮膚温の上昇が抑制される³⁰⁾が、本研究で使用したファン付きベストは首回りから空気が排出されるため、首から顔への排気により

温熱感の上昇が抑制された可能性が高いものと考えられる。図3Aから、120分の時の温熱感は60分の時に比べ条件間の差が小さくなった。この原因は、練習内容の違いによるものと考えられる。練習内容は、60分ではシュート練習中であったが、120分ではゲームの直後であったため、120分の時の方が心拍数は高く(図2B)、運動強度も高かったと考えられる。このため、ファン付きベストを着用しているVEST条件でも、120分の時には多くの被験者が強い暑さを感じたため、条件間の差が小さくなったものと考えられる。

暑熱環境下の運動時におけるRPEの上昇は、心拍数と深部体温の上昇³¹⁾及び平均皮膚温の上昇³²⁾に伴って引き起こされる。本研究では、ファン付きベストの着用に伴い心拍数と平均皮膚温の上昇が抑制されたことから、RPEの上昇は抑制されたものと考えられる。本研究における温熱感とRPEの反応は、我々の先行研究¹⁰⁾及び屋内でファン付きジャケットを使用した他の先行研究¹¹⁻¹³⁾でも同様の結果が報告されている。したがって、暑熱環境下の運動中におけるファン付きウェアの着用は、暑さと疲労の感覚が上昇するのを効果的に抑制することができるものと考えられる。

本研究では、練習中、常に動き続けているというサッカーの競技特性を考慮し、測定に時間を要する赤外線鼓膜温や口腔温などの深部体温の指標については測定を行わなかった。また、倫理的な観点から、主に屋内での体温調節研究に用いる直腸温と食道温の測定も実施することができなかった。したがって、今後は、これらの深部体温を測定し、ファン付きウェアの熱中症予防効果をより詳細に検証する必要があるものと考えられる。また、本研究は、太陽が南中高度に達する正午付近と1日の気温が最高値を示す14時付近^{16, 17)}を避け、9～11の間で実験を実施した。しかし、実際の部活動は、そのような暑熱ストレスの大きい時間帯でも実施されており、毎年多くの熱中症

事例が報告されている。このため、今後は暑熱ストレスが大きく熱中症の危険性が高い時間帯にも実験を実施し、ファン付きウェアの効果をさらに詳細に検証する必要があるものと考えられる。

4. 結 論

本研究の結果から、夏季快晴条件下の暑熱環境下の高強度部活動練習時には、ファン付きベストの着用により体温調節系の負担が軽減され、熱中症の危険性が軽減されることが確認された。一方、本研究で用いたサッカーのように練習中の移動が自由な競技においては、ファン付きベストの着用は選手の移動をある程度制限し、持久性パフォーマンスを制限する可能性が示唆された。夏季の部活動練習時における熱中症予防の観点からは、ファン付きベストの着用は熱中症予防のために非常に効果的であると考えられる。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、実験にご協力いただいた被験者の皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Ebi KL., Capon A., Berry P. et al., Hot weather and heat extremes: health risks., *Lancet*, **398**: 698-708 (2021)
- 2) Mora C., Dousset B., Caldwell IR. et al., Global risk of deadly heat., *Nat. Clim. Chang.*, **7**: 501-506 (2017)
- 3) Kjellstrom T., Briggs D., Freyberg C. et al., Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts., *Annu. Rev. Public Health*, **37**: 97-112 (2016)
- 4) Morris NB., Chaseling GK., English T. et al., Electric fan use for cooling during hot weather: a biophysical modelling study., *Lancet Planet Health*, **5**: e368-e377 (2021)
- 5) Otani H., Kaya M., Tamaki A. et al., Air velocity influences thermoregulation and endurance exercise capacity in the heat., *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **43**: 131-138 (2018)
- 6) Otani H., Kaya M., Tamaki A., et al., Combined effects of solar radiation and airflow on endurance exercise capacity in the heat., *Physiology & Behavior*, **229**: 113264 (2021)
- 7) Saunders AG., Dugas JP., Tucker R. et al., The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment., *Acta Physiologica Scandinavica*, **183**: 241-255 (2005)
- 8) Havenith G., Holmér I., den Hartog EA. et al., Clothing evaporative heat resistance-proposal for improved representation in standards and models., *Ann. Occup. Hyg.*, **43**: 339-346 (1999)
- 9) Otani H., Fukuda M., Tagawa T., Cooling Between Exercise Bouts and Post-exercise With the Fan Cooling Jacket on Thermal Strain in Hot-Humid Environments., *Front Physiol.*, **12**: 640400 (2021)
- 10) Otani H., Goto T., Kobayashi Y. et al., The fan cooling vest use reduces thermal and perceptual strain during outdoor exercise in the heat on a sunny summer day., *Int. J. Biometeorol.* (2024), doi:10.1007/s00484-024-02690-w
- 11) Hashimoto K., Horie S., Nagano C. et al., A fan-attached jacket worn in an environment exceeding body temperature suppresses an increase in core temperature., *Sci. Rep.*, **11**: 21269 (2021)
- 12) Mori K., Nagano C., Fukuzawa K. et al., Mitigation of heat strain by wearing a long-sleeve fan-attached jacket in a hot or humid environment., *J. Occup. Health*, **64**: e12323 (2022)
- 13) Tokizawa K., Effects of wetted inner clothing on thermal strain in young and older males while wearing ventilation garments., *Front Physiol.*, **14**: 1122504 (2023)
- 14) Armstrong LE., Casa DJ., Millard-Stafford M. et al., American College of Sports Medicine position stand. Exertional heat illness during training and competition., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **39**: 556-572 (2007)
- 15) Otani H., Kaya, M., Tamaki, A. et al., Effects of solar radiation on endurance exercise capacity in a hot environment., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **116**: 769-779 (2016)

- 16) Otani H., Goto T., Goto H. et al., Time-of-day effects of exposure to solar radiation on thermoregulation during outdoor exercise in the heat., *Chronobiology International*, **34**: 1224–1238 (2017)
- 17) Otani H., Goto T., Goto H. et al., Solar Radiation Exposure Has Diurnal Effects on Thermoregulatory Responses During High-Intensity Exercise in the Heat Outdoors., *J. Strength. Cond. Res.*, **33**: 2608–2615 (2019)
- 18) Zuo J., McCullough E., Heat transfer characteristics of sports apparel., *J. ASTM. Int.*, **1**: 1-10 (2004)
- 19) ISO, Ergonomics of the physical environment — Subjective judgement scales for assessing physical environments. ISO, ISO 10551, Geneva (2019)
- 20) Borg GA., Psychophysical bases of perceived exertion., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **14**: 377-381 (1982)
- 21) Ramanathan NL., A new weighting system for mean surface temperature of the human body., *J. Appl. Physiol.*, **19**: 531-533 (1964)
- 22) Yaglou CP., Minard D., Control of heat casualties at military training centers. AMA. *Archives Industrial Health*, **16**: 302-316 (1957)
- 23) Noguchi K., Gel YG., Brunner E. et al., nparLD: an R software package for the nonparametric analysis of longitudinal data in factorial experiments., *Journal of Statistical Software*, **50**: 1-23 (2012)
- 24) Cohen J., Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd edition). Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale (1988)
- 25) American College of Sports Medicine (ACSM). Position stand: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in adults., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **30**: 975-991 (1998)
- 26) Mitchell JB., Schiller ER., Miller JR. et al., The influence of different external cooling methods on thermoregulatory responses before and after intense intermittent exercise in the heat., *J. Strength. Cond. Res.*, **15**: 247-254 (2001)
- 27) Lynch GP., Périard JD., Pluim BM. et al., Optimal cooling strategies for players in Australian Tennis Open conditions., *J. Sci. Med. Sport*, **21**: 232-237 (2018)
- 28) Rowell LB., Murray JA., Brengelmann GL. et al., Human cardiovascular adjustments to rapid changes in skin temperature during exercise., *Circ. Res.*, **24**: 711-724 (1969)
- 29) Schlader ZJ., Vargas NT., Regulation of Body Temperature by Autonomic and Behavioral Thermoeffectors., *Exerc. Sport Sci. Rev.*, **47**: 116-126 (2019)
- 30) Kato M., Sugeno J., Matsumoto T. et al., The effects of facial fanning on thermal comfort sensation during hyperthermia., *Pflugers. Arch.*, **443**: 175-179 (2001)
- 31) Nybo L., Nielsen B., Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia., *J. Appl. Physiol.*, **91**: 2017-2023 (2001)
- 32) Castle PC., Maxwell N., Allchorn A. et al., Deception of ambient and body core temperature improves self paced cycling in hot, humid conditions., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **112**: 377-385 (2012)

講 評

学 術 委 員

委員長(兼)	川	原	貴	一般社団法人大学スポーツ協会 副会長
委 員	井	上	真 理	神戸大学 大学院 人間発達環境学研究科 教授
委員(兼)	押	田	芳 治	名古屋大学 名誉教授
委 員	緒	方	徹	東京大学医学部附属病院 中央施設部門 リハビリテーション部 教授
委員(兼)	梶	原	莞 爾	信州大学 繊維学部 繊維学部コーディネータ
委 員	上	條	正 義	信州大学 繊維学部 教授
委 員	佐	藤	真 理 子	文化学園大学 服装学部 大学院生活環境学研究科 教授
委員(兼)	島	崎	恒 藏	日本女子大学 名誉教授・ 一般社団法人日本衣料管理協会 会長
委 員	下	光	輝 一	公益財団法人健康・体力づくり事業財団 理事長 (東京医科大学 名誉教授)
委員(兼)	下	村	吉 治	名古屋大学 名誉教授・ 名古屋工業大学 名誉教授
委 員	田	島	文 博	医療法人ちゅうざん会ちゅうざん病院 院長・ 日本パラスポーツ学会 理事長
委 員	田	畑	泉	立命館大学 スポーツ健康科学部 特命教員(教授)
委員(兼)	永	富	良 一	東北大学産学連携機構 イノベーション戦略推進センター 特任教授
委 員	西	村	太 良	京都工芸繊維大学 元教授
委 員	檜	垣	靖 樹	福岡大学スポーツ科学部 教授・学部長
委 員	平	田	耕 造	神戸女子大学 名誉教授
委員(兼)	廣	田	孝 子	廣田アンチエイジング研究所 所長
委 員	福	永	哲 夫	東京大学 名誉教授・早稲田大学 名誉教授・ 鹿屋体育大学 名誉教授
委 員	吉	岡	利 忠	医療法人三良会 村上新町病院 院長
委 員	吉	川	貴 仁	大阪公立大学 大学院 医学研究科 教授

* (兼)は理事または評議員と兼務

事務局長	根	無 (常)	和 明 (勤)	公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団
------	---	----------	------------	--------------------------

入選研究者成果報告書講評

学術委員
名古屋大学 名誉教授 押田芳治

今年も数多くの応募のなかから厳選され、助成された研究に関する報告書に基づいて講評する。今回私に課せられた研究は5件である。1つ1つについて講評を加えたい。

①石道峰典(大阪工業大学):「スポーツ活動中の熱中症発生と水分補給に伴う骨格筋内の水分特性の変化」

日本の夏の特徴である高温多湿環境下での運動は熱中症に至る危険性は大きい。しかしながら、半世紀以上前、運動中の水分摂取は厳しく制限されていた。当時(中・高)野球部員であった私も炎天下の練習中ばかりか、試合中までも筋痙攣やめまいを経験したことがあった。その指導に理不尽さを感じ、さらには今や亡き母の助言もあり、後ろめたさを感じながら隠れて水道水を飲んだ苦い記憶がある。今でこそ科学的な根拠の集積により適切な水分や休息の必要性が少しずつ認識されるようになった。しかし、まだまだその根拠は十分とは言えない。それを補うものの一つとして本研究があろう。今後、熱中症発症予防やパフォーマンス維持のための水分補給のタイミングなどについて実際のおよびその根拠となる基礎的な研究の両面で一層の検討を期待したい。

②白井礼(青山学院大学):「マトリックス表面筋電図を用いた腓腹筋外側頭における筋痙攣発生過程の筋活動様式」

運動中に限らず、日常生活の上で不意に起こる筋痙攣は当該筋の破壊だけでなく、時に生命に重篤な結果を招く危険性がある。そのために、筋痙

攣発生のメカニズムを解明することは重要と言える。筋の活動をマトリックスレベルで解析した結果、筋痙攣の前兆としてマトリックスレベルを超えた大きな筋単位が関与していると判明した。すなわち、筋痙攣の起源は中枢神経由来とした。筋痙攣発生のメカニズムに中枢神経系が関与するならば、何がトリガーとして中枢神経系の一部を興奮させるのか、何がその興奮を抑制させるのか、を明らかにできれば筋痙攣発生の抑制も可能になるかもしれない。さらなる検索を願いたい。

③水野沙洸(立命館大学):「有酸素性運動時における異なる様式での血流制限が血管内皮機能に及ぼす影響」

運動筋の血流抑制は筋肥大や筋力増大効果がみられるという。そこで、血流抑制の様式の違いがFMD(血流依存性血管拡張反応)を指標にして血管内皮機能の変化を比較検討した。断続的な血流制限は低下した血流依存性血管拡張反応を連続血流制限に比して有意に回復させるものの、血流の揺動には影響を及ぼさなかった。今回の検討では単発実験のためか、目立った成果がみられなかった。血流抑制の長期的(繰り返し)効果としての血管内皮機能の変化と筋肥大や筋力増強効果との関係性が分らない。さらにそのメカニズムの解明も必要となろう。

④土橋祥平(筑波大学)、他2名:若年期の運動不足が成年期以降の認知機能低下をもたらすエピジェネティック機構の解明

我が国では有史以来未曾有の超高齢社会に突入

している。その結果としてアルツハイマー病をはじめとする認知症も増加の一途をたどり、その対策が急務となっている。また、有酸素運動の継続が認知症予防や軽度な認知機能低下（MCI）改善に有効とされている。本研究では、若年期の一定期間の身体活動の制限は成年期以降の海馬内神経細胞のミエリン化現象に影響を及ぼすか、について検討がなされた。その結果、若年期の運動不足は成年期以降の認知機能に負の影響をもたらすという。若年期に身体活動が維持されると、それ以降のミエリン脱髄現象が抑制され、成年期以降の認知機能低下防止に有効であると、ラットを用いた動物実験成績から示唆された。いわゆる若年期に一定期間の身体活動は認知機能に対して長期のレガシー効果がみられそうである。運動と海馬や認知機能の関連性に関してはまだまだ不明な点も多く、今後の詳細な研究を待ちたい。

⑤橋本裕介（大阪体育大学）、他4名：「関節マーカーと3DMRIを用いた変形性膝関節症保存療法の個別化治療モニタリング」

高齢者の寿命は向上し、加齢に伴う変形性関節症患者も増加して、いわゆるロコモティブシンドロームに至っている。その結果、高齢者はサルコペニア、さらにはフレイルとなり、健康寿命と平

均寿命の乖離が著しくなっている。本研究では、変形性膝関節症患者の血清学データ、臨床的評価、3DMRIから導き出された関節内軟骨体積の関連性に検討を加えた。最終的に、血清学的指標であるCOMP値から3DMRIより算出される軟骨摩耗程度が推測可能という。ただし、COMP値を用いて臨床症状評価はできないらしい。膝関節症状は関節腔内の軟骨のみに由来せず、膝関節の筋や靱帯の状態も臨床症状に変化を及ぼすことは当然といえよう。いずれにしても、対象症例数が7名と余りに少なく、現時点では研究の端緒であり、普遍的な結論を導くには早計の段階といえる。今後、症例数を増やし、他の関節症の影響も鑑みて研究を進めていただきたい。

以上、5編の研究助成報告書に個別評価を記した。これらの研究は始まったばかりか、道程半ばといったところである。しかし、研究内容には興味を抱かせるものもあり、その方向性に間違いがないなら研究の進展が楽しみである。そのためには、先輩、共同研究者と議論を重ね、決して独りよがりにならぬよう希望するものである。なお、そのように記している私も、齢を重ねてはいるが、これらの評価をするに値するか、自信がない。的外れがあればご容赦願いたい。

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員

名古屋大学 名誉教授

名古屋工業大学 名誉教授

下 村 吉 治

ここでは、第46巻研究成果報告書に掲載の6つの体力医学系研究の報告書について講評する。

[1] 小河繁彦氏（東洋大学）らによる「インターバル運動が脳内皮機能に及ぼす影響：一定強度の運動との比較」

この研究では、7名の健康な成人男性を被験者として、比較的短時間（エアロバイクを使用した32分間の運動）の継続運動またはインターバル運動（両運動とも1セッションあたり153.6 kJ）が脳血管内皮機能（cFMD）に及ぼす影響を比較検討した。cFMDは、ドップラー法により頸動脈血管径（内頸動脈の直径）と血流速度を測定し運動によって変化する血流速度に対応した内頸動脈の拡張率を算出して評価した。これまでの他研究者らの報告により有酸素性インターバルトレーニングは心血管患者の心血管機能を改善することが報告され、筆者らの先行研究では運動強度の微細な変化が内頸動脈の血流速度の増加に影響することを認めたが、本研究では残念ながら2つの運動様式によるcFMDに対する効果の違いは認められなかった。この研究においてcFMDに対する運動様式の違いによる影響はかなり繊細であり運動強度などの影響を受けやすいと考えられるため、今後の更なる検討が必要と結論されている。脳循環の調節機構の解明とともに、運動により脳循環がどのように影響されるかを明らかにするために今後の研究成果が待たれる。

[2] 平林怜氏（新潟医療福祉大学）らによる「運動パフォーマンス向上となる最適な咬合の解明：

脳機能と脊髄機能に着目」

近年、歯の咬合がアスリートの運動パフォーマンスに影響することが指摘されている。咬合により歯根膜に存在する機械受容器の発火が増加すると三叉神経を通して脳の青斑核や脊髄の活性が促進される。これらは運動の熟練や自動化により低下するため、その増加は運動パフォーマンスに悪影響を与えると推察されている。そこで本研究では歯の咬合強度と左右の歯の咬合不均衡による青斑核と脊髄活性に及ぼす影響を神経生理学的に検討した。被験者として、若年健康成人14名（男女7名ずつ）を対象とした。咬合強度の異なる6条件で、筋活動を表面筋電図（両側咬筋と両側のヒラメ筋）で測定し脊髄興奮性と瞳孔径を計測した。脊髄興奮性の指標としてヒラメ筋H反射（脛骨神経の電気刺激によりヒラメ筋に誘発される反射性筋電図反応）を解析し、青斑核活性の指標として瞳孔径を測定した。咬合バランスは咬合力測定システム用フィルムを用いて測定した。本研究結果において左右の咬合力の増加に伴う脊髄興奮性の増大と瞳孔径の散大が認められ、咬合不均衡は認知遂行機能と運動パフォーマンスの低下を引き起こす可能性が示唆された。これらの所見は運動パフォーマンスの改善に応用することができる重要な所見と考えられる。

[3] 林七虹氏（大阪公立大学）による「ケトン体の経口摂取は運動誘発性の鉄欠乏に対して有効か？—ヘプシジン分泌応答に着目して—」

アスリート（特に女性）の鉄欠乏を防ぐことは

スポーツ生理学の分野で重要な課題である。本研究では活動的な若年成人女性を対象として鉄代謝に強い影響を及ぼす2つのホルモン（鉄代謝に抑制的に作用するヘプシジンと促進的に作用するエリスロポエチン（EPO））の運動後の動態に対するケトン体（ β -ヒドロキシ酪酸）摂取の影響について検討した。これまでの報告からケトン体摂取は血中EPO濃度の上昇とヘプシジン濃度の低下を介して運動誘発性の鉄欠乏を防ぐ可能性が考えられるが詳細な研究は無いようであり、特にヘプシジンに対するその効果については不明な点が多い。本研究結果では、運動後のケトン体摂取は運動後のEPO濃度の低下を抑制的に作用したが、ヘプシジン濃度に対しては特に効果は認められなかった。本研究では女性を被験者としたことや被験者の鉄代謝の基本的な状況がこれまでの報告と異なることよりケトン体摂取のポジティブな効果は認められなかったと考えられる。今後は被験者の状態の詳細な分類を含めて更なる研究が必要であろう。

[4] 塩澤華奈氏（名古屋大学大学院）らによる「加齢による運動時の昇圧応答メカニズムの解明：内臓血管応答に着目して」

動的運動時の動脈血圧の上昇は加齢により（特に女性で）増大することが知られているが、本研究ではそのメカニズムを解明するために、若齢女性（平均年齢20歳）と高齢女性（平均年齢71歳）を対象として軽強度の動的膝伸展屈曲運動中の血圧および腹腔動脈血流の応答を調べた。腹腔動脈の血流量は、超音波診断装置を用いて腹腔動脈の血管径と血流速度を正確に測定して算出した。結果として、運動時の血圧上昇は若年女性に比べ高齢女性で高かったが、腹腔動脈の血流量と血管コンダクタンス（平均血流量／平均血圧で算出した血管収縮の指標）の運動中の変化には加齢の影響は認められなかった。本研究では、目的とした加齢による運動時の動脈血圧を上昇する要因を明ら

かにすることはできなかったが、加齢による腹腔動脈への影響はその要因に含まれないことを示唆する重要な所見であると考えられる。

[5] 高橋涼吾氏（東京大学大学院）らによる「立位中の転倒恐怖心が下肢筋脊髄興奮性に与える影響の解明」

本研究は、転倒恐怖心が下肢筋の脊髄運動ニューロンの興奮性に及ぼす影響の解明を目的とした電気生理学的研究である。被験者として若年成人男性11名を用いた。被験者に静止立位で転倒恐怖心を惹起する3つの条件（Low, Medium, Highのthreat条件）を仮想空間で体験させ、その時に経皮的脊髄電気刺激（tSCS）を与えて各種下肢筋の活動を電氣的に測定した。その結果、転倒恐怖心が惹起されると、下肢筋のうち内側広筋、大腿二頭筋長頭、ヒラメ筋、腓腹筋内側頭、および腓腹筋外側頭には有意な変化は認められなかったが、前脛骨筋に選択的に脊髄運動ニューロンの興奮性が高まった。本研究により転倒恐怖心による脊髄運動ニューロン興奮性に筋特異性が存在することが明らかとなったが、今後この現象が転倒リスクを直接増大するかを調べる必要があると著者らは考えている。この研究結果は、著者らも言っているように転倒予防に向けたリハビリテーションや治療等の開発における基礎的知見となるであろう。超高齢者大国の日本においては重要な研究成果であると判断される。

[6] 木村みさか氏（京都先端科学大学）らによる「COVID-19（コロナ）による外出自粛期間中、運動できた高齢者とできなかった高齢者の4年後の体力（体力測定会参加者の場合）」

コロナ禍における人々の行動制限は一般的に人々の体力を低下させたと推測されており、実際に内外の研究報告においてもそれを支持する報告は多いようである。そこで、本報告では地域の高齢者（65歳以上の体力測定会参加者414名：男性74名、女性340名）を対象にして、パンデミック期

(COVID-19 に対する措置：2020 年 2 月に感染症法上の指定感染症に指定，同年 4 月に全国一斉の緊急事態宣言の発出，2023 年 5 月に感染症法上の 5 類への移行) 以前からの体力等の調査を 5 類移行後も実施して，高齢者の体力に対するコロナ禍の影響を解析した．その結果，多くの報告でコロナ禍により人々の体力の低下が報告されたが，本研究ではコロナ禍前の被験者の体力値に比べて 5 類移行後の体力値の低下は認められなかったこ

とを示しており，興味深い研究結果である．この論文に考察されているように，体力測定会参加者の高齢者は健康意識が高いため彼らの体力に対するパンデミックの影響は低かった可能性を示唆している．すなわち，これらの所見は我が国における高齢者に対する施策や高齢者の健康意識を高く保つことがコロナ禍のような緊急事態においても重要であることを示唆している．

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員

東京大学 名誉教授

早稲田大学 名誉教授

鹿屋体育大学 名誉教授

福 永 哲 夫

江間論文（題目：女子ラグビー選手におけるハムストリングス筋力の重要性）は女子ラグビー選手のハムストリングス筋力について検討したものである。7人制ラグビー選手20名を対象にレギュラーと準レギュラー群とに分けて、除脂肪量、膝屈曲トルク、10 m走タイムを測定した。その結果、ハムストリングス肉離れ経験者はそうでない者より伸張性膝関節屈曲トルクは有意に低かった。また、3か月間のトレーニングによりレギュラー群の膝屈曲トルクは有意に増加したが、準レギュラー群は増加が見られなかった。これらの結果はハムストリングの伸張性筋力が競技力や肉離れ経験の有無と関係することが示唆された。従来から女子ラグビー選手に関する体力データは殆ど見られないことから、この研究は貴重なものであると考えられる。

宮崎論文（題目：ハムストリング肉離れの受傷予防と走能力向上の両方を満たす走動作の予測）は疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減に影響する骨盤・下肢関節運動の特徴を角度入力による動作シミュレーションから明らかにする事を目的とした。その結果、ハムストリング肉離れの受傷リスク減少を目指すための走動作として大腿二頭筋長頭の筋腱長を制御するためには膝関節の屈曲伸展運動及び骨盤の前傾後傾運動の制御が影響する可能性を示した。この研究結果はハムストリング肉離れを予防するトレーニング計画立案に貴重な示唆を与えるものと考えられる。

越野論文（題目：ジャンプ着地動作時のアキレス腱張力に関係する足部三次元運動の解明）はドロップジャンプ中のアキレス腱張力を三次元的に解明することを目的とした。その結果、アキレス腱張力と後足部外転は負の相関関係を示し、一方、後足部外転と前足部外がえしは有意な正の相関関係を示した。このことから、着地時のアキレス腱張力は後足部外転及び前足部外がえしの減少が関係することが明らかになった。この研究結果は跳躍力アップのトレーニングを考えるとときに貴重な資料となるものである。

新野論文（題目：後期高齢者のバスキュラー・ストレッチング介入における柔軟性及び動脈硬化度への影響）はバスキュラー（スタティック）ストレッチングの継続が柔軟性及び血管内皮機能及び動脈スティフネスに及ぼす影響を検討したものである。その結果、介入6か月では柔軟性の改善、血管内皮機能および動脈スティフネスにおいて有意な改善が見られた。一方、その後の脱介入後では、柔軟性、血管内皮機能および動脈スティフネスは介入前の状態に戻った。このことから、バスキュラーストレッチングの継続実施は柔軟性を改善し、抗動脈硬化に効果がある事の可能性が示唆された。高齢者の血管系疾患の増加現象が見られる現在では、その対策として今後の更に研究開発が期待される。

中村論文（題目：高頻度・伸張性収縮トレーニング負荷量の下限の検討）は最大下の負荷量（最大の2/3および1/3の負荷量）を用いての高頻度・

伸張性収縮トレーニングの効果を明らかにする事であった。トレーニングは1日6回、週5回、4週間のトレーニングを実施した。その結果、2/3群では筋力及び筋厚の有意な増加が認められたが、1/3群では効果が見られなかった。この結果は高頻度・伸張性収縮トレーニングでは最大筋力の2/3以上の負荷が必要である事を示した。この研究は今後の障がい者や高齢者の筋力増加プログラム作成に応用されることが期待される。

後藤論文（題目；陸上競技長距離選手における重ね着を活用した持久性トレーニングの効果）は重ね着を用いた3日間連続での持久性トレーニングが暑熱環境下での運動時体温調節能に及ぼす影

響を明らかにする事であった。陸上競技長距離選手9名（男）を対象に、室温15度環境下で90分間のペダリング運動を3日間連続で実施した。この時、暑熱ストレスを課す条件（重ね着着衣条件）と軽装（半袖、短パンでの通常条件）とで比較した。その結果、発汗量については、重ね着着衣群は通常群に比較して有意に高い値を示した。しかし、深部体温、血漿量、汗中ナトリウム濃度などについては、いずれの条件下でも有意な差が認められなかった。競技選手にとって暑熱環境下での試合やトレーニングに対する科学的対策の必要性は重要である。その点で本研究は意義深いものであり、今後さらなる研究の発展期待される。

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員

東京大学医学部附属病院 中央施設部門
リハビリテーション部 教授

緒 方 徹

2024年に開催されたパリ・パラリンピック大会において多くのパラアスリートがメダルを獲得した。その背景には個々の選手の努力は言うまでもないが、大会に向けた様々な支援があり、それらの成果として結果であったともいえる。その中で、パラスポーツを支える科学の充実は着実に成長を遂げており、より効果的な練習法やケガの予防といったスポーツサイエンスが研究者によってパラスポーツの分野に広がりつつある。パラスポーツの分野で研究を展開することはデータ収集の環境整備、データ収集方法の工夫、そして結果の解釈など、研究の各ステップにおいて新しいハードルが存在する。その中でも研究活動が盛んになってきたことは、選手・協会・研究者の連携の在り方が次第に整ってきたことを反映しているのだろう。本研究助成においてもパラスポーツに関連する申請は年々増加しており、大変喜ばしいことである。こうした中、本号では2篇の報告が寄せられている。

染谷らの報告は聴覚障害の選手が実施するサッカー競技（デフサッカー）の日本代表選手に相当する選手層に対して、ケガの頻度と内容を調査するものである。健常者スポーツでのケガの調査はしばしばみられるが、パラスポーツ領域ではまだ少なく、本研究のように26名の長期間にわたる調査は今後の参考にもなる貴重な試みである。結果においてはデフサッカー選手において、ケガの発生頻度が高く、また足関節のケガが多いというものであった。詳細は本編を読んでいただけれ

ばと思うが、聴覚障害があることによってサッカー中の下肢のケガが増えるという知見は様々な可能性を示唆し、今後のケガ防止策の策定にもつながる重要な結果が得られている。特に2025年は東京でデフリンピックが開催されることとなり、これを機に聴覚障害への社会の理解が広がるだけでなく、その当事者の人たちが活動的な生活を送るうえでの支援方法にもこうした知見が応用されるよう展開していくことが期待される。

佐賀らの報告は一人の脳性麻痺の陸上選手に対し、その走行などのパフォーマンスを動作解析、足圧分析、エネルギー代謝分析などの多面的なアプローチで特徴を抽出しようと試みている。結果からは時間的・空間的な要素からも健常者と異なる麻痺側の動きがあり、一方でそれを代償するためと思われる動きがそこに加わっていくことが読み取れる。左右の非対称性はパラアスリートを把握・理解するうえでの重要なキーワードであり、ケガの防止やパフォーマンスの向上を目指す際も左右不均一な動きをどのように理解するかがポイントになる。今回の解析は1名のアスリートについてであるが、ここで示された手法によって今後複数の選手の解析がなされることで、集団としての選手の共通点と個々の選手の特徴が明らかになっていく。そうした研究のフレームワークを構築した研究としても位置付けられる。

2篇の報告はいずれも障害を持つ当事者が高い活動性を実践した際に、どのような体の使い方、負担、ケガが生じるのか、という一般生活に対し

でも示唆を与えてくれるテーマである。これはパラスポーツ研究の一つの役割でもあり、これまでも車いすマラソンにおけるエネルギー、暑熱対策、肩関節の管理などについての研究が臨床現場へと展開していった事例もある。これらは研究を通じてパラスポーツの意義がより高まるという側面を示すものでもあり、今後もこういった展開が広がっていくことが期待される。

一方で、パラアスリートからのデータ収集にはまだ難しさがある一面もうかがえる。研究対象者の人数や、調査にかける時間の制約、観察期間の長さの制約など、2篇の研究それぞれに一定の制約があったのではないかと想像される。人を対象とした研究において、研究対象者の人数確保や、研究の際に生じる負担の軽減はスポーツ研究に限らず常に向き合うべき課題の一つである。こうした制約を解決していく方法として、研究が研究者と選手個人との間で行われるのではなく、そこに競技団体やチームの統括者がかかわっていくこと

が考えられる。研究の中にはチームにとって直接的なメリットを感じにくいものもありうるため、チームの側にもパラスポーツ研究が持つ意義について俯瞰的視野でとらえていただき、また得られた成果がどのように展開していくのかを知る機会があればと思う。一方で、調査・計測技術の向上による負担軽減も同時に進めていく必要がある。特にセンサー類の小型化と高性能化は進み、また情報収集の際のスマートフォンの利活用の可能性も広がっている。こうした先進的技術を研究に導入するとともに、得られたデジタルデータをどのように管理するかについての研究者側の意識統一も今後進んでいくことが望まれる。

パラスポーツ研究が研究者だけでなく、競技者や競技団体も含めた共同作業として認識されることで、この研究分野の持つスポーツサイエンスから一般の生活への波及効果が高まっていくことに期待したい。

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員

神戸大学大学院人間発達環境学研究科 教授 井 上 真 理

第46回入選研究者成果報告書に掲載の被服・工学系の4件の論文について講評を担当した。サステナブルな材料学的見地からの研究、オープンウォーター競技選手の特徴を明らかにし、ウェットスーツ普及の基礎的な研究、衣服内外の温湿度を簡便に測定するための固定器具の開発に関わる研究、夏季の屋外活動におけるファン付きベスト着用の影響に関する研究の4件である。以下、順に講評を述べる。

「セルロースを原料としたサステナブルなひずみ可視化シートの創生と応用」

東京理科大学 古海誓一

バイオマスであるセルロースを原料として、一定の圧力に対して反射色を示し、さらにやわらかいゴム弾性を示す液晶材料すなわちセルロース液晶エラストマーの分子設計と合成を行った研究である。セルロースのヒドロキシ基をプロピレンオキシドでエーテル化したセルロース誘導体をヒドロキシピルセルロース (HPC) という。HPCの全てのヒドロキシ基をプロピオニル基で完全にエステル化した HPC プロピオニルエステル化物は室温では透明であるが、加熱することによって分子らせんピッチが広がり、反射ピークが長波長側にシフトすることを実験的に捉えた。すなわち、反射によるコレステリック液晶の色によって温度を検知できると筆者は考察している。また、筆者は架橋性セルロース誘導体を光架橋すると、反射色のみならずゴム弾性も示す新しいセルロース液晶エラストマー膜になることを発見し、

この膜を圧縮すると異なる色の反射に変化することを示している。この反応は可逆的で、圧縮と開放の繰り返しにも対応したとのことである。さらに、架橋性 HPC 誘導体の化学構造改良したところ、反射色だけでなく、延伸方向の柔軟性に富んだセルロース液晶エラストマー膜を実現し、一軸延伸及び開放に対して可逆的に色が変化することを実証している。このセルロース液晶エラストマー膜を手指の第2関節の皮膚に貼り付けて、指の関節を屈曲させると反射色に変色し、関節の動きに応じてリアルタイムに可逆的に変色することを実証したとのことである。本研究におけるセルロース由来のコレステリック液晶エラストマーはサステナブルなセンシングデバイスとして応用できる可能性を持つとの結論を示している。

本研究助成において、このような材料研究は珍しい。基礎的な材料研究は重要であるからこそ、この研究助成においては応用部分の検証に、より重きを置いてほしかったという想いが残る。将来に期待が持てる材料的研究であることは大いに評価するものである。

「オープンウォータースイマーの皮膚温度感覚特性とウェットスーツ普及のための基礎的研究」

新潟医療福祉大学 藤本知臣 他3名

オープンウォータースイミング (OWS) は、海や川で5～25 kmという長距離を泳ぐ水泳競技で、オリンピックの正式種目でもある。本研究は、OWS スイマーの皮膚温度感覚特性を明らかにし (実験①)、この競技におけるウェットスーツ

着用が低水温環境下での OWS 中の深部対応に及ぼす影響を明らかにする（実験②）ことを目的としている。まず、OWS 選手は一般健康成人よりも皮膚の冷感受性（冷たさに対する敏感さ）が鈍くなる、また低水温環境下での OWS 時においてウェットスーツの着用が体温の低下を防ぐことができる」と仮説を立て、実験を行っている。実験①では、OWS 選手を被験者とする OWS 群と一般健康成人を被験者とする Control 群において、ペルチェ素子でできた測定プローブ、温度センサー、熱流束センサーで構成された局所皮膚温冷覚閾値測定器を用いて、前腕部に測定プローブを押し当て、皮膚温と同じ温度から温度を上昇もしくは低下させて、被験者が温かさ、冷たさを感じた時点で申告させる実験を行っている。温かさを感じるまでに要した温度変化量および局所皮膚温感受性に2つの群で差はみられなかった。しかし、冷たさを感じるまでに要した温度変化量は OWS 群で Control 群よりも大きい傾向があり、局所皮膚冷感受性 OWS 群で Control 群よりも鈍感な傾向が見られた。すなわち、OWS 選手は皮膚冷感受性が鈍く、高い耐寒性を持つ可能性が示された。実験②では、OWS 選手を被験者として、水温 15～16℃の湖において、競泳水着もしくはウェットスーツの2条件で OWS を行い、2時間2分ごとに深部体温を計測した。その結果、ウェットスーツの着用により、競泳水着着用時よりも体温が高い値を示し、ウェットスーツ着用が高体温の維持に効果的であることが示唆された。当初の仮説を証明できたことになる。

過酷なレースにおいて訓練された選手の皮膚温度感覚特性、およびウェットスーツの選手の体温に及ぼす影響を明らかにすることができ、本研究の成果は貴重なものである。選手の安全性を守ることが重要なことであるが、ウェットスーツの不快感から着用を避けるケースもあるという。本研究のさらなる進展とともに、選手がさらに高い運

動パフォーマンスを発揮する上で着用するウェアの機能の改善も望まれる。

「衣服内および衣服外の温湿度を局所的に評価する安価で簡便な新手法の開発」

新潟大学 天野達郎 他3名

ワイヤレスで温湿度を測定できる iButton[®] を使用し、安価で簡便に衣服内環境を測定できる無拘束の固定具を開発し、実際にその固定具を用いてフィールド実験を行い、測定方法の検証を行った研究である。開発した固定具は3D プリンターで製作している。本研究では開発した固定具を用いて、通気性の異なる生地で作られた T シャツ着用時の屋外での運動時の衣服内環境を測定した。陸上部の中・長距離ランナーを被験者とし、衣服が湿潤した状態では通気性が500倍異なる生地の T シャツ着用時の衣服内温湿度、胃腸温、心拍数、平均皮膚温、局所皮膚温の測定を丁寧に行っている。iButton[®] を用いた固定具は皮膚に直接取り付けることができ、汗を多量にかくような野外の運動中にも外れることなく、衣服内温湿度を計測できることが実証された。通気性の高い生地を用いた T シャツにおいて衣服内湿度が低下することが確認された。さらに、他の測定項目における生地の違いによる差はみられなかったという結果が得られている。

衣服内温度湿度を測定する折には、皮膚と衣服の間の空間にセンサーを取り付ける必要がある。そのままセンサーを皮膚もしくは衣服に貼り付けるとセンサー部分が直接皮膚もしくは衣服に接触して、いわゆる隙間の温度湿度を測定することは難しかった。この固定具を用いることによってセンサーが皮膚と衣服の間の空間に被服からの距離を固定し、その部分に位置づいた状態で運動時の測定ができる。これは非常に有意義であり、安価で簡便に様々な場面の測定がなされ、衣服内気候の研究がさらに進展することに期待する。

「ファン付きベストの着用が夏季の屋外練習時

における高校生アスリートのパフォーマンスと熱中症予防効果に及ぼす影響」

姫路獨協大学 大谷秀憲

ファン付きベストの着用が夏季快晴条件下の屋外での強度の高い運動時における高校生アスリートの持久性及び熱中症予防効果に及ぼす影響について検証することを目的とした研究である。被験者は8月の快晴の日に、ファン付きベストを着用した条件と着用しない条件の2条件で、2時間のサッカーの練習を行い、皮膚温、心拍数を測定し、温熱感の評価を行った。また、運動前体重、尿比重、総移動距離、体液指標の測定を行っている。実験により、平均皮膚温、心拍数、暑熱感がファン付きベストの着衣により有意に上昇が抑制されたという結果が得られた。総移動距離は、ファン付きベスト着用時が非着用時よりも有意に低値となった。これらの結果から、高校生アスリートにおける夏季快晴条件下の屋外での高強度な部活動の練習時には、ファン付きベストの着用により体温調節計の負担が軽減し、熱中症予防に効果的であることが確認され、練習中の持久性パフォーマンス

は制限される可能性が示唆されたと結論づけている。先行研究と関連付けながら丁寧に考察しており、ファン付きジャケットの着用中は、全身を冷却しているわけではないが、汗で濡れている体幹部を流れる気流により蒸発性熱放散が促進され、皮膚温の上昇が抑制された結果、心拍数の上昇が軽減された可能性が考えられると考察している。

地球温暖化による暑熱ストレスが増大し、ファン付きジャケットは厳しい労働環境の中でだけでなく、日常においても見かけることが多くなった。このような研究の積み重ねにより、より効果的なファン付きジャケットの着用の仕方が明らかになることを願っている。

激しい時代の流れの中で、多様性がうたわれているが、ヒトが安全安心に心地よく過ごせる状況を維持する必要性は変わらない。生理学的な研究と共に、その状況に対応するために身に着ける材料、被服の環境を、寄稿に対応して捉える研究はさらに重要性を増している。多様な視点を踏まえた被服・工学系の分野の研究の発展を望む。

事業内容

わが国の体育・スポーツに関する学術研究の振興と健全なスポーツ活動の発展に資するため、次の事業を行う。

I. 健康の増進と体力の向上およびスポーツ科学に関する調査・研究に対する援助

(1) 研究委託：

財団において研究課題を定め、適当と思われる関係機関等に対し研究を委託する。

(2) 研究助成：

体育学，健康科学，人間工学，被服科学，運動施設工学等健康の増進と体力の向上に関する学術，およびその他スポーツ振興に寄与する学術研究に関する講座をもった大学，およびこれらの分野において教育，または研究・調査活動を積極的に行っている個人，またはグループより広く課題をつのり，その調査・研究の飛躍的発展・充実が期待されるものに対し助成金を交付する。

II. わが国スポーツの振興・発展と充実に寄与する団体に資金援助を行い，トップレベルの選手育成・強化，競技力の向上を図る。

III. スポーツの施設，用具，衣服に関する学術的資料および関連文献の収集・保存・公開を行う。

理 事・監 事

理 事 長	石 本 和 之	
常務理事	川 原 貴	一般社団法人大学スポーツ協会 副会長
理 事	押 田 芳 治	名古屋大学 名誉教授
理 事	梶 原 莞 爾	信州大学 繊維学部 繊維学部コーディネータ
理 事	島 崎 恒 藏	日本女子大学 名誉教授・ 一般社団法人日本衣料管理協会 会長
理 事	杉 浦 剛	デサントアパレル株式会社 取締役
監 事	篠 原 祥 哲	篠原祥哲公認会計士事務所 公認会計士
監 事	高 木 茂 太 市	檜垣・鎌倉・寺廣法律事務所 弁護士

評 議 員

評 議 員	小	関	秀	一	株式会社デサント 代表取締役社長
評 議 員	下	村	吉	治	名古屋大学 名誉教授・ 名古屋工業大学 名誉教授
評 議 員	永	富	良	一	東北大学産学連携機構 イノベーション戦略推進センター 特任教授
評 議 員	廣	田	孝	子	廣田アンチエイジング研究所 所長
評 議 員	塔	筋	祥	平	株式会社デサント 上席執行役員 C A O

特 別 顧 問

特 別 顧 問 猪 谷 千 春

国際オリンピック委員会 名誉委員

特 別 顧 問 山 下 泰 裕

公益財団法人日本オリンピック委員会 会長

訃 報

中 島 利 誠 氏 逝 去

令和6年2月10日 元当財団評議員 中島利誠氏（お茶の水女子大学 名誉教授）が逝去されました。

中島氏は平成5年6月より平成31年6月まで、評議員，選考委員，学術委員をつとめられました。

謹んで哀悼の意を表します。

活 動 報 告

- (1) 第 46 回課題学術研究および自由課題学術研究助成金交付

令和 6 年 3 月 22 日

- (2) 公益財団法人日本オリンピック委員会，公益財団法人日本スポーツ協会，公益財団法人日本パラスポーツ協会，一般社団法人日本体力医学会，一般社団法人日本臨床スポーツ医学会，ならびに一般社団法人女性アスリート健康支援委員会への寄付金交付

令和 6 年 3 月 29 日

- (3) 臨時書面理事会（決議の省略）

開催日：令和 6 年 5 月 15 日

議 題：① 評議員会招集の件

- (4) 定時理事会

開催日： 令和 6 年 6 月 7 日

議 題：① 令和 5 年度事業報告承認の件

② 令和 5 年度決算報告書承認の件

③ 株主権の行使の件

④ 評議員会招集の件

- (5) 第 47 回学術研究公募開始

令和 6 年 6 月 13 日

- (6) 定時書面評議員会（決議の省略）

開催日：令和 6 年 6 月 13 日

議 題：① 令和 5 年度事業報告承認の件

② 令和 5 年度決算報告書承認の件

- (7) 第 46 回学術研究成果報告書提出締切

令和 6 年 6 月 30 日

- (8) 第 47 回学術研究公募締切

令和 6 年 8 月 2 日

(9) 第 47 回学術研究公募申請書審査

令和 6 年 8 月 3 日～令和 6 年 11 月 12 日

(10) 学術委員会

開催日：令和 6 年 11 月 13 日

議 題：① 第 47 回学術研究公募審査の件

② その他

(11) 臨時書面理事会（決議の省略）

開催日：令和 6 年 12 月 27 日

議 題：① 評議員会招集の件

(12) 定時理事会，定時評議員会（同時開催）

開催日：令和 7 年 2 月 19 日

議 題：① 令和 7 年度事業計画承認の件

② 令和 7 年度収支予算承認の件

③ 定款変更（基本財産の繰り入れ）

④ 監事選任の件

(13) 助成金目録贈呈式

開催日：令和 7 年 2 月 19 日

(14) 機関誌「デサントスポーツ科学」第 46 巻発行

令和 7 年 2 月 19 日

以 上

－ 編 集 後 記 －

おかげさまで、機関誌 46 巻を 23 件の研究報告書を掲載して発行することができました。貴重なご研究の報告書を完成いただいた研究者の皆様、学術委員の皆様、また機関誌の編集・発行に携わっていただいた関係者の皆様に改めまして厚く御礼を申し上げます。

機関誌 46 巻も当財団として大切にしております研究領域である、体力・医学、被服・工学、パラスポーツを広く網羅したスポーツ科学領域の研究成果を収録できました。研究のご応募が少ないパラスポーツ領域の報告書を 2 件収録できたことは、良かったと考えています。

機関誌 44 巻から紙面機関誌から e ジャーナルに変更しました。変更して 3 年目を迎えますが、非常に多くの方により検索・閲覧をしていただいております。研究成果を現実に役立たせることを目的に広く一般に公開することを目指している当財団としまして大変喜ばしい状況です。

より多くの皆様にご研究の成果を活用いただくためにも、ご研究の成果を報告いただくにあたっては専門研究者に限らず読みやすく、わかりやすい内容となるように工夫いただけます様、お願い申し上げます。

今後ともご指導、ご鞭撻、引き続きよろしくお願いいたします。

編集局長 坪 内 敬 治

「デサントスポーツ科学」第 46 巻 DESCENTE SPORTS SCIENCE Vol. 46

(表紙デザイン 永井 一正)

発 行 人 石本 和之
編 集 人 坪内 敬治
発 行 日 令和 7 年 2 月 19 日
Feb. 19, 2025
発 行 所 公益財団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団 事務局
PUBLISHER THE DESCENTE AND ISHIMOTO MEMORIAL FOUNDATION
FOR THE PROMOTION OF SPORTS SCIENCE
〒 556-0017 大阪市浪速区湊町 1 丁目 2 番 3 号 マルイト難波ビル 13F
Maruito Namba Building 13F, 1-2-3 Minatomaichi
Naniwa-ku, Osaka 556-0017 Japan
Tel. 080-4187-3046
<http://www.descente.co.jp/ishimoto/>
E-mail zaidan@descente.co.jp

「デサントスポーツ科学」編集局
〒 567-0086 大阪府茨木市彩都やまぶき 2 丁目 3 番 2 号
Tel. 080-4027-4058, 080-1499-1719
E-mail zaidan@descente.co.jp

製 作 所 株式会社 色染社
〒 531-0041 大阪市北区天神橋 7 丁目 5 番 8 号
Tel. 06-6351-6915
ISSN 0285-5739



公益財団法人

石本記念デサントスポーツ科学振興財団

The Descente and Ishimoto Memorial Foundation
for the Promotion of Sports Science

<http://www.descente.co.jp/ishimoto/>