

デサントスポーツ科学

Vol.47

目 次

巻 頭 言

わたしのスポーツ科学研究

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

石本記念デサントスポーツ科学振興財団 学術委員 福 永 哲 夫 (1)

第 47 回助成金研究報告

【最優秀入選】

〈体力医学系〉

血管内皮機能改善のための食後高脂血症管理：身体活動量と有酸素性運動の影響

Controlling Postprandial Lipemia to Improve Vascular Endothelial Function:
Effects of Daily Physical Activity and Aerobic Exercise

立命館大学 成瀬正俊 (3)

〈体力医学系〉

運動時の左室-動脈カップリングにおける大動脈インピーダンスの寄与を解明：MRI 計測による検討

Elucidating the Contribution of Aortic Impedance to Ventricular-Arterial
Coupling During Exercise: An MRI-Based Study

産業技術総合研究所 福家真理那 (13)

【優秀入選】

〈パラスポーツ系〉

超音波を用いた四肢欠損パラアスリートの新たな体組成評価の基盤研究

A Foundational Study on Novel Body Composition Assessment Using
Ultrasound in Para-Athletes with Amputee

広島大学病院 鳥山 実 (24)

〈課題研究〉

熱的快適性は脳活動から評価できるか？

—ブレインインターフェース型熱的快適性の評価方法の開発を目指して—

Can Thermal Comfort be Evaluated from Brain Activity?

早稲田大学 渡邊裕宣 (32)

適切な Footwear 着用による身体動作の「軽やかさ」の定量化

Assessment of The Effects of Appropriate Footwear on The Comfort of Movement

森ノ宮医療大学 工藤 慎太郎 (46)

衝撃吸収材を目指したキトサン誘導体による新規高分子材料創製

Creation of Novel Chitosan-Derived Polymeric Materials for Shock Absorption

奈良先端科学技術大学院大学 網代 広治 (54)

暑熱下運動中におけるペルチェ素子による頸部冷却の有用性の検討

The Effects of Neck Cooling with Peltier Element Device

During Exercise in the Heat

北海学園大学 内藤 貴司 (62)

〈体力医学系〉

ウェアラブルセンサーを用いたバスケットボール競技中の膝関節衝撃負荷の解明

Evaluation of Knee Impact Loads During Basketball Using Wearable Sensors

東北福祉大学 横山 寛子 (72)

ウェアラブルデバイスを用いた深部体温の予測モデルの構築

—熱中症罹患リスクのリアルタイム評価法の開発を目指して—

Predictive Model for Core Body Temperature Using Wearable Devices

早稲田大学 渡邊 裕宣 (80)

スピードスケートの高い滑走速度を生み出す関節パワー発揮特性の解明

Elucidation of Joint Power Characteristics that

Generate High Skating Velocities in Speed Skating

国立スポーツ科学センター 木村 裕也 (91)

Deep Learning を用いた画像解析による足部セルフチェックシステムの開発

Development of a Foot Morphology Self-Check System by

Image Analysis Using Deep Learning

新潟医療福祉大学 小宮 諒 (107)

神経制御に基づく水中ドルフィンキックの巧みな運動制御構造の解明

Research on The Structure of Segmental Coordination Based on

Neural Control During Underwater Dolphin Kicking

筑波大学 山川 啓介 (116)

ギプス固定期間中の非固定部位での運動が筋萎縮からの回復に与える効果

The Effect of Exercise by Non-immobilized Limbs on
The Recovery From Atrophy Induced by Cast Immobilization

東 京 大 学 高 橋 祐 美 子 (127)

血流制限を併用したレジスタンス運動の有効閾値についての検討

Exploring the Effective Thresholds for Resistance Exercise
with Blood Flow Restriction

北 翔 大 学 沖 田 孝 一 (137)

爆発的な膝伸筋力発揮中の運動神経活動を非侵襲的に評価する方法の考案

Development of a Non-Invasive Method for Evaluating Motoneuron Activity
During Explosive Knee Extensor Contractions

中 京 大 学 大 学 院 西 川 太 智 (144)

筋・軟部組織の滑走性から筋疲労度を判定する AI システムの構築

Development of a System to Estimate Muscle Fatigue Level and
Provide Feedback Based on Muscle and Soft Tissue Gliding

令 和 健 康 科 学 大 学 中 井 雄 貴 (155)

女性における体幹部筋内脂肪の1年間の変化と関連する因子の検討
—若齢および高齢女性を対象として—

Factors Associated with One-Year Changes in
Trunk Intramuscular Adipose Tissue in Young and Elderly Women

名 古 屋 大 学 大 学 院 北 川 芙 南 (163)

高強度インターバルトレーニングが座位による血管内皮機能に及ぼす影響

The Effects of High-Intensity Interval Training on
Sitting-Induced Endothelial Dysfunction

中 京 大 学 森 嶋 琢 真 (172)

知的障害アスリート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 (180)

カーボローディングが体水分状態と暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響

Effects of Carbohydrate Loading on Hydration Status and Thermoregulatory
Responses During Exercise in a Hot Environment

宮 崎 大 学 塩 瀬 圭 佑 (189)

講 評

学術委員 田 島 文 博 (201)

学術委員 梶 原 莞 爾 (203)

学術委員 下 光 輝 一 (206)

学術委員 吉 岡 利 忠 (208)

学術委員 田 畑 泉 (210)

財団ニュース

事業内容 (212)

役員名簿 (213)

活動報告 (216)

わたしのスポーツ科学研究

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

石本記念デサントスポーツ科学振興財団 学術委員 福永哲夫

研究の進め方には色々なタイプがある。私の場合は「取りあえず測定する」事からスタートする。まず面白そうなテーマに関してデータを収集する事に全力を集中する。時には単なる「測定屋」と揶揄されることもある。生きている人間の機能を測ろうとする場合、しつこく測り続ける事にはそれなりの意味がある。不要なものを測ったり、必要なものを測らなかつたり、後悔することも多い。研究の効率は悪いが、この方法が私の性格にはあっている。実験の前に十分に結果を予測し、仮説を立てて研究を進めるのが一般的であろうが、私には向かないようである。

本稿では、これまでの私の研究生活をどうして経験した種々の具体的事象をあげることにより読者の参考になればと考えた次第である。

高校体育教師からスポーツ科学を目指して

1964年3月に徳島大学学芸学部保健体育科を卒業し、同年4月に保健体育教師として徳島県立小松島西高等学校に赴任した。その年の10月には東京オリンピックが開催された。当時は東京オリンピックを契機に、世界各国から新しいトレーニング理論が紹介されていた。特に私の印象が強かったのがDr Hettinger著「アイソメトリックトレーニング」であった。新任体育教師として、体育授業や部活動（陸上部）指導に必要と思われる筋力トレーニング理論を勉強していたが、この本に刺激されてさらにトレーニング研究への動機が高まってきた。そこで、高校教師を続けながら大学院進学を目指して受験勉強を始め、2年間が過ぎた。1966年4月東京大学大学院教育学研究科体育学専攻修士課程に入学でき、猪飼道夫研究室でスポーツ科学の研究を始める事になった。しかし、猪飼先生から「福永君超音波をやりなさい」の一言で私の人生が決まった。当時（1965年）、超音波は豚や牛の皮下脂肪測定に使われ、人体への応用はなかった。私のやりたい筋力トレーニング研究と、およそトレーニングと関係なさそうな超音波との関係が理解できずかなり悩んだ。悩みながら試行錯誤しながらの筋横断面積の測定方法が確立するまで2年近くを要し、修士論文（ヒトの筋力と筋断面積との関係）を仕上げる事が出来、上腕屈筋群の単位面積当たりの筋力は $6\text{kg}/\text{cm}^2$ であり男女ともに差がない事を明らかにした(Ikai & Fukunaga, *Int. Z ang Physiol.*, 1968)。さらに、3年間の博士課程では超音波法を用いて発育期の子供たちや競技選手などについて、筋断面積を測りまくった。その結果を博士論文としてまとめた。

超音波法による人体筋断面積測定法の確立

1977年東京大学教養学部赴任後、9年前の修士論文を追試した。超音波法の測定精度に疑問があったからである。しかし、単位面積当たりの筋力は $6\text{kg}/\text{cm}^2$ となり、1968年の結果と同じであった。更に、1990
デサントスポーツ科学 Vol. 47

年になり同じ筋群について MRI 法で測定した研究仲間の川上泰雄（現早稲田大学教授）の実験結果もほぼ同じ結果（6kg/cm²）であった（Kawakami et al. Eur. J. Appl. Physiol., 1994）。この川上論文でこれまでの心の霧（超音波測定法の精度に関する不安）が晴れてスッキリした事を思いだす。

超音波による「輪切り」から「縦切り」へ

修士論文の追試結果が満足するものだったことから、超音波による断面積測定に自信が付き「超音波輪切りの職人」を自負するようになった。しかし、1980年代後半になり、CT法やMRI法の出現は「超音波輪切り職人」にとっては大きなショックであった。「筋横断面積を超音波で測る時代は終わった」と思った。そこで、超音波法の生きる道を「輪切り」から「縦切り」に見出そうと試みたのは1985年頃であった。超音波での縦断画像は「鱈の開き」のようで、斜めに走る白いエコーの意味は明確ではなかった。当時、「超音波縦切り画像」測定の意味に関して研究仲間のミーティングでも賛否両論があった。様々な議論を戦わせながらも、この手法に関して強い興味を示したのが川上泰雄であった。試行錯誤を繰り返しながら pennation angle（羽状角）の測定がリアルタイムで計測できるようになり、論文としてまとめられた（Kawakami et al. J. Appl. Physiol., 1993）。この論文をきっかけに超音波法による筋束（fascicle、筋線維の束）及び腱組織の長さ計測に関する研究が加速した。一方で、MRI法による筋の生理学的横断面積の測定に興味を沸き、Dr V.R. Edgerton（UCLA教授）にお願いしてUCLAで1年間MRI法を用いての筋の生理学的横断面積の研究に従事することが出来た（Fukunaga et al. J. Orthop. Res., 1992）。

筋束及び腱組織の長さの測定

1990年台になると超音波法を用いた我々の研究チームでは、筋束や腱組織の定量する試みも数多く行われるようになってきた。その結果、筋束や腱組織の「長さ」の計測が出来るようになり、関節を構成する筋腱複合体の振舞いが筋活動により異なることが明らかになってきた（Fukashiro et al. Eur. J. Appl. Physiol., 1995）。また、従来から言われていた基礎生理学での筋の活動特性（等尺性、短縮性、伸張性）と関節の動きとがヒト生体では必ずしも一致しないことを確かめた（Fukunaga et al. J. Appl. Physiol., 1996）。さらに、大学院生の久保啓太郎（現東京大学教授）は歩行中の筋腱動態を見るために、腓腹筋上に超音波プローブを装着し、歩行時の筋と腱の動きを観察した。その結果、腓腹筋が最も活動しているとき（筋放電量が多い時）に筋束長は殆ど変化してなく（いわゆる等尺性張力発揮）、腱組織が伸長していることが明らかになった（Fukunaga et al. Proc. R. Soc. Lond., 2001）。この頃に、我々超音波チームは身体運動に関連する超音波縦断画像による筋腱複合体の動態と機能との関係に関する多くの論文を公表することが出来た。これら一連の超音波論文が認められ2003年に国際バイオメカニクス学会（ISB）の学会賞（Mybridge Medal）を受賞する事が出来た。

論文作成の苦しみと楽しさ

実験し、データが出始めると学会で発表し、論文にまとめる仕事が待っている。一般に、学会発表までは比較的順調に進むことが多いが、それを論文にまとめる段階になるとかなりペースダウンする。私は実験し、データを整理することは好きだし、ワクワクするが、論文として文章を書き始めると急にペースダウンする。今年で84歳になるが、依然として文章を書こうとするときのストレスは強い（この原稿も含めて）。それだけに、論文が掲載可になった時の感激はひとしおである。その直後は、「次々と論文が書けそう」な気がする。しかし、「次々と論文が書けた」ためしがないのは何故か。未だよくわからない。ゴルフをするときのような気持ちで論文が書ける日が待ち遠しいが、その日はきそうもない。

血管内皮機能改善のための食後高脂血症管理： 身体活動量と有酸素性運動の影響

立命館大学 成瀬正俊
(共同研究者) 同 後藤一成

Controlling Postprandial Lipemia to Improve Vascular Endothelial Function: Effects of Daily Physical Activity and Aerobic Exercise

by

Masatoshi Naruse, Kazushige Goto
Ritsumeikan University

ABSTRACT

Postprandial lipemia and reductions in endothelial function, as assessed by flow-mediated dilation (FMD), are well-established responses to high-fat meal consumption. These responses are known to be attenuated by prior aerobic exercise. Emerging evidence suggests that low daily physical activity may blunt the beneficial effects of exercise on postprandial fat metabolism, yet the effects on FMD have not been examined. Therefore, this study aimed to investigate the influence of daily step count and aerobic exercise on FMD following high-fat meal consumption. Six healthy adults completed three, 5-day trials in a randomized crossover design, each with differing physical activity levels. After 2 days of controlled activity, subjects completed 2 days of either LOW ($\leq 5,000$ steps/day) or ACTIVE ($\geq 10,000$ steps/day) step counts. On the evening of day 4, subjects performed a 60-minute cycling bout. In a separate CONTROL trial, participants followed the LOW condition without exercise. High-fat meal tolerance tests were conducted the following morning, and postprandial responses were assessed over a 6-hour period. Serum triglyceride levels were, on average, 34%

lower in the ACTIVE condition compared to CONTROL ($p < 0.05$), but no significant differences were observed between LOW and the other conditions. Brachial artery FMD was decreased at 2- and 4-hours post-meal in the CONTROL condition ($p < 0.05$). In addition, FMD was greater at 2 hours post-meal in the ACTIVE condition compared to CONTROL ($p < 0.05$). These findings suggest that prior aerobic exercise may attenuate postprandial lipemia and reductions in FMD. However, low daily physical activity may limit the extent of these benefits. Further research with larger sample sizes is warranted to confirm these effects.

キーワード

身体不活動, 高脂血症, 有酸素性運動, 血管内皮機能, 動脈硬化

Keyword

physical inactivity, postprandial lipemia, aerobic exercise, endothelial function, atherosclerosis

要 旨

本研究では, 身体活動量と有酸素性運動が高脂質食摂取後の血中中性脂肪濃度と血管内皮機能に及ぼす影響を検討した。健康成人6名を対象に, 以下の3条件で5日間の実験を実施した: 不活動 ($\leq 5,000$ 歩/日), 不活動+運動, 活動 ($\geq 10,000$ 歩/日)+運動。初めの2日間は全条件5,000-7,500歩/日とし, 次の2日間は各条件の活動量とした。4日目午後6時に60分間の自転車運動を実施(運動条件のみ), 5日目朝に脂質負荷試験を行い, 食後生理応答を6時間後まで評価した。血清中性脂肪濃度は, 活動+運動条件において不活動条件よりも平均34%低値を示した ($p < 0.05$)。血管内皮機能は, 不活動条件で食後2, 4時間後に有意に低下した ($p < 0.05$)。また, 活動+運動条件で食後2時間後に不活動条件よりも高値を示した ($p < 0.05$)。不活動+運動条件では, 他条件との有意な差が認められなかった。有酸素性運動が食後高脂血症や血管内皮機能低下を軽減する効果は, 日中の身体不活動によって制限される可能性が示唆された。

緒 言

食後に血中の中性脂肪濃度が著しく上昇する食後高脂血症は, 動脈硬化の進行を促進する¹⁾。また, 食後高脂血症を引き起こす高脂質食の摂取は, 動脈硬化初期の兆候とされる血管内皮機能の低下を一時的に誘発することが報告されている²⁾。現代人の多くは, 1日に複数回の食事を摂取しており, 日中の大半を食後の状態で過ごしている。そのため, 食後の中性脂肪濃度の上昇や血管内皮機能の低下を抑制することは, 心血管疾患予防において重要である。

有酸素性運動は, 食後高脂血症や食後の血管内皮機能低下を抑制する有効な手段であり, 動脈硬化予防として推奨されている^{3,4)}。しかし近年, 日中の身体不活動によって, 食後高脂血症を抑制する運動効果が消失する可能性が指摘されている⁵⁾。これは, 中程度の強度で週に150分間の有酸素性運動などの推奨運動量を満たしていても, 日中の座位姿勢が長時間に及ぶ場合, 心血管疾患リスクが高まるという報告とも一致する⁶⁾。

そこで本研究では, 食後の血管内皮機能低下を

抑制する運動効果が、日中の身体不活動によって影響を受けるかどうかを検証することを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 対象者

運動習慣のない健康な成人男女6名(女性5名, 男性1名)を本研究の対象とした(表1)。全ての被験者に喫煙歴は無く、医薬品やサプリメント等の習慣的な服用もしていなかった。本研究は、立命館大学倫理審査委員会の承認を受けて実施された。全ての被験者に対し、実験の主旨、内容および安全性に関する十分な説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。

表1 被験者特性

項 目	
被験者数(女性)	6(5)
年齢(歳)	24±1
身長(cm)	166±8
体重(kg)	58.6±9.5
BMI	21±2
体脂肪率(%)	25.1±4.9
収縮期血圧(mmHg)	105±8
拡張期血圧(mmHg)	67±3
平均動脈圧(mmHg)	79±5
最大酸素摂取量(L/分)	1.99±0.57
最大酸素摂取量(mL/kg/分)	33.8±5.7
最高心拍数(回/分)	189±8

データは平均±標準偏差。BMI, Body mass index.

1. 2 実験概要

各被験者は、それぞれ身体活動量の異なる5日

間におよぶ実験を3回実施した(図1)。各実験は以下の3フェーズで構成された。①最初の2日間は身体活動量のコントロールとして機能し、身体活動量を5,000-7,500歩/日とした。②次の2日間は、身体活動量を5,000歩/日以下(不活動条件, 不活動+運動条件)もしくは10,000歩/日以上(活動+運動条件)とした。不活動+運動条件および活動+運動条件では、4日目午後には60分間の自転車ペダリング運動を最大酸素摂取量の60%の強度で実施した。③5日目午前には、全ての条件において脂質負荷試験を実施し、高脂質食摂取後の生理応答を摂取6時間後まで測定した。各条件の実施順序はランダムとし、それぞれ1週間以上の間隔をあけて実施した。

1. 3 事前測定

1条件目1日目の1週間以上前に、生体電気インピーダンス法(InBody770, インボディ・ジャパン, 東京)による体組成測定, 最大酸素摂取量測定, および運動負荷決定のための最大下運動試験を実施した。

最大酸素摂取量は, 自転車エルゴメーター(Aerobike 75XLIII, コナミスポーツクラブ, 東京)を用いた漸増負荷試験により測定した。呼気ガス分析装置(AE-310S, ミナト医科学, 大阪)を使用し酸素摂取量および呼吸交換比を30秒毎に測定した。呼気ガス分析装置の校正は、各測定の前



図1 実験の概要

に行った。運動中は心拍計 (H10, Polar Electro, Finland) を用いて心拍数を測定した。被験者は、2分間のウォームアップ (女性: 50W, 男性: 100W) を行い、その後疲労困憊に達するまでランプ負荷法 (女性: 毎分 15W, 男性: 毎分 25W) により運動負荷を増加させた。測定成功基準は、酸素摂取量の頭打ち, 呼吸交換比 ≥ 1.10 , もしくは測定終了時の自覚的運動強度 ≥ 19 とした。

15分以上の休息の後, 最大酸素摂取量の60%に相当する運動負荷を決定するため, 10-15分間の最大下運動試験を自転車エルゴメーター (828E, Monark Exercise, Sweeden) を用いて実施した。この際, 実験4日目に実施する運動の負荷と回転数を決定した。

1. 4 身体活動量統制

実験期間中, 被験者には実験以外の運動は控え, 身体活動量を各条件で規定された歩数に調整するよう指示した (図1)。歩数は腰部装着タイプの加速度計 (HJA-750C, オムロンヘルスケア, 京都) を起床時から就寝時まで, 入浴時を除いて常に着用した。また, 実験期間中は脂質の多い食事は控え, 全ての食事を記録した。

不活動+運動条件および活動+運動条件では, 実験4日目の午後 (翌朝の高脂質食摂取18時間前) に有酸素性運動を実施した。自転車エルゴメーター (828E, Monark Exercise, Sweeden) を用いて, 2分間のウォームアップを行った後, 最大酸素摂取量の60%まで運動負荷を引き上げ, 60分間の運動を実施した。60分の運動開始後0-10分, 20-30分, 40-50分に呼吸ガス代謝を測定し, 各測定時間の後半5分間を解析に使用した。自覚的運動強度は, 運動開始10分, 30分, および50分の時点で評価した。心拍数は運動中連続して測定した。自転車エルゴメーターにはペダル型パワーメーター (Rally RS200, Garmin, United States) を装着し, 仕事率を連続して測定した。60分間

の運動終了後, 2分間のクールダウンを約50Wの運動負荷で行った。

1. 5 脂質負荷試験

被験者は, 実験5日目の午前, 11時間以上の絶食状態で実験室へ入室した。30分間の仰臥位安静の後, 血圧, 呼気ガス代謝, 採血, および血管内皮機能の測定を行った。その後高脂質食を摂取し, 摂取2, 4, 6時間後に同様の測定を, それぞれ15分の仰臥位安静の後に実施した。

1. 5. 1 試験前統制

脂質負荷試験2日前からカフェインの摂取を控えるよう被験者に指示した。また, 脂質負荷試験前日には, アルコール, 医薬品, ビタミン剤やその他のサプリメントの摂取を控え, 規定食 (総カロリー: 699 kcal, 炭水化物: 109 g, 脂質: 19 g, タンパク質: 27 g) を21時までに摂取し, その後は絶食 (飲水のみ可) とした。

1. 5. 2 高脂質食

高脂質食は, パン, ハンバーグ, チーズで構成され, 体重1kgあたり約15kcal, 脂質68%となるよう各被験者の体重によって数量を調整した (カロリー: 15.1 kcal/kg, 炭水化物: 0.68 g/kg, 脂質: 1.14 g/kg, タンパク質: 0.51 g/kg)。摂取後は, 実験終了まで実験室において安静で過ごした。その際, 飲水, 手洗いの使用, PC・スマートフォンでの作業は自由に行った。

1. 5. 2 呼気ガス代謝

高脂質食摂取前, 摂取2, 4, 6時間後に仰臥位安静のまま10分間呼気ガス代謝を測定し, 後半5分のデータを解析に使用した。酸素摂取量, 二酸化炭素排出量, 呼吸交換比を利用してエネルギー消費量および脂質酸化率を算出した⁷⁾。

1. 5. 3 血液検体

各呼気ガス代謝測定後に, 左腕肘正中静脈から採血した。採取した血液は, 微量を血糖値の測定に使用し, 残りの血液は血清分離剤入りの真空採

血管で30-60分間室温で静置した後、1,710 gで10分間、4℃で遠心分離し、血清成分を分析までの間-80℃で保管した。

血糖値は、採血直後にグルコース測定器（フリースタイルフリーダムライト、ニプロ、大阪）を用いて測定した。血清中の中性脂肪および遊離脂肪酸は酵素法、HDLコレステロールおよびLDLコレステロールは直接法、インスリンは化学発光酵素免疫測定法を用いてそれぞれ分析した（SRL、東京）。

1. 5. 4 血管内皮機能

血管内皮機能は、各採血後に右腕上腕動脈において測定したFMDにより評価した。FMD測定は、仰臥位にて既存のガイドラインに準拠して実施した⁸⁾。血管径および血流速度は、リニア型プローブとドプラ機能付き超音波診断装置（12L-RSおよびVivid q、GE横河メディカルシステム、東京）を用いて同時に測定した。超音波プローブは、カスタム設計のホルダーを用いて動脈に対して60°の角度で固定し、測定部位には皮膚上にプローブ位置のマークを付けた。安静時の血管径および血流速度は2分間記録した。その後、右前腕に装着したカフを220 mmHgに加圧して5分間駆血した。カフ除圧後は、血管径および血流速度を3分間記録した。超音波画像は、ビデオキャプチャ（AVio, Epiphan Video, Canada）を用いてパーソナルコンピュータに記録した。

超音波画像の解析には、画像解析ソフト（FMD Studio, Quipu, Italy）を用いた。安静時血管径は2分間の平均値とした。最大血管径は、カフ除圧後に血管が最も拡張した値とした。FMDは、安静時血管径から最大血管径への変化率とした。剪断速度（shear rate: SR）は、以下の通り算出した： $4 \times \text{平均血流速度 (cm/秒)} / \text{血管径 (cm)}$ 。駆血開放直後から最大血管径に至るまでの、安静時を上回るSRの曲線下面積（SR area under the curve: SR AUC）を台形公式により算出した。

1. 6 統計解析

実験期間中の歩数は、反復測定二元配置分散分析（条件×実験日程）を用いて解析した。60分間の有酸素性運動中の指標の解析には、対応のあるt検定を用いた。脂質負荷試験における食後6時間の総エネルギー消費量および平均脂質酸化率は、反復測定一元配置分散分析を用いて解析した。血液指標および血管内皮機能の解析には、反復測定二元配置分散分析（条件×時間）を用いた。分散分析の事後検定にはBonferroni補正による多重比較を行った。有意水準は、 $p < 0.05$ とした。全ての測定値は平均±標準偏差で示した。

2. 研究結果

2. 1 身体活動量

実験期間中の歩数を図2に示す。活動+運動条件では、3、4日目の歩数が、同条件1、2日目および同日の他条件と比較して有意に高値を示した（ $p < 0.05$ ）。不活動+運動条件では、3、4日目の歩数が、同条件1、2日目と比較して低値を示した（ $p < 0.05$ ）。不活動条件では、3日目の歩数が同条件1、2日目よりも低値を示し（ $p < 0.05$ ）、4日目の歩数は同条件2日目と比較して低値を示した（ $p < 0.05$ ）。

4日目の有酸素性運動中における運動強度（%最大酸素摂取量）、酸素摂取量、仕事率、心拍数、および自覚的運動強度には、不活動+運動条件と活動+運動条件の間に有意な差が認められなかった（表2）。

2. 2 脂質負荷試験

2. 2. 1 エネルギー代謝

高脂質食摂取後6時間の総エネルギー消費量には、3条件間で有意な差が認められなかった（ $p > 0.05$, 図3A）。食後6時間の脂質酸化率は、不活動条件と比較して活動+運動条件で有意に高値を示した（ $p < 0.05$, 図3B）。

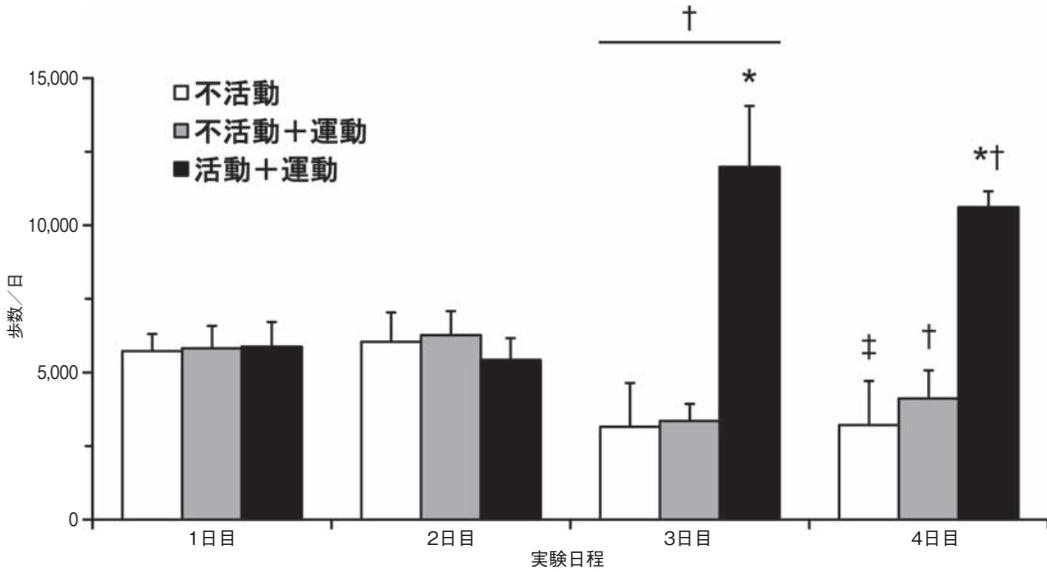


図2 実験期間中の身体活動量
 *p<0.05 (vs.同日不活動, 不活動+運動), †p<0.05 (vs.同条件1日目, 2日目), ‡p<0.05 (vs.同条件2日目)

表2 60分間の有酸素性運動

項目	不活動+運動	活動+運動
運動強度(%最大酸素摂取量)	60±1	60±1
酸素摂取量(L/分)	1.19±0.34	1.20±0.34
仕事率(W)	100±32	99±33
心拍数(回/分)	154±11	153±11
自覚的運動強度	12±2	13±2

データは平均±標準偏差. 全項目において条件間のp>0.05.

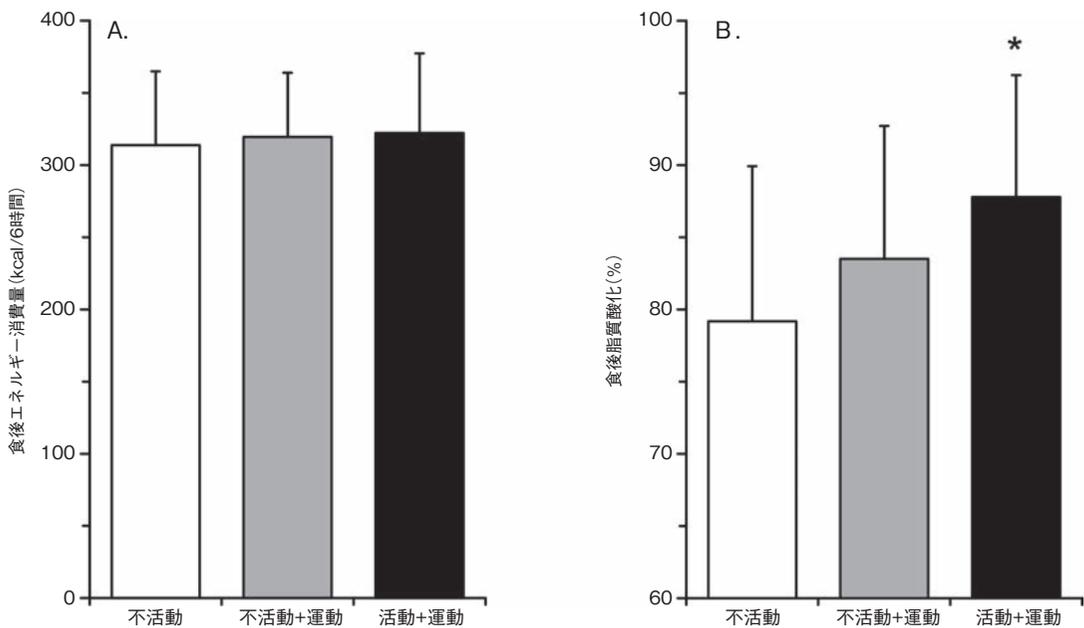


図3 高脂質食摂取後の呼気ガス代謝
 A. 食後6時間のエネルギー消費量. 条件間のp>0.05. B. 食後6時間の平均脂質酸化率. *p<0.05 (vs.不活動)

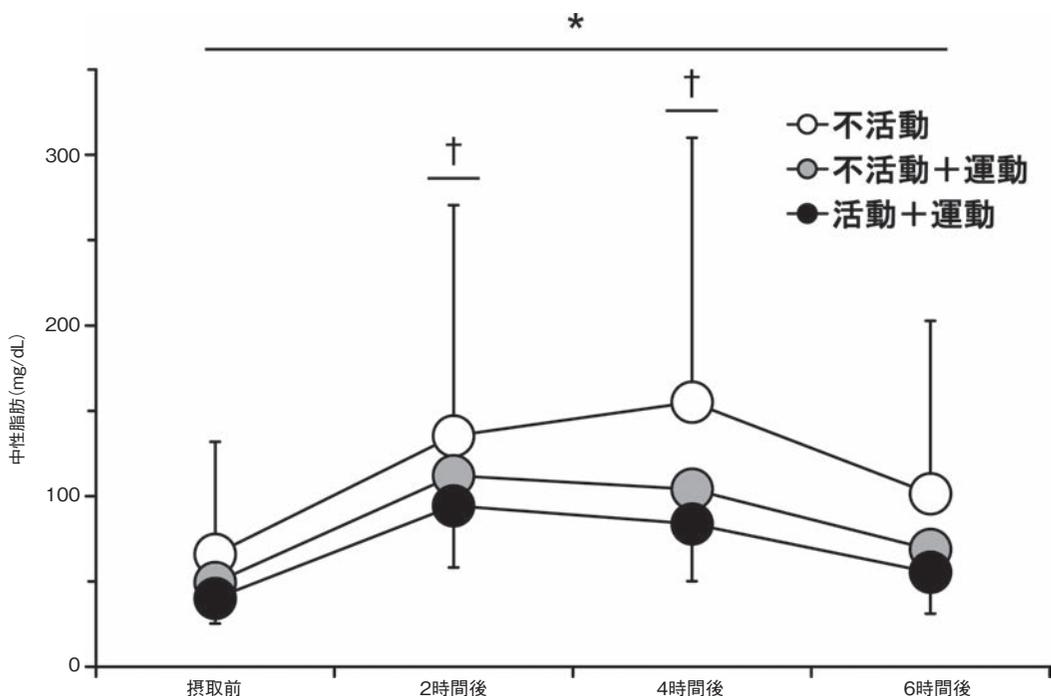


図4 高脂質食摂取による血清中性脂肪濃度の変化
*p<0.05 (不活動vs.活動+運動), †p<0.05 (vs.摂取前)

表3 脂質負荷試験による血液指標の変化

項目	条件	絶食時	2時間後	4時間後	6時間後
インスリン (μ IU/mL)	不活動	5 \pm 1	18 \pm 10* [†]	7 \pm 2	5 \pm 3
	不活動+運動	4 \pm 1	16 \pm 7* [†]	9 \pm 7	4 \pm 1
	活動+運動	4 \pm 1	15 \pm 5* [†]	8 \pm 5	4 \pm 1
遊離脂肪酸 (μ Eq/L)	不活動	445 \pm 75	345 \pm 83* [†]	614 \pm 124*	660 \pm 145*
	不活動+運動	441 \pm 86	359 \pm 69* [†]	631 \pm 88* [†]	642 \pm 81*
	活動+運動	557 \pm 131	401 \pm 71* [†]	605 \pm 84*	690 \pm 60*
HDL コレステロール (mg/dL)	不活動	62 \pm 18	60 \pm 15	59 \pm 16	60 \pm 15
	活動+運動	61 \pm 16	60 \pm 16	58 \pm 15	60 \pm 16
LDL コレステロール (mg/dL)	不活動	64 \pm 19	64 \pm 21	63 \pm 21	65 \pm 20
	活動+運動	76 \pm 15	74 \pm 13	78 \pm 14	81 \pm 15
血糖値 (mg/dL)	不活動	73 \pm 14	73 \pm 15	74 \pm 15	78 \pm 14
	活動+運動	71 \pm 19	70 \pm 19	72 \pm 18	75 \pm 18
血糖値 (mg/dL)	不活動	90 \pm 5	96 \pm 4*	93 \pm 5	92 \pm 5
	不活動+運動	92 \pm 3	93 \pm 6*	94 \pm 5	92 \pm 5
	活動+運動	86 \pm 8	95 \pm 7*	94 \pm 5	89 \pm 6

データは平均 \pm 標準偏差. 全項目において条件間のp>0.05. 時間の主効果:*p<0.05 (vs.絶食時), †p<0.05 (vs.4時間後, 6時間後).

2. 2. 2 血液指標

血清中の中性脂肪は, 不活動条件と比較して活動+運動条件で低値を示した (p<0.05, 図4). また, 全ての条件において食後2, 4時間後に, 摂取前と比べて有意な増加が認められた (p<0.05).

その他の血液指標には, 条件間の差が認められなかった (p>0.05, 表3). インスリンは, 食後2時間で他の測定時点よりも高値を示した (p<0.05). 遊離脂肪酸は, 食後2時間で低下し, 4, 6時間後に上昇した (p<0.05). HDLコレステロールおよ

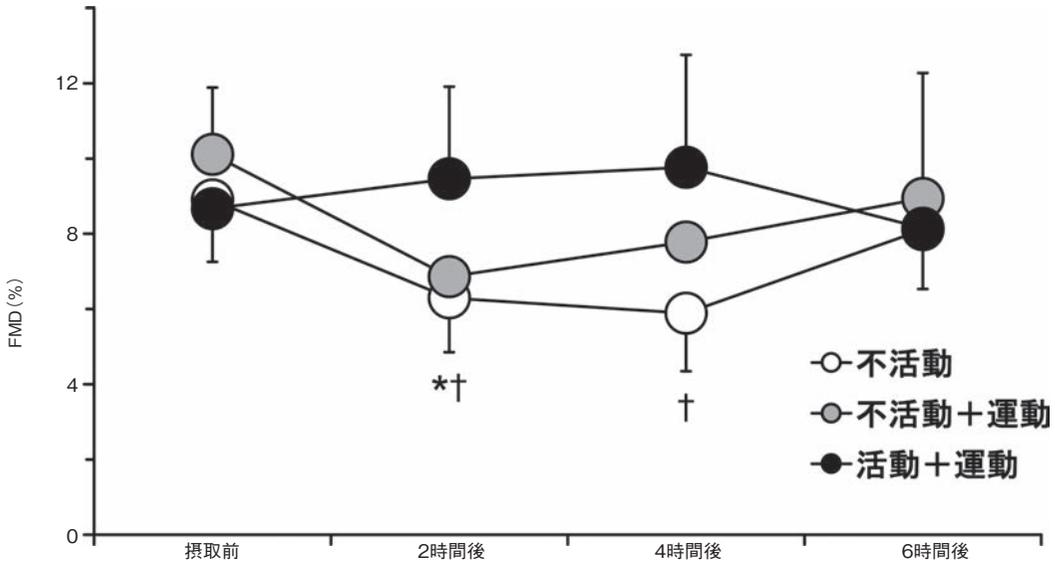


図5 高脂質食摂取による血管内皮機能 (flow-mediated dilation: FMD) の変化
*p<0.05 (不活動vs.活動+運動), †p<0.05 (vs.摂取前)

びLDLコレステロールには、高脂質食摂取による変化が認められなかった ($p>0.05$)。血糖値は、食後2時間でわずかに増加した ($p<0.05$)。

2. 2. 3 血管内皮機能

FMDは、不活動条件において高脂質食摂取前と比較して、摂取2、4時間後に低下した ($p<0.05$, 図5)。また、摂取2時間後において、不活動条件に比べて活動+運動条件で高値を示した ($p<0.05$)。FMDをそれぞれのSR AUCで除した場合にも同様の結果が得られた。SR AUCには、条件間の差および高脂質食摂取による変化が認められなかった ($p>0.05$)。

3. 考 察

本研究では、高脂質食摂取による中性脂肪濃度およびFMDの変化を異なる身体活動量条件で比較した。その結果、5,000歩/日以下の不活動の後では、脂質負荷試験において食後の高脂血症およびFMDの低下がみられたが、10,000歩/日+60分間の有酸素性運動では、これらの変化が抑制された。一方で、5,000歩/日+60分間の有酸素性

運動では、有意な抑制効果は確認されなかった。したがって、日中に座位中心のオフィスワークをして、仕事終わりに運動をするという典型的な生活パターンにおいて、運動の動脈硬化予防の効果が十分に発揮されない可能性がある。

不活動条件と比較した際の、活動+運動条件での食後脂質酸化率の増加と食後高脂血症の抑制率は、それぞれ12%と34%であり、これらの結果は、これまでに報告されている値と概ね一致する^{3,9)}。一方、不活動+運動条件では、これらの値はそれぞれ6%と23%に留まった。本研究では、2日間にわたる5,000歩/日以下の不活動を採用したが、これまでに、運動の食後高脂血症抑制効果を身体不活動によって消失させたことを報告した先行研究では、脂質負荷試験前4日間を4,000歩/日以下で過ごしており、不活動の期間が長引くほど、運動効果がより減弱する可能性を示している¹⁰⁾。

上腕動脈FMDにおいても、中性脂肪濃度と同様に、不活動による運動効果の減弱が示唆される結果が得られた。中性脂肪は、血管内皮機能と密接に関連するものの、現在のところ直接的な動脈硬化誘発因子ではないとされている¹¹⁾。ま

た、静脈内への中性脂肪投与によって血清中性脂肪濃度が約3倍に上昇した際に、FMDには変化がみられなかったという報告もあることから、一時的に上昇した中性脂肪が直接血管拡張反応を抑制している可能性は低い¹²⁾。本研究で測定した中性脂肪以外の血液指標では条件間の差が認められなかったことから、インスリン、遊離脂肪酸、HDLおよびLDLコレステロール、そしてグルコースが、このFMDの変化の条件差に関与している可能性も低いと考えられる。

FMD低下の要因としては、一酸化窒素 (nitric oxide:NO)、酸化ストレス、炎症反応が挙げられる。血管拡張物質であるNOは、血管内皮機能の維持・向上に重要な役割を持っている。これまでに、高脂質食摂取は、NOの生物学的利用能を低下させ、急性および慢性の血管内皮機能低下をもたらす可能性が示されている^{13,14)}。また、高脂質食と抗酸化作用を持つビタミンD摂取の併用によりFMDの低下が抑制されたことから、酸化ストレスの食後のFMD低下への関与が示唆される¹⁵⁾。この他にも、高脂質食摂取後のFMD低下に付随して、遊離基やチオバルビツール酸反応物質といった酸化ストレス指標の上昇や、抗酸化酵素であるグルタチオンペルオキシダーゼの低下が報告されている^{16,17)}。さらに、高脂質食摂取後のNOや酸化ストレスの変化に、炎症反応が関連している可能性も示唆されている^{2,18,19)}。しかしながら、高脂質食摂取前の身体活動量や運動が、これらの要素にどのような影響を与えるのかは明らかになっておらず、今後の検証が必要である。

4. まとめ

本研究は、日中の身体不活動が、高脂質食摂取による血管内皮機能低下を抑制する運動効果を減弱させる可能性を示した。動脈硬化の予防には、単なる運動習慣だけでなく、身体活動量全体の見直しが重要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、実験の実施にご協力頂きました、立命館大学の大学院生の皆様に深く感謝致します。

文 献

- 1) Aronson D., Rayfield E.J., How hyperglycemia promotes atherosclerosis: molecular mechanisms. *Cardiovasc Diabetol*, 1: 1(2002)
- 2) Fewkes J.J., Kellow N.J., Cowan S.F., Williamson G., Dordevic A.L., A single, high-fat meal adversely affects postprandial endothelial function: a systematic review and meta-analysis., *Am. J. Clin. Nutr.*, 116: 699-729(2022)
- 3) Freese E.C., Gist N.H., Cureton K.J., Effect of prior exercise on postprandial lipemia: an updated quantitative review., *J. Appl. Physiol. (1985)* 116: 67-75(2014)
- 4) Tucker W.J., Sawyer B.J., Jarrett C.L., Bhammar D.M., Ryder J.R., Angadi S.S., Gaesser G.A., High-intensity interval exercise attenuates but does not eliminate endothelial dysfunction after a fast food meal., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 314: H188-h194(2018)
- 5) Coyle E.F., Burton H.M., Satiroglu R., Inactivity causes resistance to improvements in metabolism after exercise., *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 50: 81-88 (2022)
- 6) Biswas A., Oh P.I., Faulkner G.E., Bajaj R.R., Silver M.A., Mitchell M.S., Alter D.A., Sedentary time and its association with risk for disease incidence, mortality, and hospitalization in adults: a systematic review and meta-analysis., *Ann. Intern. Med.*, 162: 123-132(2015)
- 7) Frayn K.N., Calculation of substrate oxidation rates in vivo from gaseous exchange., *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.*, 55: 628-634(1983)
- 8) Thijssen D.H.J., Bruno R.M., van Mil A., Holder S.M., Fata F., Greyling A., Zock P.L., Taddei S., Deanfield J.E., Luscher T., Green D.J., Ghiadoni L., Expert consensus and evidence-based

- recommendations for the assessment of flow-mediated dilation in humans., *Eur. Heart J.*, **40**: 2534-2547 (2019)
- 9) Burton H.M., Coyle E.F., Daily step count and postprandial fat metabolism., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **53**: 333-340 (2021)
- 10) Akins J.D., Crawford C.K., Burton H.M., Wolfe A.S., Vardarli E., Coyle E.F., Inactivity induces resistance to the metabolic benefits following acute exercise., *J. Appl. Physiol. (1985)*, **126**: 1088-1094 (2019)
- 11) Talayero B.G., Sacks F.M., The role of triglycerides in atherosclerosis., *Curr. Cardiol. Rep.*, **13**: 544-552 (2011)
- 12) Gokce N., Duffy S.J., Hunter L.M., Keaney J.F., Vita J.A., Acute hypertriglyceridemia is associated with peripheral vasodilation and increased basal flow in healthy young adults., *Am. J. Cardiol.*, **88**: 153-159 (2001)
- 13) Magné J., Huneau J.F., Delemasure S., Rochette L., Tomé D., Mariotti F., Whole-body basal nitric oxide production is impaired in postprandial endothelial dysfunction in healthy rats., *Nitric. Oxide.*, **21**: 37-43 (2009)
- 14) Luiking Y.C., Engelen M.P., Deutz N.E., Regulation of nitric oxide production in health and disease., *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care.*, **13**: 97-104 (2010)
- 15) Plotnick G.D., Corretti M.C., Vogel R.A., Effect of antioxidant vitamins on the transient impairment of endothelium-dependent brachial artery vasoactivity following a single high-fat meal., *Jama*, **278**: 1682-1686 (1997)
- 16) Anderson R.A., Evans M.L., Ellis G.R., Graham J., Morris K., Jackson S.K., Lewis M.J., Rees A., Frenneaux M.P., The relationships between postprandial lipaemia, endothelial function and oxidative stress in healthy individuals and patients with type 2 diabetes., *Atherosclerosis*, **154**: 475-483 (2001)
- 17) Tsai W.C., Li Y.H., Lin C.C., Chao T.H., Chen J.H., Effects of oxidative stress on endothelial function after a high-fat meal., *Clin. Sci. (Lond.)*, **106**: 315-319 (2004)
- 18) Nappo F., Esposito K., Cioffi M., Giugliano G., Molinari A.M., Paolisso G., Marfella R., Giugliano D., Postprandial endothelial activation in healthy subjects and in type 2 diabetic patients: role of fat and carbohydrate meals., *J. Am. Coll. Cardiol.*, **39**: 1145-1150 (2002)
- 19) Emerson S.R., Kurti S.P., Harms C.A., Haub M.D., Melgarejo T., Logan C., Rosenkranz S.K., Magnitude and timing of the postprandial inflammatory response to a high-fat meal in healthy adults: a systematic review., *Adv. Nutr.*, **8**: 213-225 (2017)

運動時の左室-動脈カップリングにおける大動脈インピーダンスの寄与を解明：MRI計測による検討

産業技術総合研究所 福家 真理那
(共同研究者) 同 樽 味 孝
同 東 本 翼
九州大学病院 稗 田 道 成

Elucidating the Contribution of Aortic Impedance to Ventricular-Arterial Coupling During Exercise: An MRI-Based Study

by

Marina Fukuie, Takashi Tarumi, Tsubasa Tomoto

Human Informatics and Interaction Research institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Tehnology (AIST)

Michinari Hieda

Department of Medicine and Biosystemic Science Hematology, Oncology, and Cardiovascular Medicine, School of Medicine Kyushu University Fukuoka Japan

ABSTRACT

Because exercise alters both cardiac and vascular dynamics, the impact of aortic impedance on left ventricular ejection is likely to vary depending on the mode of exercise and an individual activity level. Aortic impedance, which represents the opposition to pulsatile blood flow, is a key determinant of left ventricular afterload and plays an important role in ventricular-arterial coupling. In this study, we aimed to investigate the influence of aortic impedance on left ventricular dynamics under two conditions: the acute effects of different exercise modes (Study 1) and the chronic adaptations observed in endurance-trained athletes (Study 2). In Study 1, we assessed

the relationship between aortic impedance and indices of left ventricular mechanical dynamic during rhythmic handgrip and dynamic cycling exercises. Handgrip exercise led to a selective increase in the pulsatile components of aortic impedance, particularly the characteristic impedance, which corresponds to aortic wall distensibility. These changes were significantly associated with increases in myocardial oxygen demand and mechanical energy output of the left ventricle. In contrast, cycling exercise decreased aortic impedance across a wider frequency range, including both characteristic and low-frequency harmonics. However, these changes showed no clear association with left ventricular mechanical dynamic indices, suggesting that different exercise modalities may influence ventricular-arterial interaction through distinct mechanisms. In Study 2, endurance-trained athletes exhibited chronically lower pulsatile aortic impedance at rest, which was associated with lower myocardial oxygen demand. However, no distinct features were found in mechanical energy indices. Together, these findings suggest that the effects of aortic impedance on ventricular-arterial coupling are modulated by both acute exercise mode and long-term exercise habits. Understanding these interactions may provide physiological insights for individualized exercise prescriptions aimed at optimizing cardiovascular efficiency.

キーワード

大動脈インピーダンス, 左室-動脈連関, 左室エネルギー動態, 運動様式, 運動時測定

Keyword

Aortic input impedance, Left ventricular-arterial coupling, Left ventricular energetics,

Exercise modality, Exercise measurement

要 旨

運動強度によって左室と動脈の循環生理学的挙動が動的に変化するため、大動脈インピーダンスの左室駆出への影響は運動様式や運動習慣により差異が生じると考えられる。本研究では、運動の急性効果として、ハンドグリップおよび自転車運動時の大動脈インピーダンスと左室のエネルギー動態の関係（課題1）、および慢性効果として持久系 Athlete におけるこれら指標の特性（課題2）を検討した。課題1では、ハンドグリップ運動で拍動性の高いインピーダンスが増加し、心筋酸素需

要や機械的エネルギーの増加と関連していた。一方、自転車運動ではインピーダンスは全体的に低下したが、左室の指標との明確な関連はみられなかった。課題2では、Athleteは拍動性の高いインピーダンスが低く、心筋酸素需要の低さと関連していたが、機械的エネルギーには特異的な特徴は認められなかった。以上より、大動脈インピーダンスは運動様式や運動習慣に依存して左室-動脈カップリングに影響を与えることが示唆された。

緒 言

左室からの血液駆出は、大動脈圧（後負荷）に

打ち勝ち、大動脈弁を開放することによって達成される。この後負荷は拍動性を有しており、心拍ごとの血圧・血流変動を反映する大動脈インピーダンスによって定量的に評価される。一方、臨床研究で一般的に用いられている末梢血管抵抗や平均動脈圧は、定常的な後負荷の指標であるため、心臓と血管がダイナミックに相互作用するヒト循環における本質的な負荷を捉えきれない可能性がある。

運動中、心臓は拍出量を増加させるために心拍数や収縮力を増強する一方、動脈系は血管トーンスでの調整を通じて全身の血流配分を制御する。これらの生理応答は、左室と動脈系の相互作用(左室-動脈カップリング)に変化をもたらし、左室駆出特性や左室エネルギー駆動効率にも影響を及ぼすと考えられる。特に、運動時における動脈系の動的な応答変化が左室エネルギー駆出効率に変化をもたらす可能性があり、この機序を理解することは、運動処方最適化や循環器疾患患者におけるリスク評価に重要な知見を提供する。

以上を踏まえ、本研究では、2種類の運動様式(レジスタンス運動および有酸素運動)における大動脈インピーダンスが左室エネルギー動態へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。また、第二の目的として、我々が以前報告¹⁾した持久系Athleteにおけるインピーダンス特性が、左室機械的・代謝的エネルギーと関連するかどうかを検討し、持久性運動の慢性効果(トレーニング適応)についても併せて評価した。

1. 方法

(課題1) 対象者 本課題では健常若年者19名からデータを収集した。心血管疾患及び運動器障害の既往がある者、現在または過去に喫煙歴のある者は除外した。また、MRIの安全基準を満たしていない者、閉所恐怖症をもつ者も除外対象者とした。すべての実験手続き、プロトコルは産業技

術総合研究所の倫理審査委員会の承認の下実施された。すべての対象者から、書面によるインフォームドコンセントが取得された。

(課題1) 実験プロトコル 対象者には、実験2時間以上前の絶食および測定24時間以上前からの激しい運動やカフェインの摂取を控えるように指示した。実験室に来室後、実験説明、形態的身体特性の計測を実施した。その後、MRIテーブルの上で仰臥位にさせ、左室短軸画像、大動脈血流画像を取得した。安静時の撮像終了後に、仰臥位安静姿勢のまま、利き手に関係なく、全対象者共通で右手での最大握力(MVC)テスト(TSD121B-MRI, BIOPAC Systems, California, U.S.A.)を2回行い、最大値のほうをMVCとして採用した。2分程度の安静後、40% MVCで3秒収縮・3秒弛緩の反復性ハンドグリップ運動(RHG)を行わせた。定常状態の達成のため、運動開始1分間後に胸部MRIの撮像を始めた。左室CINE画像の撮像終了まで運動を継続させた。撮像終了後、2分間安静にし、同じ手順で位相差コントラスト法(PC-MRI)によるRHG中の大動脈血流波形を取得した。各撮像中間で左上腕血圧から一般伝達関数法による大動脈圧波形の記録を行った。運動中、対象者はモニターの握力のリアルタイム表示を見ながら力を調整した。

RHG終了後、一度MRI室から退出し、20分間程度の安静を取ってから、再度MRI室に入室し、安静時の左室短軸CINE画像および大動脈血流波形を取得した。その後、予備実験で心拍数100拍/分となる絶対強度(男性15 watt, 女性10 watt)でケーデンス50回転/分の自転車運動をさせた。なおケーデンスは、メトロノームを用いて維持させた。定常状態での撮像を行うため運動開始1分後から撮像を始めた。左室短軸CINE画像撮像に連続して大動脈CINE PC-MRI撮像を行った。大動脈PC-MRI撮像終了後の大動脈圧波形の記録が終わるまで運動は継続させた。

(課題2) 対象者 本課題は、我々が以前、持久系 Athlete の大動脈インピーダンス特性に関する報告¹⁾におけるデータを再解析した。解析対象者は、持久系 Athlete 15名、同年代の Sedentary 16名であった。ただし、左室 CINE 画像は欠損や質が不良であるデータを除き、Athlete 6名、Sedentary 10名分のデータで解析した。

(課題2) 実験プロトコル 課題1の安静時撮像方法と同様の手順で撮像した。

MRI データ取得と解析大動脈血流：上行大動脈血流は、CINE PC-MRI を用いて測定した。まず3点の位置決定ツールを用いて胸部大動脈の斜位矢状断像(二重斜位)、いわゆる candy-cane view を取得した。次に2次元高速フィールドエコーシーケンスを用いて心電図同期(レトロスペクティブ ECG ゲーティング)下に自由呼吸で CINE PC-MRI 撮像を行った。データ取得スライスは大動脈分岐部直上に配置した。CINE PC-MRI では、マグニチュード画像および位相画像を以下のパラメータで取得した：速度エンコーディング 250 cm/s、心周期数：30 フェーズ、視野 350 × 300 mm、面内分解能 1.22 × 1.22 mm、スライス厚 8 mm、繰り返し時間 4.0 ms、エコー時間：2.4 ms、フリップ角：10°、信号平均回数 2 回。撮像時間は対象者の心拍数に依存するが、5分程度であった。すべての CINE PC-MRI データは画質を目視で確認し、速度アライアシング (aliasing) は全被験者において認められなかった。

CINE PC-MRI データは、Q-flow ソフトウェア (Philips Medical Systems, Amsterdam, The Netherlands) を用いて半自動的に解析され、上行大動脈の血流波形が作成された。上行大動脈の血管腔境界を1枚のマグニチュード画像上において手動でトレースした。次にその境界が残りのすべてのマグニチュード画像に対応する各心周期の位相画像へ自動的に適用された。上行大動脈血流量率波形は心周期全体にわたり断面積と平均血流速

度の積で算出された。課題2の一回拍出量は左室短軸画像の取得数が少ないため、大動脈血流量波形により算出した。一回拍出量と心拍数の積から心拍出量を算出し、平均血圧を心拍出量で割り総末梢血管抵抗を算出した。

大動脈圧：CINE- PC MRI 中、上行大動脈圧は、SphygmoCor XCEL システム (ATCOR Medical, Sydney, Australia) を用いて、上腕圧波形から一般化伝達関数により推定された。XCEL システムの電子モジュールは MRI 室の外に設置され、MRI 室の壁にある波導を通して空気チューブを延長し、MRI ボア内で仰向けに横たわる参加者が装着したカフに接続された。上腕動脈血圧を記録した後、カフは拡張期血圧以下のレベルまで再度加圧され、20秒間そのまま保持して連続的な上腕圧波形を収集した。圧波形は収縮期および拡張期血圧値で較正され、一般化伝達関数を用いて 128 Hz で単一の大動脈圧波形として再構成された。延長されたチューブ付きの上腕動脈オシロメトリックカフは、MRI 室内での大動脈圧推定に適しており、本研究および以前報告した研究¹⁾でも使用されている。延長チューブの妥当性に関しては先の研究で報告している。

大動脈インピーダンスの算出方法：インピーダンススペクトルは、位相コントラスト MRI から得られた上行大動脈の時間あたりの血流量 (m^3/s) と、SphygmoCor XCEL システムから得られた上行大動脈圧 (mmHg) のフーリエ変換から計算された。両信号は、心拍ごとに 1000 ポイントに再サンプリングされ、DC 成分が除去された。大動脈圧と流量の波形は、FFT (高速フーリエ変換) にかけて、それぞれのハーモニック (調和成分) における周波数領域での複素圧と流量を得た。その後、各ハーモニックにおける圧 (P) を流量 (Q) で割ることで、複素数インピーダンス $Z(f) = P(f) / Q(f)$ が算出された。反射波の影響が最も少ないとされる特性インピーダンス (Z_c) を個々のイン

ピーダンス位相が0交差した以降の高調波における係数を平均して算出した。

左室容積と左室容積-圧ループ：心臓MRIを用いて左心室の形態および機能を評価した。撮像には、短軸断面のバランスド・ファスト・フィールド・エコー法 (balanced fast field echo) を用い、心電図に同期したレトロスペクティブ・ゲーティングおよび呼吸終末での息止めを行った。撮像条件は以下のとおりである：視野 (field of view) は340×340 mm, スライス厚は8 mm, スライス数は14枚 (スライス間のギャップなし), 面内分解能は1.41×1.41 mm, 心周期あたりのフェーズ数は30, フリップ角は50°であった。左室容積曲線は、QMassソフトウェア (Version 8.1, Medis Medical Imaging Systems B.V., Leiden, The Netherlands) を用いた修正シンプソン法により算出した。この曲線より最大と最小を拡張・収縮末期容積 (LVEDV・ESV) とした。駆出率 (ejection fraction, EF) は、以下の式により求めた：EF (%) = (LVEDV - ESV) / LVEDV × 100。

左室容積曲線と同時に取得された大動脈圧波形を用いて先行研究²⁾に基づき、以下の方法で圧-容積ループを描画した。大動脈圧と左室容積波形を100ポイントにリサンプリング処理を行い、各ポイントで圧/容積から時変仮エラスタンスを算出する。この時変エラスタンスE (t) の算出式であるDouble-Hill関数に必要な因子を算出した。

$$E(t) = E_{max} \times \frac{\left(\frac{t}{t_{max}}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{t_{max}}\right)^n} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{t_{min}}\right)^m}$$

E_{max}: 時変仮エラスタンスの最大値, t: 時間, t_{max}: E_{max}の時間, t_{min}: エラスタンスの低下する時間, n: 収縮期の立ち上がりの鋭さ, m: 弛緩期の低下の鋭さ。このうち「t_{min}」, 「n」, 「m」は任意の時間で初期設定された。時変仮エラスタンスとDouble-Hill関数により算出されたE (t) の二乗誤差を算出した。二乗誤差と上記のDouble-

Hill関数の構成因子を用いてエクセルのソルバー機能でのDouble-Hill関数により算出されたE (t) の最適化を行った。左室圧 (LVP) を以下の式より算出した。

$$LVP = E(t) \times (LVV - V_0)$$

E (t): 最適化後の時変エラスタンス, LVV: 時点の左室容積, V₀: 左室内圧「0」の時の容積。本研究ではV₀を0に設定した。

菅らの概念³⁾にしたがってPVループを使って左室機械的エネルギーを算出した。このループ内を左室血液駆出に関わる外部機械的エネルギーであるStroke work (J) として算出した。熱や蓄積エネルギーとなるPotential energy (J) として、ループ外左側の収縮末期圧-容積直線 (V₀とE_{max}を結ぶ直線) の下の面積を算出した。また、左室機械的エネルギー変換効率性はStroke workとPEの総和をStroke workで割り100分率にして算出した。

統計解析：課題1における統計解析には混合線形モデルを用いた。反復測定デザインに対しては、共分散構造として複合対称性を仮定した。固定効果因子として「条件 (安静・運動)」を指定し、各条件における主要アウトカムの差を評価した。また、各指標間の条件による変化の相関は反復測定相関により算出した。

課題2では、サンプルの欠損が多かった左室容積に関わる指標を除き、各群間の比較には対応のないt検定を用いた。左室容積指標については正規性を満たさなかったため、Mann-Whitney U testを用いた。各指標間の相関解析にはピアソンの積率相関係数を使用した。

すべての統計解析はSPSS Statistics version 26 (IBM Corp., Armonk, NY, U.S.A) を用いて行い、p値<0.05を統計学的有意とした。

2. 結果

課題1：ハンドグリップ運動 対象者の身体的特性は、平均年齢 24 ± 4 歳、身長 169.2 ± 9.7 cm、体重 63.3 ± 17.1 kg、体格指数 (BMI) 21.9 ± 4.5 kg/m²であった。対象者19名全員がハンドグリップ運動を完遂し、欠損データは存在しなかった。

血行動態の結果は、表1に示した。上腕 (Brachial)・大動脈 (Aortic) 収縮期血圧 (systolic BP)、拡張期血圧 (Aortic diastolic BP)、平均血圧 (Aortic MAP) はハンドグリップ運動時に顕著に増加した。しかし反射波の代表的な指標である増大指数 (Augmentation index) は増加傾向にとどまった。

表1では、左室容積変化も示した。拡張末期容積 (EDV) はハンドグリップ運動で平均5 mLのわずかな増加を示し、収縮末期容積 (ESV) に変化はなかったが駆出率 (EF) は増強していなかった。

心拍数 (Heart rate) と1回拍出量 (Stroke volume) が顕著に増加したため、心拍出量 (Cardiac output) も有意な増加を示した。一方末梢血管抵抗 (TPR) に変化はなかった。

左室機械的エネルギー指標 (表1) はStroke workとPotential energyの両方がハンドグリップ運動で増加したが、左室機械的エネルギー変換効率 (LV mechanical efficiency energy) に有意な変化は認められなかった。

大動脈インピーダンスの位相はハーモニックスの主効果と相互作用を認めた。第1-2のHRハーモニックスでは条件間に差はなく血流が先行した (位相が負) 状態であったが、第3HRハーモニックスでハンドグリップ運動条件の位相が急激な上昇を示し、急峻な圧の先行が認められた。ただし、どちらも第2から第3HRハーモニックスの間で位相の逆転が生じた。係数 (Modulus) の変化 (図1 (A)) もハーモニックスの主効果と相互作用を認

表1 Change in cardiovascular parameters during rhythmic handgrip (RHG) exercise

N	(female)	Rest		RHG		LMM p-values
		Mean	(95%CI) (Lower-Upper)	Mean	(95%CI) (Lower-Upper)	
<i>Blood pressure measurements</i>						
Heart rate	beats/min	63	(59-68)	75	(70-80)	<0.001
Brachial systolic BP	mmHg	112	(107-117)	127	(122-132)	<0.001
Brachial pulse pressure	mmHg	42	(39-46)	43	(39-47)	0.591
Aortic systolic BP	mmHg	97	(92-102)	113	(108-117)	<0.001
Aortic pulse pressure	mmHg	27	(25-29)	27	(25-29)	0.565
Aortic diastolic BP	mmHg	70	(66-75)	85	(81-90)	<0.001
Aortic MAP	mmHg	81	(76-85)	98	(93-102)	<0.001
Augmentation index	%	1.39	(-4.29-7.08)	5.88	(0.20-11.57)	0.060
<i>Left ventricular measurements</i>						
EDV	mL	103	(92-114)	108	(97-119)	0.001
ESV	mL	46	(40-52)	48	(41-54)	0.170
EF	%	55.9	(53.3-58.5)	56.7	(54.0-59.3)	0.292
Stroke volume	mL	57	(51-63)	61	(55-66)	0.007
Cardiac output	L/min	3.56	(3.18-3.93)	4.49	(4.12-4.86)	<0.001
TPR	mmHg/L/min	23.37	(21.13-25.61)	22.46	(20.22-24.70)	0.262
Stroke work	J	0.770	(0.681-0.858)	0.925	(0.837-1.014)	<0.001
Potential energy	J	0.577	(0.484-0.671)	0.684	(0.591-0.778)	<0.001
LV mechanical efficiency	%	57.8	(55.6-59.9)	58.0	(55.9-60.2)	0.688

These data were demonstrated as estimated mean and 95% confidence interval. Bold p-values presented < 0.050. BP: blood pressure, EDV: end-diastolic volume, EF: ejection fraction, ESV: end-systolic volume, MAP: mean arterial pressure, TPR: total peripheral resistance

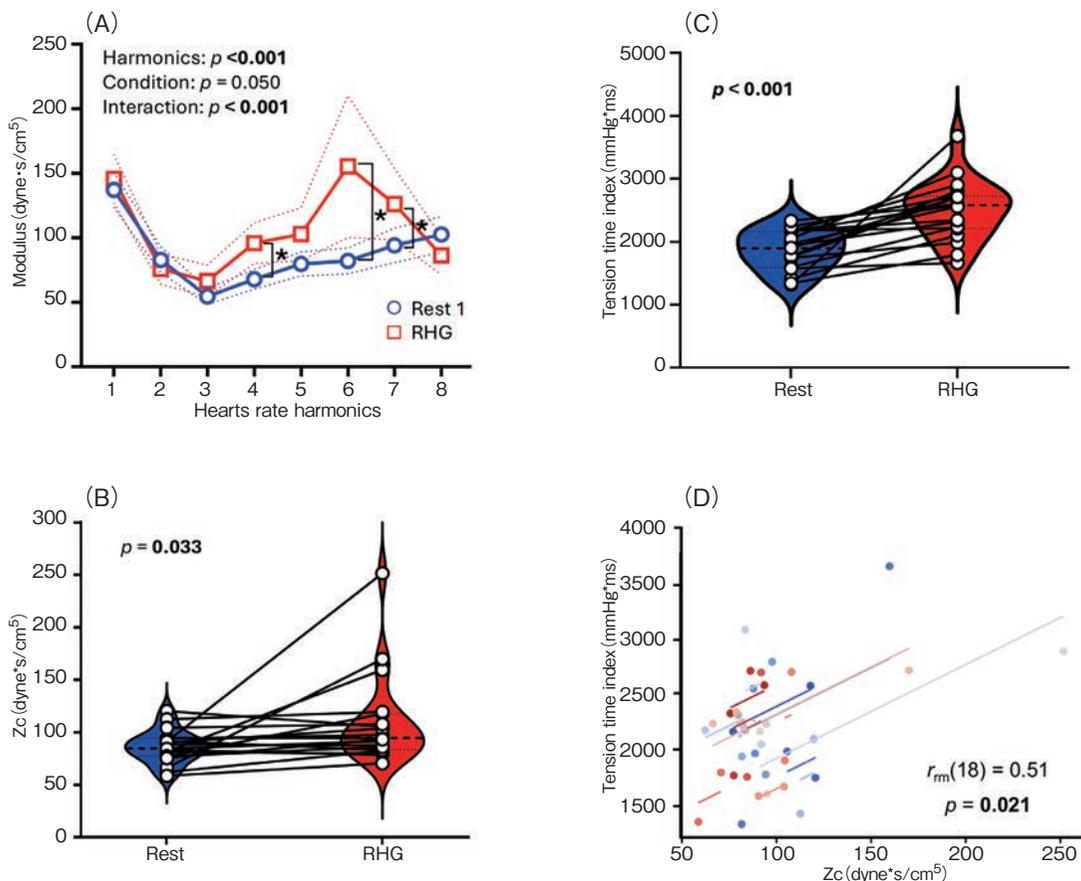


図1 ハンドグリップ運動時の大動脈インピーダンスと心筋酸素需要

(A) 心拍ハーモニクスにおける大動脈インピーダンス, (B) 特性インピーダンス, (C) 緊張時間指数, (D) 特性インピーダンスと心筋酸素需要の関係を示す。(A-C)における青は安静時, 赤はハンドグリップ運動時を示す。(A)の[*]は事後検定で有意な群間差が認められたことを示す。(B・C)の丸記号と折れ線は個人の安静時からハンドグリップ運動時の変化を示す。

めた, 第4と第6-7 HR ハーモニクスでハンドグリップ運動時の方が有意に高いModulusが認められた。反射波の影響が最小限になる特性インピーダンス (Z_c , 図1 (B)) はハンドグリップ運動時に有意に増加した。

左室酸素需要の指標である緊張時間指数 (Tension time index) はハンドグリップ運動時に有意に増加した (図1 (C))。

特性インピーダンスと左室エネルギー動態との関係性を反復測定相関分析で解析した結果, 特性インピーダンスは, Stroke work ($r_{rm}(18) = 0.46$, 95% CI [0.024, 0.751], $p = 0.04$), Potential energy ($r_{rm}(18) = 0.59$, 95% CI [0.201, 0.819], $p = 0.006$) およびTension time index ($r_{rm}(18) = 0.51$, 95% CI

[0.089, 0.778], $p = 0.021$, 図1 (D)) と正の相関が認められた。一方, TPRはStroke work ($r_{rm}(18) = -0.20$, 95% CI [-0.59, 0.267], $p = 0.401$), Potential energy ($r_{rm}(18) = -0.03$, 95% CI [-0.469, 0.415], $p = 0.889$) およびTension time index ($r_{rm}(18) = 0.16$, 95% CI [-0.307, 0.56], $p = 0.509$) と相関関係はなかった。

2. 1 課題1: 自転車運動

自転車運動も19名全員が完遂したが, 安静時および運動時の両方で血圧が測定できなかった者が1名, 運動時のみ血圧が測定できなかった者が5名, 大動脈血流と血圧の測定位相がずれていた者が1名存在した。これらを除外した結果, 安静

時18名、運動時13名の血行動態指標および左室容積指標が得られた。なお、大動脈インピーダンスに関しては、運動時に12名の実測値を用いて解析を行った。本課題における統計解析は、混合線形モデルを用い、欠損値補完処理は標準的な統計手続きに基づいて行った。結果は、推定平均値および95%信頼区間で示した。

自転車運動時の血行動態の変化は表2に示している。上腕・大動脈収縮期、拡張期、平均血圧は有意に増加した。Augmentation indexは大きく減少しているように観察されるがばらつきが大きく、有意な差とはならなかった。

EDVおよびESVはどちらも有意に増加した。EFは増加傾向が認められた。Heart rateとStroke volumeの両方の顕著な増加の結果、Cardiac outputはおおよそ2倍増加を示した。TPRは低下した。

自転車運動時の左室機械的エネルギーは、

Stroke workとPotential energyの両方の有意な増加が認められた。しかし、LV mechanical efficiencyに変化はなかった。

自転車運動時の大動脈インピーダンスの位相は、ハーモニックスの主効果と相互作用を認めたが、位相逆転周囲に条件間の差はなかった。Modulusは第7-8の高周波領域だけでなく、第1-2 HRハーモニックスの低周波領域でも自転車運動時の方が有意に低いインピーダンスを示した(図2(A))。しかし、Zcでは自転車運動時の低下傾向しか認められなかった(図2(B))。

一方、自転車運動時のTension time indexは有意に増加した(図2(C))。

安静から自転車運動によるZcの変化はStroke work ($r_{rm}(11) = -0.43$, 95% CI [-0.793, 0.158], $p = 0.142$), Potential energy ($r_{rm}(11) = -0.54$, 95% CI [-0.84, 0.019], $p = 0.058$), Tension time index ($r_{rm}(12) = -0.37$, 95% CI [-0.75, 0.205], $p = 0.199$, 図2

表2 Change in cardiovascular parameters during cycling around heart rate 100 beats/min

N	(female)	Rest		Cycling		LMM p-values
		Mean	(95%CI) (Lower-Upper)	Mean	(95%CI) (Lower-Upper)	
<i>Blood pressure measurements</i> *						
Brachial systolic BP	mmHg	112	(108-117)	122	(117-128)	0.006
Brachial pulse pressure	mmHg	44	(38-50)	47	(41-53)	0.235
Aortic systolic BP	mmHg	96	(93-99)	106	(102-109)	<0.001
Aortic pulse pressure	mmHg	27	(24-31)	27	(23-31)	0.818
Aortic diastolic BP	mmHg	69	(66-72)	79	(75-82)	<0.001
Aortic MAP	mmHg	79	(77-82)	91	(88-94)	<0.001
Augmentation index	%	-1.2	(-9.7-7.4)	-8.2	(-18.3-1.8)	0.205
<i>Left ventricular measurements</i> +						
Heart rate	beats/min	63	(57-69)	94	(88-100)	<0.001
EDV	mL	101	(88-115)	122	(109-135)	<0.001
ESV	mL	43	(35-51)	50	(42-57)	0.006
EF	%	58	(55-61)	60	(57-63)	0.058
Stroke volume	mL	59	(52-65)	72	(66-79)	<0.001
Cardiac output	L/min	3.69	(3.15-4.24)	6.70	(6.16-7.25)	<0.001
TPR	mmHg/L/min	22.33	(20.28-24.37)	14.38	(12.27-16.49)	<0.001
Stroke work	J	0.800	(0.708-0.893)	0.969	(0.870-1.067)	<0.001
Potential energy	J	0.574	(0.466-0.682)	0.704	(0.589-0.820)	0.007
LV mechanical efficiency	%	59.0	(56.0-62.0)	59.1	(55.8-62.5)	0.927

These data were demonstrated as estimated mean and 95% confidence interval. Bold p-values presented < 0.050. BP: blood pressure, EDV: end-diastolic volume, EF: ejection fraction, ESV: end-systolic volume, MAP: mean arterial pressure, TPR: total peripheral resistance, *: Hemodynamic data were available for 19 participants at rest and for 14 participants during cycling exercise (blood pressure waveforms could not be obtained in 5 participants during cycling). +: Data from all 19 participants were available for both rest and cycling conditions.

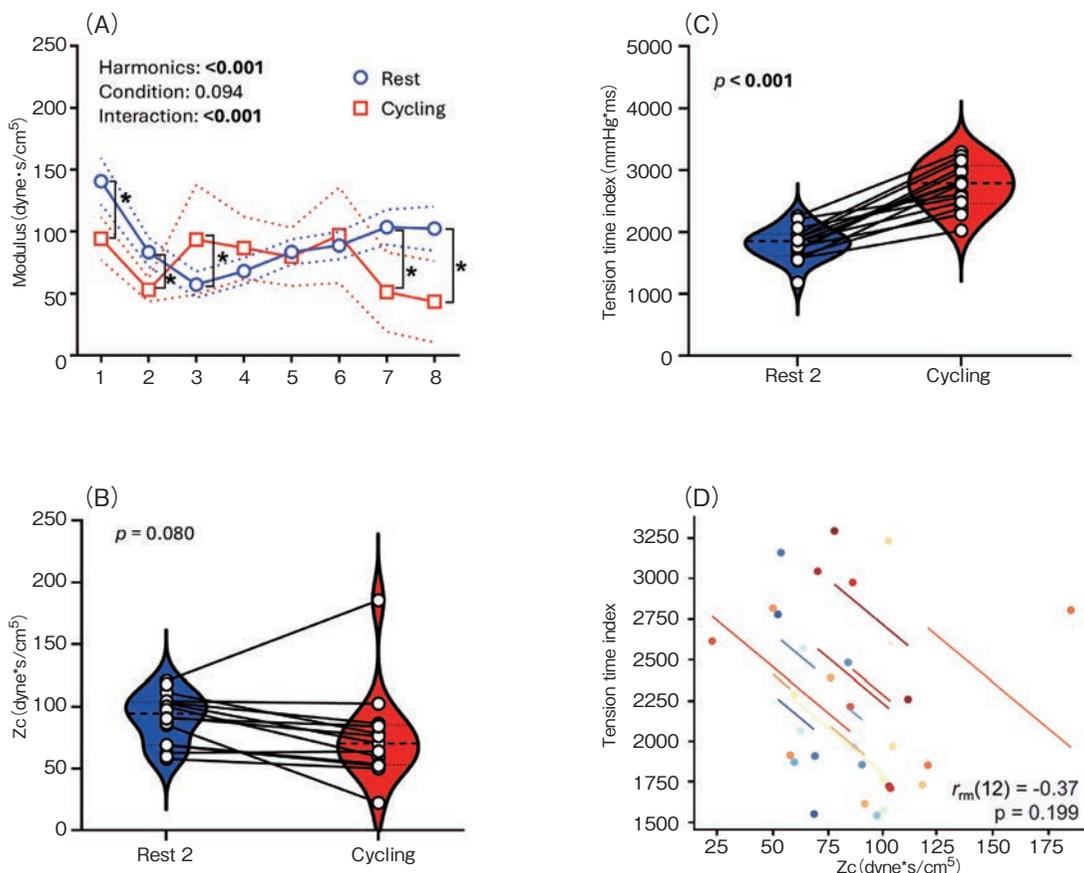


図2 自転車運動時の大動脈インピーダンスと心筋酸素需要

(A) 心拍ハーモニクスにおける大動脈インピーダンス、(B) 特性インピーダンス、(C) 緊張時間指数、(D) 特性インピーダンスと心筋酸素需要の関係を示す。(A-C)における青は安静時、赤は自転車運動時を示す。(A)の「*」は事後検定で有意な群間差が認められたことを示す。(B・C)の丸記号と折れ線は個人の安静時から自転車運動時の変化を示す。

(D)のどれとも関連する指標はなかった。しかし、TPR と、Stroke work ($r_{rm}(12) = -0.81, 95\% \text{ CI } [-0.936, -0.481], p < 0.001$), Potential energy ($r_{rm}(12) = -0.74, 95\% \text{ CI } [-0.913, -0.348], p = 0.002$), Tension time index ($r_{rm}(13) = -0.88, 95\% \text{ CI } [-0.959, -0.662], p < 0.001$) これらの指標は関連しなかった。

2. 2 課題2: 持久系 Athlete (慢性効果)

持久系 Athlete (15名) と Sedentary (16名) 群の平均年齢 (20 ± 1 vs. 21 ± 2 歳, $p = 0.181$) と身長 (171.4 ± 6.1 vs. 172.8 ± 5.7 cm, $p = 0.529$) には違いはなかった。体重 (57.6 ± 6.2 vs. 67.3 ± 13.5 kg, $p = 0.017$) と BMI (19.7 ± 1.2 vs. 22.6 ± 4.2 kg/m², p

$= 0.015$) は Athlete 方が有意に低かった。

すべての指標の群間差を表3に示した。Aortic diastolic BP と Aortic MAP, Augmentation index は Athlete のほうが Sedentary よりも有意に低かった。Athlete は Sedentary よりも Heart rate が低く、Stroke volume が高かったが Cardiac output には群間差はなかった。

大動脈インピーダンス Modulus は、前回に報告した結果と同様に、高周波領域で低くなった。そのため、Zc も Athlete のほうが Sedentary よりも有意に低かった (表3)。

左室機械的エネルギーの Stroke work, Potential energy に群間差はなく LV mechanical efficiency も違いはなかった。

表 3 Cardiovascular parameters in Athlete and Sedentary group

		Athlete	Sedentary	p-values
		Mean ± SD	Mean ± SD	
N		15	16	
<i>Blood pressure measurements</i>				
Aortic systolic BP	mmHg	94 ± 7	99 ± 7	0.051
Aortic pulse pressure	mmHg	31 ± 5	30 ± 5	0.686
Diastolic BP	mmHg	64 ± 7	69 ± 7	0.023
Mean arterial pressure	mmHg	73 ± 6	80 ± 7	0.009
Augmentation index	%	-13 ± 10	-1 ± 8	<0.001
Heart rate*	beats/min	48 ± 4	58 ± 9	0.001
Stroke volume*	mL	95 ± 21	80 ± 10	0.022
Cardiac output*	L/min	4.53 ± 0.81	4.61 ± 0.58	0.748
<i>Left ventricular measurements</i>				
Tension time index	mmHg · ms	1399 ± 137	1733 ± 254	<0.001
Stroke work †	J	1.05 ± 0.08	1.08 ± 0.12	1.000
Potential energy †	J	0.70 ± 0.21	0.78 ± 0.11	0.428
LV mechanical efficiency †	%	60.63 ± 6.88	58.23 ± 2.65	0.713
<i>Left ventricular afterload</i>				
TPR*	mmHg/L/min	16.80 ± 3.92	17.53 ± 1.83	0.509
Zc	dyne · s/cm ⁵	76.1 ± 19.0	91.5 ± 19.4	0.035

These data were demonstrated as estimated mean and 95% confidence interval. *: Data calculated from aortic blood flow rate of phase-contrast MRI due to the small number of people on cardiac CINE images. Bold p-values presented < 0.050. BP: blood pressure, TPR: total peripheral resistance, Zc: characteristic impedance, †: Because of suboptimal image quality, the number of participants included in the analysis was limited (Athlete group: 6, Sedentary group: 10).

一方、Tension time index は Athlete のほうが有意に低かった。

Zc と Tension time index は正の相関関係 ($r_s = 0.451, p = 0.010$) を示したが、Zc と Stroke work ($r_s = -0.012, p = 0.966$)、Potential energy ($r_s = -0.085, p = 0.753$) は関連性が認められなかった。

3. 考 察

本研究では、2つの課題を通じて、運動による大動脈インピーダンスの変化が左室エネルギー動態に及ぼす影響を検討した。その結果、以下の知見が得られた。第一に、ハンドグリップのようなレジスタンス運動中は大動脈特性インピーダンス (Zc) が上昇し、大動脈壁の拡張性の低下を示した。この変化は左室の機械的および代謝的エネルギー指標と有意に関連し、Zcの左室機械的な外部出力 (Stroke work)、潜在的エネルギー (Potential energy)、心筋酸素需要 (Tension time index) への寄与率は20～35%に達した。一方、有酸素運動中は、大動脈インピーダンス Modulus

が低下したが、これらの変化と左室エネルギー動態との有意な関連性は認められなかった。さらに、本研究では、この変化が左室の機械的動態指標とは関連しない一方、代謝的動態指標とは有意に関連することが新たに見出された。これらの結果は、運動様式の違いによって左室-動脈カップリングの特性が異なることを示唆しており、とくにレジスタンス運動では左室エネルギー動態への影響が大きい可能性を示している。本知見は、運動様式による心血管適応メカニズムの理解に寄与するとともに、心血管疾患に対する個別化された運動処方の方立案に重要な示唆を与える。

左室-動脈カップリングは、大動脈実効エラストランス (Ea) と左室エラストランス (Ees) 比から評価されることが多い。安静時において Ea は (動脈ステイフネスに関係する) 拍動性の負荷よりも (末梢血管抵抗に関係する) 定常性の負荷に対して、約3倍の感受性を持つ⁴⁾。運動時には、Ea は動脈ステイフネスや反射波の影響を強く受けるとされている⁵⁾。したがって、従来の非侵襲的評

価では、安静時と運動時におけるカップリングの変化を同一の指標で評価することが困難であった。一方、大動脈インピーダンスは、Heart rateに由来する周波数領域ごとに区分して評価できるため、より精緻な解析が可能である。本研究では、レジスタンス運動中には特性インピーダンス、すなわち動脈スティフネスの変化が左室後負荷に強く寄与し、機械的（拍出効率）および代謝的エネルギーにも中等度の影響を与えることが示された。一方、自転車運動では、特性インピーダンスに加え、基本調波に相当する低周波領域でもインピーダンスが低下し、TPRと左室エネルギー動態との間に強い関連性が認められた。これらの結果から、レジスタンス運動では動脈スティフネスのような構造的特性による左室後負荷が、また有酸素運動では反射波や末梢血管の収縮・弛緩による平均血圧の変化が、左室-動脈カップリングに大きく影響することが示唆される。

さらに、我々が以前に報告した持久系 Athleteの安静時データでは、TPRではなく動脈スティフネスが低いという特性が認められた¹⁾。このことは、運動の急性効果と慢性効果が、動脈の異なる部位に異なる影響を及ぼす可能性を示唆している。

4. 結 論

運動様式の違いにより、大動脈インピーダンスが左心室のエネルギー動態に与える影響は異なることが示された。有酸素性運動中には、反射波やTPRなど、全身の動脈特性が関与して大動脈インピーダンスが変化した。有酸素運動の慢性的な効果としては、大動脈の拡張性の改善、すなわち特性インピーダンスの低下が認められた。

謝 辞

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助成をいただき、本研究成果を国際学会で発表を行うことができました (European College of Sport Science (ECSS), Rimini, Italy, July 2025)。心より感謝申し上げます。また、本研究対象者と共同研究者には、労力と時間を提供していただきました、感謝申し上げます。

文 献

- 1) Fukuie M. et al., Ascending aortic impedance in young endurance athletes: a time-resolved phase-contrast MRI study., *Journal of Applied Physiology*, 136 (3) : p. 555-566 (2024)
- 2) Seemann F. et al., Noninvasive quantification of pressure-volume loops from brachial pressure and cardiovascular magnetic resonance., *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 12 (1) : p. e008493 (2019)
- 3) Suga H., External mechanical work from relaxing ventricle., *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 236 (3) : p. H494-H497 (1979)
- 4) Chemla D. et al., Contribution of systemic vascular resistance and total arterial compliance to effective arterial elastance in humans., *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 285 (2) : p. H614-H620 (2003)
- 5) Otsuki T. et al., Contribution of systemic arterial compliance and systemic vascular resistance to effective arterial elastance changes during exercise in humans., *Acta physiologica*, 188 (1) : p. 15-20 (2006)

超音波を用いた四肢欠損パラアスリートの 新たな体組成評価の基盤研究

広島大学病院	鳥山 実
(共同研究者) 同	伊藤 創
同	居倉 怜央
同	廣田 智弘
同	三上 幸夫

A Foundational Study on Novel Body Composition Assessment Using Ultrasound in Para-Athletes with Amputee

by

Minoru Toriyama,
Hajime Ito, Yukio Mikami
*Department of Sports Medical Center,
Hiroshima University Hospital*
Reo Igura, Tomohiro Hirota
*Department of Rehabilitation,
Division of Clinical Practice and Support,
Hiroshima University Hospital*

ABSTRACT

Purpose

The purpose of this study was to examine the validity of subcutaneous fat thickness (SFT) and qualitative muscle assessment using ultrasound, and to further investigate their relationships with phase angle (PhA) derived from bioelectrical impedance analysis (BIA).

Methods

Twenty-one individuals (16 males and 5 females) who underwent CT scans at our institution were included. Subcutaneous fat thickness was measured at the thigh, upper arm, and waist using ultrasound (US-SFT) and CT images (CT-SFT). At the thigh, echo intensity (EI) from ultrasound and CT attenuation values were obtained to assess muscle quality, and their correlations with PhA were analyzed. Pearson's or Spearman's correlation coefficients were used for statistical analyses.

Results

A very strong positive correlation was observed between US-SFT and CT-SFT, confirming the validity of ultrasound for measuring subcutaneous fat thickness. A significant negative correlation was also found between lower-limb PhA and both US-SFT and CT-SFT, indicating a localized relationship between subcutaneous fat and PhA. Regarding muscle quality, CT values showed a significant positive correlation with PhA, whereas EI demonstrated only a limited association.

Conclusion

Ultrasound-derived subcutaneous fat thickness (US-SFT) provides an accurate estimate comparable to that of CT and may serve as a useful alternative indicator, especially for individuals such as those with limb amputation, in whom BIA is difficult to apply. Conversely, for qualitative muscle assessment, CT demonstrated superiority, highlighting the importance of selecting assessment modalities based on specific evaluation goals.

キーワード

フェーズアングル 皮下脂肪厚 超音波 CT

Keyword

Phase angle; Subcutaneous fat thickness; Ultrasound; Computed tomography (CT)

要旨

目的

本研究は超音波を用いた皮下脂肪厚および筋の質的評価の妥当性を検証し、さらにそれらと生体電気インピーダンス分析 (Bioelectrical Impedance Analysis : BIA) による Phase Angle (PhA) との関連性を明らかにすることを目的とした。

方法

対象は当院においてCT検査が施行された21名 (男性16名, 女性5名) とした。大腿部, 上腕部, 腰部において超音波画像による皮下脂肪厚 (US-SFT) およびCT画像による皮下脂肪厚 (CT-SFT) を測定した。大腿部ではエコー輝度 (Echo Intensity : EI) およびCT値を算出し, PhAとの関連性を検討した。統計解析にはピアソンまたはスピアマンの相関係数を用いた。

結 果

US-SFTとCT-SFTとの間には非常に強い正の相関が認められ、超音波による皮下脂肪厚測定の妥当性が確認された。また、下肢PhAとUS-SFTおよびCT-SFTの間には有意な負の相関が認められ、局所的な皮下脂肪厚とPhAの関連が明らかとなった。筋の質的評価では、CT値はPhAと有意な正の相関を示した一方、EIとの関連は限定的であった。

結 論

US-SFTはCTに近い精度で皮下脂肪厚を評価可能であり、特にBIAが使用困難な四肢切断者などにおいて有効な代替指標となる可能性が示された。一方で、筋の質的評価においてはCTの優位性が示唆され、目的に応じた評価手法の選択が求められることが明らかとなった。

1. 背 景

アスリートにとって自身の体組成を的確に把握することは、パフォーマンスの最適化や傷害予防、効果的なトレーニング・コンディショニング戦略の立案において極めて重要な要素である。特に、骨格筋量や脂肪量、筋質といった体組成の構成要素は、種目特性や競技レベルに応じて変化するため、定期的かつ精度の高い評価が求められる。現在、体組成の評価には二重エネルギー X線吸収測定法 (Dual Energy X-ray Absorptiometry : DXA) やコンピュータ断層撮影 (Computed Tomography : CT)、生体電気インピーダンス分析 (Bioelectrical Impedance Analysis : BIA) などが用いられており、中でもBIAは簡便かつ非侵襲的に評価が可能であることから、競技現場における実用性が高いとされている¹⁾。

BIAは、四肢末端 (通常は両手・両足) に電極を装着し、体内に微弱な電流を流すことで、組織間の電気抵抗やリアクタンス (容量性成分) を測定し、体水分量や筋量を推定する手法である²⁾。

しかしながら、この手法は四肢の形態が標準的であることを前提としており、切断や変形のある者には適用が困難である。特に四肢欠損を有するパラアスリートにおいては、末梢に電極を装着することができない場合や、身体が電氣的に左右非対称となることで、BIAの基礎となる筒状モデルが成立せず、推定精度が著しく低下することが報告されている³⁾。Choiらは片下肢切断を有する男性を対象とした検証において、標準的なBIA式が切断者の除脂肪体重を正確に推定できず、切断者専用の予測式が必要であることを示している⁴⁾。そのため、このような切断者を対象とした体組成評価には、CTやMRIなどの高精度の画像診断装置が必要となるが、これらは高コストかつ被曝や閉所恐怖などの問題を伴うため、競技現場や定期モニタリングには適さない。

こうした背景から、近年注目されているのが超音波を用いた筋量・脂肪量評価法である。超音波は非侵襲的かつ可搬性に優れており、筋肉の厚さ、断面積、さらには筋内脂肪や結合組織の沈着など、筋質を視覚的に評価できる点が特徴である⁵⁾。これまでに、高齢者やサルコペニア患者、さらには健常アスリートを対象とした研究において、超音波で得られる筋厚やエコー輝度とCT・MRI・DXAで得られる体組成との間に有意な相関が報告されており^{6,7)}、代替的评价法としての可能性が示唆されている。

一方で四肢切断者の多くは、運動量が著しく低下し、週150分以上の中等度～強度運動を継続している者は全体の30%程度という報告がある⁸⁾。またKorean全国規模のコホート研究では、切断者は2型糖尿病リスクが全体で1.11倍、重度障害者では1.77倍高いことが報告されている⁹⁾。したがって、四肢切断者においては、運動不足に起因する内科的合併症の併発リスクが高く、体組成や筋・脂肪の量的、質的評価は、これらのリスク管理上も重要な意味を持つと考えられる。

本研究では、BIA法の限界を補完しうる代替手段として、超音波による体組成評価法を確立することを目的とする。具体的には、大腿部における皮下脂肪厚や筋厚などの超音波指標を計測し、CTやBIAとの比較・検証を通じて、その妥当性と臨床的応用可能性を検討する。これにより、従来評価が困難とされてきた四肢切断パラアスリートの体組成モニタリングにおいて、新たな標準的評価手法の構築を目指す。

2. 方法

2.1 対象者

当院に通院もしくは入院中であり、周術期においてCT撮影が実施され、本研究について同意が得られた21名(男性16名,女性5名)を対象とした。本研究は広島大学病院臨床研究倫理審査委員会の承認の下で施行した。

2.2 測定

超音波による評価は、超音波診断装置(コニカミノルタ社製 MX-1, 日本)にリニアプローブを接続して使用し、以下の3部位で撮像を行った:

- 1) 大腿: 大腿長(上前腸骨棘~膝蓋骨上縁)の中点,
- 2) 上腕: 肩峰から遠位方向に20 cmの部位,
- 3) 腰背部(第4腰椎レベル): 第4腰椎棘突起より有症状側外側方向に5 cmの部位

大腿および上腕の撮像は被験者を背臥位とし、腰背部の撮像は腹臥位で行った。各部位に対してプローブを垂直に接触させ、最小限の圧迫下で横断面画像を取得した。画像取得時のゲインや深度などの機器設定はすべて一定条件で統一し、取得画像は機器内に保存した。CT画像は術前評価を目的として撮像された臨床画像データを用いた。撮像は64列マルチディテクタCT装置(VCT: GE Medical Systems社, 米国)を用いて実施された。同一被験者に対し、大腿・上腕・腰椎レベルの断面画像から、超音波画像と同部位である大腿中点、

上腕20 cm部、腰椎L4横断像と一致するレベルを選定し解析を行なった。

BIAの評価指標としてフェーズアングル(Phase Angle: PhA)を採用した。PhAは生体電気インピーダンス分析装置(InBody社製 InBody S10, 韓国)を用いて、全身セグメント別に測定を行った。測定は仰臥位安静5分後に実施し、電極は標準の8電極法に従って左右の手首および足関節に装着した。得られたセグメント別データのうち、下肢疾患を有する対象者の患側下肢PhAを解析対象とした。

2.3 データ解析

皮下脂肪厚については、取得した超音波画像から皮下脂肪厚(Ultrasound Subcutaneous Fat Thickness: US-SFT)を計測した。大腿部は測定部位における皮膚表面から大腿直筋の最大径での筋膜上縁までの垂直距離を、上腕部は測定部位における皮膚表面から上腕二頭筋最大径での筋膜上縁までの垂直距離を、腰部は測定部位における皮膚表面から脊柱起立筋の最大径での筋膜上縁までの垂直距離を、それぞれ計測した。CT画像においても同様に、皮下脂肪厚(CT Subcutaneous Fat Thickness: CT-SFT)を計測した。

筋内脂肪については、超音波画像は画像解析ソフトウェア ImageJ (version 1.53, National Institutes of Health, 米国)を用いて解析を行った。大腿直筋の筋膜内に含まれる筋組織全体を対象とする関心領域(region of interest: ROI)を手動で設定し、ROI内の画素輝度の平均値(0~255階調)を大腿エコー輝度(Echo Intensity: EI)として算出した。CT画像においても大腿部における超音波と同部位の画像を用い、ROIを設定して大腿CT値(Hounsfield Unit: HU)を算出した。US-SFT, CT-SFT, ROIの設定, 大腿EI, 大腿CT値の算出は、評価者2名により独立して実施し、平均値を代表値とした。

2. 4 統計解析

大腿部と上腕部と腰部のUS-SFTと、大腿部と上腕部と腰部のCT-SFT、および各変数と下肢PhAの関連性、大腿EI、大腿CT値のそれぞれと下肢PhAの関連性について、ピアソンの積率相関係数 (Pearson's r) を算出した。正規性の検定にはShapiro-Wilk検定を用い、正規性が確認されない変数についてはスピアマンの順位相関係数 (Spearman's ρ) による補足解析を行った。統計解析は、統計ソフトウェアR version 4.3.2を用いて実施し、有意水準は5% ($p < 0.05$) とした。

3. 結果

対象者の詳細を表1に示す。この中で、CTは21名の解析が実施できたが、超音波は画像が不明瞭であった3名が除外され、PhAは金属製イン

表1 対象者の詳細

性別	男性16名	女性5名
年齢 (歳)	34.6 ± 23.1	
身長 (cm)	165.1 ± 8.6	
体重 (kg)	62.3 ± 12.4	
BMI (kg/m ²)	22.8 ± 3.8	
疾患	前十字靭帯損傷	16名
	脊柱管狭窄症	2名
	変形性肩関節症	3名
	(mean ± SD)	

プラントが留置されていた5名のデータが除外された。

その結果、CT-SFTは、大腿CT-SFTは16例、上腕CT-SFTは3例、腰部CT-SFTは2例が解析対象となった。US-SFTは大腿US-SFTは13例、上腕US-SFTは3例、腰部US-SFTは2例が解析対象となった。大腿CT値は16例、大腿EIは13例、PhAは16例が解析対象となった。結果を表2に示す。

各変数の関連性について、US-SFTとCT-SFTとの間にはスピアマンの順位相関にて非常に強い正の相関が認められた ($\rho = 0.95, p < 0.001$, 図1)。下肢PhAと各評価指標との関連性を検討したところ、CT-SFT ($r = -0.57, p = 0.022$, 図2)、US-

表2 皮下脂肪厚, CT値, エコー輝度, Phase angleの結果

CT-SFT(mm)	
大腿部	9.4 ± 5.0
上腕部	8.0 ± 2.9
腰部	7.9 ± 3.2
US-SFT(mm)	
大腿部	9.3 ± 4.7
上腕部	5.8 ± 0.7
腰部	8.1 ± 3.0
大腿CT値 (HU)	56.7 ± 4.8
大腿EI (a.u.)	54.5 ± 15.6
PhA (degree)	6.6 ± 1.0
	(mean ± SD)

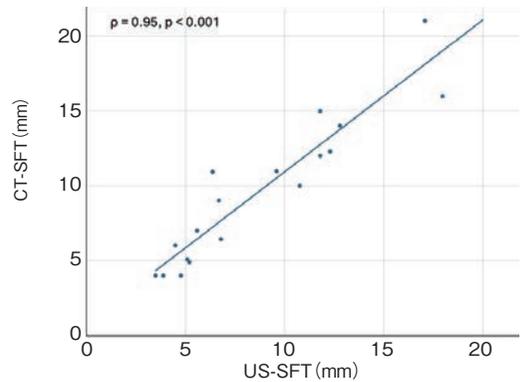


図1 CT-SFT (CTによる皮下脂肪厚) とUS-SFT (超音波による皮下脂肪厚) の関係

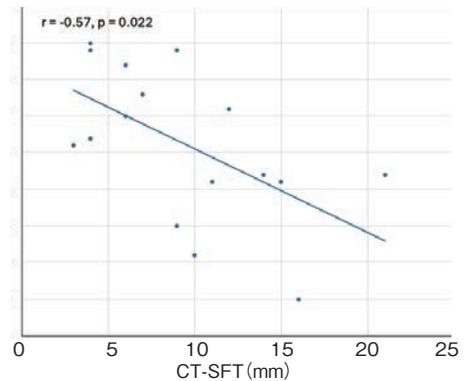


図2 下肢PhA (フェーズアングル) とCT-SFT (CTによる皮下脂肪厚) の関係

SFT ($r = -0.69, p = 0.009$, 図3) との間には有意な負の相関が認められた。下肢PhAと大腿CT値は有意な正の相関が確認された ($r = 0.67, p = 0.004$, 図4)。EIの間にも負の相関がみられたが、有意水準には達しなかった ($r = -0.49, p = 0.087$, 図5)。

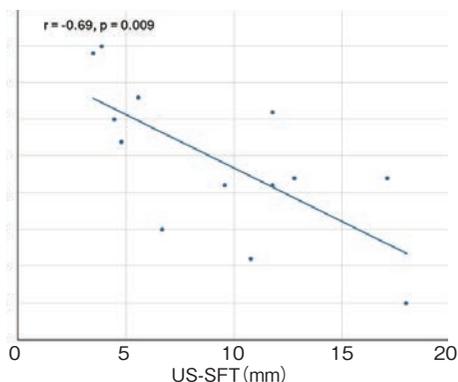


図3 下肢PhA (フェーズアングル) と US-SFT (超音波による皮下脂肪厚) との関係

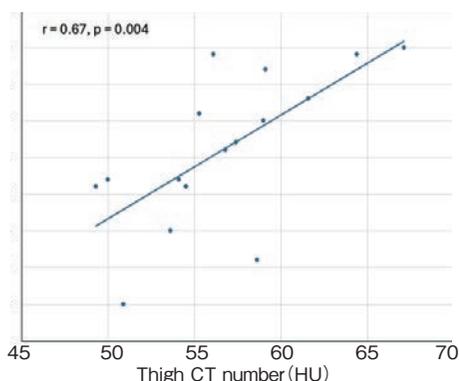


図4 下肢PhA (フェーズアングル) と 大腿CT値との関係

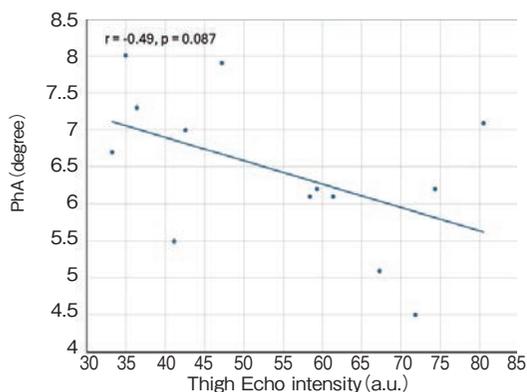


図5 下肢PhA (フェーズアングル) と 大腿EI (エコー輝度) との関係

4. 考 察

本研究では①超音波による皮下脂肪厚の測定精度をCTによる評価と比較し、妥当性を検証、②

インピーダンス法による下肢のPhAとUS-SFT、CT-SFT、筋エコー輝度、および筋のCT値との関連性を検証した。

US-SFTとCT-SFTの比較では、強い相関関係が認められ、超音波による皮下脂肪厚の測定がCTに匹敵する妥当性を有することが示された。この結果は、腹部や体幹部で報告されている過去の報告と一致している。Störchleらは8部位における標準化された超音波皮下脂肪厚測定法がCT・MRIと極めて高い一致性を示したと報告しており¹⁰⁾、またOrphanidouらも腹部における超音波とCTの測定が高い一致性を示すことを示している¹¹⁾。本研究は下肢における検証であるが、体幹と同様に、US-SFTがCT-SFTの代替手段として十分信頼に足ることを示した点で、新たなエビデンスを提供していると考えられる。

さらに、下肢におけるUS-SFTおよびCT-SFTとPhAの関連を詳細に検討した結果、US-SFTおよびCT-SFTともにPhAと有意な負の相関を示した。PhAと脂肪量の関連性については、これまでに体脂肪率や内臓脂肪と負の相関を示す報告が存在している。Ferrazらの心臓病患者105名を対象とした研究では、PhAが腹部超音波で測定された内臓脂肪厚(VAT)と逆相関し、PhAが低いほどVATが多いことが確認された¹²⁾。さらに、青年男女324名を対象とした調査では¹³⁾、PhAと体脂肪率との間に有意な負の相関が確認されており、脂肪量の増加に伴いPhAが低下する傾向が指摘されている。これらの結果は、PhAが脂肪組織の蓄積、特に内臓脂肪や総脂肪量の増加に伴って低下するという生理学的特性と一致している。本研究では、局所的な皮下脂肪厚との関連を検討した結果、PhAとUS-SFTおよびCT-SFTには明確な負の相関が存在し、局所的な評価の有用性を示した。またCTに劣らない精度で局所皮下脂肪を評価可能であり、インピーダンス法やCTに代わる新たな局所脂肪の評価として超音波による局所脂

筋量の定量化指標となりうる可能性が示された。このことは全身の体脂肪評価に限定されていたPhAと脂肪量の関連を、下肢局所にも適用できることを示す新たなエビデンスとなり、PhAの測定が困難な四肢切断者や電極装着制限がある症例に対して、US-SFTが実用的かつ信頼性の高い代替評価指標になり得る可能性を示している。

一方で、筋の質の評価指標については差が認められた。CT値はPhAとの間に整合性の高い関連を示したのに対し、EIとの関連は限定的であり、筋質評価においてはCTの有用性が示された。これは、CTによる筋密度評価が脂肪浸潤などを反映した高精度な構造情報を提供できるのに対し、EIは装置特性や被験者間変動の影響を受けやすいことと関連する可能性がある。今後は超音波の機器を変更した評価を検討する必要がある。

これらの結果の意義は次の通りである。PhAは細胞の健全性や筋量・筋質を反映する総合的指標である一方、四肢切断者などでは測定が困難であることが知られている。皮下脂肪の評価において、US-SFTという非侵襲的で簡便な測定法が、PhAと同様の情報を提供しうることは、現場への応用可能性を高める重要な知見である。現場や測定環境によってはCTを使用できない場合が多い中、超音波による局所的な体組成評価は臨床評価やトレーニングモニタリングへの応用が期待される。一方で、筋質評価を重視する場面では、CTによる評価の導入も考慮する必要がある。

本研究の限界としては、サンプル数の制限や測定部位の限定、測定者間信頼性のさらなる評価の必要性が挙げられる。また、筋力や機能的アウトカムとの連関評価が未実施であるため、今後はPhAおよび超音波やCTに加えて筋力や機能指標を取り入れた多変量解析の実施が望まれる。

5. 結 論

本研究により、US-SFTはCT-SFTに代わる信

頼性の高い皮下脂肪厚指標であることが確認され、PhAとの関連性においてもCTと遜色ない情報を含む可能性が示された。また筋の質評価においてはCTによる評価の方が、信頼性がより高いことが明らかになり、目的に応じた機器選択と評価指標選定の重要性が示唆された。将来的には、四肢切断者などPhAが測定しづらい対象へUS-SFTを用いた評価法を標準化する取り組みが、臨床的価値を持つと考えられる。

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様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) de la Cruz Marcos S., Redondo del Río M.P., de Mateo Silleras B., Applications of Bioelectrical Impedance Vector Analysis (BIVA) in the Study of Body Composition in Athletes., *Applied Sciences*, 11 (21): 9781 (2021)
- 2) Going S., Nichols J., Loftin M., Stewart D., Lohman T., Tuuri G., Ring K., Pickrel J., Blew R., Stevens J., Validation of bioelectrical impedance analysis (BIA) for estimation of body composition in Black, White and Hispanic adolescent girls., *International Journal of Body Composition Research*, 4(4): 161-167 (2006)
- 3) Goosey-Tolfrey V.L., Keil M., Brooke-Wavell K., de Groot S., A Comparison of Methods for the Estimation of Body Composition in Highly Trained Wheelchair Games Players., *International Journal of Sports Medicine*, 37(10): 799-806 (2016)
- 4) Choi H.-J., Ko C.-Y., Chang Y., Kim G.-S., Choi K., Kim C.-H., Development and validation of bioimpedance prediction equations for fat-free mass in unilateral male amputees., *PeerJ*, 9: e10970 (2021)
- 5) 三秋泰一, 超音波検査法を用いた筋の評価, *J. Wellness Health Care*, 47(2): 1-8 (2023)
- 6) Becchetti C., Berzigotti A., Ultrasonography as a diagnostic tool for sarcopenia in patients with cirrhosis: Examining the pros and cons., *European Journal of Internal Medicine*, 116: 27-33 (2023)
- 7) Wang J.-C., Wu W.-T., Chang K.-V., Chen L.-R.,

- Chi S.-Y., Kara M., Özçakar L., Ultrasound Imaging for the Diagnosis and Evaluation of Sarcopenia: An Umbrella Review., *Life*, 12(1) : 9(2022)
- 8) Sederberg M.A., Tarkhan A., Ray L.S., Lee E.S., Lin C., Physical Activity in Adults With an Amputation as Assessed With a Self-Reported Exercise Vital Sign., *PM&R*, 12(9) : 861–869(2020)
- 9) Yoo J.E., Lee D., Kim B., Chang W.H., Jin S.-M., Han K., Shin D.W., Increased risk of type 2 diabetes after traumatic amputation: a nationwide retrospective cohort study., *Front. Endocrinol.*, 15: 1437860(2025)
- 10) Störchle P., Müller W., Sengeis M., Lackner S., Holasek S., Fürhapter-Rieger A., Measurement of mean subcutaneous fat thickness: eight standardised ultrasound sites compared to 216 randomly selected sites., *Scientific Reports*, 8: 16268(2018)
- 11) Orphanidou C., McCargar L., Birmingham C.L., Mathieson J., Goldner E., Accuracy of subcutaneous fat measurement: comparison of skinfold calipers, ultrasound, and computed tomography., *Journal of the American Dietetic Association*, 94(8) : 855–858 (1994)
- 12) Ferraz A.M., Filho G.A., Silva M.L., Freitas L.P., Lima N.K.C., Souza D.D., Alves P.T.S., Lira N.B., Rocha E.E., Is phase angle associated with visceral adiposity and cardiometabolic risk in cardiology outpatients?, *Clin. Nutr. ESPEN.*, 47: 341–347(2022)
- 13) Tyagi T., Singh K., Tyagi R., Correlation of body fat percentage with phase angle in young adults using bioelectric impedance analyzer - A cross-sectional study., *Natl. J. Physiol. Pharm. Pharmacol.*, 13(11) : 2319-2322(2023)

熱的快適性は脳活動から評価できるか？ ーブレインインターフェース型熱的快適性の 評価方法の開発を目指してー

早稲田大学 渡邊 裕 宣
(共同研究者) 杏林大学 渋谷 賢
早稲田大学 杉 泰 佑
同 永 島 計

Can Thermal Comfort be Evaluated from Brain Activity?

by

Hironori Watanabe, Kei Nagashima

*Institute for Energy and environmental system, Sustainable Energy & Environmental
Society Open Innovation Research Organization, Waseda University*

Satoshi Shibuya

*Department of Integrative Physiology,
School of Medicine, Kyorin University*

Taisuke Sugi

*Body Temperature and Fluid Laboratory,
Faculty of Human Sciences, Waseda University*

ABSTRACT

Human thermal perception is essential for adapting to environmental conditions and is divided into two main components: thermal sensation and thermal comfort. This research employed electroencephalogram measurement alongside dipole and event-related spectrum perturbation analysis to clarify the spatiotemporal patterns of brain activity associated with thermal perception. In Experiment 1, we analyzed brain

activity patterns associated with thermal sensation when exposed to localized cold and warm stimuli. Experiment 2 focused on brain activity patterns associated with thermal comfort, using a combination of whole-body and localized thermal stimuli. The results indicated that overlapping brain regions, such as the right anterior cingulate cortex, precuneus, and medial prefrontal cortex, were activated in response to thermal sensation, with distinct temporal activity patterns observed between cold and warm stimuli. Regarding thermal comfort, the anterior cingulate cortex, medial prefrontal cortex, and insular cortex were implicated, with unique spatiotemporal activity patterns distinguishing comfort from discomfort. These results indicate that thermal perception is processed through different neural oscillation patterns within distinct brain regions.

キーワード

熱知覚, 温冷感, 脳波, ダイポール解析, ERSP解析

Keyword

thermal perception, thermal sensation, EEG, dipole analysis, ERSP analysis

要 旨

ヒトの熱知覚は環境適応に重要な役割を果たしており、温冷感と熱的快適感の2要素に分類される。本研究では、脳波測定とダイポールおよび事象関連スペクトラム摂動解析を組み合わせて、熱知覚形成に関連する脳活動の時空間パターンを解明した。実験1では局所的な冷・温刺激による温冷感の脳活動パターンを、実験2では全身と局所の温熱刺激の組み合わせによる熱的快適感の脳活動パターンを検討した。その結果、温冷感では右前中心回、楔前部、内側前頭回などの重複する脳領域が活性化し、冷・温刺激間で異なる時間的活動パターンを示した。熱的快適感では、上前頭回、内側前頭回、前帯状回、島皮質などが関与し、快適・不快感で明確に異なる時空間活動パターンが観察された。これらの知見は、温熱知覚が特定の脳領域における異なる神経摂動パターンによって処理されることを示唆している。

1. 序 論

温度は生物機能に影響を与える要因であり、動物は恒常性維持のために内外の熱環境を意識的・無意識的に評価している。人間の意識的熱知覚は、接触物質の熱特性を推定する温冷感（判別要素）と、快・不快を判断する熱的快適感（快・不快要素）に分類される^{1,2)}。

温度感覚の神経メカニズムについては、機能的・解剖学的に分離された回路による処理（ラベルライン理論）と、皮質ニューロンでの連続的・段階的温度表現による処理という2つのモデルが提唱されている³⁻⁷⁾。fMRI研究では、前帯状皮質、島皮質、下頭頂葉が温度感覚に関与することが示されているが^{8,9)}、冷・温刺激の判別メカニズムは未解明である。

熱的快適感については、行動性体温調節の主要な駆動因子として機能するが、その神経基盤に関する知見は限られている。我々の先行研究では、

局所冷・温刺激と全身冷・温刺激の組み合わせにより、同じ局所刺激でも全身条件によって異なる主観的快適感が生じることを示した¹⁰⁾。しかし、fMRIの時間分解能の制限により、熱的快適感の形成に関連する動的な神経活動パターンは明らかになっていない。

EEG測定は、ミリ秒単位の時間分解能で神経活動の動的パターンを評価可能である。事象関連スペクトラム摂動 (ERSP) 解析により特定刺激に対する詳細な時間的活動が明らかになり、ダイポール解析の進歩により信号源推定精度も向上している^{11, 12)}。本研究では、ダイポール解析とERSP解析を組み合わせ、温冷感(実験1)と熱的快適感(実験2)の形成に関連する脳活動の時空間パターンを解明することを目的とした。なお、実験1の詳細は、Watanabe et al. *Neuroscience*, 2025に示している。

2. 方法

2.1 対象者

本研究のすべてのプロトコルはヘルシンキ宣言を遵守し、早稲田大学の人を対象とする研究に関する審査委員会の承認を得て実施した(承認番号: 2023-212)。すべての対象者から実験参加前にインフォームドコンセントを得て、実験を行った。実験1は健康な若齢成人20名(男性11名、女性9名)、実験2では健康な若齢成人12名(男性11名、女性1名)が参加した。全員が非喫煙者で、神経筋疾患の既往がなく、薬物を服用していなかった。実験24時間前からカフェイン・アルコール摂取と激しい運動を禁止した。

2.2 実験手順

2.2.1 実験1

実験は人工気候室(室温25℃、湿度50%)内で実施した。対象者は下着、Tシャツ、ハーフパンツ、靴下に替え、実験用のリクライニングチェ

アに座り30分間の安静後、右手示指・中指を直径3cm、銅板被覆のペルチェ装置(Intercross社製)に接触させた。

温度刺激は、15秒間の統制温刺激(32℃)に続いて10秒間の条件温刺激(冷刺激24℃または温刺激40℃)のペア刺激とした。この温度設定は疼痛を誘発せず、冷・温感を惹起するよう予備実験に基づき設定した。条件ごとに、各セッションで10回のペア刺激を4セッション実施し、計40回の応答を記録した。セッション間には30秒の休息を設け、2条件の順序はランダム化した。対象者は、測定中に閉眼し、筋活動によるアーチファクトを最小化するため身体をリラックスするように指示された。各条件終了後、視覚的評価尺度(VAS)を用い、局所(指)および全身の温冷感ならびに熱的快・不快感を評価した。生理的パラメーターとして、心拍数、平均血圧、耳内温、平均皮膚温を連続測定したが条件間での差異は確認されなかった。

EEG測定には32ビットプロセッサボード(Cyton Biosensing Board, OpenBCI)を使用し、国際10-20法に則り15電極を配置した(Fp1, Fp2, F3, Fz, F4, F7, F8, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, O2)。右耳朶に基準電極を配置し、インピーダンスは5kΩ以下に維持した。データは、サンプリング周波数128Hzで取得した。EEG解析にはEEGLAB version 2022.1を使用した。前処理として1-40Hzバンドパスフィルタを適用し、条件温刺激前2秒から後10秒をエポック化した。振幅が±100 μVを超えるエポック、およびスペクトルパワーが平均±3を超えるエポックを除外した。その結果、冷条件で2.1 ± 2.2エポック(5.1 ± 5.5%)、温条件で1.9 ± 2.1エポック(4.8 ± 5.3%)が除外された。

EEG解析はEEGLABを使用し¹³⁾、各対象者から15成分を抽出した(全300成分)。ダイポール解析にはDIPFIT function (version 2.3)を使用し、

残差分散が15%を超える成分は除外した(25成分, 8.3%)。ICクラスタリングにはk-means法を用い、空間トポグラフィーマップ、双極子位置、パワースペクトラムを決定因子とした。目標クラスタの選択基準は70%以上の対象者($n \geq 14$)が寄与するクラスタとした。Brodmann領域の同定にはTalairach Client (version 2.4.3)を使用し、双極子重心位置から4mm以内の最有意ボクセルを基準とした。ERSP解析では、各目標クラスタで1-40HzのERSPを条件間比較した。解析区間は条件温刺激前2秒から後10秒とし、Morlet wavelet変換を適用した(1Hzで3サイクルから40Hzで40サイクル)。200時点(-332-8324ms)と79周波数点(1-40Hz線形間隔)を生成し、窓サイズ3336ms、時間分解能88msとした。EEGデータに対しては、EEGLABプラグインを用いて、試行間のERSPの時周波数結果の差を比較するためにパーミュテーション検定を実施した。パーミュテーション検定では、第一種の過誤を回避するためにFalse Discovery Rate法による補正が必要となる場合があるが、本研究では時間要因の水準が多数存在するため、統計的有意差の検出が困難であることから補正は適用しなかった。さらに、 θ (4-7Hz)、 μ (8-13Hz)、 β (15-25Hz)帯域の平均パワー変化を算出し、3次多項式回帰分析を実施し、各ダイポールにおける周波数帯域のパワー変化のパターンを評価した。

2. 2. 2 実験2

実験2は温度刺激以外を実験1と同様とした。温熱刺激は、全身温刺激(TSbody)として水循環スーツを使用し、17°C(Cbody)または47°C(Hbody)の水を2L/分で灌流した。局所刺激(TSlocal)として両側頸部にペルチェ装置を装着し、32°Cの統制温刺激(Nlocal)15秒に続いて24°C(Clocal)または40°C(Hlocal)の条件温刺激10秒を各条件40回実施した。全身温刺激の順序はCbodyの後にHbodyとした。局所温刺激の

順序は各対象者でランダム化し、試行間に30秒以上の休息を設けた。全身温刺激を与え、各温度が安定した後に局所刺激を開始し、閉眼状態でEEG測定を実施した。なお、Cbody後には、32°C(Nbody)の水を灌流させ、耳内温および皮膚温が一定になった時点で、EEG測定は行わず、各条件刺激を10セット実施した。CbodyNlocal, CbodyClocal, CbodyHlocal, NbodyNlocal, NbodyClocal, NbodyHlocal, HbodyNlocal, HbodyClocal, HbodyHlocalにおける局所(頸部)および全身の熱的快・不快感ならびに温・冷感を、VASを用いて評価した。

EEG測定・解析は実験1と同様の設定で実施した。前処理後、CbodyClocal試行で 0.9 ± 2.9 エポック($2.3 \pm 7.2\%$)、CbodyHlocal試行で 0.1 ± 0.3 エポック($0.2 \pm 0.7\%$)、HbodyClocal試行で 3.4 ± 6.4 エポック($8.5 \pm 15.9\%$)、HbodyHlocal試行で 5.7 ± 7.8 エポック($14.2 \pm 19.5\%$)を除外した。7名以上(約70%)の対象者が寄与するクラスタのみを目標クラスタとして選択し、刺激後の各周波数帯域における有意なパワー変化は、対応のあるt検定を用い、刺激前のそれぞれの平均パワーと統計的差異($P < 0.05$)が256ms以上継続する摂動を有意な時間的神経活動の変化と定義した。

2. 3 統計解析

実験1におけるVASによる局所と全身の温冷感と熱的快・不快感については、対応のあるt検定を用いて分析した。各周波数帯域のパワーに対する多項式の適合度は、決定係数(R^2)およびF統計量(OriginPro 2024b, Lightstone, 東京, 日本)を用いて評価した。実験2におけるVASによる局所と全身の温冷感と快・不快感については、対応のある二元配置分散分析(TSbody \times TSlocal)を用いて分析した。統計解析はSPSSソフトウェア(SPSS Statistics 27; IBM社, Armonk, NY, USA)を用いて実施し、有意水準は $P < 0.05$ に設定した。

表1 VASにより評価した局所(指)および全身の温冷感と熱的快・不快感

変数	条件		Paired t-test P value
	冷条件(24℃)	温条件(40℃)	
指			
温冷感	-64.4 ± 23.3	69.0 ± 23.4	< 0.001
熱的快・不快感	-1.5 ± 30.0	5.60 ± 45.0	0.554
全身			
温冷感	-8.8 ± 16.3	8.9 ± 12.1	0.002
熱的快・不快感	0.5 ± 17.4	2.8 ± 20.9	0.272

平均値 ± 標準偏差

3. 結果

3.1 実験1

VAS評価による温熱快適性 (P = 0.554) または全身の快・不快感 (P = 0.740) に有意差はみられなかった(表1)。しかし、局所 (P < 0.001) および全身の温冷感 (P = 0.003) では条件間に有意差が認められた。全対象者が冷条件では冷たいと感じ、温条件では温かいと感じた(表1)。

クラスタリングにより、10個のクラスタが同定された。これらは右内側前頭回 (MNI座標: x = 9, y = 4, z = 55; BA6), 右前中心回 (MNI座標: x = 50, y = -3, z = 24; BA6), 左前中心回 (MNI座標: x = -46, y = 0, z = 38; BA6), 右楔前部 (MNI座標: x = 3, y = -56, z = 55; BA7), 右帯状回 (MNI座標: x = 12, y = -57, z = 5; BA30), 左帯状回 (MNI座標: x = -14, y = -31, z = 29), 右中前頭回 (MNI座標: x = 37, y = 45, z = 9; BA10), 右上前頭回 (MNI座標: x = 2, y = 60, z = 2; BA10), 右楔部 (MNI座標: x = 9, y = -77, z = 24; BA18), 左中後頭回 (MNI座標: x = -36, y = -78, z = 9; BA19) が含まれた(図1, 表2)。

ERSP解析では、各周波数帯域におけるパワー変化が観察され(図1)、3次多項式回帰分析では、右楔前部の冷条件μ帯域を除き、全ての脳領域・周波数帯域で有意な適合が認められた (P < 0.001)。R²値は0.03から0.93まで広範囲に分布し、回帰係数パターンは条件・周波数帯域・脳領域間で異なっていた(図1)。

3.2 実験2

予想通り、全身の温冷感にはTSbodyの主効果が認められたが、TSlocalの主効果は認められなかった (TSbody: P < 0.001; TSlocal: P = 0.147; 交互作用: P = 0.299; 図2)。事後分析の結果、CbodyはNbodyよりも強い冷感を、HbodyはNbodyよりも強い温感を引き起こしたことが明らかとなった (いずれも P < 0.001)。また、全身の熱的快・不快感に対しては、TSbodyおよびTSlocalの両方に有意な主効果が認められた (TSbody: P < 0.001; TSlocal: P = 0.012; 交互作用: P = 0.183; 図2)。事後分析では、CbodyおよびHbodyはNbodyと比較して有意に不快感を誘発した (いずれも P < 0.001) 一方で、CbodyとHbody間には差がなかった (P = 1.000)。さらに、Nlocalと比較してClocalでは熱的快・不快感が変化したが (P = 0.010)、Hlocalでは変化しなかった (P = 1.000)。頸部の温熱感については、TSbodyの主効果は認められなかったが、TSlocalの主効果が有意に認められた (TSbody: P = 0.512; TSlocal: P < 0.001; 交互作用: P = 0.139; 図2)。事後分析により、ClocalはNlocalよりも強い冷感を、HlocalはNlocalよりも強い温感を頸部において引き起こすことが示された (いずれも P < 0.001)。一方、局所の熱的快・不快感については、TSlocalの主効果およびTSlocal × TSbodyの交互作用効果の両方が認められた (TSbody: P = 0.565; TSlocal: P = 0.004; 交互作用: P < 0.001; 図2)。事後分析により、Cbody条件下では、Clocalは不快感を、Hlocal

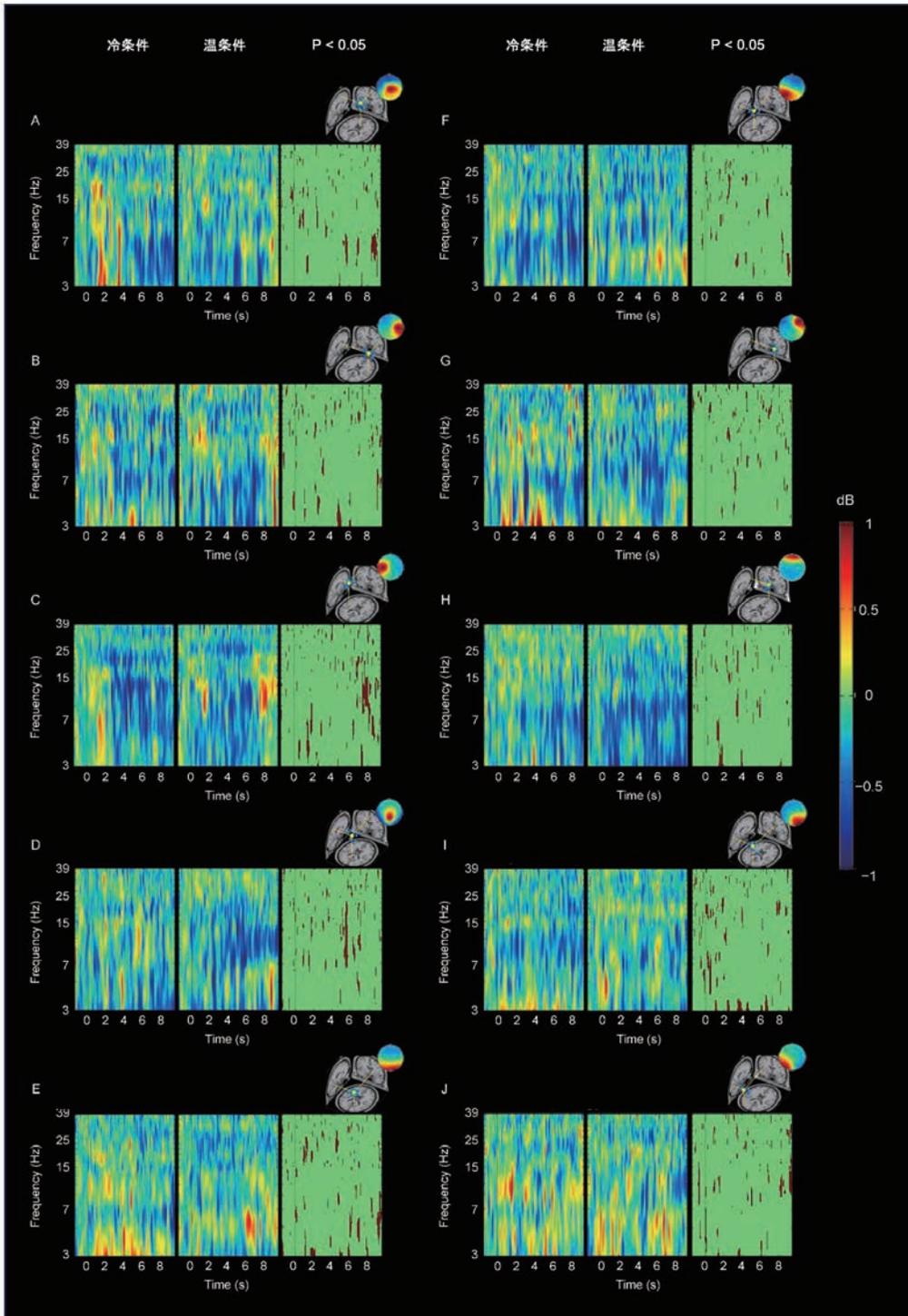


図1 時間-周波数プロットは、各活性化脳領域における事象関連スペクトル変動 (ERSP) を示している (右内側前頭回:A, 右前中心回:B, 左前中心回:C, 右楔状部:D, 右帯状回:E, 左帯状回:F, 右中前頭回:G, 右上前頭回:H, 右楔部:I, 左中後頭回:J)。各領域において、左および中央のパネルは冷条件および温条件のERSPをそれぞれ示す。青はパワーの減少を、赤はパワーの増加を表す。右のパネルはパーミュテーション検定の結果を示し、両条件間で有意差が認められた領域 ($P < 0.05$) は濃赤色で示している。

表2 クラスタリングにより同定された
温冷感に関連する脳領域

脳領域	半球	MNI(x, y, z)	ブロードマン脳領域
中心前回	右	50, -3, 24	6
	左	-46, 0, 38	6
楔前部	右	3, -56, 55	7
内側前頭回	右	9, 4, 55	6
内側前頭回	右	37, 45, 9	10
上前頭回	右	2, 60, 2	10
楔部	右	9, -77, 24	18
後頭回	左	-36, -78, 9	19
帯状回	右	12, -57, 5	30
	左	-14, -31, 29	

は快適感を誘発することが示された (Clocal vs. Nlocal: $P = 0.001$; Hlocal vs. Nlocal: $P < 0.001$). 一方で, Hbody条件下では, ClocalおよびNlocalは温熱快・不快感を変化させなかった (Clocal vs. Nlocal: $P = 1.000$; Hlocal vs. Nlocal: $P = 0.133$). クラスタリングにより, 8個のクラスタが同定された. これらには右上前頭回 (MNI座標: $x = 16, y = 65, z = -2$), 左内側前頭回 (MNI座標: $x = -23, y = 43, z = 7$; BA10), 右内側前頭回 (MNI

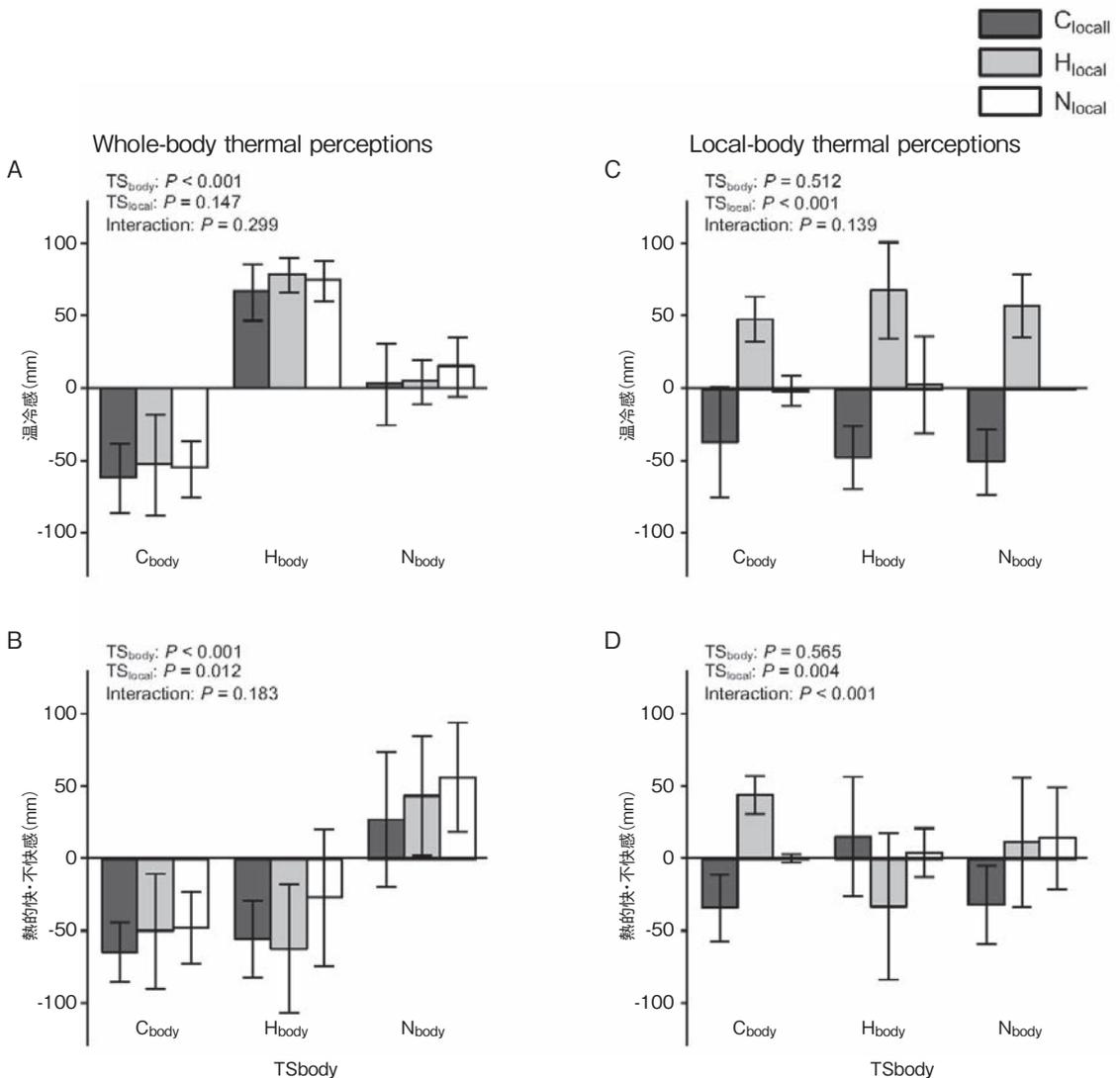


図2 全身および局所の温冷感および熱的快・不快感に関する視覚的評価尺度 (VAS) 評価
全身温度刺激 (TS_{body}) は冷 (24° C, C_{body}), 温 (40° C, H_{body}), 統制 (32° C, N_{body}) の3条件で, これらと同時に局所温度刺激 (TS_{local}) として冷 (17° C, C_{local}), 温 (47° C, H_{local}), 統制 (32° C, N_{local}) を付与した. (A, C) 温冷感の評価スコア: 全身 (A) および局所 (C). (B, D) 熱的快/不快感の評価スコア: 全身 (B) および局所 (D)

座標 : $x = 14, y = -2, z = 50$; BA6), 右中側頭回 (MNI座標 : $x = 41, y = -63, z = 17$; BA39), 左帯状回 (MNI座標 : $x = 0, y = 18, z = 45$), 右前帯状回 (MNI座標 : $x = 16, y = 32, z = 1$), 右後帯状

回 (MNI座標 : $x = 4, y = -61, z = -19$; BA23), 左島皮質 (MNI座標 : $x = -48, y = -37, z = 18$; BA13) が含まれていた (図3).

ERSP解析では, 各周波数帯域におけるパワー

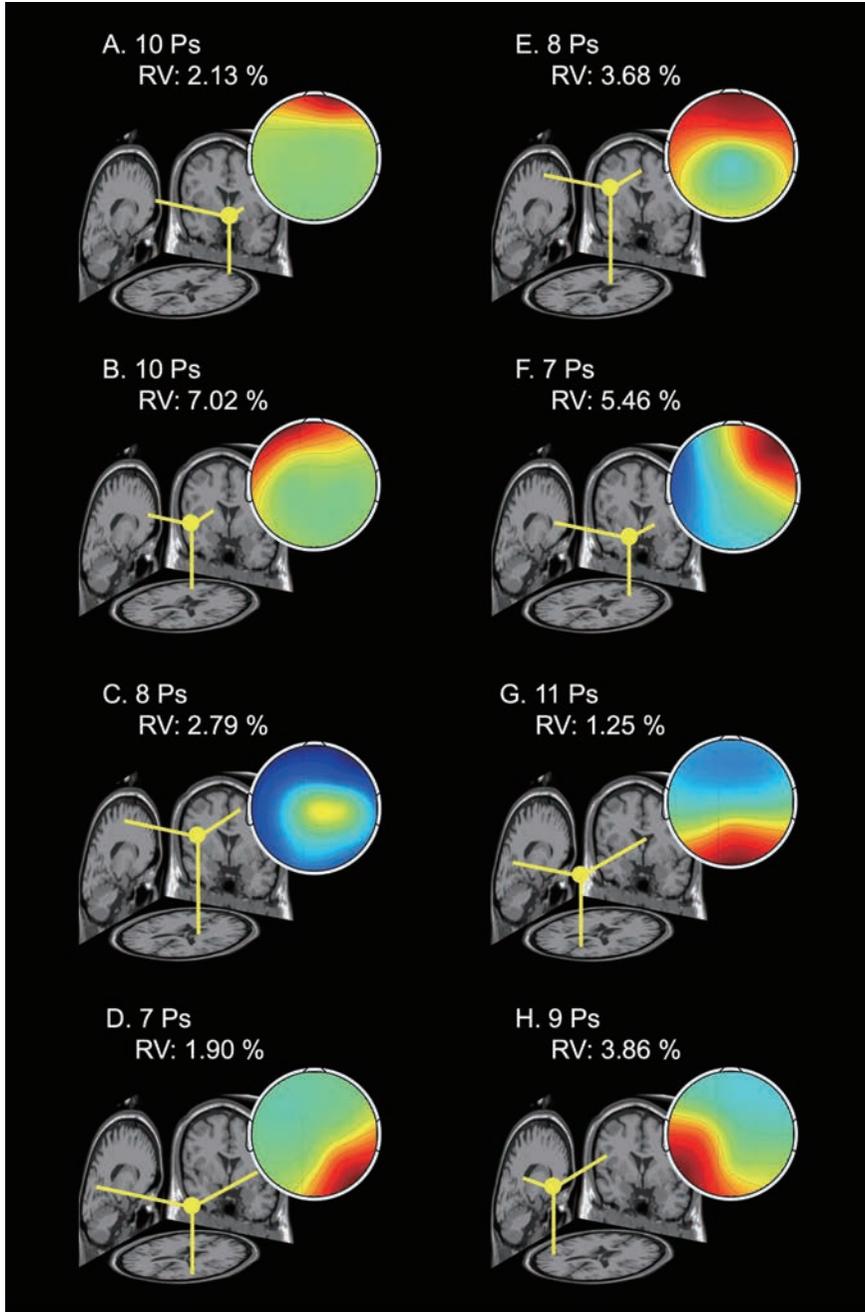


図3 局所温度刺激 (ClocalおよびHlocal, Nlocal) が全身温度刺激 (CbodyおよびHbody) と同時に付与された際の, 各ダイポールにより同定された脳領域を示す (A) 右上前頭回, (B) 左内側前頭回, (C) 右内側前頭回, (D) 右中側頭回, (E) 左帯状回, (F) 右前帯状回, (G) 右後帯状回, (H) 左島回. 青はパワーの減少を, 赤はパワーの増加を表す.

変化が観察され、256ms以上継続する摂動を有意な時間的神経活動の変化と定義した結果、CbodyClocal条件（不快）では右中側頭回の θ 帯域（2.5-8.2 s）、左帯状回の θ 帯域（1.8-4.1 s）、左島皮質の θ 帯域（7.2-8.1s）、右上前頭回の μ 帯域（4.9-5.3 s）、右内側前頭回の μ 帯域（3.5-8.3 s）、右中側頭回の μ 帯域（3.1-3.5 s）、右後帯状回の μ 帯域（0.4-8.3 s）、左帯状回の μ 帯域（1.1-1.6 s）、右後帯状回の β 帯域（1.0-8.3 s）で活性化が認められた。CbodyHlocal条件（快）では右後帯状回の θ 帯域（1.0-1.6 s）、右後帯状回の μ 帯域（2.5-2.9 s）、左島皮質の μ 帯域（7.6-7.9 s）、左島皮質の β 帯域（3.9-4.3 s）で活性化が認められた。HbodyClocal条件（快適）では右・左内側前頭回の θ 帯域（1.4-7.6 s, 4.8-6.4 s）、左内側前頭回の μ 帯域（7.5-7.9 s）、右内側前頭回の β 帯域（4.3-4.9 s）で活性化が認められた。HbodyHlocal条件では256ms以上継続する有意な摂動は認められず、これは主観評価で快適感の変化がなかったことと一致していた（図4、表3）。

4. 考 察

4. 1 温冷感の形成メカニズム（実験1）

局所温・冷刺激に対し、楔前部、前中心回、内側前頭回など10の重複する脳領域が活性化した。楔前部は高次認知機能、前中心回は運動制御、前頭回は認知処理、帯状回は感情・記憶処理に関与しており¹⁴⁻¹⁶、温冷感が多様な脳機能の統合により生成されることが示された。重要な点として、同一脳領域でも冷・温刺激で異なる時間的神経振動パターンを示したことである。3次多項式回帰分析により、回帰係数パターンが条件・周波数帯域・脳領域間で異なることが明らかになった。これは、ラベルライン理論とは異なり、同一脳領域における異なる処理メカニズムによって温度判別が行われることを示唆している。 θ 波（注意）、 μ 波（感覚運動処理）、 β 波（覚醒・集中）の周波

数特性の違いも、感覚の複雑な神経処理を反映している¹⁷。また、冷刺激を伝達するA δ 線維と温刺激を伝達するC線維の伝導速度の違い¹⁸⁻²⁰、および皮質での二相性反応（急速な初期反応と緩徐な適応反応）が、観察された時間的パターンの差異に寄与していると考えられる。

4. 2 温熱快・不快感の形成メカニズム（実験2）

実験2では、温熱快適感と不快感で明確に異なる時空間活動パターンが観察された。特に重要な発見は、同じ局所刺激でも全身条件により主観的快適性が変化し、それに対応した脳活動パターンの違いが検出されたことである。不快条件（CbodyClocal）では上前頭回、内側前頭回、中側頭回、後帯状回、帯状回、島皮質という広範囲の脳領域が活性化したのに対し、快適条件（CbodyHlocalやHbodyClocal）では限定的な領域の活性化のみが認められた。これは、不快感の処理により多くの認知・感情資源が動員されることを示唆している。上前頭回は認知・運動制御・感覚ネットワークのハブとして機能し、内側前頭回は高次認知機能、中側頭回は意識的記憶、前帯状回は感情評価、後帯状回はエピソード記憶、島皮質は感覚・感情統合に関与しているとされている^{15, 16, 21-23}。これらの知見は、熱的快・不快が複数の認知・感情脳ネットワークの統合活動により生成されることを示している。注目すべきは、256ms以上継続する有意な摂動の定義により、機能的に関連する脳活動を明確に分離できたことである。HbodyHlocal条件で有意な長期摂動が認められなかったことは、主観評価で熱的快・不快感がなかったことと一致しており、この定義の妥当性を支持しているかもしれない。

4. 3 限 界

本研究にはいくつかの限界がある。15電極による空間分解能の制限、個人差の評価不足が挙げられる。

表 3A クラスタリングおよび事象関連スペクトル摂動(ERSP)解析によって同定された脳領域

脳領域 (x, y, z)	半球	BA	Frequency band	C _{body} C _{local}	条 C _{body} H _{local}	件 H _{body} C _{local}	H _{body} H _{local}
上前頭回 (16, 65, -2)	右		Θ			7.80-7.89	1.19-1.45
			μ	2.19-2.28 4.89-5.28 7.28-7.50			
			β			4.19-4.32 4.67-4.89	
内側前頭回 (-23, 43, 7)	左	10	Θ			1.41-2.19 3.14-3.23 3.71-4.46 7.19-7.57	1.28-1.50 3.58-3.71
			μ	1.54-1.62 2.62-2.71 3.58-3.71 5.46-5.50 6.50-6.71		0.53-0.71 1.41-1.45 2.28-2.50 6.06-6.24 7.46-7.94	
			β	0.58-0.67 2.23-2.32		1.06-1.14 4.67-4.80 5.85-5.93	
内側前頭回 (14, -2, 50)	右	6	Θ		2.32-2.41 5.92-6.01	4.80-5.10 5.76-6.37	
			μ	3.54-3.89 4.76-5.50 5.93-8.33			
			β		4.46-4.62 7.15-7.24	0.45-0.54 4.28-4.85	
中側頭回 (41, -63, 17)	右	39	Θ	1.28-1.50 2.54-4.06 4.85-5.28 5.85-6.78 7.50-8.24			
			μ	3.14-3.46 6.46-6.54 8.06-8.33		5.46-5.58 7.02-7.10	
			β		1.89-2.14	5.10-5.37	
帯状回 (0, 18, 45)	左	32	Θ	1.50-1.54 1.84-2.32 3.67-4.14 7.24-7.37	2.45-2.58		0.45-0.58 4.67-4.76
			μ	1.10-1.58	7.94-8.15	0.49-0.62 1.93-2.02 3.02-3.29	
			β				
前帯状回 (16, 32, 1)	右		Θ	3.58-3.62		1.14-1.19 5.93-6.15	0.50-0.58
			μ			2.76-2.93	
			β	0.71-0.89 2.06-2.10 6.15-6.41		2.02-2.10	

5. 結 論

本研究により、温冷感および熱的快・不快感の形成に関連する脳活動の時空間パターンに関する重要な知見が得られた。温冷感では共通の脳領域

が活性化するが、冷・温刺激で異なる時間的パターンを示すことで判別が行われる。熱的快適感では、快適・不快感で明確に異なる時空間活動パターンが観察され、不快感の形成には広範囲の認知・感情関連領域が動員される。これらの知見は、EEG

表 3B クラスタリングおよび事象関連スペクトル摂動(ERSP)解析によって同定された脳領域

脳領域 (x, y, z)	半球	BA	Frequency band	C _{body} C _{local}	条 C _{body} H _{local}	件 H _{body} C _{local}	H _{body} H _{local}	
後帯状回 (4, -61, -19)	右	23	Θ		1.02-1.58	3.54-3.76	4.19-4.41	
					6.98-7.10		5.37-5.62	
					0.41-2.10			
					2.39-4.67			
					4.98-5.10			
			μ		2.54-2.89			
					5.41-5.89			
					6.67-7.41			
					7.76-8.33			
視床下部 (-48, -37, 18)	左	13	Θ		5.67-5.71			
					6.37-6.46			
					3.14-3.41		0.02-0.14	
					4.80-4.93			
					6.37-6.50			
					7.24-8.06			
				μ		6.41-6.62		
							1.58-1.84	
							4.15-4.28	
							4.89-4.93	
		7.58-7.94						
β			1.32-1.37	1.75-1.84				
			6.76-6.80	3.41-3.54				
				3.89-4.28				
				4.85-5.10				
				5.28-5.50				
				6.28-6.41				
				7.06-7.15				
				7.94-8.06				

BA, ブロードマン脳領域

スペクトルパワーの変動は, TSlocalの付与から, 少なくとも256 ms間持続した場合は太字で示され, 変動が認められなかった場合は非太字で示されている。

技術の発展により, 将来的には個人適応型の衣服の快適性の評価システムの開発や, 医療・介護施設での温熱環境最適化へのシステム応用が期待される。

謝 辞

著者らは実験参加者の方々に感謝の意を表す。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 (H.W) および日本学デサントスポーツ科学 Vol. 47

術振興会科学研究費助成事業 (基盤研究 A : JP 19H01128, K.N) の支援を受けた。

文 献

- 1) M. Cabanac, Physiological role of pleasure: A stimulus can feel pleasant or unpleasant depending upon its usefulness as determined by internal signals, *Science*, (80-.) 173, 1103-1107 (1971)
- 2) H. Hensel, Thermoreception and temperature regulation, *Monogr. Physiol. Soc.*, 38, 1-321. <https://>

- doi.org/10.1177/1748895811401979 (1981)
- 3) J.C. Pereira, R.C. Alves, The labelled-lines principle of the somatosensory physiology might explain the phantom limb phenomenon, *Med. Hypotheses*, 77, 853–856. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2011.07.054>, (2011)
 - 4) A.D. Craig, J.O. Dostrovsky, Differential projections of thermoreceptive and nociceptive lamina I trigeminothalamic and spinothalamic neurons in the cat, *J. Neurophysiol.*, 86, 856–870. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.86.2.856> (2001)
 - 5) C. Ran, M.A. Hoon, X. Chen, The coding of cutaneous temperature in the spinal cord, *Nat. Neurosci.*, 19, 1201–1209. <https://doi.org/10.1038/nn.4350> (2016)
 - 6) D.A. Yarmolinsky, Y. Peng, L.A. Pogorzala, M. Rutlin, M.A. Hoon, C.S. Zuker, Coding and plasticity in the mammalian thermosensory system, *Neuron*, 92, 1079–1092. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.10.021> (2016)
 - 7) F. Wang, E. Bélanger, S.L. Côté, P. Desrosiers, S.A. Prescott, D.C. Côté, Y. De Koninck, Sensory afferents use different coding strategies for heat and cold, *Cell Rep.*, 23, 2001–2013. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2018.04.065> (2018)
 - 8) K. Nagashima, H. Nakata, T. Harada, I. Kato, N. Sadato, Differences in the neural networks of thermal sensation with and without evaluation process, *IBRO Neurosci. Reports*, 13, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2022.09.006> (2022)
 - 9) Y. Aizawa, T. Harada, H. Nakata, M. Tsunakawa, N. Sadato, K. Nagashima, Assessment of brain mechanisms involved in the processes of thermal sensation, pleasantness/unpleasantness, and evaluation, *IBRO Reports*, 6, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.ibror.2019.01.003> (2019)
 - 10) Y. Aizawa, T. Harada, H. Nakata, M. Tsunakawa, N. Sadato, K. Nagashima, Assessment of brain mechanisms involved in the processes of thermal sensation, pleasantness/unpleasantness, and evaluation, *IBRO Reports*, 6, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.ibror.2019.01.003> (2019)
 - 11) S. Shibuya, S. Unenaka, S. Shimada, Y. Ohki, Distinct modulation of mu and beta rhythm desynchronization during observation of embodied fake hand rotation, *Neuropsychologia*, 159, 107952. <https://doi.org/10.1016/j.Neuropsychologia.2021.107952> (2021)
 - 12) S. Shibuya, S. Unenaka, T. Zama, S. Shimada, Y. Ohki, Sensorimotor and posterior brain activations during the observation of illusory embodied fake hand movement, *Front. Hum. Neurosci.*, 13, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00367> (2019)
 - 13) A. Delorme, S. Makeig, EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis, *J. Neurosci. Methods*, 134, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009> (2004)
 - 14) A.E. Cavanna, M.R. Trimble, The precuneus: A review of its functional anatomy and behavioural correlates, *Brain*, 129, 564–583. <https://doi.org/10.1093/brain/awl004> (2006)
 - 15) F.L. Stevens, R.A. Hurlley, K.H. Taber, Anterior cingulate cortex: Unique role in cognition and emotion, *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci.*, 23, 121–125. <https://doi.org/10.1176/jnp.23.2.jnp121> (2011)
 - 16) R. Leech, D.J. Sharp, The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease, *Brain*, 137, 12–32. <https://doi.org/10.1093/brain/awt162> (2014)
 - 17) W. Klimesch, EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance, *Brain Res. Rev.*, 29, 169–195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3) (1999)
 - 18) P. Hüllemann, A. Nerdal, A. Binder, S. Helfert, M. Reimer, R. Baron, Cold-evoked potentials—Ready for clinical use?, *Eur. J. Pain*, 20, 1730–1740. <https://doi.org/10.1002/ejp.896> (2016)
 - 19) R. De Keyser, E.N. van den Broeke, A. Courtin, A. Dufour, A. Mouraux, Event-related brain potentials elicited by high-speed cooling of the skin: A robust and non-painful method to assess the spinothalamic system in humans, *Clin. Neurophysiol.*, 129, 1011–1019. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.02.123> (2018)
 - 20) C. Leone, A. Dufour, G. Di Stefano, A. Fasolino, A. Di Lionardo, S. La Cesa, E. Galosi, M. Valeriani, M. Nolano, G. Cruccu, A. Truini, Cooling the skin for assessing small-fibre function, <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001584> (2019)
 - 21) M. Snellekx, S.L. Rossell, A. Gibbons, J. Nithianantharajah, B. Dean, Evidence that the frontal pole has a significant role in the pathophysiology of schizophrenia, *Psychiatry*

- Res. 317, 114850. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2022.114850> (2022)
- 22) D.D. Jobson, Y. Hase, A.N. Clarkson, R.N. Kalaria, The role of the medial prefrontal cortex in cognition, ageing and dementia, *Brain Commun.*, 3, <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcab125> (2021)
- 23) L.R. Squire, C.E.L. Stark, R.E. Clark, The medial temporal lobe, *Annu. Rev. Neurosci.*, 27, 279–306. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144130> (2004)

適切な Footwear 着用による 身体動作の「軽やかさ」の定量化

森ノ宮医療大学 工藤 慎太郎
(共同研究者) 同 渡邊 貴博
同 宮下 敏紀

Assessment of The Effects of Appropriate Footwear on The Comfort of Movement

by

Shintarou Kudo, Takahiro Watanabe,
Toshinori Miyashita
*Inclusive Medical Sciences Research Institute,
Morinomiya University of Medical Sciences*

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effects of footwear-induced arch support on subjective "comfort" during running and its biomechanical factors. In experiment 1, arch deformation was measured using a stretch strain sensor in 30 healthy adults. The results showed that the condition with greater arch support exhibited significantly higher visual analog scale (VAS) scores for perceived comfort compared to the non-support condition. In experiment 2, 20 healthy adults participated to examine the biomechanical factors related to subjective comfort. Participants rated footwear conditions as either "comfort" (perceived as light) or "non-comfort" (not perceived as light). Biomechanical parameters, including dynamic joint stiffness (DJS), co-contraction index (CCI) of tibialis anterior and lateral gastrocnemius, and jerk (an indicator of smoothness), were measured during running. The results demonstrated

that the comfort condition showed significantly lower DJS, CCI, and jerk compared to the non-comfort condition. These findings suggest that footwear providing appropriate arch support may contribute to an increased sense of comfort during running by suppressing excessive joint stiffness and muscle co-contraction, and by promoting smoother joint movements.

キーワード

軽やかさ, 伸縮性歪みセンサー, 関節剛性, 同時収縮指数, 躍度

Keyword

movement comfort, stretch strain sensor, joint stiffness, co-contraction index, jerk

要 旨

本研究は、Footwearによる足部アーチ制動がランニング中の主観的な「軽やかさ」に与える影響と、その生体力学的要因を明らかにすることを目的とした。実験1では健常成人40名を対象に伸縮性歪みセンサーを用いて足部アーチ変形量を測定し、アーチ制動条件では非制動条件よりも軽やかさの点数が有意に増加した ($p = 0.024$)。実験2では健常成人20名を対象に、軽やかだと評価されたFootwear着用時 (Comfort条件) と軽やかではないと評価されたFootwear着用時 (Non-Comfort条件) の、関節剛性 (DJS)、同時収縮指数 (CCI)、滑らかさを示すJerkを測定した。その結果、Comfort条件はNon-Comfort条件と比較して、DJS ($p = 0.047$)、CCI ($p = 0.044$)、Jerk ($p = 0.010$) が有意に低下した。以上の結果より、Footwearによる足部支持が、関節剛性や同時収縮の抑制、動作の滑らかさに寄与し、主観的な「軽やかさ」の向上に貢献する可能性が示唆された。

緒 言

適切なFootwearの選定において、着用後の快適さや動作の軽やかさは重要な要素とされている¹⁾。これは、快適性の高いFootwearの着用が、ラ
デサントスポーツ科学 Vol. 47

ンニングパフォーマンスの向上に貢献することが報告されているためである²⁾。また快適性の高いFootwearはスポーツ動作に関連する障害や外傷を軽減させる可能性もある³⁾。しかし、その快適さや動作の軽やかさの評価には、visual analog scale (VAS) やLikert scaleなどの主観的な評価にとどまっている^{4,5)}。主観的な軽やかさの評価は、異なる日に複数回実施し、その平均を算出する場合にのみ信頼性があることが示されている⁴⁾。この方法は靴選定の場面では現実的ではなく、即座の評価には適さない可能性がある。したがって、快適さや軽やかさという主観的な要因を客観的なデータで示すことが必要である。

足部アーチの支持性については、アーチサポートインソールはランニング中の足部運動に影響を与えることが報告されている⁶⁻⁹⁾。MacLeanら⁷⁾は、アーチサポートインソール着用条件は、靴のみの条件と比較して下腿に対する後足部の外がえしが減少したと報告している。Ferberら¹⁰⁾は、アーチサポートインソール着用条件は、靴のみの条件と比較して、足部アーチの低下が制動できたと報告した。しかし、このようなアーチ支持による足部運動や足部アーチの変化が、実際に動作の軽やかさといった主観的感觉に影響を与えているかは、依然として不明である。さらに、これまでの

多くの軽やかさに関する研究では、障害リスクや運動パフォーマンスへの影響に焦点が当てられてきたが^{2,3)}、軽やかさはどのような生体力学的データに起因するかが不明である。

これまでの研究では、Footwearを着用すると足部の運動解析が困難となるため、アーチ支持性と快適さの関係性を明らかにすることは困難であった。インソールの効果判定を運動学的に行っている研究では、靴に穴を開けた状態での測定や^{9,10)}、靴にマーカーを貼付した条件で測定されている⁸⁾。この方法では、靴内における足部アーチ挙動の評価が十分にできていない可能性がある。近年、伸縮性歪みセンサーを使用したFootwear内で足部アーチ挙動を評価する手法が確立され^{11,12)}、この手法を使用することで、完全な靴着用時の評価が可能となった。そこで、本手法を用いることで、靴内で足部アーチが適切に保持されているかを定量的に評価でき、先行研究での問題点を解決できると考えた。さらに、動作の質の評価として、動作中の関節運動の剛性 (Dynamic joint stiffness: DJS)¹³⁾ と主動作筋と拮抗筋の同時収縮 (Co-contraction index : CCI)¹⁴⁾、下肢関節運動の安定性の指標である下肢関節の協調性のばらつき (Coordination variability)¹⁵⁾ が知られている。これらは関節が安定かつ滑らかに動いているかを評価する指標であり、関節運動の安定が低下すると、関節の剛性を高めるため、同時収縮が増加する。つまり拮抗筋の活動により、抵抗が生じ、重く感じると可能性がある。すなわち、これらの指標は関節運動の軽やかさに影響する可能性がある。そのため3つの要因を定量評価し、関係性を明らかにし、適切なFootwearを装着した条件と装着していない条件で比較検討することで、適切なFootwearが動作の「軽やかさ」を改善するかを生体力学的手法により定量評価できると考えられる。

本研究の目的は、Footwearによる足部アーチ制

動が、ランニング中の主観的な「軽やかさ」に影響を及ぼすかを明らかにし、ランニング中の「軽やかさ」に影響する力学的パラメーターを解明することとした。本研究の仮説は、Footwearによる足部アーチの制動は軽やかさを高め、動作の円滑性を示す力学的パラメーターが軽やかさに関連するとした。

1. 研究方法

1. 1 実験1：ランニング中の主観的な「軽やかさ」に対するインソールの影響

本研究は横断研究とし、下肢に整形外科的疾患や神経学的疾患の既往歴を有さない健康成人大学生40名を対象とした。本研究は所属機関の倫理委員会の承認を受けて実施され (No. 2024-092)、全ての対象者は実験前に書面によるインフォームド・コンセントに同意した。

伸縮性歪みセンサー (C-STRETCH[®], Bando Chemical Industries, Ltd., Kobe, Japan) を使用し、足部の運動を測定した。ストレッチセンサー計測システムは、ストレッチセンサー、トランスミッタ、出力ケーブルで構成され、三次元動作解析装置と同期をかけた。伸縮性歪みセンサーのサイズは、縦10mm、横50mmである。ストレッチセンサーは、先行研究で再現性が認められているスプリング靱帯法に基づき貼付した¹¹⁾。貼付方法は、距骨下関節を中間位 (距骨頭の内側と外側が同程度に触れる位置) で、ストレッチセンサーを70mmに伸張し、載距突起と舟状骨に貼付した。伸縮性歪みセンサーのサンプリング周波数は100Hzとした。

靴は全対象者共通 (WAVE REVOLT, Mizuno, 日本) とし、各対象者のサイズに合った靴を使用した。インソールは靴付属のデフォルトインソール (WAVE REVOLT, Mizuno, 日本)、アーチサポートの高さが異なるレディメイド型インソール (Low, Middle, High) (Footcraft, シグマック

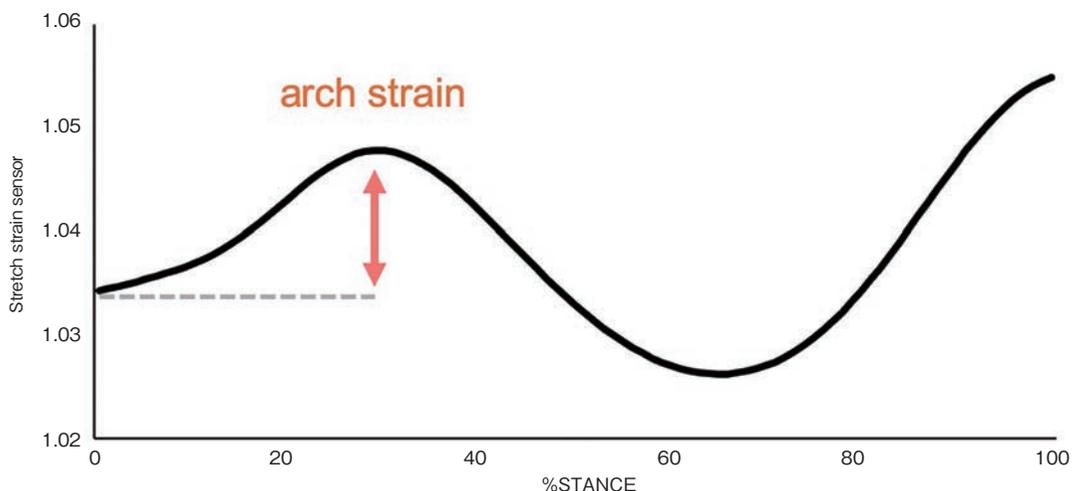


図1 伸縮性歪みセンサーの波形と arch strain

ス社、日本)とした。ランニングデータ取得前に、5秒間の静止立位データを測定した。静止立位のデータは、伸縮性歪みセンサー信号のオフセット値を算出するために使用された。静止立位の測定後、対象者は裸足条件およびインソール着用状態で、快適速度で床反力計（サンプリング周波数1000Hz）（AMTI, USA）を踏むようにランニングを行なった。なお、走路は全長約15mの直線であり、2枚の床反力計（幅40cm×長さ80cm）が埋め込まれている。対象者は少なくとも10回の走行練習を行い、対象者が課題動作（測定足で床反力計に接地する）とインソールに慣れたことを確認し計測した。各条件はランダムで実施し、対象者にはブラインドを実施した。各条件5施行ずつ測定を実施し、裸足条件を5cmとした10cm visual analog scale (VAS) で評価した。つまり、5cm未満は裸足条件より軽やかでないことを示し、5cm以上は裸足条件と比較して軽やかであることを示す。疲労の影響を取り除くため、各施行間に5分間の休憩を設けた。

対象者が床反力計に接地した5施行のデータを解析対象とした。伸縮性歪みセンサーから得られた生データは、10HzのButterworth low-pass filterでフィルターをかけた。ランニング立脚期は床反力データをもとに同定され、初期接地は床反力垂

直成分が20Nを超えた時点、足部離地は床反力垂直成分が20Nを下回った時点と定義した。ランニング立脚期は、101ポイントに時間正規化した。初期接地から最大伸張時までの伸縮性歪みセンサーの電圧の最大値を arch strainとして算出した(図1)。インソール4条件のうち、arch strainが最小の条件をアーチ制動条件、arch strainが最大の条件をアーチ非制動条件とした。

統計解析はR studio (version 4.0.4; R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)を用いて実施した。アーチ制動条件と非制動条件の比較において、各条件のVASに対してShapiro-Wilk検定を実施し、対応のあるt検定を実施した。なお、有意水準は5%とした。

1. 2 実験2：主観的な「軽やかさ」と関連するパラメータの解明

本横断研究は、下肢に整形外科的疾患や神経学的疾患の既往歴を有さない健常成人大学生20名を対象とした。本研究は所属機関の倫理委員会の承認を受けて実施され (No. 2024-092)、全ての対象者は実験前に書面によるインフォームド・コンセントに同意した。

赤外線カメラ9台を含む三次元動作解析装置 (Vicon MX system, Oxford Metrics Ltd., Oxford,

England), 加速度センサーが内蔵された無線表面筋電計2台 (Cometa slr, Milan, Italy), 床反力計1枚を使用した. サンプル周波数はそれぞれ 250Hz, 1000Hz, 1000Hzとした. Plug-in gait lower body modelに基づき, 直径9.5mmの赤外線反射マーカを, 左右上前腸骨棘・左右上後腸骨棘・右大腿骨近位 1/3・左大腿骨遠位 1/3・左右大腿骨外側上顆・右脛骨近位 1/3・左脛骨遠位 1/3・左右外果・左右第二中足骨頭・左右踵骨の計16箇所に貼付した. 筋電計はSENIAMのガイドラインに基づき, 右前脛骨筋, 右腓腹筋外側頭に貼付した. 表面筋電計を貼付後, 前脛骨筋は座位での足関節背屈, 腓腹筋外側頭は片脚立位最大底屈位での最大抵抗で, 最大随意等尺性収縮 (MVIC) を計測した. また, 前脛骨筋に貼付した表面筋電計の加速度センサーを腓骨頭に貼付した. 足部運動は実験1と同様, 伸縮性歪みセンサー (サンプリング周波数100Hz) をスプリング靱帯法に基づき対象者の足部に貼付し計測した.

靴およびインソール条件, VAS評価は実験1と同様に実施した. 対象者が床反力計に接地した5施行のデータを解析対象とした. 赤外線反射マーカの軌跡, 床反力データは, それぞれ Butterworth low-pass filterが12Hz, 50Hzで実施された. Plug-in gait lower body modelに基づき下腿, 足部セグメントを定義し, 下腿セグメントに対する足部セグメントの矢状面角度を算出した. 関節角度と床反力データより, 足関節の関節モーメントを算出した. その後, 関節剛性の指標である dynamic joint stiffness (DJS) を足関節矢状面角度と足関節矢状面モーメントから算出した¹³⁾.

表面筋電図はセンサー内で10Hz~450Hzのバンドパスフィルターが施行された. 得られた筋電図波形は, Visual 3D (C-Motion, Germantown, MD, USA) で全波整流され, 10Hzの Butterworth low-pass filterでエンベロープ処理が実施された. 解析された筋電図波形は各筋のMVICで標準化し

た. その後, 前脛骨筋と腓腹筋外側頭の同時収縮指数 (co-contraction index : CCI) を, 先行研究の計算式に基づき算出した¹⁴⁾.

Jerkは先行研究¹⁶⁾に従い, 2軸加速度 (前後 Ay, 垂直 Az) に対して時間微分と2Hzの Butterworth low-pass filterを実施し, Jerk合成ベクトルの計算式より算出された.

協調性のばらつきは, 伸縮性歪みセンサーで得られる足部運動と足関節矢状面角度の時系列データから, 足関節矢状面角度を横軸, 足部運動を縦軸にとる angle-angle diagramを作成し, 時系列でプロットされた値のなす角度 (coupling angle) を算出した (式1)¹⁷⁾. γ は coupling angle を示し, $0^\circ \leq \gamma \leq 360^\circ$ の範囲で算出される. x と y はそれぞれ近位セグメントと遠位セグメントの角度を表し, i はストライド j 歩目の % 立脚期を示す. Circular statisticsを用いて, coupling angle は被験者内, 被験者間で平均処理された¹⁸⁾.

$$\gamma_{j,i} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{j,i+1} - y_{j,i}}{x_{j,i+1} - x_{j,i}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

各被験者における variability は, 50歩のデータにおける coupling angle の円周標準偏差として算出した (式2). 得られた coupling angle と variability は, circular statistics¹⁸⁾ を用いて平均処理した. データ解析には R studio を用いてプログラミング処理した.

$$\text{Variability}_i = \sqrt{2 \cdot (1 - \gamma_i)} \cdot \frac{180}{\pi} \dots (2)$$

ランニング立脚期は床反力垂直成分が20Nを上回った時点を初期接地, 20Nを下回った時点を足部離地と定義した. ランニング立脚期を100%に時間正規化し, 0~50%を立脚期前半, 51~100%を立脚期後半と定義した. 各パラメーターは, 立脚期前半と後半の平均値を算出した.

4つのインソールでVASの点数が最も高値で

表 1 Comfort条件とNon-Comfort条件間の各パラメーター比較結果

	立脚初期		MD (95% CI)	p-value	立脚後期		MD (95% CI)	p-value
	Comfort	Non-Comfort			Comfort	Non-Comfort		
DJS (Nm / kg / deg)	0.11 (0.06)	0.11 (0.06)	0.0009 (-0.03~0.03)	0.949	0.05 (0.03)	0.06 (0.03)	-0.03 (-0.06~-0.0003)	0.047
CCI	0.12 (0.05)	0.13 (0.05)	-0.01 (-0.04~ 0.01)	0.274	0.09 (0.04)	0.12 (0.06)	-0.01 (-0.02~-0.0003)	0.044
Coordination variability (deg)	4.1 (2.3)	5.7 (4.4)	-1.53 (-3.52 0.46)	0.123	6.6 (2.5)	7.1 (3.4)	-0.55 (-1.97~0.85)	0.420
Jerk	30.6 (18.1)	32.1 (20.3)	-1.47 (-8.61~ 5.66)	0.670	30.7 (16.6)	35.9 (18.4)	-5.2 (-9.04~-1.35)	0.010

略語:MD:Mean difference, DJS:Dynamic joint stiffness, CCI:Co-contraction index

あった条件を Comfort 条件, 最も低値であった条件を Non-Comfort 条件とした. 各条件の Jerk, DJS, CCI, coupling angle variability に対して Shapiro-Wilk 検定を実施し, 対応のある t 検定を実施した. その後, 主観的な「軽やかさ」を従属変数, DJS, CCI, Coordination variability, Jerk を独立変数とした重回帰分析を実施した. なお, 有意水準は 5% とした.

2. 結果

2.1 実験1

測定中に伸縮性歪みセンサーが外れ, その後の測定が困難であった 5 名, データ欠損者 (伸縮性歪みセンサーの大幅な電圧の低下等) 5 名を除外した 30 名 (年齢: 21.2[1.3]歳, 身長: 164.9 [8.9] cm, 体重: 58.0[10.4]kg) が解析対象となった. アーチ制動条件は非制動条件と比較し, VAS が有意に増加した (制動条件: 28.7 [9.6] cm, 非制動条件: 23.1 [10.3] cm, $p = 0.024$, 95% 信頼区間: $- 10.2 \sim - 0.9$).

2.2 実験2

本実験は 20 名 (年齢: 20.9[0.6]歳, 身長: 167.7 [9.1]cm, 体重: 57.7[10.7]kg) が対象となった. Comfort 条件は Non-Comfort 条件と比較し, 立脚期後半の DJS (Comfort 条件: 0.05 [0.03] Nm / kg / deg, Non-Comfort 条件: 0.06 [0.03] Nm / kg / deg, p

$= 0.047$, 95% 信頼区間: $- 0.06 \sim - 0.0003$), 前脛骨筋と腓腹筋外側頭の同時収縮指数 (Comfort 条件: 0.09 [0.04], Non-Comfort 条件: 0.12 [0.06], $p = 0.044$, 95% 信頼区間: $- 0.02 \sim - 0.0003$), Jerk (Comfort 条件: 30.7 [16.6] cm, Non-Comfort 条件: 35.9 [18.4], $p = 0.010$, 95% 信頼区間: $- 9.04 \sim - 1.35$) が有意に低下した (表 1). 従属変数を軽やかさ, 独立変数をそれぞれのパラメーターにした重回帰分析では, 有意な関連性を認めなかった ($p > 0.05$).

3. 考察

本研究では, Footwear による足部アーチ制動がランニング中の主観的な「軽やかさ」に与える影響と, その生体力学的要因との関係を明らかにすることを目的とした. 実験 1 の結果, アーチ制動条件において非制動条件よりも VAS が有意に増加した. つまり, アーチ制動条件は軽やかさが高まることが示唆された. さらに, 最も軽やかだと評価された Footwear 着用時には, 立脚期後半の DJS, 前脛骨筋と腓腹筋外側頭の CCI, および Jerk が有意に低下した. これらは動作の円滑性を示すパラメーターであると考えられる¹⁹⁻²¹⁾. すなわち, Footwear 着用による軽やかさには, 動作の円滑性を示すパラメーターが関与することが明らかになった.

これまでランニング効率に関連する生体力学

的要因の解明を目的とした先行研究では、DJS, CCI, Jerkが運動学的指標として検討されてきた^{19, 20)}。Tamら¹⁹⁾はランニングの酸素消費量と足関節DJSの関係を検討しており、足関節DJSが低いとランニング中の酸素消費量が低いと述べている。またTamら¹⁹⁾は、前脛骨筋と腓腹筋外側頭の同時収縮が少ないとランニング中の酸素消費量が低いことを述べている。つまり、足関節周囲の同時収縮が減少し、DJSが低下するとランニング動作の効率が高くなると考えられる。またMiyashitaら²¹⁾は下腿部のJerkを用いて、歩行動作の滑らかさの指標としている。つまり、本研究で用いたDJS, CCI, Jerkはいずれも動作の円滑性を評価しうるパラメーターと言える。そこで、動作の円滑性が高いほど、主観的な「軽やかさ」が高いと仮説を立て、それらのパラメーターとの関連性を検討した。その結果、インソールを装着したときの主観的な「軽やかさ」が高いほど、運動の円滑性が高いことが明らかになった。

Murleyらは、扁平足者において足部アーチの低下が下腿筋活動の増加をもたらすことを報告しており²²⁾、足部の支持性が筋負担の増減に影響する可能性を示している。本研究ではランニング中のアーチの低下を制動できるインソールでは、軽やかさが向上した。つまり、アーチの支持により、アーチ保持に作用する下腿筋の筋活動が減少するため、足関節周囲のDJSやJerkが減少し、滑らかな関節運動が可能になったと考えられる。

本研究の結果から、足部アーチを適切に制動するFootwearの使用は、ランニング中の主観的な「軽やかさ」の向上に寄与する可能性が示された。さらに、立脚期後半におけるDJSやCCI, およびJerkという客観的な生体力学的指標が有意に低下したことは、足部支持が運動制御の効率化に影響を与えていることを示唆する。特にJerkは加速度センサーで簡便に測定可能であり¹⁶⁾、今後はこれらの客観指標を用いた評価が、主観的評価と組

み合わせて効果的な足部サポートの選択や運動パフォーマンスの向上に役立つと考えられる。これら客観的指標を活用した多角的評価を取り入れることが、快適性向上および障害予防に繋がる可能性がある。

本研究にはいくつかの限界が存在する。1つ目に、本研究はFootwearによる足部アーチ制動が軽やかさや生体力学的指標に与える因果関係を明確に示す介入研究ではなく、横断研究に留まっているため、因果関係の解明にはさらなる検討が必要である。2つ目に、「軽やかさ」という主観的評価は個人差や心理的要因の影響を受けやすく、多様な背景や感覚の違いが結果に影響している可能性があるが、本研究ではこれらの要因を詳細に分析していない点である。

結 論

研究では、Footwearによる足部アーチ制動がランニング中の主観的な「軽やかさ」に与える影響と、その生体力学的要因との関連を検討した。実験1の結果、アーチ制動条件では非制動条件と比較してVASスコアが有意に増加し、主観的な「軽やかさ」が向上することが示された。実験2では、軽やかだと評価されたFootwearの着用時に、立脚期後半のDJS, CCI, Jerkといった生体力学的指標が有意に低下した。これらの結果は、足部アーチの適切な支持が関節剛性や筋活動の過剰を抑制し、滑らかな運動を可能にすることで、軽やかさの感覚を高めている可能性を示唆する。また、これらの生体力学的指標は、加速度センサーや筋電図などを用いることで比較的簡便に評価可能であり、Footwearの機能的評価や使用者の快適性向上に向けた指標として有用であると考えられる。今後は、個人の主観的感覚に加え、DJSやCCI, Jerkといった客観的指標を組み合わせた多角的評価の導入が、より快適で機能的なFootwearの開発や選択に貢献すると期待される。

謝 辞

本研究の実施にあたり，研究助成を受け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，本研究の参加協力を快諾してくださった被験者の皆様，本研究デザインや研究結果に対して有意義なご助言をくださった所属機関の所員の皆様に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Martínez-Martínez, J. M. et al., Use of SOMs for footwear comfort evaluation., *Neural Comput. Appl.*, **28**, 1763–1773 (2017)
- 2) Luo G., Stergiou P., Worobets J., Nigg B., Stefanyshyn D., Improved footwear comfort reduces oxygen consumption during running., *Footwear Sci.*, **1**, 25–29 (2009)
- 3) Kinchington M. A., Ball K. A., Naughton G., Effects of footwear on comfort and injury in professional rugby league., *J. Sports Sci.*, **29**, 1407–1415 (2011)
- 4) Mills K., Blanch P., Vicenzino B., Identifying clinically meaningful tools for measuring comfort perception of footwear., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42**, 1966–1971 (2010)
- 5) Hsu C.-Y. et al., Biomechanical analysis of the FlatFoot with different 3D-printed insoles on the lower extremities., *Bioengineering (Basel)*, **9**, 563 (2022)
- 6) Mündermann A., Nigg B.M., Humble R.N., Stefanyshyn D.J., Foot orthotics affect lower extremity kinematics and kinetics during running., *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*, **18**, 254–262 (2003)
- 7) MacLean C., Davis I.M., Hamill J., Influence of a custom foot orthotic intervention on lower extremity dynamics in healthy runners., *Clin. Biomech.*, **21**, 623–630 (2006)
- 8) Braga U.M. et al., Effects of medially wedged insoles on the biomechanics of the lower limbs of runners with excessive foot pronation and foot varus alignment., *Gait Posture*, **74**, 242–249 (2019)
- 9) Ataabadi P.A., Abbassi A., Letafatkar A., Vanwanseele B., The effects of foot orthosis and low-dye tape on lower limb joint angles and moments during running in individuals with pes planus., *Gait Posture*, **96**, 154–159 (2022)
- 10) Ferber R., Benson B., Changes in multi-segment foot biomechanics with a heat-mouldable semi-custom foot orthotic device., *J. Foot Ankle Res.*, **4**, 18 (2011)
- 11) Sakamoto K. et al. Validity and reproducibility of foot motion analysis using a stretch strain sensor., *Gait Posture*, **86**, 180–185 (2021)
- 12) Watanabe T., Tsutsumi M., Kuroyanagi E., Furusawa H., Kudo S., In-shoe multi-segment foot kinematics measurement during the stance phase of running using a stretch strain sensor., *Heliyon*, **10**, e34197 (2024)
- 13) Gait characterization via dynamic joint stiffness.
- 14) Rudolph K.S., Axe M.J., Snyder-Mackler L., Dynamic stability after ACL injury: who can hop? *Knee Surg., Sports Traumatol. Arthrosc.*, **8**, 262–269 (2000)
- 15) Hamill J., Palmer C., Van Emmerik R.E.A., Coordinative variability and overuse injury., *Sports Med. Arthrosc. Rehabil. Ther. Technol.*, **4**, 45 (2012)
- 16) Miyashita, Kudo., Maekawa., Estimation of the ankle power during the terminal stance of gait using an inertial sensor., *J. Phys. Ther. Sci.*, **31**, 354–359 (2019)
- 17) Chang R., Van Emmerik R., Hamill J., Quantifying rearfoot-forefoot coordination in human walking., *J. Biomech.*, **41**, 3101–3105 (2008)
- 18) Batschelet E., *Circular Statistics in Biology.* (Academic Press, 1981)
- 19) Tam N., Tucker R., Santos-Concejero J., Prins, D., Lamberts R. P., Running economy: Neuromuscular and joint-stiffness contributions in trained runners., *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, **14**, 16–22 (2019)
- 20) Balasubramanian S., Melendez-Calderon A., Roby-Brami A., Burdet E., On the analysis of movement smoothness., *J. Neuroeng. Rehabil.*, **12**, 112 (2015)
- 21) Miyashita T., Kawanishi K., Kudo S., Relationship between lower-extremity co-contraction and jerk during gait., *Sensors (Basel)*, **25**, (2025)
- 22) Murley G.S., Menz H.B., Landorf K.B., Foot posture influences the electromyographic activity of selected lower limb muscles during gait., *J. Foot Ankle Res.*, **2**, 35 (2009)

衝撃吸収材を目指したキトサン誘導体による 新規高分子材料創製

奈良先端科学技術
大学院大学 網代 広治

Creation of Novel Chitosan-Derived Polymeric Materials for Shock Absorption

by

Hiroharu Ajiro

Nara Institute of Science and Technology

ABSTRACT

In this study, the author developed a novel flexible and biodegradable material by blending chitosan (CS) with a specially modified copolymer of poly (trimethylene carbonate) (PTMC). To improve interactions within the blend, *N*-methyl-D-glucamine—functioning as a polyol—was grafted onto the PTMC copolymer, resulting in poly (TMC-*co*-TMC-glucamine) (PTTG). This modification was designed to enhance hydrogen bonding between components. The CS/PTTG blend films were then prepared via solvent casting. To evaluate the chemical interactions and thermal properties of these materials, Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and thermogravimetric analysis (TGA) were performed. The results showed noticeable shifts in wavenumber and a reduction in the temperature at which 10% weight loss occurred (T_{10}), indicating changes in chemical structure and thermal stability. In terms of mechanical performance, the addition of PTTG significantly enhanced the material's strength and flexibility. The tensile strength increased to 16.0 ± 2.6 MPa in the formulation containing 75% CS and 25% PTTG (CS75PTTG25). Flexibility was also improved, reaching up to 55.9 ± 6.6 MPa in a simple blend containing CS, the PTMC copolymer, and *N*-methyl-D-glucamine. The study also presents a detailed

explanation of the mechanisms underlying these improvements, offering insights into the role of hydrogen bonding and polymer compatibility. Overall, the CS/PTTG blend films combine biodegradability with excellent mechanical properties, highlighting their promise for use in a variety of flexible material applications, including environmentally friendly packaging, biomedical devices, or shock-absorbing components.

キーワード

キトサン, 分解性高分子, 多価アルコール, ブレンド, 引張強度

Keyword

Chitosan, Biodegradable polymer, Polyol, Blend, Tensile strength

要 旨

本研究では、キトサン (CS) と修飾ポリカーボネート系共重合体PTMCをブレンドすることで、新規の柔軟性と生分解性を備えた高分子材料を開発した。PTMCにはポリオールとして機能する *N*-メチル-D-グルカミンをグラフト化し、水素結合の強化を目的としたPTTG (poly (TMC-co-TMC-glucamine)) を合成した。CSとPTTGのブレンド膜は溶媒キャスト法で作製され、FT-IRおよびTGAによる評価により、波数のシフトや T_{10} の低下が確認され、化学構造および熱安定性の変化が示唆された。力学的性能では、CS75PTTG25の組成において引張強度が 16.0 ± 2.6 MPaに向上し、柔軟性も最大 55.9 ± 6.6 MPaまで改善された。これらの特性向上のメカニズムについても詳細に検討されている。得られたCS/PTTGブレンド膜は、生分解性と優れた機械的特性を両立し、環境対応型包装材や医療用素材、衝撃吸収材など多用途への展開が期待される。

緒 言

プラスチックはその利便性と低コストから広く用いられてきたが、分解性の低さや不適切な廃棄
デサントスポーツ科学 Vol. 47

処理による環境問題が深刻化しており、特にマイクロプラスチックが海洋汚染の要因として国連のSDGsでも取り上げられている¹⁾。除去技術は未だ発展途上であり、バイオマス素材による代替が注目されている。中でもキトサン (CS) は優れた生分解性と無毒性から注目されているが、水耐性や機械的性質に限界があり、脆く実用性に乏しい²⁾。その改善のためにグリセロールやソルビトールなどの多価アルコール系可塑剤が用いられ、引張特性の向上が報告されている³⁾。また、他の生分解性ポリマーとのブレンドも試みられ、特に柔軟性に優れたポリトリメチレンカーボネート (PTMC) は注目されている⁴⁾。PTMCは酸性副産物を出さずに分解し、環境負荷が低い点が利点である。

これまでにCSとPTMCのブレンドに関する報告は少なく、主に医療応用に限られていた。著者らは以前、カルボキシル基を導入したPTMC誘導体を用いたCSブレンドにより、柔軟性を向上させたが、引張強度の改善は限定的であった⁵⁾。その原因として、CSとPTMC誘導体間の静電相互作用の弱さが考えられる。近年はナノ粒子や天然物との複合によるCSフィルムの高性能化も進んでいる⁶⁾。

本研究では、多価アルコールである *N*-メチル

-D-グルカミンをPTMCの側鎖に導入したPTTG (poly (TMC-co-TMC-glucamine)) を合成し、CSとブレンドすることで、水酸基による水素結合を活用してCSの硬直構造を緩和し、引張強度と伸長性を同時に改善することを目指した。これは、柔軟で高性能な新規バイオマス系高分子材料の創製に資するアプローチである。

1. 実験方法

1. 1 材料

キトサン (CS) は、粘度5 ~ 20mPa·s (0.5%酢酸水溶液中、20℃)、脱アセチル化度70%以上のものを使用した。炭素担持パラジウム (10 wt.% ローディング、担体活性炭) を使用した。ベンジルアルコール、1,8-ジアザビシクロ [5.4.0] ウンデカ-7-エン (DBU) (減圧蒸留後使用)、*N*-メチル-D-グルカミン (MGlu)、テトラヒドロフラン (THF)、および*N,N*-ジシクロヘキシルカルボジイミド (DCC) を使用した。

1. 2 ポリ (TMC-co-TMC-OBn) およびポリ (TMC-co-TMC-COOH) の合成

TMC (2.63 g, 25.85 mmol)、TMC-OBn (2.16 g, 8.62 mmol)、およびベンジルアルコール (0.036 mL, 0.345 mmol) を乾燥ジクロロメタン (DCM, 20 mL) に溶解し、DBU (0.514 mL, 3.45 mmol) を添加して室温で一晩攪拌した。反応後、エタノールを少量添加し、ヘキサノールと2-プロパノール (5:5) 混合物に注ぎ込み、デカンテーションと遠心分離により精製し、真空乾燥することで、ポリ (TMC-co-TMC-OBn) (75:25) を得た (収率87%, M_n 5600)。

ポリ (TMC-co-TMC-OBn) の THF 溶液に、ポリマーに対して 20 mol% の炭素担持パラジウムを添加し、室温、水素雰囲気下で 24 時間反応させた。触媒をろ過と遠心分離により除去後、溶媒を蒸発

させ、ポリ (TMC-co-TMC-COOH) (75:25) を得た (収率74%, M_n 4800)。

1. 3 PTTGの合成

ポリ (TMC-co-TMC-COOH) (0.20 g, 1.72 mmol) を THF 40 mL に溶解し、DCC (0.11 g, 5.14 mmol) を少量ずつ添加し、室温で2時間攪拌した。MGlu (0.33 mg, 1.72 mmol) を添加し、室温で2時間反応させた。得られた溶液を脱イオン水で透析後、凍結乾燥し、PTTG (ポリ (TMC-co-TMC-グルカミン)) (75:25) を得た (収率10%)。

1. 4 ポリ (TMC-co-TMC-COOH) およびMGluとのCSブレンドフィルムの調製

CS (0.18 g) を 2% (w/v) の 1.5% (v/v) 酢酸水溶液に溶解し、ポリ (TMC-co-TMC-COOH) (0.06 g, 0.54 mmol) を 1% (w/v) の THF に溶解した。両溶液を混合後、ポリ (TMC-co-TMC-COOH) に対して 0.3 モル% の MGlu (0.031 g, 0.16 mmol) を添加し、室温で1時間攪拌した。溶液をシリコン製シャーレ (直径 50 mm, 高さ 12 mm) に注ぎ、40℃ のドラフトチャンバーで 1 ~ 2 日間乾燥させ、CS75/PTMC-co-TMC-COOH25/MGlu ブレンドフィルムを得た。

1. 5 PTTGとのCSブレンドフィルムの調製

CS を 2% (w/v) の 1.5% (v/v) 酢酸水溶液に、PTTG を 1% (w/v) の脱イオン水に溶解した。CS と PTTG の混合溶液の総重量を 250 mg とし、様々な比率 (CS50PTTG50, CS60PTTG40, CS75PTTG25, CS80PTTG20, CS90PTTG10) で混合し、室温で1時間攪拌した。溶液をシリコン製シャーレ (直径 50 mm, 高さ 12 mm) に注ぎ、40℃ のドラフトチャンバーで 1 ~ 2 日間乾燥させ、CS/PTTG ブレンドフィルムを得た。

1. 6 特性評価

FT-IR スペクトルは、フーリエ変換赤外分光光度計 (IR Affinity-1S Shimadzu) を用いて、4000 ~ 500 cm^{-1} の範囲、分解能 4 cm^{-1} 、積算回数 64 回で測定した。数平均分子量 (M_n) は、SEC (SPD-20A システム、島津製作所) を用いて、カラム (TSKgel α -M)、溶離液 DMF (0.6 mL/min)、温度 40°C の条件で測定した。SEM 像は、走査型電子顕微鏡 (SEM, SU6600) を用いて、加速電圧 1 kV で取得した。熱重量分析は、TGA-50 (島津製作所) を用いて、窒素雰囲気下 (50 mL/min)、昇温速度 10°C /min、温度範囲 20 ~ 500°C の条件で実施した。機械的特性 (引張強度、破断点伸び、ヤング率) は、EZ-SX テクスチャーアナライザー (島津製作所、500 N ロードセル) を用いて、サンプルサイズ 5 mm × 30 mm × 0.1 mm、ロードセル 500 N、クロスヘッド速度 1 mm/min、ゲージ長 10 mm の条件で測定した。各サンプルにつき 3 回

の測定を行い、平均値と標準偏差を算出した。

1. 7 分解試験

乾燥させたフィルムを 0.5 × 0.5 cm^2 に切り出し、重量を測定後、0.1 mol/L、pH 7.4 の PBS 溶液に浸し、37°C の振とう機で浸漬した。所定の時間間隔でサンプルを取り出し、60°C の真空乾燥機で乾燥後、再度重量を測定し、重量減少率を算出した。各条件につき 3 つのサンプルを使用し、実験は 3 回繰り返した。

2. 研究結果

2. 1 poly(TMC-co-TMC-OBn), poly(TMC-co-TMC-COOH), PTTG の合成と特性評価

本研究で使用したポリマーの化学構造は図 1 に示される。先行研究⁵⁾により、TMC と TMC-COOH を 7:3 比率で共重合したポリマーが、最も

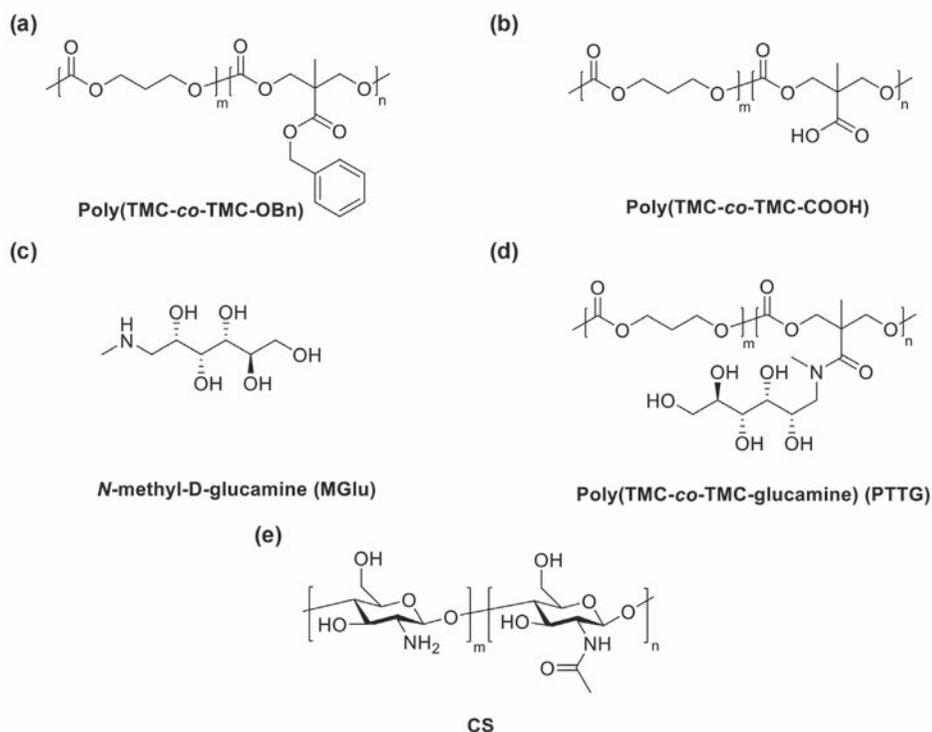


図 1 Chemical structure in this study

(a) poly (TMC-co-TMC-OBn), (b) poly (TMC-co-TMC-COOH), (c) MGlu, (d) PTTG, and (e) CS.⁷⁾

優れた機械的特性を示すことが確認されていた。これを受け、TMCとTMC-OBnを75:25の割合で開環重合し、さらに水素化によりベンジル基を除去することで、poly (TMC-co-TMC-COOH) が合成された。¹H NMR解析により、ベンジル基由来のシグナル (約7.3 ppm) が完全に消失しており、合成の成功が確認された。

続いて、poly (TMC-co-TMC-COOH) の側鎖にMGlucをグラフト化した。¹H NMRスペクトルでは、MGlucに由来するシグナル (3.5-3.8 ppm, 3.2 ppm, 2.7 ppm) が観察され、導入が成功したことが示された。導入率 (DS) は99%以上であり、非常に高い結合効率が達成された。PTTGは白色の綿状の外観を示し、水への溶解性が部分的に改善された一方、THFには不溶であったため、DMF中でSEC測定を実施した。結果、数平均分子量 (M_n) は7900、PTMC/TMC-MGlucのモル比は55/45であり、構造はpoly (TMC21-co-TMC-glucamine17) と推定された。

さらにFT-IR解析により、PTTG合成の成功が裏付けられた。poly (TMC-co-TMC-COOH) 単体

ではC=O伸縮 (1737 cm^{-1}) とC-O伸縮 (1223 cm^{-1}) が確認されたが、MGlucとの物理混合ではOH伸縮 (3332 cm^{-1}) およびアミンN-H曲げ (1579 cm^{-1}) が現れ、化学結合ではなく物理的混合であることが示された。一方、PTTGではアミドIバンド (1625 cm^{-1}) が新たに観測され、グラフト化が化学的に成功していることが示唆された。

2. 2 ブレンドフィルム

本研究では、フィルム中の水分量が物性に与える影響を考慮し、まず乾燥条件を最適化した。TGA分析により、室温乾燥では約20%、40℃乾燥では約7%、60℃真空乾燥では約5%の水分が残存していることが判明したため、40℃で乾燥させ、45%湿度下でサンプルを保存する条件が選択された。図2に示すように、純粋なCSフィルムは茶色透明であり、PTTGを添加すると色が次第に薄くなった。表面観察では、すべてのフィルムが平滑で孔がなく、肉眼レベルでは均一な混合が達成されていることが示唆された。

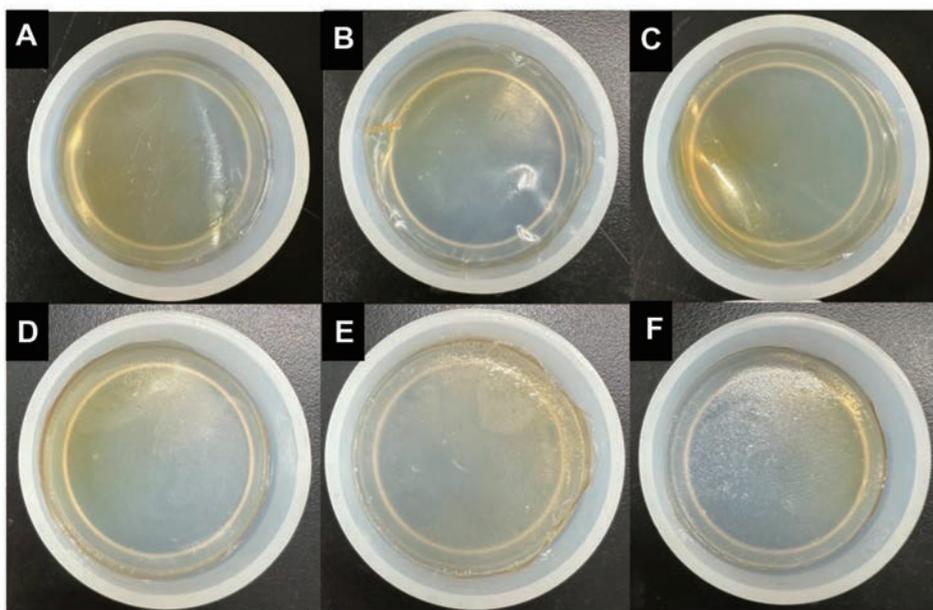


図2 Physical appearance of CS blend films
A. pure CS, B. CS90PTTG10, C. CS80PTTG20, D. CS75PTTG25, E. CS60PTTG40, and F. CS50PTTG50.⁷⁾

2.3 ブレンドフィルムの特性評価

SEMによる断面観察では、すべてのフィルムで引張試験後にクラックが生じていたが、純粋なCSフィルム、CS75PTTG25、CS90PTTG10では滑らかな断面が確認され、均一な混合が達成されていた。一方、単純混合フィルムでは約200 nmの小孔が多数存在し、混合不良が明らかとなった。

FT-IR分析では、純粋なCSフィルムにおいて、広範なOH/NH伸縮 ($3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$) とアミドI (1635 cm^{-1})、プロトン化アミノ基 (1545 cm^{-1}) に由来する特徴的な吸収が観察された。ブレンドフィルムでは、C=O伸縮 (1745 cm^{-1}) の新規ピーク出現とO-H領域のシフトが確認され、CS間水素結合の破壊とCS-PTTG間での新たな水素結合形成が示唆された。PTTG含量が増加すると、O-H領域は高波数側へシフトする一方、C=OおよびC-O伸縮バンドは低波数側へ移動し、PTTG導入に伴う分子間相互作用の変化が明らかになった。特に、アミドIバンドのシフトから、側鎖間でも新たな水素結合が形成されていることが推察された。

熱安定性評価では、全フィルムが $100\text{--}150^\circ\text{C}$ で水分蒸発、続いてポリマー分解による重量減少を示した。CS単体フィルムの T_{10} は 291°C であったが、プラスチックとコポリマーの添加により T_{10} は低下した。特に、CS75PTTG25フィルムでは単純混合フィルムよりも高い T_{10} を示し、強力な水素結合による熱安定性向上が示された。

機械特性評価では、図3に示すように、プラスチックやコポリマーの添加により脆性破壊から延性破壊への転換が観察された。CS75PTTG25フィルムは単純混合フィルムよりも高い引張強度と弾性率を示し、均一な混合と強化された水素結合によるものと考えられた。一方、単純混合フィルムは柔軟性が高いものの、内部に生じた小孔により機械強度が低下していた。poly (TMC-co-TMC-COOH) 添加では、CSフィルムの伸びは

$10.6 \pm 3.6\%$ から $18.9 \pm 2.2\%$ へ増加したが、破断応力はほぼ変化しなかった。MGlU添加では伸びが $46.0 \pm 2.5\%$ に大幅増加し、一般的なプラスチックサイザー効果と一致した。単純混合フィルムでは伸びがさらに $55.9 \pm 6.6\%$ まで向上したが、引張強度はやや低下した。CS75PTTG25フィルムは、引張強度 $16.0 \pm 2.6\text{ MPa}$ 、ヤング率 $286.69 \pm 43.47\text{ MPa}$ と高い剛性を示した一方、伸びは $20.1 \pm 3.3\%$ とやや低下した。これは、グラフト型ブレンドにより高密度な水素結合ネットワークが形成されたことによると考えられた。さらに、PTTG含量を増加させると、引張強度、伸び、ヤング率は全体的に減少し、過剰な水素結合がポリマー鎖の可動性を制限していることが示唆された。ブレンドフィルム中の NH_2 (CS) とOH (PTTG) モル比の解析では、 $\text{NH}_2:\text{OH}=2:1$ (CS80PTTG20) で最良の機械特性が得られた。PTTG過剰の場合、柔軟性や強度はむしろ低下した。

フィルム設計機構の考察では、MGlU単独添加ではCS間水素結合の破壊により柔軟性が向上し、CS/PTMC-co-TMC-COOHフィルムではPTMC主鎖の柔軟性と水素結合により延伸性が改善された。CS/PTTGブレンドでは、PTTG側鎖アミド基、CS側 NH_2 基およびOH基間での複合的な水素結合と静電相互作用が構造安定化に寄与していると考えられる。

考 察

PBS中浸漬試験では、全サンプルで時間とともに直線的に重量減少が増加した。24時間後、CS単体は30%、CS90PTTG10は17%、CS75PTTG25は15%の重量減少を示し、PTTG導入により分解速度が抑制された。既存のバイオポリマーブレンド(シルクペプチド、セルロース、米デンプン)と比較すると、本研究のCS/PTTGブレンドフィルムはより高い引張強度を示した。また、一般的なプラスチックサイザー(グリセロール、エチレング

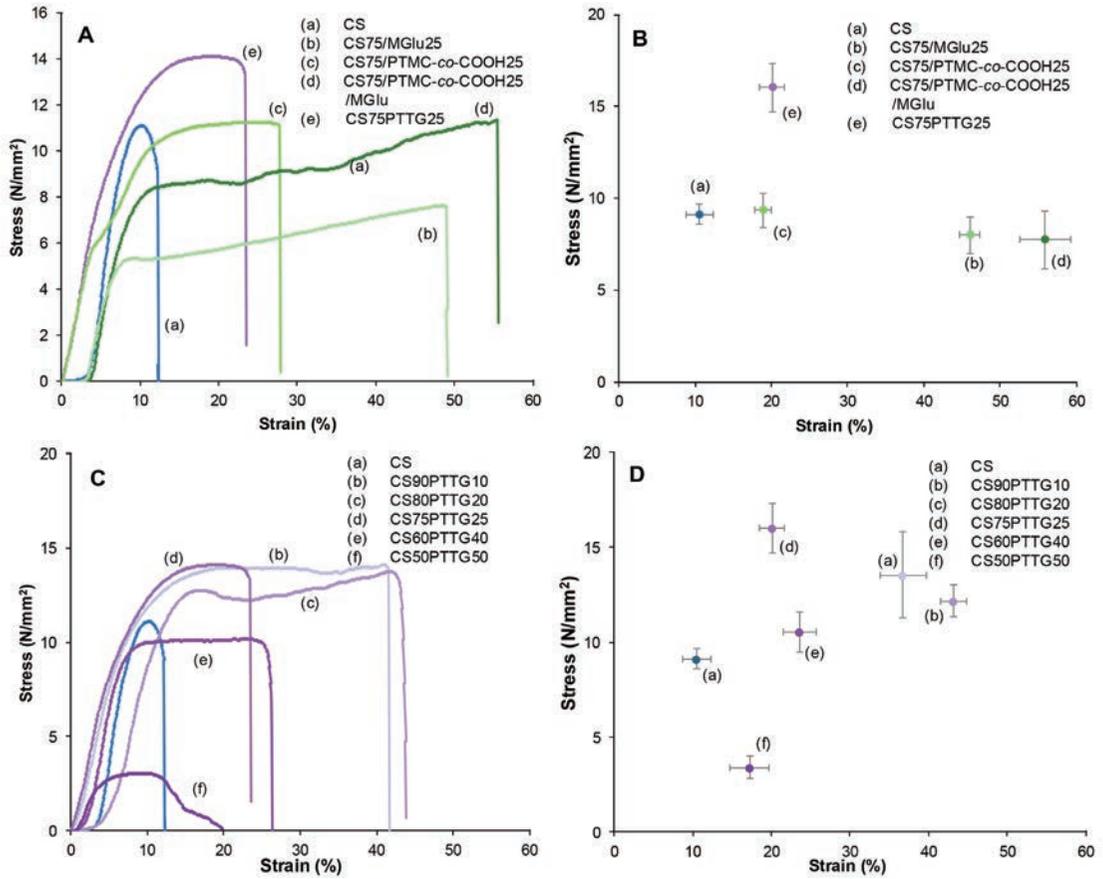


図3 A. typical tensile stress-strain curves of blend films
 (a) CS, (b) CS75/MGlu25, (c) CS75/PTMC-co-TMC-COOH25, (d) CS75/PTMC-co-TMC-COOH25/MGlu, (e) CS75PTTG25,
 B. tensile strength and maximum strain,
 C. typical tensile stress-strain curves of blend films
 (a) CS, (b) CS90PTTG10, (c) CS80PTTG20, (d) CS75PTTG25, (e) CS60PTTG40, (f) CS50PTTG50,
 D. tensile strength and maximum strain⁷⁾

リコールなど)を用いたブレンドと比較しても、同等の柔軟性を維持しつつ、優れた強度と生分解性を両立できる点が大きな利点であった。このため、CS/PTTGブレンドフィルムは、スポーツ用品用の衝撃吸収剤だけでなく、食品包装材や医療用フィルムなど、環境負荷の低い応用展開も期待できる。実用化のためには引裂強度や高速衝撃試験による定量的な衝撃吸収性能の評価が今後の課題である。

まとめ

PTTGは、99%を超える高いMGlu置換度で合成に成功した。FT-IR分析では1637 cm⁻¹に特徴的なアミドIピークが確認され、¹H NMR分析ではMGluがポリマーの側鎖に導入されたことが明らかとなった。CSとPTTGのブレンドフィルム、および対照としてPTMC-co-TMC-COOHとMGluの単純なブレンドフィルムが作製され、分析された。FT-IR分析の結果、PTTGの濃度が増加するにつれて波数が低い方へシフトし、CSとPTTG

の間に水素結合が形成されていることが示唆された。力学強度評価では、特にCS/PTTGブレンドにおいて柔軟性と伸び率の顕著な向上が確認された。これは、MGluがキトサン分子間の水素結合を阻害するという仮説を裏付けるものである。CS80PTTG20ブレンドは、NH₂基とOH基の比率が2:1という最適な組成を示し、引張強度と柔軟性の両方が向上した。さらに、PTTGはpH 7.4におけるCSの生分解安定性を向上させることがわかった。この結果は、PTTGが機械的特性と分解特性の両方を改善する二重の役割を果たすことを示している。結論として、CS80PTTG20ブレンドが最適な配合組成であることがわかった。このブレンド材料は、生物医学や持続可能な高分子材料への応用において有望な可能性を示唆している。

謝 辞

本研究を支援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深く感謝いたします。

文 献

- 1) F. Haque, C. Fan, Fate and impacts of microplastics in the environment: hydrosphere, pedosphere, and atmosphere, *Environments*, 10, 70, (2023)
- 2) L. Mu, L. Wu, S. Wu, Q. Ye, Z. Zhong, Progress in chitin/chitosan and their derivatives for biomedical applications: Where we stand, *Carbohydr. Polym.*, 343, 122233, (2024)
- 3) A.R. El Feky, M. Ismaiel, M. Yilmaz, F.M. Madkour, A. El Nemr, H.A.H. Ibrahim, Biodegradable plastic formulated from chitosan of *Aristeus antennatus* shells with castor oil as a plasticizer agent and starch as a filling substrate, *Sci. Rep.*, 14, 11161, (2024)
- 4) A. Nag, A.E. Arifianti, A. Khankhuean, H. Ajiro, Polymer blends using poly (trimethylene carbonate), *Eur. Polym. J.*, 214, 113146, (2024)
- 5) K. Irikura, N. Ekapakul, C. Choochottiros, N. Chanthaset, H. Yoshida, H. Ajiro, Fabrication of flexible blend films using a chitosan derivative and poly (trimethylene carbonate), *Polym. J.*, 53, 823-833, (2021)
- 6) S. Bhowmik, D. Agyei, A. Ali, Enhancement of mechanical, barrier, and functional properties of chitosan film reinforced with glycerol, COS, and gallic acid for active food packaging, *Sustain. Mater. Technol.*, 41, e01092, (2024)
- 7) A. Khankhuean, Y. Morimura, H. Ajiro, Improving the mechanical properties of chitosan through blending with poly (trimethylene carbonate) copolymer, *Int. J. Biol. Macromol.*, 283, 137830, (2024)

暑熱下運動中におけるペルチェ素子による 頸部冷却の有用性の検討

北海学園大学 内藤 貴司
(共同研究者) 福山市立大学 林 聡太郎
鳥取大学 斎藤 辰哉
九州大学 斎藤 篤司

The Effects of Neck Cooling with Peltier Element Device During Exercise in the Heat

by

Takashi Naito
Hokkai-Gakuen University
Sotaro Hayashi
Fukuyama City University
Tatsuya Saito
Tottori University
Atsushi Saito
Kyushu University

ABSTRACT

This study aimed to compare the effects of neck cooling using Peltier elements or internal cooling achieved by ingesting ice slurry during exercise on thermal strain in hot conditions. Eight healthy male participants underwent a randomized crossover trial with two conditions: (1) internal cooling (INT trial) and (2) neck cooling using a Peltier-based neck cooler (NECK trial). Participants performed 45 min of cycling exercise while monitoring rectal temperature, tympanic temperature, mean skin

temperature, heart rate, thermal sensation, thermal discomfort, perceived exertion, and reaction time. The results showed that in the NECK trial, neck skin temperature significantly decreased from 5 min after exercise onset. However, rectal temperature remained elevated in 40 min. Thermal sensation was significantly improved in the NECK trial up to 20 min, but the INT trial showed significantly lower at the 40-min. No significant differences were found in thermal discomfort, perceived exertion, or reaction time. These findings suggest that Peltier-based neck cooling effectively improves thermal sensation in the early stages of exercise but has limited effects on deep body temperature regulation. For effective heat stress prevention, combining neck cooling with internal cooling or other body cooling methods may be necessary.

キーワード

アイススラリー, ネッククーラー, 直腸温, 温熱感覚, 鼓膜温

Keyword

ice slurry, neck cooler, rectal temperature, thermal sensation, tympanic temperature

要 旨

本研究は、暑熱下運動におけるペルチェ素子による頸部冷却とアイススラリー摂取による体内冷却を比較し、その有用性を明らかにすることを目的とした。健康男性8名を対象に、①体内冷却（INT 試行）と②頸部冷却あり（NECK 試行）のランダム化比較試験を実施し、自転車エルゴメーターによる45分間の運動を行った。運動中の直腸温、鼓膜温、平均皮膚温、心拍数、温熱感覚、温熱不快感、主観的運動強度、全身反応時間を評価した。結果として、NECK 試行では頸部の皮膚温が運動開始5分後以降で有意に低下したが、運動後半時の直腸温は高値を示した。温熱感覚は運動開始から20分目まで有意に改善されたが、40分目ではINT 試行が有意に低値を示した。温熱不快感や主観的運動強度、全身反応時間にも有意な差は認められなかった。これらの結果から、ペルチェ素子による頸部冷却は短時間の温熱感覚改善には有効であるものの、深部体温の抑制には限界があるこ

とが示唆された。暑熱障害の予防には、より広範囲の身体冷却や体内冷却を組み合わせる必要があると考えられる。

緒 言

我が国では地球温暖化の影響によって平均気温は上昇しており、消防庁は熱中症による救急搬送が過去3年で7万件/年以上に達していると報告している¹⁾。熱中症は運動中のみならず、身体活動時にも発症が見受けられており、その対策は喫緊の課題となっている。熱中症発症は深部体温の過度な上昇が主要因として考えられており、その抑制方略としてアイススラリーによる身体冷却が検討されている。アイススラリーは微小な氷と水が混ざった液体であり、経口摂取のため深部体温を直接冷却できることからその有用性が示されている²⁾。

身体冷却は近年の機器発展によって、様々なものが存在する。例えば、保冷剤がポケットに内包されたベスト型の冷却衣服の使用は高強度の間欠

性運動時の平均皮膚温や心拍数を低下させ、有用性が示されている³⁾。また、背部にファンが搭載された外気通風式の衣服の使用は鼓膜温や平均皮膚温の上昇の抑制や低下の促進⁴⁾が報告されている。これらはスポーツ競技場面に加えて、職場における熱中症予防策のひとつであり、我が国では数多くの機器が市販されている。暑熱環境下でのこれらの機器の使用は熱中症予防に効果的とされている一方で、最適な着用方法やその有用性は必ずしも科学的・医学的に検証されていない場合も存在する。

近年、身体冷却の機器としてペルチェ素子を用いたネッククーラー（頸部冷却）がある。ペルチェ素子は接合された異なる2種類の半導体（n型、p型）から構成され、直流電流の極性を制御することで温度を比較的容易に変化させることができる。ペルチェ素子に電流を流すと片方の接面からもう一方に動く際に、熱も輸送するという特性を持つため発熱および吸熱をすることができる⁵⁾。ペルチェ素子を用いたネッククーラーはこの吸熱を利用し、通電することで熱移動を発生させ、ペルチェ素子のプレートが頸部に接地することで身体冷却を行うものである。頸部冷却は先行研究において凍らせたアイスタオル⁶⁾や保冷剤⁷⁾が検討され、温熱快適性を改善することが報告されている。しかし、これらは一定時間使用すると冷却媒体が融解し、使用困難となるデメリットがある。ペルチェ素子を用いた頸部冷却は、電源さえあれば、身体冷却が可能であり、安静時の発汗量および皮膚温の上昇を抑制し、温熱感覚や快適性を改善させることが報告されている⁸⁾。我々が知る限り、ペルチェ素子による頸部冷却は上記の先行研究を含めて数編しかなく、身体冷却の有用性が示されているアイスラリー摂取による体内冷却と比べて有効かは不明である。したがって、本研究の目的は暑熱下運動におけるペルチェ素子による頸部冷却とアイスラリー摂取による体内冷却を

比較し、その有用性を明らかにすることを目的とする。

1. 方法

1.1 被験者

被験者は、健常男性9名が実験に参加した。しかし、1名の被験者は実験中に軽度の熱中症を発症してドロップアウトしたため、8名（年齢 = 20 ± 1 歳、身長 = 1.713 ± 0.036 m、体重 = 63.26 ± 13.21 kg）の被験者を解析対象とした。彼らはアスリートでは無かったが、日常的に運動習慣のある被験者であった。また、いずれの被験者も常用薬を服用しておらず、何ら心臓血管系及び呼吸器系の疾病歴を有していなかった。彼らには本研究の目的、方法、危険性等を十分に説明し、被験者全員から実験に参加することに同意を得た。本研究は、福山市立大学倫理審査委員会（承認番号：2024005）の承認を得て実施した。

1.2 実験デザイン

本研究では、暑熱環境下運動におけるペルチェ素子による頸部冷却とアイスラリー摂取による体内冷却を比較検討するため、ランダム化比較試験を行った。全ての被験者は運動時に1) 体内冷却試行（INT）と2) 頸部冷却試行（NECK）の2試行を実施した。

1.3 実験プロトコル

本実験は各試行4日以上の間隔をあげ、ランダムで実施した。また、全ての実験は体温調節応答に対する日内変動を考慮し、同時刻に実施した。各被験者は実験前日より激しい運動やアルコール、カフェイン等の栄養サプリメント摂取が制限された。彼らは実験の2時間前に500 mLの水を摂取し、それ以降は絶食をした。実験室（室温20℃、相対湿度50%）に到着し30分以上安静後、半袖シャツ、短パンと運動靴（総重量は約1.3

kgであり、衣服面積比（着衣と裸体の体表面積比率）は1.12、衣服熱抵抗は $0.063 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ または 0.405 clo、衣服蒸発性熱抵抗は $0.010 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$ に着替えた⁹⁾。採尿、身長および体重を測定した後、測定器具を装着した。その後、被験者は室温 $34.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $52 \pm 3\%$ 、黒球湿球温度 $29.5 \pm 0.6^\circ\text{C}$ の暑熱環境下において全身反応時間を測定後、自転車エルゴメーター（AEROBIKE 75XL III, COMBI社製）上で5分間安静にした。自転車運動は回転数60 rpmとし、体重1 kg当たり2.0 wattの強度で15分間実施した。その後5分間の休息をとり、それを計3回反復した（図1）。運動終了後、汗を十分拭き取り、全身反応時間、体重測定および採尿を行なった。

1. 4 身体冷却介入

体内冷却はアイススラリー（リポビタンアイススラリー Sports, 大正製薬社製）を5分間の休息時に体重1 kg当たり3.75 g摂取した。また、NECK 試行では、同飲料を室温のまま摂取した。頸部冷却はパルチエ素子のプレート（6.5×3.5 cm）が左右の頸部に接着するように設計されたネッククーラー（ネッククーラー Evo, サンコー

社製）を用いた。このネッククーラーは、運動開始時から着用された。図2に、室温25°Cにおけるパルチエ素子プレートの温度変化を示した。

1. 5 測定項目

尿比重は実験前後に採尿を行い、デジタル尿比重屈折計（PAL-09S, アタゴ社製）を用いて測定した。体重は市販の体重計（BC-316, タニタ社製）を使用し、50 g単位で測定した。直腸温は、潤滑剤を塗ったサーミスタカテーテル（ITP010-11: 日機装サーモ社製）を直腸内に15 cm挿入した。頸部、上腕部、胸部、および大腿部の4点にサーミスタプローブ（ITP082-24: 日機装サーモ社製）を装着し、その上をサージカルテープで覆った。鼓膜温は赤外線式温度計（Thermoscan7, Braun社製）を用いて5分毎に2回測定し、平均値を採用した。心拍数は無線式携帯型心拍計（H-10, Polar社製）を胸部に装着し、30秒毎に記録した。全身反応時間はマットスイッチ（VoltOnoJump, S-cade社製）を用いた。被験者はマットスイッチの上に立ち、1.5 m前に設置されたモニターから光刺激が呈示された後、できる限り早くジャンプした。光刺激の呈示は1.25 mの高さから黄色で照射され、

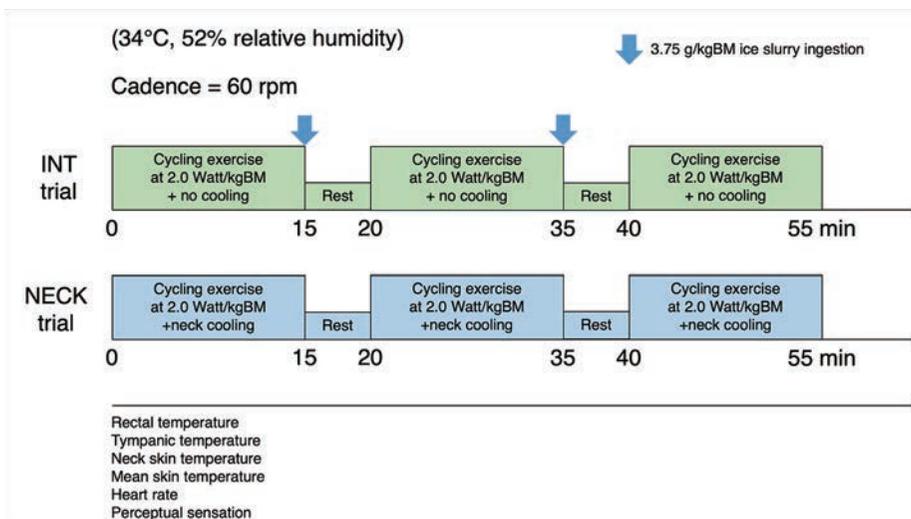


図1 Schematic representation of the experimental protocol

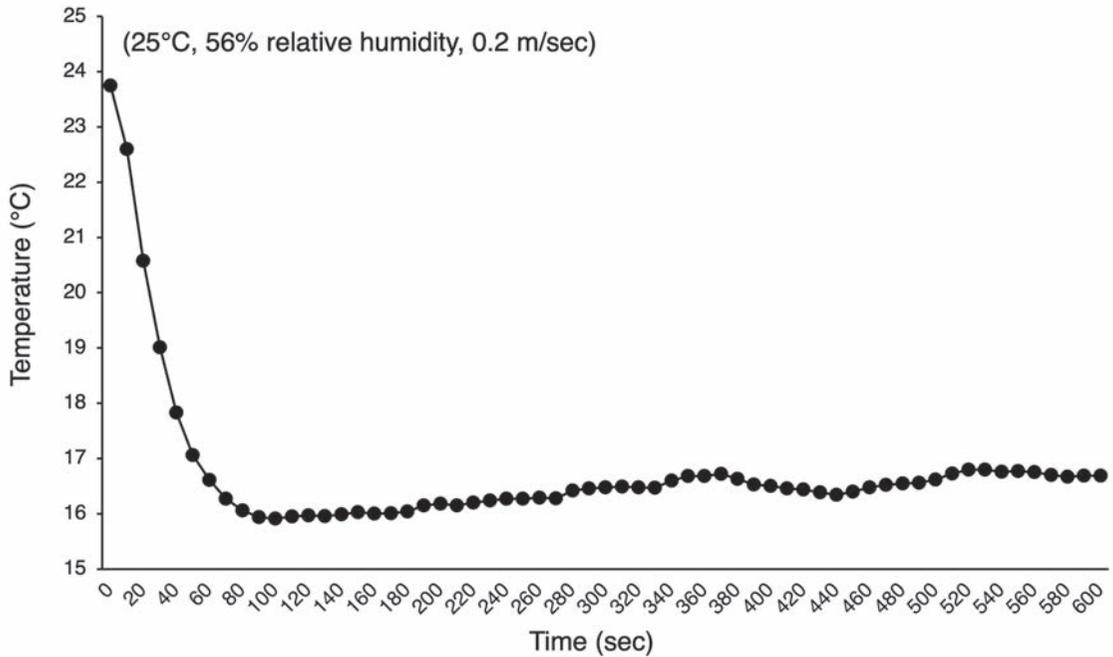


図2 Temperature change of Peltier element plate at room temperature of 25°C

ランダムな間隔であった。本試行前に練習試行を行い、本試行は運動の前後で5回ずつ実施した。

主観的感覚は温熱感覚（1：とてもさむい，9：とてもあつい）を9段階スケール¹⁰⁾，温熱不快感（1：とても不快，7：とても心地よい）を7段階スケール¹¹⁾，主観的運動強度（Rating of perceived exertion: RPE，7：非常に楽である，19：非常にきつい）をBorg（1982）の15段階スケール¹²⁾を用いて5分毎に記録した。

1. 6 算出項目

平均皮膚温および総発汗量を算出するために、下記の公式を用いた。

$$\text{平均皮膚温 (°C)} = 0.43 \times \text{胸部皮膚温} + 0.25 \times \text{上腕部皮膚温} + 0.32 \times \text{大腿部皮膚温}^{13)}$$

$$\text{総発汗量 (g)} = \text{運動前の体重} - \text{運動後の体重} + \text{飲水量}$$

1. 7 統計処理

結果は、全て平均値±標準偏差値で示した。全ての統計処理は、SPSSのバージョン28 (Statistical package for social science: IBM社製)を用いて行った。データの正規性と試行間の等分散性は、それぞれShapiro-Wilkの検定とLeveneの検定を用いて検定した。Shapiro-Wilkの検定またはLeveneの検定の結果が有意水準より低い場合、データはノンパラメトリック検定を使用して分析された。ノンパラメトリックデータ（主観的指標）は、Friedmanの二元配置分散分析を用いて分析した。有意差が認められた場合は、Wilcoxonの符号付順位検定を用いて比較した。運動前後の体重および尿比重、体温や心拍数などの生理学的指標は繰り返しのある2要因（試行×時間）分散分析（Two-way repeated ANOVA）を用いた。有意な交互作用が認められた場合および総発汗量は対応のあるt検定によって比較した。多重比較検定にはBonferroni法を用いた。

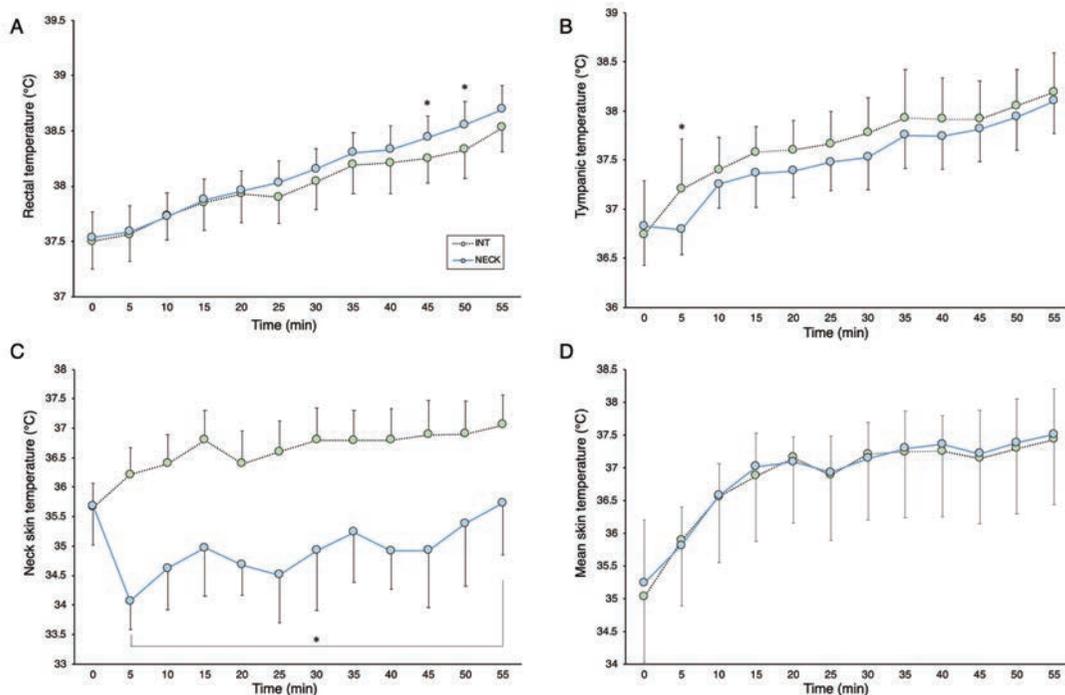


図3 The rectal (A), tympanic (B), neck skin (C), and mean skin temperatures (D) during experimental trials
*: INT vs. NECK, $P < 0.05$

表1 Body composition and reaction time during experimental trials

	INT		NECK	
	Pre	Post	Pre	Post
Body mass (kg)	63.35 ± 12.89	62.75 ± 12.45	63.28 ± 13.21	62.33 ± 13.06
Urine specific gravity	1.019 ± 0.009	1.019 ± 0.007	1.017 ± 0.008	1.020 ± 0.010
Total sweating volume (kg)	545 ± 234		944 ± 190*	
Reaction time (msec)	350.8 ± 545.8	381.7 ± 456.7	371.2 ± 977.5	353.7 ± 112.6

Values are means ± SD. INT, internal cooling trial, NECK, neck cooling trial.

2. 結果

2.1 体温調節指標

各試行における運動時の直腸温、鼓膜温、頸部皮膚温および平均皮膚温は図3に示した。運動時の直腸温は45および50分目においてINT試行で有意に低値を示した ($P < 0.05$)。鼓膜温は運動開始5分後にNECK試行が有意に低値を示した ($P < 0.05$)。頸部皮膚温は0分目では有意な差は認められなかったが、5分目以降からNECK試行がINT試行よりも有意に低値を示した ($P < 0.05$)。またその低値は、実験終了まで持続した。平均皮膚温

は2試行間で有意な差は認められなかった。

2.2 体水分状態

各試行における運動開始前の体重および尿比重は2試行間で有意な差はなかった。運動終了後、体重の減少が2試行で認められ、総発汗量はNECK試行が有意に高値を示した ($P < 0.05$; 表1)。

2.3 心拍数

各試行における運動時の心拍数は、2試行間で有意な差は認められなかった (図4A; $P < 0.05$)。

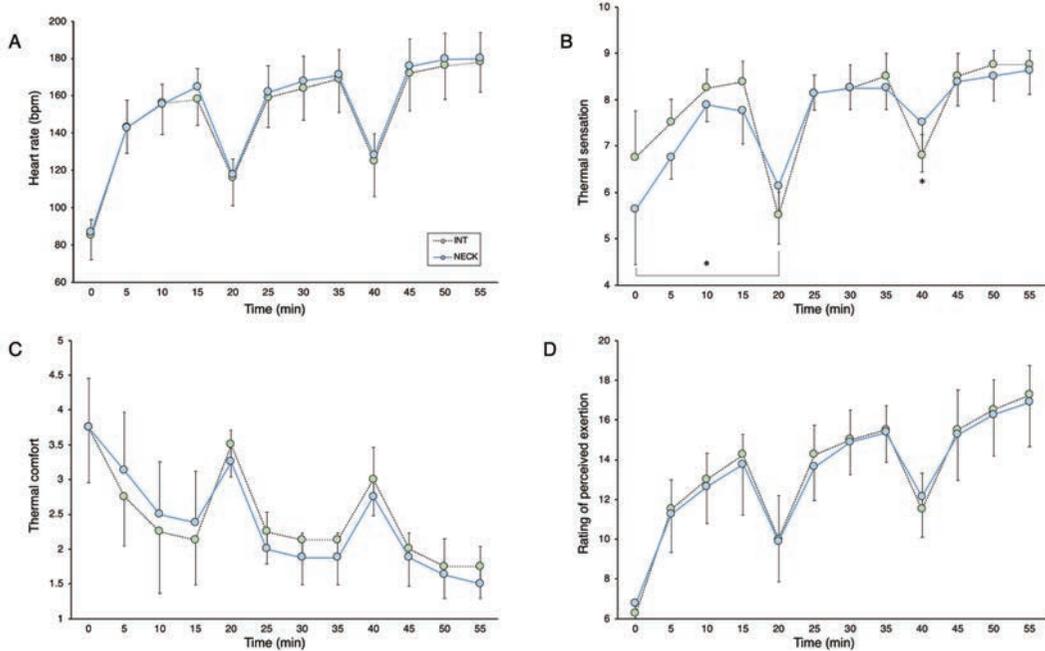


図4 The heart rate (A), thermal sensation (B), thermal comfort (C), and rating of perceived exertion (D) during experimental trials
*: INT vs. NECK, <math>P < 0.05</math>

2. 4 主観的指標

NECK 試行における温熱感覚は、0-20分目までINT試行よりも有意に低値を示した(図4B; $P < 0.05$)。一方、40分目の温熱感覚はINT試行が有意に低値を示した。温熱不快感および主観的運動強度は、2試行間で有意な差は認められなかった(図4C, 4D; $P > 0.05$)。

2. 5 全身反応時間

各試行における運動時の心拍数は、2試行間で有意な差は認められなかった(表1)。

考察

本研究の主な知見は、暑熱環境下での運動中におけるペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却はアイススラリー摂取による体内冷却と比較して①運動開始直後の鼓膜温は低値を示したが、直腸温は運動の後半時に高値を示した。②頸部の皮膚温は低下させた。③温熱感覚は運動の

前半において有意に低値を示したが、40分目では高値を示した。一方で、温熱不快感や主観的運動強度は有意な差が認められなかった。

暑熱障害は、深部体温の過度な上昇が発症の要因の一つとされている。その対策として、近年アイススラリー摂取による体内冷却は微小な氷の融解熱を利用して、直接胃や腸を直接冷却することができ、深部体温を効率的に低下させる¹⁴⁾。また、頸部冷却は頸部に位置し、脳へ血液を供給する総頸動脈を冷却することで、熱負荷を低減する方略¹⁵⁾として用いられている。深部体温低減の機序は冷却法で異なっているが、本研究ではペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却はアイススラリー摂取による体内冷却と比較して直腸温の上昇を有意に抑制しなかった。近年のレビュー論文において頸部冷却は実践的な冷却方略ではあるが、深部体温の低減は困難であることを示唆している^{16,17)}。これは、冷却部位の体表面積の狭小であることに起因していると考えら

れる。頸部は、体表面積の中で10%以下しかない。本研究で使用したペルチェ素子の寸法は6.5×3.5 cmであり、それが左右の頸部を冷却しているが、皮膚表面への接触面積は約45 cm²であった。DuBois et al. (1916)の体表面積算出式(体表面積 = 71.84 × 身長0.725 × 体重0.425)によると、今回の平均体表面積は1.743 m²で、平均体表面積に対する冷却面積の割合は0.25%であった¹⁸⁾。したがって、本研究で使用したペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却はアイススラリー摂取による体内冷却と比べて深部体温に対する影響は限定的であったと考えられる。また、この深部体温への影響が発汗量の差に貢献した可能性が示唆された。

本研究におけるペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却は、運動開始時から前半にかけての温熱感覚を改善した。頸部は顔面部と同様に温度に対する高い感受性(alliesthesial sensitivity)を有しており¹⁹⁾、軽度の熱負荷を受けた際に冷刺激を加えると全身の温熱感覚が即座に軽減される可能性があることが示されている²⁰⁾。したがって、NECK 試行における頸部の温熱感覚は0分目から有意に低値を示したが、これは0分目から冷却を開始したため、急激に頸部が冷やされたことで即時的に温熱感覚が改善したと考えられる。実際に、運動開始5分目においてNECK 試行の鼓膜温はINT 試行に比べて低値を示している。一方で、NECK 試行において頸部の皮膚温は運動終了時まで有意に低値を示していたが、温熱感覚は20分目から差がなくなり、40分目ではアイススラリー摂取による体内冷却が低値を示した。これはアイススラリー摂取による口腔や消化器の温度受容器が刺激されたこと²¹⁾に加えて、頸部冷却に対する慣れが関連していると考えられる。外部からの冷却は温度受容器に対する適応(慣れ)を生じさせ、感受性の高い寒冷受容器の数が減少し、寒冷感覚の閾値が上昇するため、

より低い温度を感知することが困難になる²²⁾。このことから、参加者は慢性的な冷却介入に慣れるため、その後の冷却介入の有効性が低下する可能性が示唆されている²³⁾。したがって、本研究の知見も踏まえ、ペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却において運動の後半時にも温熱感覚を改善するには、間欠的な装着や継続的な装着における冷却媒体の温度変化を加える必要がある。実際にネッククーラーによる頸部冷却において、ネッククーラーを適宜交換した場合、温熱感覚の改善が報告されている¹⁵⁾。

暑熱下運動中における頸部冷却による主観的感覚の改善は不快感を軽減し¹⁷⁾、持久性運動能力の低下を抑制することが確認されている²⁴⁾。加えて、先行研究において頸部冷却の使用はより複雑な認知能力の改善をすることを報告している²⁵⁾が、Ando et al. (2015)は頸部冷却による認知機能の改善には熱負荷の低減の必要性を示している²⁶⁾。これはアイススラリー摂取による体内冷却の先行研究においても見解が一致している²⁷⁾。これらの知見はペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却はアイススラリー摂取による体内冷却と同様に認知機能(全身反応時間)の改善に対する熱負荷の低減には限定的であることを示唆した。

結 論

本研究で使用したペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却はアイススラリー摂取による体内冷却と比較して、運動時の冷却部位の皮膚温を低下させ、運動前半において温熱感覚を改善した。一方で、アイススラリー摂取による体内冷却はペルチェ素子を用いたネッククーラーによる頸部冷却と比べて直腸温の上昇の抑制が観察された。したがって、本研究で用いたペルチェ素子を用いたネッククーラーによる運動時の頸部冷却の有用性は限定的であり、暑熱障害の予防の観点

からは更なる身体冷却法の使用が必要であることが示唆された。

謝 辞

実験に協力してくださった福山市立大学の学生の皆様に感謝申し上げます。

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心よりお礼申し上げます。

文 献

- 1) 総務省 (online) 令和 6年 (5~9月) の熱中症による救急搬送状況. https://www.soumu.go.jp/main_content/000974432.pdf, (参照日 2025年 2月 28日)
- 2) Bongers C., de Korte J.Q., Eijsvogels T., Infographic. Keep it cool and beat the heat: cooling strategies for exercise in hot and humid conditions., *Br. J. Sports Med.*, (2020)
- 3) Chaen Y., Onitsuka S., Hasegawa H., Wearing a Cooling Vest During Half-Time Improves Intermittent Exercise in the Heat., *Front Physiol.*, 10:711 (2019)
- 4) Naito T., Saito T., Ohhashi M., Hayashi S., Recovery with a fan-cooling jacket after exposure to high solar radiation during exercise in hot outdoor environments., *Front Sports Act. Living*, 5:1106882 (2023)
- 5) 西村崇宏・唐澤洋之・瀬尾明彦・土井幸輝. ヒト手掌部での温度感覚による仮現運動において温度刺激の揭示時間と SOAが発生率に及ぼす影響の評価. 日本感性工学会論文誌. 11 (3) 475-481 (2012)
- 6) Bright F.M., Chaseling G.K., Jay O., Morris N.B., Self-paced exercise performance in the heat with neck cooling menthol application, and abdominal cooling., *J. Sci. Med. Sport.*, 22:371-7 (2019)
- 7) Galpin A.J., Bagley J.R., Whitcomb B., Wiersma L.D., Rosengarten J., Coburn J.W., Judelson D.A., Effects of intermittent neck cooling during repeated bouts of high-intensity exercise., *Sports.*, 4:38 (2016)
- 8) Chen J., Takasu R., Tanaka H., Comfort associated with local cooling in a hot environment: verification of Peltier device cooling., *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, 27 (3) :45-54 (2021)

- 9) Zuo J.M., E. A., Heat Transfer Characteristics of Sports Apparel., *Journal of ASTM International*, 1 (10) : 10(2004)
- 10) ISO. Ergonomics of the physical environment — Subjective judgement scales for assessing physical environments. ISO 10551. 28(2019)
- 11) Bedford T., The warmth factor in comfort at work: a physiological study of heating and ventilation., *Ind. Health Res. Board.*, 76:iv+102(1936)
- 12) Borg G.A., Psychophysical bases of perceived exertion., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 14 (5) : 377-81 (1982)
- 13) Ramanathan N.L., A New Weighting System for Mean Surface Temperature of the Human Body., *J. Appl. Physiol.*, 19:531-3(1964)
- 14) Naito T., Iribe Y., Ogaki T., Ice ingestion with a long rest interval increases the endurance cycling capacity and reduces the core temperature in the heat., *J. Physiol. Anthropol.*, 36:9(2017)
- 15) Zhu L., Theoretical evaluation of contributions of heat conduction and countercurrent heat exchange in selective brain cooling in humans., *Ann. Biomed. Eng.*, 28:269-77(2000)
- 16) Cao Y., Lei T.Z., Wang F., Yang B., Mundel T., Head, face and neck cooling as per cooling (cooling during exercise) modalities to improve exercise performance in the heat: a narrative review and practical applications., *Sports Med. Open.*, 8:16 (2022)
- 17) Ruddock A., Robbins B., Tew G. Bourke L. Purvis A. Practical cooling strategies during continuous exercise in hot environments: a systematic review and meta-analysis., *Sports Med.*, 47:517-532(2017)
- 18) DuBois D., DuBois E.F., A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known., *Archives of Internal Medicine*, 17:9(1916)
- 19) Stevens J.C., Choo K.K., Temperature sensitivity of the body surface over the life span., *Somatosens. Motor. Res.*, 15 (1) : 13-28(1998)
- 20) Cotter J.D., Taylor N.A.S., Distribution of cutaneous sudomotor and alliesthesial thermosensitivity in mildly heat-stressed humans: an open-loop approach., *J. Physiol.*, 565:335-345 (2005)
- 21) Villanova N., Azpizoz F., Malagelada J.R., Perception and gut reflexes induced by stimulation of gastrointestinal thermoreceptors in humans., *J. Physiol.*, 501:215-22(1997)

- 22) Kozyreva T.V., Adaptation to cold of homeothermic organism: Changes in afferent and efferent links of the thermoregulatory system., *J. Exp. Integr. Med.*, 3:255–265(2013)
- 23) Desai T., Bottoms L., Neck cooling improves table tennis performance amongst young national level players., *Sports.*, 5:19(2017)
- 24) Douzi W., Dugue B., Vinches L., Sayed C.A., Halle S., Bosquet L., Dupuy O., Cooling during exercise enhances performances, but the cooled body areas matter: A systematic review with meta-analyses., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 29 (11) : 1660-1676 (2019)
- 25) Lee J.K.W., Koh A.C.H., Koh S.X.T., Liu G.J.X., Nio A.Q.X., Fan P.W.P., Neck cooling and cognitive performance following exercise-induced hyperthermia., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 114:375-384 (2014)
- 26) Ando S., Komiyama T., Sudo M., Kiyonaga A., Tanaka H., Higaki Y., The effects of temporal neck cooling on cognitive function during strenuous exercise in a hot environment: a pilot study., *BMC Res. Notes.*, 8:202(2015)
- 27) Saldaris J.M., Landers G.J., Lay B.S., Zimmermann M.R., Internal precooling decreases forehead and core temperature but does not alter choice time during steady state exercise in hot, humid conditions., *J. Therm. Biol.*, 66-72(2019)

ウェアラブルセンサーを用いた バスケットボール競技中の膝関節衝撃負荷の解明

	東北福祉大学	横山 寛子
(共同研究者)	弘前大学医学部 附属病院	逸見 瑠生
	同	千々松 雅人
	弘前大学	津田 英一

Evaluation of Knee Impact Loads During Basketball Using Wearable Sensors

by

Hiroko Yokoyama

Tohoku Fukushi University

Rui Henmi, Masato Chijimatsu

Hirosaki University Hospital

Eiichi Tsuda

Hirosaki University

ABSTRACT

The purpose of this study was to quantitatively evaluate knee impact loads during basketball practice using wearable inertial sensors and to investigate differences between the dominant and non-dominant limbs in high school female basketball players.

Eight female players (15 ± 0 years) from the same team participated. During 3-on-3 or 4-on-4 practice sessions, inertial sensors (BlueTrident IMU, VICON) were affixed bilaterally over the tibial tuberosity to record acceleration. Composite acceleration exceeding 20G was defined as a high-impact movement. The total count and frequency per minute of high impact were calculated for both limbs. Simultaneously, video

recordings were used to categorize high-impact events into stops, sprints, decelerations, side-steps, and other movements. Statistical comparisons between dominant and non-dominant limbs were performed using the Wilcoxon signed-rank test ($p < 0.05$).

The median frequency of high-impact events per minute was 14.0 (0.0–41.3) for the dominant limb and 18.2 (0.0–40.2) for the non-dominant limb, with no significant differences. Among movement categories, stops, sprints, and decelerations accounted for the highest frequencies of high-impact movements on both limbs. These findings suggest that rapid acceleration and deceleration typical of basketball induce substantial knee impact loads, yet no clear limb dominance was evident in high-impact frequency. Future research should examine the relationship between high-impact thresholds and anterior cruciate ligament injury risk.

キーワード

慣性センサー, 膝関節衝撃, 加速度, バスケットボール, 膝前十字靭帯損傷

Keyword

IMUs, knee impact, acceleration, basketball, ACL injury

要 旨

本研究の目的は、高校生女子バスケットボール選手を対象に、ウェアラブル慣性センサーを用いて競技中に膝関節に生じる衝撃を定量的に評価し、利き脚と非利き脚における特徴を明らかにすることである。対象は高校生女子バスケットボール選手8名とし、3対3または4対4の練習中に両側脛骨粗面部に慣性センサーを装着して加速度を測定した。合成加速度が20Gを超える動作を高衝撃動作と定義し、その発生回数およびプレータイム1分あたり頻度を算出した。統計学的解析として高衝撃動作をストップ、スプリント、減速などに分類し、その頻度を利き脚・非利き脚で比較した。利き脚と非利き脚で高衝撃動作の頻度に有意差はなく、両側ともストップ、スプリント、減速に高衝撃動作が多くみられた。本研究によりバスケットボール中の高衝撃動作について、利き脚および非利き脚における片側優位性は認められな

かったが、バスケットボール特有の急激な加速・減速動作において膝関節衝撃を増大させることが示唆された。

諸 言

膝前十字靭帯 (anterior cruciate ligament; 以下、ACL) 損傷は代表的なスポーツ外傷の一つである。バスケットボール競技ではストップ、着地動作、方向転換動作、踏み込み動作といった急激な加速・減速を伴う動作において高頻度に非接触型損傷が発生することが報告されている^{1,2)}。ACL損傷のメカニズムとしては大腿脛骨関節外側コンパートメントに圧迫力が生じることで脛骨の内旋と前方移動が起こり、ACLの断裂へ至ること³⁾が報告されている。着地動作時における脛骨近位への長軸方向の圧迫力は垂直床反力と相関があることから⁴⁾、ストップ動作や着地動作時に加わる膝関節への大きな衝撃力はACL損傷のリスクと考えられる。

近年、慣性センサーの小型化や高機能化が進み、身体各部位に装着してもスポーツ動作を妨げない形状のさまざまなウェアラブルセンサーが開発されている。体幹や四肢に装着したセンサーで加速度を測定することで、競技中の身体各部位にかかる衝撃力や外的負荷を定量的に評価し、選手の練習量・練習内容の調整やスポーツ外傷予防に活用されている⁵⁻⁷⁾。衝撃力は質量と加速度の積で表されるため、動作中の加速度が大きいほど衝撃力も大きいと考えられる。慣性センサーで測定された着地動作やカッティング動作時の脛骨近位部加速度は床反力⁸⁾や膝関節外反モーメント⁹⁾と関連するため、慣性センサーを用いた脛骨近位部加速度測定はバスケットボール競技中に膝関節へ加わる衝撃の評価に有用と考えられる。

バスケットボール選手を含めスポーツ選手には利き手・利き脚などの片側優位性が存在し¹⁰⁾、ジャンプ、方向転換、スプリントなどの各パフォーマンステストにおいて非対称のある選手は傷害発生率が高いことが報告されている¹¹⁾。また、利き脚と非利き脚間には着地時の膝関節外反角度、膝関節外反モーメント、着地衝撃の非対称があり^{12,13)}、特に女性は男性と比べて片側優位性が強いとの報告もある¹⁴⁾。これらの報告は動作課題ごとの報告であるが、実際の競技中においても膝関節に加わる衝撃やその頻度に片側優位性があれば、より衝撃を受けやすい側の膝関節でACL損傷リスクが増大するのではないかと推察される。永野ら⁵⁾の報告では上背部に装着した慣性センサーで測定した体幹加速度を用いて、バスケットボール競技中の身体衝撃の特徴について検討し、ACL損傷好発動作である減速、方向転換、ストップ、着地において高衝撃動作が高頻度にみられた。これはあくまで体幹部が受ける衝撃力を反映したものと考えられ、実際の競技場面において大きな衝撃を膝関節が受ける頻度や、利き脚および非利き脚の特徴については明らかになっていない。

本研究の目的は高校生女子バスケットボール選手を対象に、実際の競技中に膝関節に加わる衝撃をウェアラブル慣性センサーで定量評価し、衝撃の大きい動作やその頻度、および利き脚・非利き脚の特徴を明らかにすることである。

1. 研究方法

1.1 対象

本研究では同一チームに所属する高校生女子バスケットボール選手8名(年齢 15 ± 0 歳, 身長 160.5 ± 4.9 cm, 体重 52.8 ± 5.7 kg)を対象とした。過去に半月板損傷や靭帯損傷などの重篤な膝関節外傷の既往、または下肢手術歴のある選手は除外した。対象者および保護者には研究目的・方法について書面を用いて説明し、署名による同意を得た。本研究は弘前大学大学院医学研究科倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号: 2023-154)。

1.2 膝関節衝撃評価方法

膝関節衝撃評価にはウェアラブル9軸慣性センサー(BlueTrident IMUセンサー, VICON社製)を用い、脛骨近位部の加速度を測定した(サンプリング周波数1600 Hz, 測定範囲 ± 200 G)。両側脛骨粗面上に伸縮性のあるテーピングテープでセンサーを固定し(図1)、その上から膝用サポーター(ザムスト Bodymate ヒザ, 日本シグマックス社製)を装着して、センサーと皮膚とのずれを



図1 センサーの固定位置

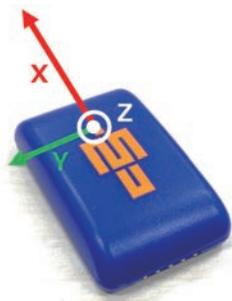


図2 センサーの軸方向

抑制した。x軸を上下方向（重力方向）、y軸を内外側方向、z軸を前後方向と設定した（図2）。

対象選手が競技中に行った動作を同定できるように、iPad mini（第6世代、Apple社製）のカメラを用いて対象選手を追跡しながら動画を撮影した（フレームレート24fps）。加えて、対象選手がコート上で他選手により隠れた場合に備え、コート全体が見通せる体育館2階からもビデオカメラ（GoPro HERO12, GoPro社製）で撮影した（フレームレート100fps）。測定開始時には対象選手がその場でジャンプ着地動作を行った様子をiPad miniで撮影し、その着地動作を基準に加速度データと動画データを測定後に同期させた。

1. 3 測定課題

対象選手は脛骨近位部にセンサーを装着し、体育館で行われたチームの通常練習に参加し加速度を記録した。解析対象の測定課題は実践的な練習である3対3もしくは4対4とした。これらの練習ではバスケットボールコート全面を使用し、攻撃と守備を各1回行い、休憩を挟みながら3～5回繰り返された。8名の測定はそれぞれ別日の練習において実施した。

1. 4 高衝撃動作の分類

本研究ではレイアップシュートが得意な手を利き手と定義し、利き手と同側の脚を利き脚、反対側を非利き脚と定義した。測定した脛骨近位部の

デサントスポーツ科学 Vol. 47

加速度データは解析前に1000 Hzにリサンプリングした。その後、各軸方向の成分加速度（x: x軸加速度、y: y軸加速度、z: z軸加速度）から合成加速度を下記の式で算出した。

$$\text{合成加速度} = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$$

合成加速度が20 Gを超える動作場面を「高衝撃動作」と定義し^{6,7)}、3対3もしくは4対4中の高衝撃動作の発生回数を利き脚・非利き脚でそれぞれカウントした。同期された動画を参照し、先行研究⁵⁾を参考に作成した動作分類に従い、高衝撃動作を分類した（表1）。1回の着地やストップ、ステップを1動作と換算した。動作分類は1名の検者が行った。

表1 バスケットボール競技中の動作の分類

動作の種類		
減速	踏み込み	加速
ストップ	スプリント	ドライブ
着地	サイドステップ	身体接触
テイクオフ	バックステップ	その他
方向転換	その他ステップ	不明

1. 5 Impact Loadおよび高衝撃動作頻度

ボールの保持に関わらず、対象選手がコート内でプレーしている時間を「プレータイム」として測定中の動画から計測した。プレー中の膝関節への累積衝撃負荷としてCatapult社のPlayer LoadTM計算式^{15, 16)}を参考にImpact Load (arbitrary unit : AU) を次項の式で算出した。Player LoadTMは胸背部に装着したセンサーの加速度データから算出する値である。

Impact Load

$$= \sum_{i=0}^n \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}}{100}$$

x_i, y_i, z_i : 時間*i*における各成分加速度 (G)

n : サンプリング回数

Impact Loadはプレータイムで正規化し、1分あたりのImpact Loadを算出した。また、利き脚・非利き脚それぞれにおける高衝撃動作の発生回数(回)と、プレータイム1分あたりの高衝撃動作発生頻度(回/分)を算出した。

1. 6 統計学的解析

統計学的解析にはRコマンダー 4.4.2 (Windows版)を用いた。プレータイム1分あたりのImpact Load、プレータイム1分あたりの高衝撃動作の頻度(回/分)、動作別のプレータイム1分あたりの高衝撃動作頻度(回/分)について、Wilcoxonの符号付順位和検定を用いて利き脚・非利き脚間で比較した。有意水準は5%とした。

2. 研究結果

対象選手3名は3対3における脛骨近位部加速度を、5名は4対4における脛骨近位部加速度を解析に用いた。

2. 1 プレータイムおよびImpact Load

各選手のプレータイムおよびImpact Loadを表2に示す。Impact Loadにおいて利き脚・非利き脚間に有意差は認められなかった($p < 0.05$)。

2. 2 高衝撃動作の発生回数および頻度

対象者8名中7名から合成加速度が20Gを超える高衝撃動作が抽出された。全選手の高衝撃動作の合計回数および動作別の合計回数と、1分あたりの高衝撃動作の発生頻度を表3に示す。1分あたりの高衝撃動作の動作別発生頻度については図

3に示す。利き脚と非利き脚の間にいずれの項目においても有意差は認められなかった($p < 0.05$)。

3. 考 察

3. 1 膝関節高衝撃動作の特徴について

合成加速度20Gを超えた高衝撃動作のうち、特に高頻度に抽出された上位3つの動作は「ストップ」、「スプリント」、「減速」であった。バスケットボールは急加速や急減速による速い展開が魅力的な競技である。永野ら⁵⁾はバスケットボール競技中の体幹加速度データから4G以上の高衝撃動作を抽出し、「減速」、「方向転換」、「ストップ」、「着地」が高頻度に発生する高衝撃動作として報告している。本研究においてもACL損傷の好発動作である「ストップ」と「減速」^{1,2)}が膝関節高衝撃動作として高頻度で抽出され、バスケットボールにおける急減速が特に膝関節への衝撃を増大させると考える。

一方で、本研究ではACL損傷受傷機転としては少ない「スプリント」で膝関節高衝撃動作の頻度が高かった。ランニングでは走行速度が上がるにつれて脛骨加速度が増大する¹⁷⁾。今回の測定課題がトランジションを求められる3対3および4対4の練習であり、攻守が切り替わった際には反対側のコートへ素早く走る必要がある。このような練習では「スプリント」そのものが高頻度で発生し、結果的に高衝撃動作として「スプリント」が高頻度に抽出されたと考えられる。

ACL損傷好発動作である「着地」の頻度については、本研究では脛骨近位部加速度が20Gを超える着地頻度は0.3 - 0.8回/分であった。一方で

表2 プレータイムとImpact Load:中央値(最小値-最大値)

プレータイム (分)	Impact Load (AU)		プレータイム1分あたりの Impact Load (AU)	
	非利き脚	利き脚	非利き脚	利き脚
2.142 (1.817-3.067)	247.8 (69.1-327.2)	253.2 (61.2-327.0)	102.6 (27.6-154.9)	101.8 (24.5-153.1)

表3 高衝撃動作の全選手の合計回数と頻度:中央値(最小値-最大値)

	高衝撃動作の合計回数(回)		1分あたりの高衝撃動作の頻度 (回/分)	
	非利き脚	利き脚	非利き脚	利き脚
高衝撃動作すべて	267	275	18.2 (0.0-40.2)	14.0 (0.0-41.3)
ストップ	57	43	3.6 (0.0-8.8)	3.3 (0.0-7.2)
スプリント	65	58	2.8 (0.0-11.6)	3.0 (0.0-9.9)
減速	32	29	1.7 (0.0-6.1)	1.9 (0.0-4.4)
サイドステップ	24	26	1.1 (0.0-5.5)	1.1 (0.0-6.6)
その他ステップ	15	27	1.1 (0.0-2.2)	0.8 (0.0-7.7)
方向転換	20	16	0.8 (0.0-4.4)	1.1 (0.0-2.8)
加速	18	21	0.8 (0.0-3.9)	0.8 (0.0-4.4)
着地	13	9	0.8 (0.0-2.2)	0.3 (0.0-2.2)
踏み込み	9	6	0.3 (0.0-2.8)	0.3 (0.0-1.1)
ドライブ	9	8	0.0 (0.0-2.8)	0.3 (0.0-2.8)
バックステップ	7	7	0.3 (0.0-2.2)	0.0 (0.0-1.7)
テイクオフ	5	3	0.3 (0.0-1.1)	0.0 (0.0-0.6)
身体接触	4	3	0.3 (0.0-0.6)	0.0 (0.0-1.1)
その他	5	3	0.0 (0.0-1.1)	0.0 (0.0-0.6)

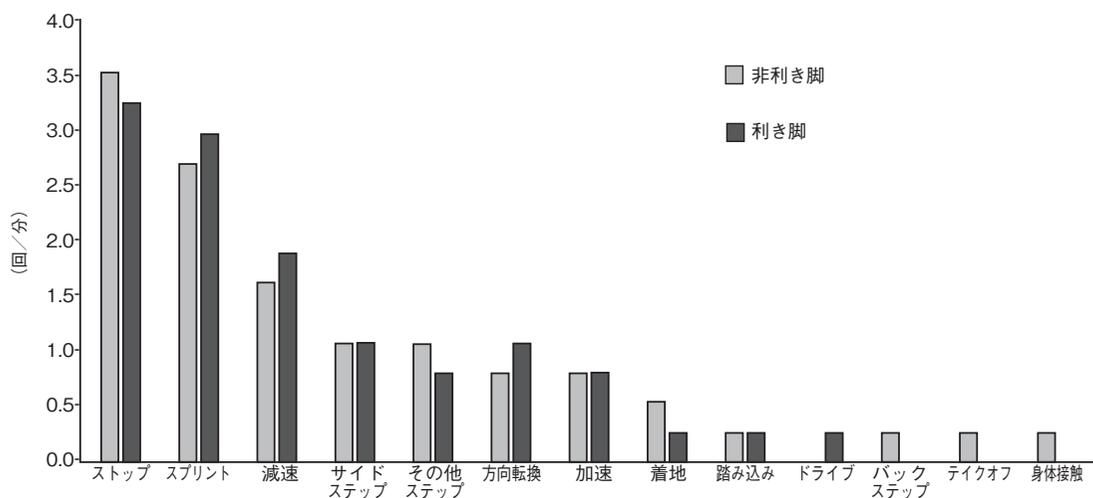


図3 1分あたりの高衝撃動作の頻度

永野ら⁵⁾は、体幹加速度が4G以上の着地頻度は1.5回/分と報告しており、頻度に違いがみられた。慣性センサー装着部位が異なることや、高衝撃動

作の基準が異なることなど、「着地」における高衝撃動作のカウント方法の違いに加え、対象の競技カテゴリーや測定した練習形式、選手のプレー

スタイルの違いが影響している可能性がある。

本研究では膝関節高衝撃動作における合成加速度の閾値として先行研究^{6,7)}を参考に20Gを用いたが、この閾値を超える動作の頻度とACL損傷発生との関係は明らかではない。しかしながら、着地動作時の床反力や膝関節外反モーメントの増大はACL損傷を予測すること¹⁸⁾から、膝関節へより大きな衝撃が繰り返し加わることは、ACL損傷リスクを高めるものと考えられる。今後は高衝撃動作の閾値の妥当性やACL損傷発生との関係について検討する必要がある。

3. 2 Impact Loadと高衝撃動作の頻度

本研究においてはImpact Loadの大きさおよび、高衝撃動作の頻度に関して、利き脚と非利き脚の間に有意な差は認められなかった。男子プロバスケットボール選手を対象とした研究では、練習や試合において歩数や荷重負荷に左右差がないことが報告されている¹⁹⁾。本研究の測定課題である3対3や4対4のように、より実際の試合に近い形式の練習の場合では、選手の得意・不得意による動作の選択ではなく、次々に展開されるシチュエーションに応じて動作が選択される。そのため動作に極端な偏りが生じず、膝関節へ加わる衝撃も利き脚もしくは非利き脚の一方に集中することなく、Impact Loadや高衝撃動作の発生頻度に非対称を認めなかったと考えた。ジャンプ、着地、方向転換、スプリントなどの各課題動作においてはパフォーマンスや下肢の運動学・運動力学において左右非対称があるとされる^{12,13)}が、必ずしも実際の競技場面では各動作の頻度や累積衝撃負荷に差があるとは限らないことが示された。今後は実際の競技中の観察された動作ごとに、膝関節への衝撃の大きさを利き脚と非利き脚で検討する必要があると考えられる。

3. 3 本研究の限界と今後の課題

本研究ではいくつかの限界がある。1つ目は対象選手の測定を同日の同じ測定課題にて行うことができなかったことである。2つ目に3対3および4対4の練習形式に限定して膝関節衝撃の特徴を評価しており、実際の試合状況とは異なる状況でのデータ測定であったことである。3つ目に対象は高校生女子選手に限られており、性別や他年代における特性を考慮できていないため、競技特性全体を網羅しているとは言い難い。今後は対象範囲を拡大しポジションごとの動作特性や、ACL損傷既往歴のある選手との比較など、様々な条件での膝関節衝撃特性の検討が必要である。

4. 結 論

ウェアラブル慣性センサーを用いて高校生女子バスケットボール選手の競技中の膝関節衝撃を評価した。合成加速度が20 Gを超える高衝撃動作は「ストップ」、「スプリント」、「減速」などバスケットボール競技特性を反映する動作に高頻度でみられた。また、プレータイム1分あたりのImpact Loadおよび高衝撃動作の頻度には利き脚と非利き脚の間に有意差はなく、片側の優位性は認められなかった。

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厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Heder Ternell K., Tosarelli F., Buckthorpe M., Samuelsson K., Hamrin Senorski E., Della Villa F., A Systematic Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Professional Female Basketball Players., *Am. J. Sports Med.*, 53 (6): 1368-80 (2025)
- 2) Petway A.J., Jordan M.J., Epsley S., Anloague P., Rimer E., Mechanisms of Anterior Cruciate

- Ligament Tears in Professional National Basketball Association Players: A Video Analysis., *J. Appl. Biomech.*, **39** (3) : 143-50 (2023)
- 3) Koga H., Nakamae A., Shima Y., Iwasa J., Myklebust G., Engebretsen L., Bahr R., Krosshaug T., Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball., *Am. J. Sports Med.*, (11) : 2218-25 (2010)
 - 4) Shimokochi Y., Ambegaonkar J.P., Meyer E.G., Changing Sagittal-Plane Landing Styles to Modulate Impact and Tibiofemoral Force Magnitude and Directions Relative to the Tibia., *J. Athl. Train.*, **51** (9) : 669-81 (2016)
 - 5) 永野康治, 笹木正悟, 市川浩 : バスケットボール競技中における前十字靭帯損傷好発動作の抽出. *JOSKAS*, **45**: 655-59 (2020)
 - 6) Burland J.P., Outerleys J.B., Lattermann C., Davis I.S., Reliability of wearable sensors to assess impact metrics during sport-specific tasks., *J. Sports Sci.*, **39** (4) : 406-11 (2021)
 - 7) Keogh J.A.J., Ruder M.C., Masood Z., Kobsar D., The Ecological Validity of Countermovement Jump to On-Court Asymmetry in Basketball., *Sports Med. Int. Open.*, **6** (2) : E53-E59 (2022)
 - 8) Elvin N.G., Elvin A.A., Arnoczky S.P., Correlation between ground reaction force and tibial acceleration in vertical jumping., *J. Appl. Biomech.*, **23** (3) : 180-9 (2007)
 - 9) Ekdahl M., Ulman S., Butler L., Relationship of Knee Abduction Moment to Trunk and Lower Extremity Segment Acceleration during Sport-Specific Movements., *Sensors (Basel.)*, **24** (5) : 1454 (2024)
 - 10) Arboix-Alió J., Buscà B., Peralta-Geis M., Montalvo A.M., Fort-Vanmeerhaeghe A. The Relationship between Change-of-Direction Performance Indicators and Inter-Limb Asymmetries in Elite Youth Female Basketball Players., *J. Hum. Kinet.*, **96** (Spec Issue) : 235-46 (2025)
 - 11) Fort-Vanmeerhaeghe A., Milà-Villarroel R., Pujol-Marzo M., Arboix-Alió J., Bishop C., Higher Vertical Jumping Asymmetries and Lower Physical Performance are Indicators of Increased Injury Incidence in Youth Team-Sport Athletes., *J. Strength. Cond. Res.*, **36** (8) : 2204-2211 (2022)
 - 12) Morishige Y., Harato K., Kobayashi S., Niki Y., Matsumoto M., Nakamura M., Nagura T., Difference in leg asymmetry between female collegiate athletes and recreational athletes during drop vertical jump., *J. Orthop. Surg. Res.*, **14** (1) : 424 (2019)
 - 13) Aizawa J., Hirohata K., Ohji S., Ohmi T., Yagishita K., Limb-dominance and gender differences in the ground reaction force during single-leg lateral jump-landings., *J. Phys. Ther. Sci.*, **30** (3) : 387-92 (2018)
 - 14) Hewett T.E., Ford K.R., Hoogenboom B.J., Myer G.D., Understanding and preventing acl injuries: current biomechanical and epidemiologic considerations - update 2010., *N. Am. J. Sports Phys. Ther.*, **5** (4) : 234-51 (2010)
 - 15) Julien C., "What' s PLAYER LOAD?" Catapult 社 <https://support.catapultsports.com/hc/en-us/articles/360000510795-What-is-Player-Load> (閲覧日: 2025年6月4日)
 - 16) Nicoletta D.P., Torres-Ronda L., Saylor K.J., Schelling X., Validity and reliability of an accelerometer-based player tracking device., *PLoS One*, **13** (2) : e0191823 (2018)
 - 17) Sheerin K.R., Besier T.F., Reid D., The influence of running velocity on resultant tibial acceleration in runners., *Sports Biomech.*, **19** (6) : 750-60 (2020)
 - 18) Hewett T.E., Myer G.D., Ford K.R., Heidt R.S. Jr., Colosimo A.J., McLean S.G., van den Bogert A.J., Paterno M.V., Succop P., Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study., *Am. J. Sports Med.*, **33** (4) : 492-501 (2005)
 - 19) Ibáñez S.J., Pablo L.S., Víctor H.B., Sebastián F., "Is Basketball a Symmetrical Sport?" *Symmetry*, **15** (7) : 1336 (2023)

ウェアラブルデバイスを用いた深部体温の予測モデルの構築 —熱中症罹患リスクのリアルタイム評価法の開発を目指して—

早稲田大学 渡邊 裕 宣
(共同研究者) 同 永 島 計

Predictive Model for Core Body Temperature Using Wearable Devices

by

Hironori Watanabe, Kei Nagashima
*Institute for Energy and Environmental system,
Sustainable Energy & Environmental Society Open Innovation Research Organization,
Waseda University*

ABSTRACT

Continuous monitoring of core body temperature (T_{core}) is essential for preventing heatstroke, yet traditional methods for measuring and predicting T_{core} encounter challenges in practical applications. This study aimed to develop a novel T_{core} prediction model integrating variables such as forearm skin temperature (T_{forearm}) and physiological (heart rate, exercise duration), environmental (ambient temperature, humidity), and individual parameters (gender, body mass index). From 12 young adult participants, a predictive model for ear canal temperature (T_{ear}) as an index of T_{core} was formulated through multiple regression analysis of all variables in a controlled hot environment with an ambient temperature of 35°C and relative humidity of 60%, during multi-stage treadmill exercise. The concordance between measured and predicted T_{ear} in both experiments was assessed by calculating the intraclass correlation coefficient ($\text{ICC}_{2,1}$) and bias using Bland-Altman plot analysis. A preliminary multiple

regression model was established, and by refining the model around the inflection point where thermoregulatory responses became significant ($T_{\text{ear}} = 37.5^{\circ}\text{C}$), prediction accuracy was enhanced ($\text{ICC}_{2,1} = 0.968, P < 0.001; \text{Bias} = 0.001$). Prediction accuracy varied among participants, with $\text{ICC}_{2,1}$ ranging from 0.861 to 0.995 (all $P < 0.001$) and bias ranging from -0.136 – 0.097 . These findings suggest that the prediction model incorporating T_{forearm} and other relevant parameters may be valid for real-time T_{core} monitoring.

キーワード

重回帰分析, 脳温, 耳内温, 皮膚温, スマートウォッチ

Keyword

multiple regression analysis, brain temperature, ear canal temperature, skin body temperature, smartwatch

要 旨

熱中症予防には深部温 (T_{core}) のモニタリングが重要であるが, 従来の T_{core} 測定および予測モデルには限界がある. 本研究では, スマートウォッチ型ウェアラブルセンサーへのモデル搭載を最終目標として, 前腕皮膚温 (T_{forearm}) と生理 (心拍数, 運動時間)・環境 (環境温度, 湿度), 個人パラメーター (性別, 体格指数) を変数とした新しい T_{core} 予測モデルを開発することを目的とした. 若齢成人12名を対象とし, T_{core} の指標として耳内温 (T_{ear}) の予測モデルを, 環境温度 35°C , 相対湿度60%の管理された暑熱環境下での多段階トレッドミル運動において各変数を重回帰分析に投入し, モデルを開発した. 実測 T_{ear} と予測 T_{ear} の一致度は, 級内相関係数 ($\text{ICC}_{2,1}$) と Bland-Altman プロット解析による Bias を算出し評価した. 重回帰モデルを暫定的に構築し, 体温調節反応の変化が顕著となった $T_{\text{ear}} = 37.5^{\circ}\text{C}$ の変曲点前後でモデルを再構築することで予測精度が向上した ($\text{ICC}_{2,1} = 0.968, P < 0.001; \text{Bias} = 0.001$). 各対象者のパラメーターをモデル式に当てはめる

デサントスポーツ科学 Vol. 47

と, $\text{ICC}_{2,1}$ は 0.861 – 0.995 (all $P < 0.001$), Bias は, -0.136 – 0.097 の範囲であった. これらの結果は, T_{forearm} を用いた予測モデルが T_{core} のリアルタイムセンシングに一定の実用的なアプローチとなる可能性を示唆している.

序 論

暑熱環境下における身体活動は熱中症の罹患リスクを上昇させる. 深部体温 (T_{core}) の過度な上昇は, 身体臓器の中でも熱に脆弱な脳の機能に支障をきたし, 重篤な健康被害となる場合もある¹⁻³⁾. 熱波は環境災害の中で最たる死亡原因であり^{4,5)}. 今後数十年でその頻度, 強度, 時間が増加することは確実視されている^{6,7)}. そのため, 熱中症の罹患リスクの回避には, T_{core} の上昇を早期に同定する技術の開発が重要である⁸⁾.

食道温や直腸温などの従来の T_{core} 測定は高精度であるが侵襲的であるため, 研究や臨床以外での実用性に乏しい. 近年, 大脳に血液を供給する内頸動脈からの輻射熱より T_{core} を同定する耳内温 (T_{ear}) 測定デバイスが開発され, その妥当性も立証されている⁹⁾. しかし, 使用時に片耳が閉塞さ

れるため、特定の状況では使用が制限される。したがって、より効率的かつ非侵襲的な T_{core} の測定あるいは予測技術の開発が望まれる。

皮膚温 (T_{skin}) は T_{core} を予測する際のパラメーターの1つである¹⁰⁾。また、環境からの影響を最小限に抑えるためセンサーを被覆し計測された T_{skin} は、予測精度を向上させる¹¹⁾。そのため、被覆 T_{skin} を説明変数の1つとした T_{core} 予測モデルが開発されている¹²⁻¹⁵⁾。しかし、既存の複数モデルには、環境温、放射熱、相対湿度 (RH)、風速などの環境パラメーターにくわえ、 T_{skin} を含む生理パラメーターを導出する複数のセンサーの貼付が必要であった。より実用性を高めるため、Eggenbergerらは心拍数 (HR) と肩甲骨付近の被覆 T_{skin} を説明変数とし、直腸温を予測する最小変数モデルを提案した¹⁶⁾。本モデルは従来の多変数モデルより現実的である一方、実測値と予測値には乖離がみられる。この乖離は、環境および生理パラメーターにくわえ、個人パラメーター (体力レベル、体組成、年齢、性別など) が組み込まれていないことに起因すると考えられている¹⁶⁾。また、肩甲骨付近の T_{skin} 測定は日常的な使用を考慮すると改良の余地がある。

近年のスマートウォッチ技術の進歩により、生理および環境パラメーターの連続測定が可能となった。特定のスマートウォッチには、前腕部の T_{skin} ($T_{forearm}$) を測定できるセンサーが搭載されている。また、時計自体が測定部位を覆うため、測定される $T_{forearm}$ は被覆 $T_{forearm}$ とみなすことができる。したがって、この $T_{forearm}$ に加え、生理・環境・個人パラメーターを変数とした数理モデルを構築することで、より精確かつ実用的な T_{core} 予測モデルや機器開発が可能になると考える。そこで、本研究ではまず、実験室レベルで T_{core} の指標である T_{ear} を目的変数とし、 $T_{forearm}$ および生理 (心拍数 (HR)、運動時間)・環境 (環境温、湿度)・個人パラメーター (性別、体格指数 (BMI)

) を説明変数とした新たな T_{core} 予測モデルを開発することを目的とした。我々は、予測 T_{ear} が実測 T_{ear} と高い一致度を示し、高い実用性を示すと仮説立てた。

1. 方法

1.1 対象者

健康な若齢成人12名 (男性6名、女性6名; 年齢 21 ± 1 歳; 身長 164 ± 8 cm; 体重 54.4 ± 7.9 kg) を対象とした。暑熱順化に関連する交絡因子を最小限に抑えるため10月 (秋) から12月 (冬) の期間に実施した。本研究のすべてのプロトコルはヘルシンキ宣言を遵守し、早稲田大学の人を対象とする研究に関する審査委員会の承認を得て実施した (承認番号: 2023-212)。すべての対象者から実験参加前にインフォームドコンセントを得て、実験を行った。

1.2 実験手順

対象者は排尿後にヌード体重と身長を測定した。その後、対象者は下着、Tシャツ、短パン、靴下に着替え、前室 (室温 26°C) で20分間座位安静にした。そして、対象者は室温 35°C 、相対湿度60%に設定された人工気候室 (TBR-12H, Espec, Osaka, Japan) 内で10分間の座位安静後、多段階トレッドミル運動を行った。プロトコルは、3 km/h の10分間の運動から開始し、その後10分ごとに 0.5 km/h ずつ速度を増加させた。なお、運動終了の基準は、対象者が疲労困憊を訴えた場合、または T_{ear} が 38.5°C を超えた場合とした。この基準に従い、対象者1名が45分、9名が60分、1名が65分、1名が70分で運動を終了した。

1.3 データ取得

1.3.1 説明変数

性別の変数は、男性を1、女性を2として設定した。また、BMIは、ヌード体重 (kg) を身長

(m) の2乗で除して算出した。HRは左腕のスマートウォッチ型ウェアラブルセンサー (Mulisiten; Toshiba, Tokyo, Japan) を用いて1分間隔で測定した。安静時HRは個人間で異なるため、HR関連変数を次のように算出した：

$\Delta \text{HR} = \text{運動中のHR} - \text{前室での座位安静中のHR}$
 運動強度 = $\Delta \text{HR} / (220 - \text{年齢} - \text{運動中のHR}) \times 100 (\%)^{17}$ 。T_{forearm}は右腕に設置した温湿度ロガー (iButton Hydrochron; Maxim, Dallas, USA) を用いて測定した。皮膚温センサーを搭載したスマートウォッチを模擬するため、ロガーは背面部をくり抜いた時計により覆った。対象者の周囲環境温と湿度は、スマートウォッチ型ウェアラブルセンサー (Mulisiten; Toshiba) を用いて1分間隔で測定した。

1. 3. 2 目的変数 (T_{ear})

T_{ear}は耳内温計 (VTB01; Vitarate, Tokyo, Japan) を用いて連続測定した⁹⁾。耳孔は医療用フィルムで覆った。T_{ear}はタブレット端末 (iPad Pro; Apple, Cupertino, USA) のアプリケーション (Thermologger; Vitarate, Tokyo, Japan) を用いてBluetooth経由で30秒ごとに記録し、解析時に1分間隔で平均化した。

1. 4 データ処理

前処理として、各パラメーターにおいて欠損値があった場合、当該時点の1分前のデータを用いて置換した。ただし、欠損値の数は全データの1%未満であった。その後、説明変数と目的変数を用いた強制投入法による重回帰分析を行い、暫定的なT_{ear}予測モデルを作成した。暫定的な予測モデルの精度を向上させるため、説明変数間の多重共線性を評価する分散拡大係数 (VIF) を求めた。高VIF (> 10) を示した変数を削除し、すべての説明変数のVIFが10以下になるまでプロセスを繰り返した。その結果、HRと運動強度を除外したモデルが作成された。しかし、実測T_{ear}

と予測T_{ear}の一致度を解析したところ、37.5℃前後で系統誤差がみられた (結果参照)。そのため、37.5℃前後で初期予測モデルと同じ説明変数を用い、2つの最終予測モデルを作成した。予測T_{ear}の精度は、初期および最終予測モデルを用い、全対象者から得られた全時点データによる実測T_{ear}と予測T_{ear}の級内相関係数 (ICC_{2,1}) より評価した。さらに、最終予測モデルでは、対象者ごとのICC_{2,1}を計算した。実測T_{ear}と予測T_{ear}の差を視覚化するため、Bland-Altmanプロット解析を用い、平均差 (Bias) と一致限界を算出した¹⁸⁾。

1. 5 統計解析

T_{ear}予測モデルはEZR on R commander (version 1.68) を用いて開発した。ICCはSPSSソフトウェア (SPSS Statistics 29; IBM Corp., Armonk, NY, USA) を用いて解析し、Bland-AltmanプロットはOriginソフトウェア (OriginPro; Lightstone, Tokyo, Japan) を用いて作成した。統計的有意水準はP < 0.05とした。

2. 結果

37.5℃の変曲点を考慮しない予測モデルは以下の式で表される。

$$\text{予測T}_{\text{ear}} (\text{℃}) = 0.04244 \times \text{環境温度} + 0.00234 \times \text{湿度} + 0.06806 \times \text{性別} + 0.00664 \times \text{BMI} + 0.01843 \times \text{運動時間} + 0.04673 \times \text{T}_{\text{forearm}} + 0.00005 \times \Delta \text{HR} + 33.15000$$

初期予測モデルのICC_{2,1}は0.900 (P < 0.001) であった。さらに、Bland-Altmanプロット解析では、Bias (= 0.003) が示され、プロットの大部分が一致限界内 (- 0.360 [- 1.96 SD] から - 0.367 [1.96 SD]) に収束した。一方、37.5℃未満では逆比例誤差、37.5℃以上で比例誤差がみられた。37.5℃の変曲点を考慮した予測モデルは以下の式で表された (図1A)。

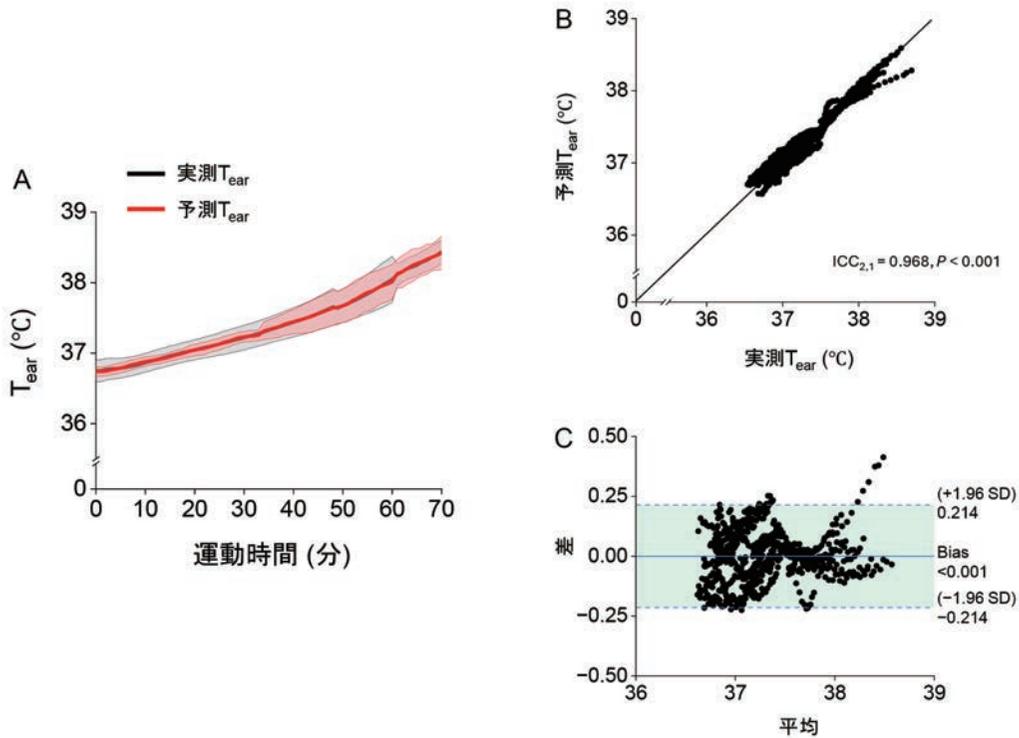


図1 A, 実測T_{ear} (黒) と37.5°Cの変曲点を組み込んだ予測T_{ear} (赤) の時系列データ。実線は平均値, 薄色の領域は標準偏差を示す。B, 実測T_{ear}と予測T_{ear}間の級内相関係数 (ICC)。C, 実測T_{ear}と予測T_{ear}を比較したBland-Altmanプロット, 実線は2つの値の平均差を表し, 破線は95%一致限界 (平均差 ± 1.96 SD) を示す。点はすべての対象者から得られた時点データを示す。

T_{ear} < 37.5°Cの場合,

$$\begin{aligned} \text{予測 } T_{\text{ear}} (\text{°C}) = & 0.01212 \times \text{環境温度} + 0.01290 \\ & \times \text{湿度} + 0.02998 \times \text{性別} + 0.00234 \times \text{BMI} + 0.01126 \\ & \times \text{運動時間} + 0.06092 \times T_{\text{forearm}} - 0.00236 \times \Delta \text{HR} \\ & + 33.31277 \end{aligned}$$

T_{ear} ≥ 37.5°Cの場合,

$$\begin{aligned} \text{予測 } T_{\text{ear}} (\text{°C}) = & -0.12724 \times \text{環境温度} - 0.01029 \\ & \times \text{湿度} + 0.042327 \times \text{性別} + 0.04008 \times \text{BMI} + 0.03118 \\ & \times \text{運動} \\ & \text{時間} + 0.01063 \times T_{\text{forearm}} + 0.00230 \times \Delta \text{HR} \\ & + 41.40534 \end{aligned}$$

最終予測モデルのICC_{2,1}は0.968に増加した (P < 0.001; 図1B)。くわえて, Bland-Altmanプロット解析では, Biasが減少した (= 0.001; 図1C)。さらに, 初期モデルにおいて確認された系統誤差はみられなかった。また, 各対象者のパラメーター

を本モデル式に当てはめると, ICC_{2,1}は0.861–0.995 (all P < 0.001; 図2), Biasは, –0.136–0.097の範囲であった (図3)。

3. 考察

3.1 主知見

本研究では, T_{forearm}に生理・環境・個人パラメーターを組み込んだT_{core}予測モデルを実験室レベルで開発した。その結果, モデルにT_{ear}37.5°Cの変曲点を組み込むことで, 実測T_{ear}とのICC_{2,1}が0.968と高い一致度を示し, Bland-Altmanプロット解析においても低いBiasが得られた。

3.2 37.5°Cの変曲点を考慮する必要性

実測T_{ear}と予測T_{ear}の間で観察された誤差に基づき, 37.5°Cの変曲点をモデルへ組み込んだ。こ

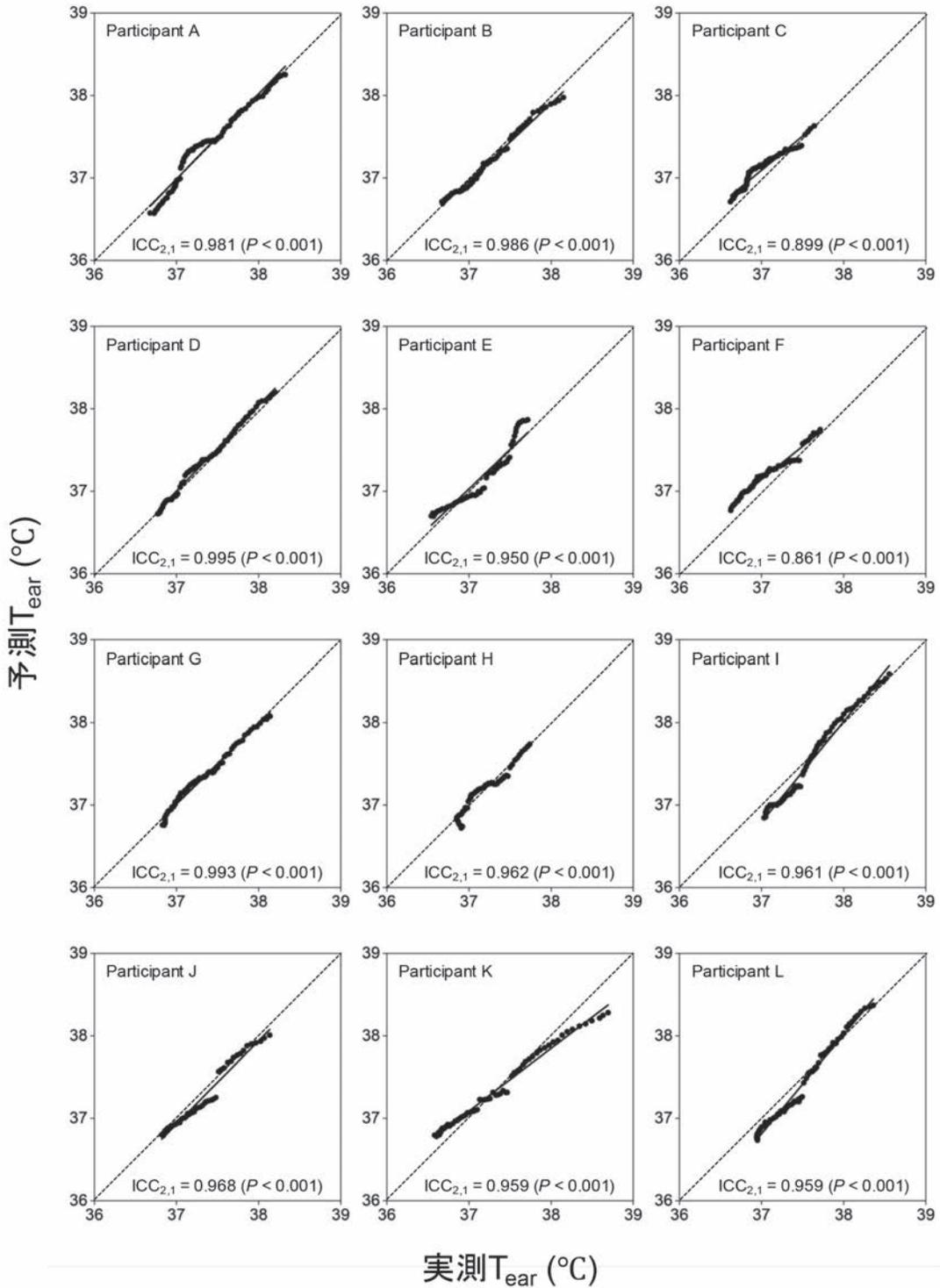


図2 各対象者の実測T_{ear}と予測T_{ear}間の級内相関係数 (ICC)

の37.5°Cは、皮膚血流量の増加や発汗などの体温調節メカニズムがより顕著になる移行点を示し

ていると考えられる。本実験プロトコルとは異なるが先行研究において、37°C以降に発汗や皮膚

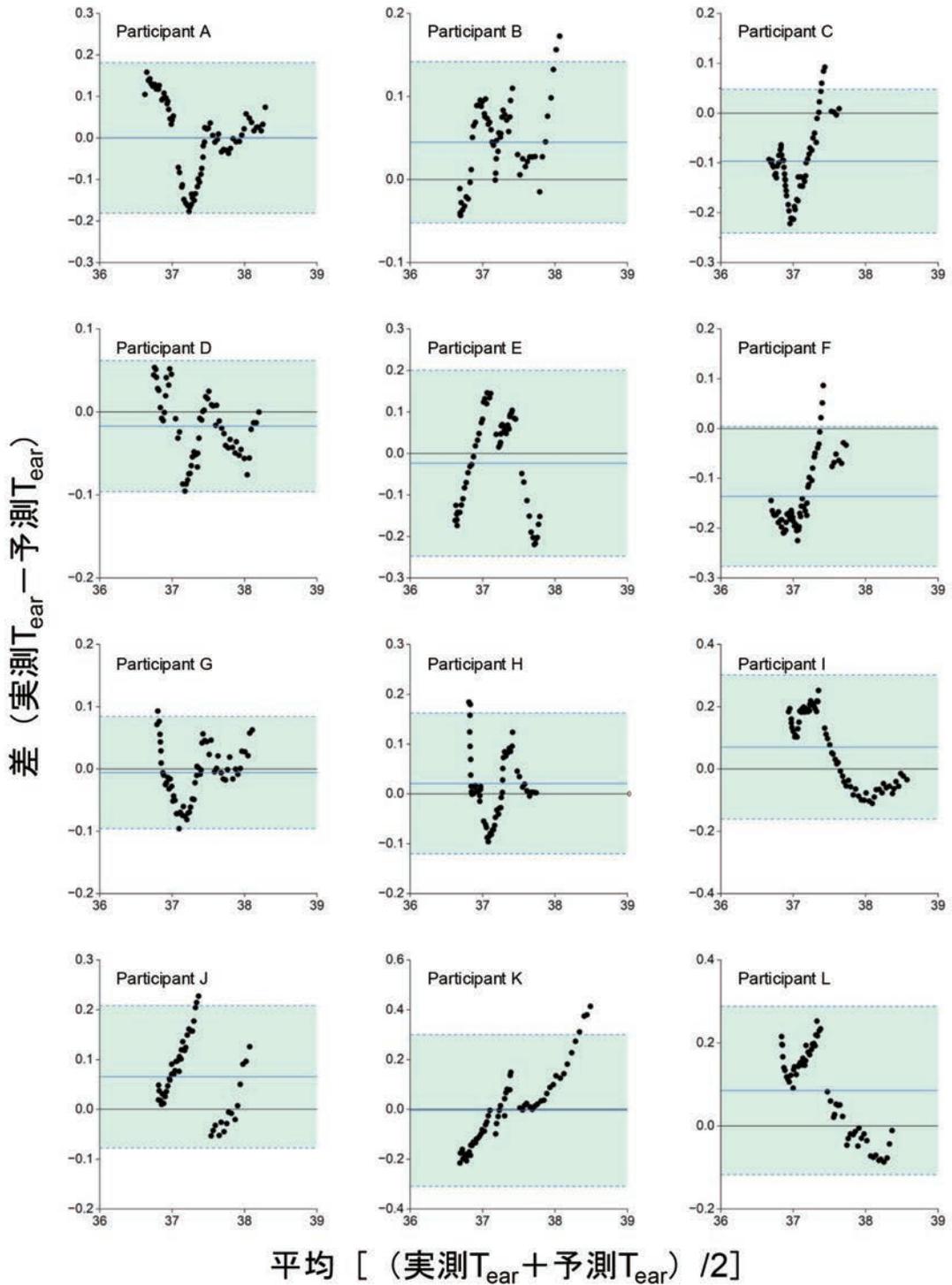


図3 各対象者の実測 T_{ear} と予測 T_{ear} を比較したBland-Altmanプロット
 実線は2つの値の平均差を表し、破線は95%一致限界(平均差 \pm 1.96 SD)を示す。

血管拡張のオンセット深部温度閾値があることが示されている^{19, 20)}。初期モデルではこれらの

非線形変化を適切に捉えることができず、この $T_{ear}37.5^{\circ}\text{C}$ 前後で系統誤差が生じた。37.5°Cの閾値

を境に2つの回帰式を導入した最終モデルは、これらの生理学的変化をより効果的に考慮し、Biasを低減し、予測精度を向上させた。

3. 3 各説明変数の係数の解釈

本モデルは重回帰分析より数理的に構築されたことから、説明変数の係数を生理学的に解釈することは難しいが、一部は説明可能であるかもしれない。

3. 3. 1 T_{forearm} の妥当性

T_{forearm} の係数は正となったことは、 T_{forearm} が T_{core} を予測する際の信頼性の高い指標となる可能性を示唆する。安静時、前腕を含む四肢への血流は比較的安定しているが、運動中や環境温変化が顕著な場合、身体は末梢血流を変化させることで熱放散を調節する²¹⁾。具体的には、 T_{core} が上昇すると、血管拡張により皮膚への血流が増加し、皮膚表面から環境への熱伝達が促進される²²⁾。したがって、 T_{forearm} の上昇は T_{core} の上昇に対応すると考えられる。この生理学的プロセスにより、 T_{forearm} を説明変数の一部とした予測モデルにより算出された T_{ear} は、実測 T_{ear} と高い一致度を示したと考えられる。

3. 3. 2 生理学的パラメーター (HR, 運動時間)

HR (Δ HR) の T_{ear} の係数は、 $T_{\text{ear}}37.5^{\circ}\text{C}$ を境に変化した。HRは活動筋への血流を増加させ、代謝を増大させることで内因性熱産生に貢献する²¹⁾。一方、 T_{core} が高い場合は、HRの増加が皮膚血流量の増加など、熱放散を促進する体温調節のための血管調整に寄与する²¹⁾。この閾値前後の係数の変化は、心血管調節と体温恒常性との間の動的な相互作用を示しており、高体温時における Δ HRの T_{ear} への影響を説明しているかもしれない。運動時間に関しては、長期の運動は T_{ear} と正の相関を示し、これは、時間経過に伴う代謝熱産生の累積効果と一致する。また、持続的な身体活動は継続的な代謝熱産生により体温の漸進的な上

昇につながるため、この考えは妥当である。

3. 3. 3 環境パラメーター (環境温と湿度)

実験1は人工気候室内で実施したため、計測された環境温と湿度は一定であると予想した。しかし、測定値は変動し、環境温は $35\text{--}36^{\circ}\text{C}$ 、RHは $60\text{--}80\%$ の範囲内で推移した。この変動の要因として、計測センサーが機器側面に搭載されていたことが考えられる。そのため、局所的な身体部からの放熱と発汗反応が測定値に影響した可能性がある。運動中、発汗は運動時間と強度との相互作用により自律的に増加し、環境要因が体温調節反応をさらに調節する。また、通常、 T_{skin} は環境温よりも高く、皮膚と環境間の伝導による熱放散を促進する^{22, 23)}。しかし、環境温が T_{skin} より高い場合、熱伝導の方向は逆になる^{22, 23)}。本研究では、環境温と湿度の係数は 37.5°C を境に逆転した。この結果は、この閾値以下では皮膚温が環境温よりも低く、それ以上では高かったことを示唆する。結果として、前者のケースでは係数が負になり、後者のケースでは正になったと考えられる。

3. 3. 4 個人特有パラメーター (性別とBMI)

性別は正の係数を示したことは、熱放散と熱産生に影響を与える体組成の性差を反映しているかもしれない。女性は男性と比較して、筋量が少なく、脂肪量が多い²⁴⁾。筋肉と脂肪の水分含有量がそれぞれ約70%と30%であるため、女性の水分含有量の少なさは熱伝導による熱放散に不利となる可能性がある。これらの体組成の違いが、性別の係数に寄与していると考えられる。さらに、本研究では酸素摂取量は測定していないが、同じ絶対的運動負荷では、絶対的および相対的な酸素摂取量は女性の方が男性よりも大きくなる²⁵⁾。代謝熱産生が酸素消費量によって直接影響を受けることを考えると、この要因も性別間の係数の違いに寄与している可能性がある。BMIが高いほど T_{ear} が増加することは、体脂肪が多い個人ほど、

断熱性の向上と対流冷却の減少により、より多くの熱を保持するという原理と一致している。この所見は、脂肪組織が熱障壁として機能し、熱放散を妨げるという先行研究と一致している²⁶⁾。さらに、BMIが高い個人は体表面積対質量比が低く²⁷⁾、環境との熱交換能力がさらに低下する可能性がある。これらの要因が、BMIが正の係数を示すことを示唆している。ただし、これらの変数と係数の解釈は生理学的原理に基づいた推論でしかなく、また、係数は他の説明変数との関係によって変化する。したがって、各係数の具体的な生理学的意義を解明するためには、さらなる研究が必要である。

3.5 限界

本研究にはいくつかの限界がある。1つ目、サンプル数が多くはないため対象者ごとに予測 T_{ear} の妥当性を検証した場合の実測 T_{ear} との乖離につながっているかもしれない。本研究は若齢成人のみを対象としているが、年齢も説明変数となりうるため、より広範な年齢集団でのさらなる検証が必要である。2つ目、運動前の暑熱環境下における曝露時間が10分と短時間であった。先行研究ではPre-warmingとして90分程度曝露している。しかし、当該先行においては発汗や皮膚血管拡張が開始するオンセット深部温が37.2℃付近に存在することが示されており^{19, 20)}、当該深部温閾値は本研究の変曲点に該当すると考えられる。そのため、変曲点を加味したモデルの作成は理屈に合う。一方、先行研究と本研究の T_{core} 閾値の乖離は T_{core} の測定手法やプロトコルの相違に加え、運動前の曝露時間の違いによるものと考えられる。Frank et al. は、自律性の血管運動 (vasomotor) に対する寄与比が深部温と皮膚温の比率は、3:1と報告しており、皮膚温を+1.0℃上げる効果は T_{core} を+0.33℃上げるのに相当すると考えられる²⁸⁾。したがって、先行研究 (Pre-warming) の平

均皮膚温が本研究の平均皮膚温より~1℃高かった場合、観測される T_{core} 閾値は~0.3℃低くなる。したがって、本モデルの実環境への応用にはまだ検証すべき点が残る。さらに、3つ目として、屋外などにおいて、モデル実用性を実際に検証していないことである。

4. 結論

本研究は、 $T_{forearm}$ にくわえ、生理・環境・個人パラメーターを組み込むことにより、 T_{core} の予測モデルを開発した。37.5℃の変曲点の包含したモデルは予測精度を大幅に向上させた。多様な集団や環境でのさらなる検証が必要であるが、前腕部皮膚温を用いた T_{core} の予測モデルの可能性を示した本知見は次世代ウェアラブル技術の進歩に貢献し、熱中症リスクのリアルタイム検出を可能にするかもしれない。

謝辞

著者らは、堀江純平氏 (早稲田大学) と実験参加者の方々に感謝の意を表す。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 (H.W) および日本学術振興会科学研究費助成事業 (基盤研究A; JP 19H01128, K.N), ならびに東芝インフラシステムズ株式会社の支援を受けた。

文献

- 1) N.A.S. Taylor, Challenges to temperature regulation when working in hot environments, *Ind. Health*, **44**, 331-344. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.331> (2006)
- 2) J. González-alonso, C.G. Crandall, J.M. Johnson, The cardiovascular challenge of exercising in the heat, *J. Physiol.*, **586**, 45-53. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.142158> (2008)
- 3) L. Nybo, Hyperthermia and fatigue, *J. Appl. Physiol.*, **104**, 871-878. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00910.2007> (2008)

- 4) N.M. Berry, K. Davison, A.M. Coates, J.D. Buckley, P.R.C. Howe, Impact of cocoa flavanol consumption on blood pressure responsiveness to exercise, *Br. J. Nutr.*, **103**, 1480–1484. <https://doi.org/10.1017/S0007114509993382> (2010)
- 5) G. Luber, M. McGeehin, Climate Change and Extreme Heat Events, *Am. J. Prev. Med.*, **35**, 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021> (2008)
- 6) G.A. Meehl, C. Tebaldi, More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century, *Science (80-)*, **305**, 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704> (2004)
- 7) Schar Christoph, Vidale Pier Luigi, Luthi Daniel, Frei Christoph, Haberli Christian, Liniger Mark A., Appenzeller Christof, The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves, *Nature*, **427**, 328–332. <https://doi.org/10.1038/nature02230.1> (2004)
- 8) Y. Epstein, W.O. Roberts, The pathophysiology of heat stroke: an integrative view of the final common pathway, *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, **21**, 742–748. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01333.x> (2011)
- 9) I. Kato, H. Watanabe, K. Nagashima, Evaluation of newly developed wearable ear canal thermometer, mimicking the application to activities on sports and labor fields, *J. Physiol. Sci.*, **73**, 15. <https://doi.org/10.1186/s12576-023-00874-4> (2023)
- 10) S. Mendt, M.A. Maggioni, M. Nordine, M. Steinach, O. Opatz, D. Belavý, D. Felsenberg, J. Koch, P. Shang, H.C. Gunga, A. Stahn, Circadian rhythms in bed rest: Monitoring core body temperature via heat-flux approach is superior to skin surface temperature, *Chronobiol. Int.*, **34**, 666–676. <https://doi.org/10.1080/07420528.2016.1224241> (2017)
- 11) V.L. Richmond, S. Davey, K. Griggs, G. Havenith, Prediction of Core Body Temperature from Multiple Variables, *Ann. Occup. Hyg.*, **59**, 1168–1178. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev054> (2014)
- 12) M.J. Buller, W.A. Latzka, M. Yokota, W.J. Tharion, D.S. Moran, A real-time heat strain risk classifier using heart rate and skin temperature, *Physiol. Meas.*, **29**, <https://doi.org/10.1088/0967-3334/29/12/N01> (2008)
- 13) M.J. Buller, J. Castellani, W.S. Roberts, R.W. Hoyt, O.C. Jenkins, Human thermoregulatory system state estimation using non-invasive physiological sensors, *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, 3290–3293. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090893> (2011)
- 14) M.J. Buller, W.J. Tharion, C.M. Duhamel, M. Yokota, Real-time core body temperature estimation from heart rate for first responders wearing different levels of personal protective equipment, *Ergonomics*, **58**, 1830–1841. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1036792> (2015)
- 15) A.P. Welles, X. Xu, W.R. Santee, D.P. Looney, M.J. Buller, A.W. Potter, R.W. Hoyt, Estimation of core body temperature from skin temperature, heat flux, and heart rate using a Kalman filter, *Comput. Biol. Med.*, **99**, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2018.05.021> (2018)
- 16) P. Eggenberger, B.A. MacRae, S. Kemp, M. Bürgisser, R.M. Rossi, S. Annaheim, Prediction of core body temperature based on skin temperature, heat flux, and heart rate under different exercise and clothing conditions in the heat in young adult males, *Front. Physiol.*, **9**, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01780> (2018)
- 17) R.A. Robergs, R. Landwehr, The surprising history of the “HRmax=220-age” equation, *J. Exerc. Physiol. Online*, **5**, 1–10 (2002)
- 18) J.M. Bland, D.G. Altman, Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement, *Lancet*, **1**, 307–310. <https://doi.org/10.1128/AAC.00483-18> (1986)
- 19) G.P. Kenny, J. Périard, W.S. Journeay, R.J. Sigal, F.D. Reardon, Effect of exercise intensity on the postexercise sweating threshold, *J. Appl. Physiol.*, **95**, 2355–2360. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00651.2003> (2003)
- 20) G.P. Kenny, J.E. Murrin, W. Shane Journeay, F.D. Reardon, Differences in the postexercise threshold for cutaneous active vasodilation between men and women, *Am. J. Physiol. - Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **290**, 172–179. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00428.2005> (2006)
- 21) M.J. Joyner, D.P. Casey, Regulation of increased blood flow (Hyperemia) to muscles during exercise: A hierarchy of competing physiological needs, *Physiol. Rev.*, **95**, 549–601. <https://doi.org/10.1152/physrev.00035.2013> (2015)
- 22) C.J. Smith, J.M. Johnson, Responses to

- hyperthermia. Optimizing heat dissipation by convection and evaporation: Neural control of skin blood flow and sweating in humans, *Auton. Neurosci. Basic Clin.*, **196**, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.01.002> (2016)
- 23) M.N. Sawka, L.R. Leon, S.J. Montain, L.A. Sanna, Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress, *Compr. Physiol.*, **1**, 1883–1928. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100082> (2011)
- 24) T. Abe, C.F. Kearns, T. Fukunaga, Sex differences in whole body skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging and its distribution in young Japanese adults, *Br. J. Sports Med.*, **37**, 436–440. <https://doi.org/10.1136/bjsm.37.5.436> (2003)
- 25) M.J. Price, P.M. Smith, L.M. Bottoms, M.W. Hill, The effect of age and sex on peak oxygen uptake during upper and lower body exercise: A systematic review, *Exp. Gerontol.*, **190**, 112427. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2024.112427> (2024)
- 26) J.R. Speakman, *Obesity and thermoregulation*, 1st ed., Elsevier B.V., 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63912-7.00026-6>
- 27) K.M. Taylor, G.E.W. Giersch, A.R. Caldwell, Y. Epstein, N. Charkoudian, Relation of body surface area-to-mass ratio to risk of exertional heat stroke in healthy men and women, *J. Appl. Physiol.*, **136**, 549–554. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00597.2023> (2024)
- 28) S.M. Frank, S.N. Raja, C.F. Bulcao, D.S. Goldstein, Relative contribution of core and skin temperatures to thermal comfort in humans, *J. Therm. Biol.*, **86**, 1588–1593. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(99\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(99)00039-X) (1999)

スピードスケートの高い滑走速度を生み出す 関節パワー発揮特性の解明

国立スポーツ
科学センター 木村 裕也
(共同研究者) 同 横澤 俊治

Elucidation of Joint Power Characteristics that Generate High Skating Velocities in Speed Skating

by

Yuya Kimura, Toshiharu Yokozawa
Japan Institute of Sports Sciences

ABSTRACT

This study aimed to identify the mechanical factors necessary for achieving higher skating velocities and better race times by estimating blade reaction forces using wireless insole-type foot pressure sensors, and by characterizing lower limb joint torques and joint torque powers during skating under conditions closely simulating actual races. Simulated races were conducted and analyzed with 16 skilled skaters. The results showed that skaters with superior race times and higher velocities exhibited greater hip and knee extension torque power in the right lower limb during both straight and curve skating. Additionally, greater hip abduction torque power was observed in the right lower limb during curve skating. These findings suggest that generating such torque power is critical for achieving better performance. Furthermore, during curve skating, ankle plantarflexion torque power in the right lower limb and knee extension torque power in the left lower limb showed sex-related differences, indicating that these power outputs may be particularly important for female skaters.

キーワード

スピードスケート, 足圧センサ, 関節トルク, 関節トルクパワー, キネティクス

Keyword

speed skating, foot pressure sensor, joint torque, joint torque power, kinetics

要 旨

本研究は、ワイヤレス式インソール型足圧センサを使用してブレード反力を推定し、実際のレースにより近いパフォーマンス発揮時での、滑走中における下肢の関節トルクおよび関節トルクパワーの特徴を明らかにすることで、高い滑走速度獲得およびより良いゴールタイムのために必要な力学的要因を解明することを目的とした。熟練選手16名を対象に模擬レースを実施し分析を行った結果、ゴールタイムが優れ、滑走速度の高い成績上位選手は、ストレート滑走およびカーブ滑走右下肢の股関節・膝関節伸展トルクパワーが大きく、さらに、カーブ滑走右下肢の股関節外転トルクパワーも大きかった。これらのパワー発揮がより良いパフォーマンスのためには重要であることが示唆された。加えて、カーブ滑走右下肢の足関節底屈および左下肢の膝関節伸展トルクパワーは男女で傾向が異なり、特に女子ではこれらのパワー発揮も重要である可能性が示唆された。

緒 言

スピードスケートのパフォーマンス改善に有効な示唆を得るためには、滑走中に発揮した力学的パワーとパフォーマンスとの関係を検討することが有効であると考えられる。スピードスケートでは、フォースプレートなどを用いて反力測定を行うことが困難なため、氷上滑走のキネティクスの分析は、特製センサブレードを利用することによって行われてきた。de Koning et al.¹⁾は、競技レベルの異なる男子選手3名を対象に、ストレート

ト滑走中にブレードの上下軸方向に作用する圧縮力を計測し、プッシュオフ力と滑走速度との関係について検討している。また、結城ほか²⁾は、ブレードの上下軸に加えて左右方向に加わる力についても検出できるセンサブレードを作成し、当時の世界記録保持者を含む男子熟練選手10名を対象に、ストレート加速滑走中におけるブレード反力を計測し、ブレード反力の側方成分が加速に大きく影響することを明らかにしている。その後スラップスケートが主流となった2000年代に、Yuda et al.³⁾が、男子長距離選手8名を対象に、4,000m滑走中におけるカーブ滑走左ストローク中のブレード反力を計測し、レース後半では側方成分が減少していたことを報告している。また、左ストロークのプッシュオフ動作には膝関節が大きく貢献していることを明らかにしている(湯田ほか⁴⁾。近年では、van der Kruk et al.⁵⁾が、スラップアーム(スケート靴とブレードが踵で離れる機構を可能にするためにスケート靴底面に固定されているアーム部分)内部に小型の力覚センサとデータトリガを取り付けたワイヤレス性のセンサブレードを開発し、男女熟練競技者7名のブレード反力を測定している。

これまでのキネティクスの研究から、ストレートおよびカーブ滑走におけるプッシュオフのメカニズムは明らかになってきた。これらは「滑る」動作の解明として学術的な意義が非常に高い。しかし、実際の公式競技会におけるパフォーマンスを分析することが技術的に困難なため、パフォーマンス向上に直結する知見の提供はまだ不十分である。従来、特製ブレードを用いたブレード反力

の計測が行われてきたが、この方法は、靴やロガー等の機器が重く、動作を阻害する要因が大きい。この問題点を改善するためには、実験環境をより実際の公式競技会に近づけるよう、選手自身が普段から使用しているスケート靴およびブレードを使用し、身体には測定機器類を極力装着しない状態で試技を行わせ、力学的指標を取得することで、より競技現場にとって有益な知見が得られると考えられる。センサブレードを用いない方法として足圧センサによる圧力データからブレード反力を算出する方法が考えられるが(皆川⁶⁾)、従来はロガーなどを含む重量やケーブルの存在によって競技会に近い感覚で滑走することは困難だった。近年ではケーブルのない軽量の足圧センサが開発されており、長時間でも継続して収集し続けられるようになっている。これを活用することによって、ブレード反力を推定し、キネティクスの分析がより詳細に行えると考えられる。

以上のことから、本研究では、ワイヤレス式インソール型足圧センサを使用してブレード反力を推定し、実際のレースにより近いパフォーマンス発揮時での、滑走中における下肢の関節トルクおよび関節トルクパワーの特徴を明らかにすることで、高い滑走速度獲得およびより良いゴールタイムのために必要な力学的要因を解明することを目的とする。

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者には、スピードスケート長距離種目を専門とする男女熟練競技者16名(男子、年齢:20.4歳 \pm 0.86歳、体重:64.3kg \pm 4.65kg、女子、年齢:20.8歳 \pm 1.48歳、体重:58.2kg \pm 3.59kg)を用いた。内訳は、男子大学生選手8名、女子大学生選手6名、女子社会人選手2名であり、そのうち男子2名および女子2名は日本スケート連盟シニア強化指定選手である。実験に先立ち、被験者には実験の目

的と内容、データの取り扱い等の説明をした後、実験参加の同意を得た。なお、実験は鹿屋体育大学自然科学系倫理審査小委員会の審査を経て承認を得た上で行った。

1.2 模擬レース

模擬レースは、長野県長野市オリンピック記念アリーナ(エムウェーブ)で行った。被験者には、事前に十分なウォーミングアップを陸上および氷上で行わせた。模擬レースは、3,000mシングルトラックレーススタート位置から検者の合図でスタートした後、1周387.36mのリンクを7周と約1/3周滑走することで行った。被験者は、ダブルトラックレースのインナーレーンにあたるレーン内側半分(幅4m)を常に滑走した。

1.3 インソール型足圧センサ

本研究では、滑走中に足底面に加わる圧力を計測するために、ワイヤレス式インソール型足圧センサ(moticon, Moticon社製, 100Hz, 図1)を用いた。インソールの厚さは、コイン型リチウム



図1 インソール型足圧センサ

電池が内蔵される土踏まず部分が10.5mm, その他の箇所が2.8mmとなっている。被験者の足のサイズに最も合うインソールを選択し, スケート靴内底部に敷いた状態でスケート靴を着用させた。また, インソール装着への順応を目的として, 被験者には模擬レースの前日および当日の氷上ウォーミングアップにて, インソールを敷いた状態でのスケート靴の着用および氷上滑走を十分に行わせた。スケート靴およびブレードは被験者が所有し普段から使用しているものを用いた。データの記録開始および停止等の操作は, インソールとBluetooth接続されたスマートフォンから行った。測定中のデータは, インソール内部のロガーに記録および保存され, 模擬レース終了後, インソールからノートパソコンに移送された。スケート靴内の着圧による影響を除去するため, スケート靴の着用が完了した後, 地面から足を浮かせた状態でゼロ補正を行った。足圧データと3次元撮影用映像(後述)との同期のために, 模擬レース発走直前にて被験者にインソールを装着した状態で床面を強く踏み込ませ, センサに衝撃が加わった瞬間と, その後の模擬レース中にて被験者が3次元撮影計測範囲を通過する際に点灯するワイヤレスLED型シンクロナイザを, 同期用のビデオカメラ(*a 7s II*, SONY社製, 120 frames/s)で撮影し, 同一の映像データに記録することで, 衝撃とシンクロナイザ点灯との時間間隔を算出した。同時に, シンクロナイザの点灯を3次元撮影用カメラにも取り込むことによって足圧データと3次元撮影用映像との同期を行った。

1. 4 位置計測システムによる滑走速度算出

会場天井に設置された28台のモノクロカメラ(*UI-5240CP-M-GL*, iDS社製)を用い, レース全体を通して同期撮影した(60 frames/s, 露出時間1/1000s)。カメラパラメータは, 予めコース上に設置された基準点のカメラ画像上における位置,

ならびにカメラの絶対位置にもとづいて算出した。頭部および胴体を模式化したテンプレートを準備し, 保存された画像からカメラごとにテンプレートにマッチする選手を自動識別し, 頭頂部の水平面内の2次元座標値を同定した。得られた被験者の座標値より, 計測範囲(後述)であるストレート区間およびカーブ区間の中央を通過する前後1秒の平均速度を算出し, 滑走速度とした。

1. 5 3次元撮影および3次元座標算出

ホームストレート中央付近に幅4m, 長さ48m, 高さ1.25m, 第1カーブ中央付近に幅4m, 長さ24m, 高さ1.25mの計測範囲を設定した(図2)。ストレートとカーブそれぞれについて, 3台のハイスピードカメラ(ストレート:*Phantom v311*, *MIRO LC111*, *VEO 410S*, カーブ:*MIRO LC111*, *VEO 410S*, *Vision Research*社製)により被験者の前方, 後方(固定)および側方(パンニング)から通過中の被験者を撮影した(300 frames/s, 露出時間1/1000s)。ビデオの同期はワイヤレスLED型シンクロナイザ(*PTS-168*, *DKH*社製)を用いて行った。周回ごとに得られた映像データから, ストレート滑走では3周目(1,000m付近), カーブ滑走では2周目(720m付近)の試技を分析対象とした。計測範囲での1サイクルについて, ビデオ動作解析システム(*Frame-Dias IV*, *DKH*社製)により身体分析点21点およびブレード両端4点を50Hzでデジタイズした(図3)。パンニングDLT法により得られた分析点25点の3次元座標を, 4次のButterworth low-pass digital filterにより遮断周波数2.0-6.5Hzで平滑化した(Winter⁷⁾)。得られた3次元座標より, 横澤ほか⁸⁾による男女別スピードスケート選手の身体部分慣性係数を用いて, 身体部分重心座標を算出した。

1. 6 推定ブレード反力の算出

インソール内部の16個の各圧力センサに加わっ

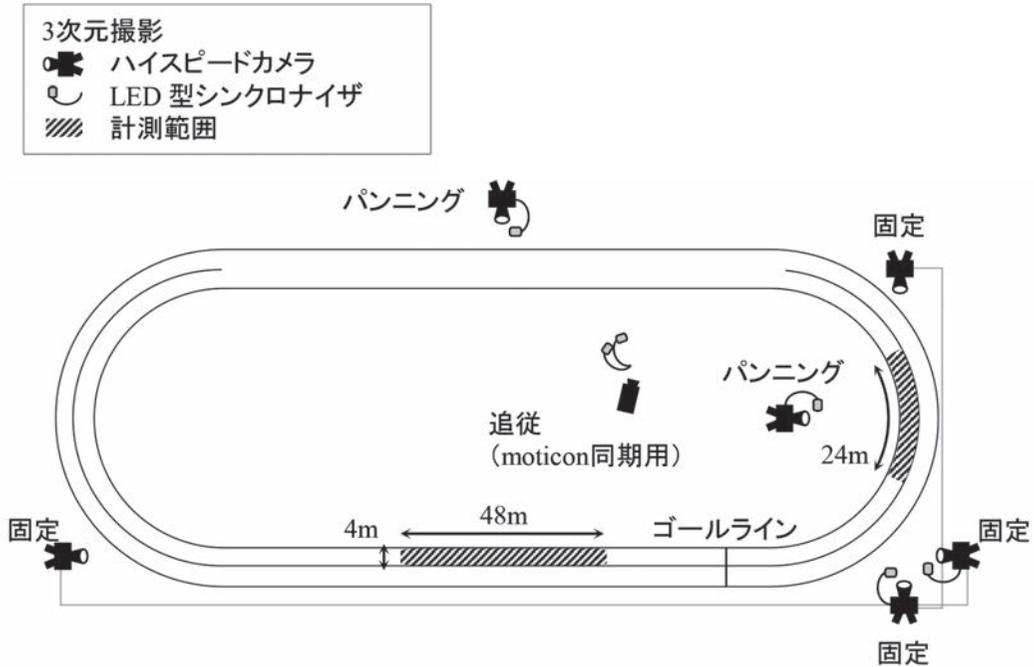


図2 撮影計測範囲およびカメラ配置



図3 座標算出点

た圧力 (単位: N/cm^2) に、各圧力センサの面積 (単位: cm^2) を乗じて力 (単位: N) を算出し、16個のセンサに加わった力の合計を推定ブレード反力の大きさとした。先行研究 (皆川⁶⁾) およびフォースプレート上をインラインローラースケートで滑走した事前検証の結果から、推定ブレード反力の作用方向を推定した。同側ブレードの後端から前端を結ぶベクトルを y_b 軸、同側ブレード後端と同側下肢膝関節を結ぶベクトルを s 軸として、 y_b

と s との外積を x_b 軸とする。そして、ベクトル x_b と y_b との外積によって得られたベクトル z_b 軸を、推定ブレード反力の作用方向とした (図4)。

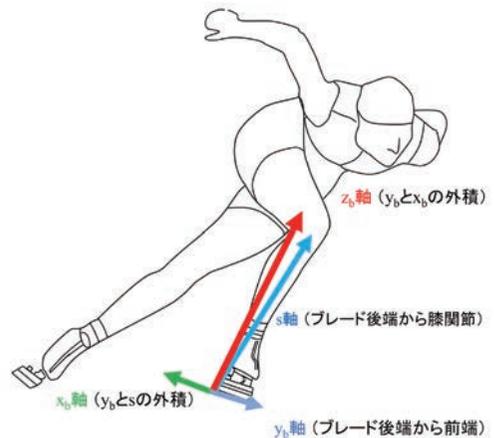


図4 推定ブレード反力の作用方向

また、16個の圧力センサに加わった圧力の分布から、圧力中心位置を算出した。

1. 7 下肢関節トルクの算出

本研究では、湯田ほか⁴⁾の方法に従って、静止座標系における下肢の3次元関節トルクを算出し、座標変換行列によって運動座標系に変換した。氷面とブレードの間に加わる鉛直軸回りのフリーモーメントについては考慮しないこととした。設定した下肢関節の運動軸は、股関節では内外転軸、屈伸軸および内外旋軸の3軸、膝関節では屈伸軸と内外旋軸の2軸、足関節では底背屈軸と回内外軸の2軸であり、各運動軸は股関節点、膝関節中点、足関節外果、足先、踵を用いて以下のように定義した。

・股関節：内外旋軸は股関節と膝関節を結ぶベクトルとした。また、股関節と膝関節を結ぶベクトルと股関節と足関節外果を結ぶベクトルとのベクトル積を算出し、屈伸軸とした。そして、このようにして得られた2つの軸のベクトル積を算出し、内外転軸とした。それぞれの軸において外旋、伸展および外転方向を正とした。

・膝関節：内外旋軸は膝関節と足関節外果を結ぶベクトルとした。また、膝関節と足関節外果を結ぶベクトルと膝関節と股関節を結ぶベクトルとのベクトル積を算出し、屈伸軸とした。それぞれの軸において外旋および伸展方向を正とした。

・足関節：回内外軸は足関節外果と足先を結ぶベクトルとした。また、足関節外果と足先を結ぶベクトルと踵と足先を結ぶベクトルとのベクトル積を算出し、底背屈軸とした。それぞれの軸において回外および底屈方向を正とした。

1. 8 下肢関節トルクパワーの算出

湯田ほか⁴⁾の方法に従って算出された静止座標系における遠位セグメントの角速度から近位セグメントの角速度を減じることによって関節を構成する2つのセグメントの相対角速度を求め、座標変換行列によって運動座標系に変換した。このようにして得られた運動座標系における関節角速

度と関節トルクを乗じることにより関節トルクパワーを算出した。

1. 9 データ規格化および群分け

本研究で算出した関節トルクおよびトルクパワー、力学的仕事はスケート靴を含む被検者の身体質量 (kg) で規格化した。また、本研究で算出した時系列データは、分析を行う下肢側ブレードの着氷から同側ブレードの離氷までの接氷時間で規格化した。

ストレート滑走右脚およびカーブ滑走右脚、左脚のデータについて、日本スケート連盟シニア強化指定男子選手2名 (以下、Top男子)、同強化女子選手2名 (以下、Top女子)、その他の男子選手6名 (以下、Sub男子)、その他の女子選手6名 (以下、Sub女子) を平均して比較した。

2. 研究結果

2. 1 ゴールタイムおよび滑走速度

模擬レースのゴールタイムは、Top男子が235.68秒 \pm 1.98秒、Sub男子が252.01秒 \pm 5.64秒、Top女子が263.23秒 \pm 0.94秒、Sub女子が274.92秒 \pm 5.85秒であった。ストレート滑走速度は、Top男子が13.37m/s \pm 0.02 m/s、Sub男子が12.40 m/s \pm 0.39 m/s、Top女子が11.70 m/s \pm 0.07 m/s、Sub女子が11.30 m/s \pm 0.28 m/sであった。カーブ滑走速度は、Top男子が13.51 m/s \pm 0.04 m/s、Sub男子が12.48 m/s \pm 0.45 m/s、Top女子が11.83 m/s \pm 0.07 m/s、Sub女子が11.44 m/s \pm 0.24 m/sであった。

2. 2 ストレート滑走

図5～7にストレート滑走におけるそれぞれ右脚股関節、膝関節、足関節各軸回りの関節トルク、関節角速度および関節トルクパワーについて、Top男子、Sub男子、Top女子、Sub女子の平均パターンを示した。

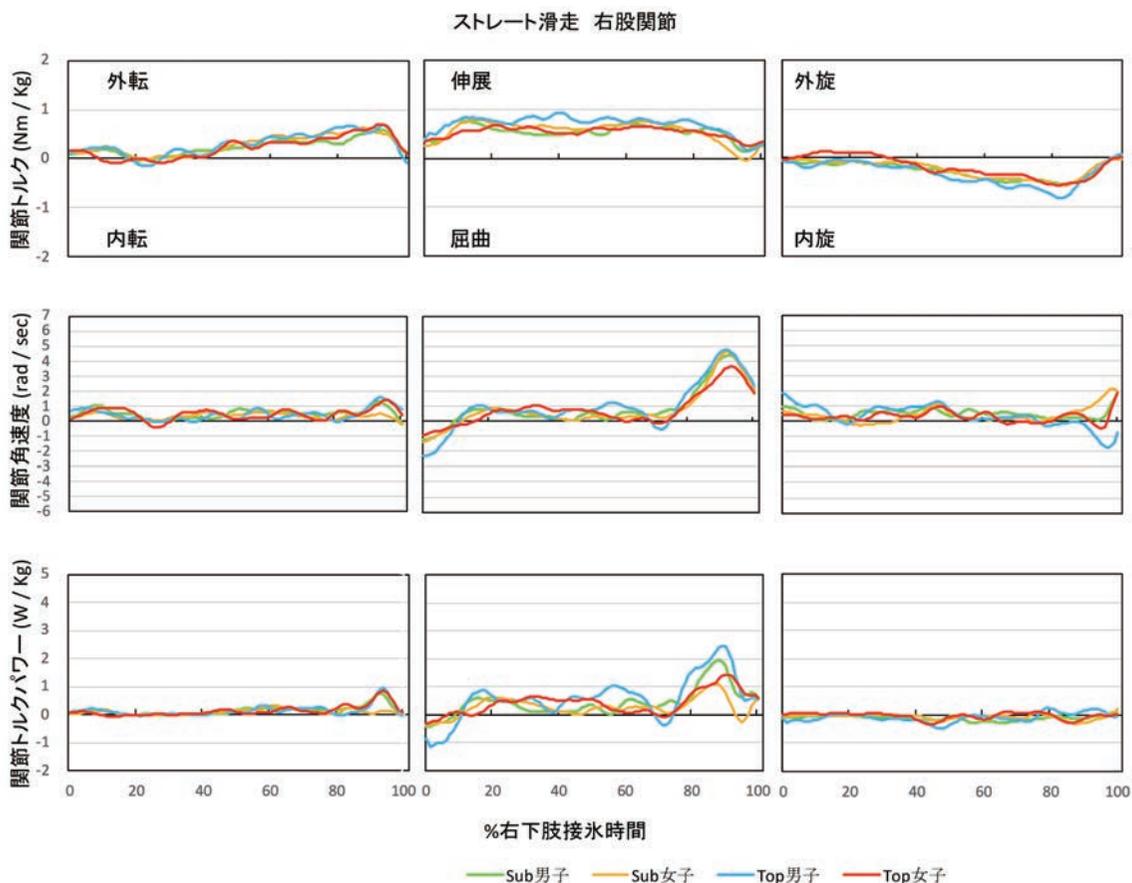


図5 ストレート滑走右下肢接水時間における右股関節トルク,角速度,トルクパワー

・ 股関節 (図5)

内外転軸では、いずれのパターンも40%時付近から外転トルクが増大し、90%時付近でピークを迎えていた。Sub女子以外の関節トルクパワーは、90%時付近で正パワーのピークがみられた。

屈伸軸では、いずれのパターンも80%時付近まで一定の伸展トルクがみられた。伸展角速度は70%時付近から増大し、90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーも90%時付近で正パワーのピークを迎えており、ピーク値はTop男子, Sub男子, Top女子, Sub女子の順に大きかった。

内外旋軸では、いずれものパターンも40%時付近から内旋トルクが大きくなり、80%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーはいずれのパターンも値が小さかった。

・ 膝関節 (図6)

屈伸軸では、いずれのパターンも10~90%時付近にかけて一定の伸展トルクがみられた。伸展角速度は80%時付近から増大し、90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーも80%時付近から増大し、90%時付近で正パワーのピークを迎えており、ピーク値はTop男子, Sub男子, Top女子, Sub女子の順に大きかった。

内外旋軸では、いずれのパターンも関節トルク, 角速度および関節トルクパワーの値が小さかった。

・ 足関節 (図7)

底背屈軸では、いずれのパターンも10~90%時付近にかけて一定の底屈トルクがみられた。底屈角速度は、80%時付近からブレード離水に向け

ストレート滑走 右膝関節

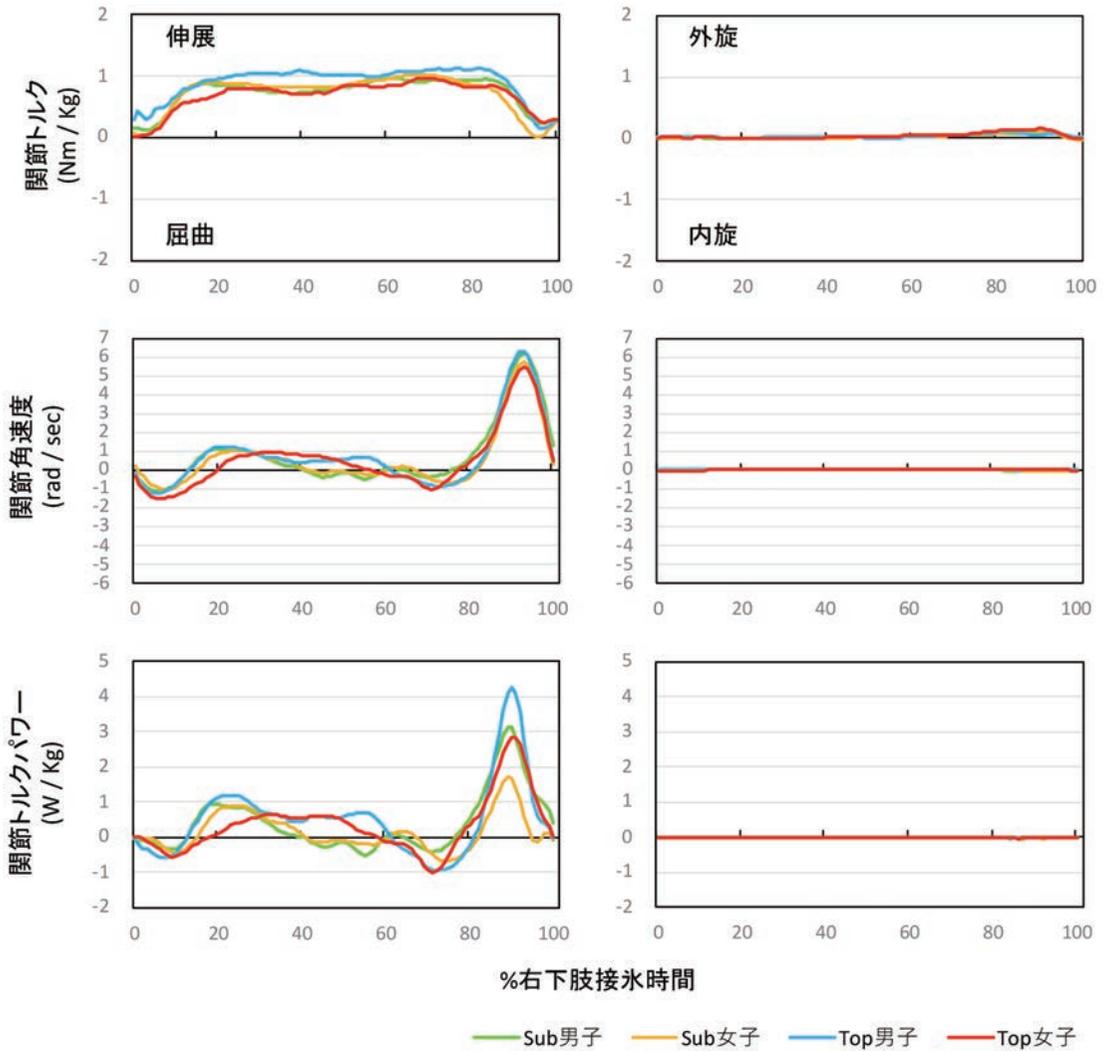


図6 ストレート滑走右下肢接氷時間における右膝関節トルク,角速度,トルクパワー

て増大していた。関節トルクパワーは、0～20%時付近で負のパワー、90～100%時付近で正のパワーが発揮されていた。

回内外軸では、いずれのパターンも50%時付近から回内トルクが発揮されていた。関節トルクパワーはいずれも値が小さかった。

2. 3 カーブ滑走右下肢

図8～10にカーブ滑走におけるそれぞれ右脚

股関節、膝関節、足関節各軸回りの関節トルク、関節角速度および関節トルクパワーについて、Top男子、Sub男子、Top女子、Sub女子の平均パターンを示した。

・股関節 (図8)

内外軸では、いずれのパターンも0～10%時付近まで内転トルクが発揮され、20%時付近から外転トルクに転じ徐々に増大し、90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーは、80

ストレート滑走 右足関節

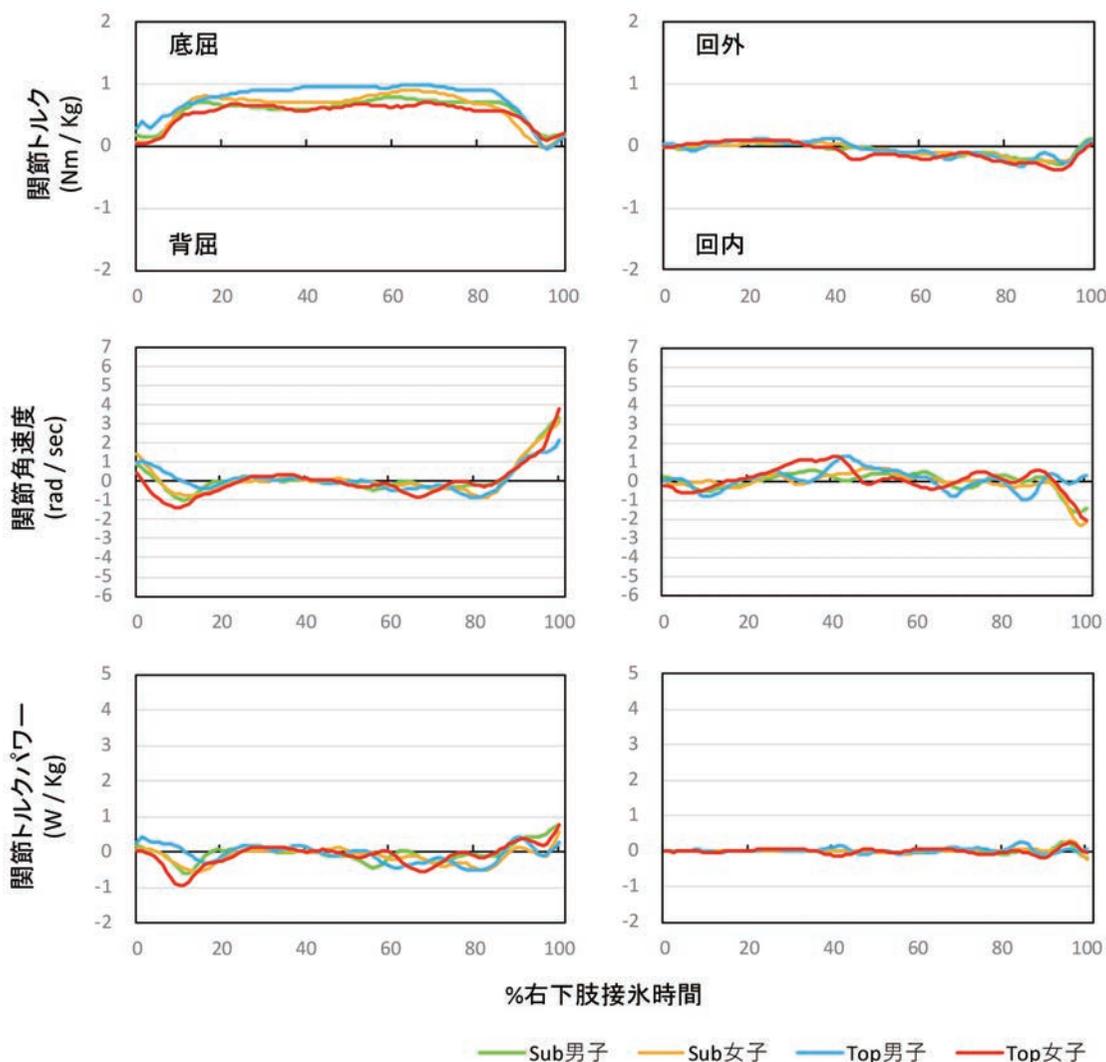


図7 ストレート滑走右下肢接氷時間における右足関節トルク,角速度,トルクパワー

～90%時付近で正パワーのピークを迎えており、ピーク値はTop女子、Top男子、Sub男子、Sub女子の順に大きかった。

屈伸軸では、いずれのパターンも80%時付近まで一定の伸展トルクがみられた。角速度は、0～10%時付近は屈曲方向を示し、10%付近から伸展方向に転じた。その後、70%時付近から増大し、90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーは、10～80%時付近で正パワーを示し

た。80%時の値はTop男子、Top女子、Sub男子、Sub女子の順に大きかった。

内外旋軸では、いずれものパターンも10～90%時付近にかけて一定の内旋トルクがみられた。関節トルクパワーは、いずれのパターンも値が小さかった。

・膝関節 (図9)

屈伸軸では、いずれのパターンも10～90%時付近にかけて一定の伸展トルクがみられた。角速

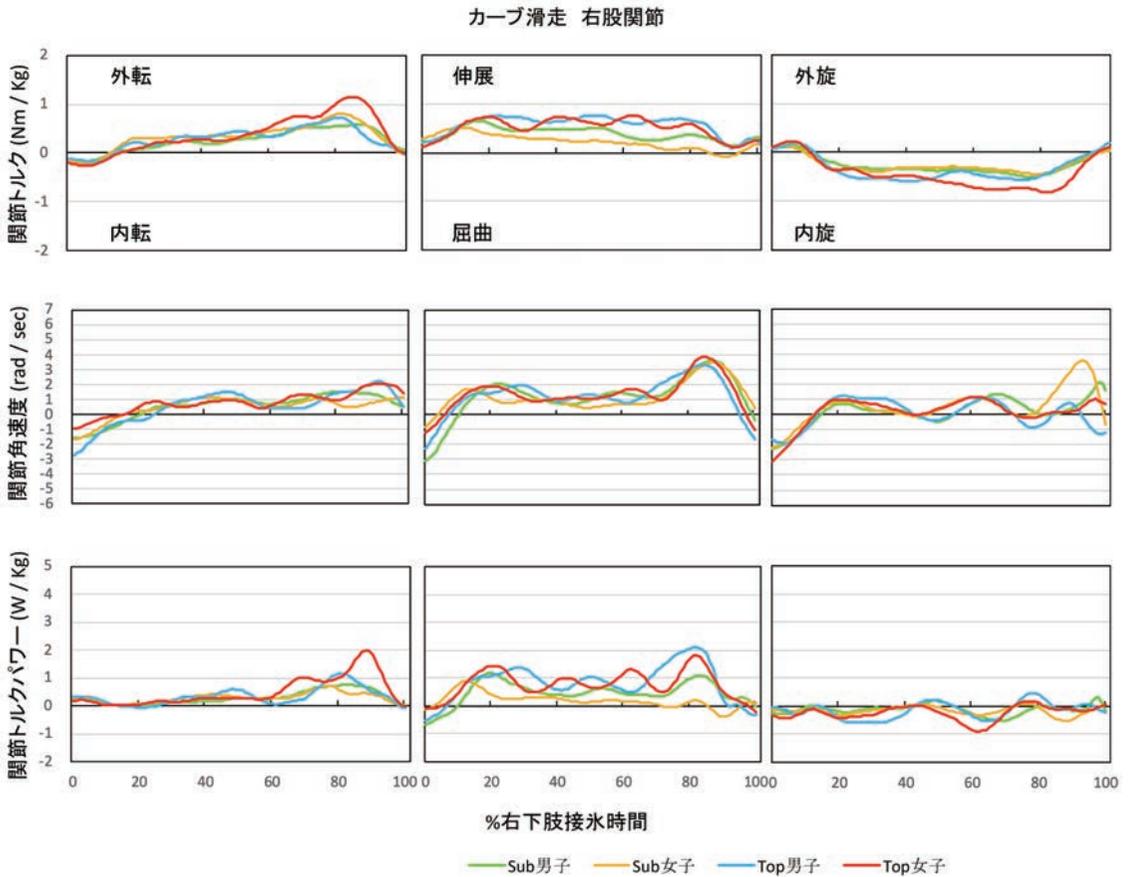


図8 カーブ滑走右下肢接氷時間における右股関節トルク,角速度,トルクパワー

度は、0～20%時付近にかけて屈曲方向を示し、20%時付近で伸展方向に転じた。その後、伸展角速度は70%時付近から増大し、90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーも、70%時付近から増大し、80～90%時付近で正パワーのピークを迎えており、ピーク値はTop女子、Top男子、Sub男子、Sub女子の順に大きかった。

内外旋軸では、いずれのパターンも80%時付近で外旋トルクがみられたが、値は小さかった。角速度および関節トルクパワーは、いずれも値が小さかった。

・足関節 (図10)

底背屈軸では、いずれのパターンも10～80%時付近にかけて一定の底屈トルクがみられた。背屈角速度は、ブレード着氷後10%時付近でピー

クがみられた。その後、80%時付近から底屈角速度が増大し、90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーは、10～20%時付近で負のパワーのピークがみられた。また、80～90%時付近で正パワーのピークを迎えており、ピーク値はTop女子、Sub男子、Top男子、Sub女子の順に大きかった。

回内外軸では、いずれのパターンも20%時付近から回内トルクが発揮され、80～90%時付近でピークを迎えていた。回内角速度は90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーは、80～90%時付近で正のピークを迎えていた。

2. 4 カーブ滑走左下肢

図11～13にカーブ滑走におけるそれぞれ左

カーブ滑走 右膝関節

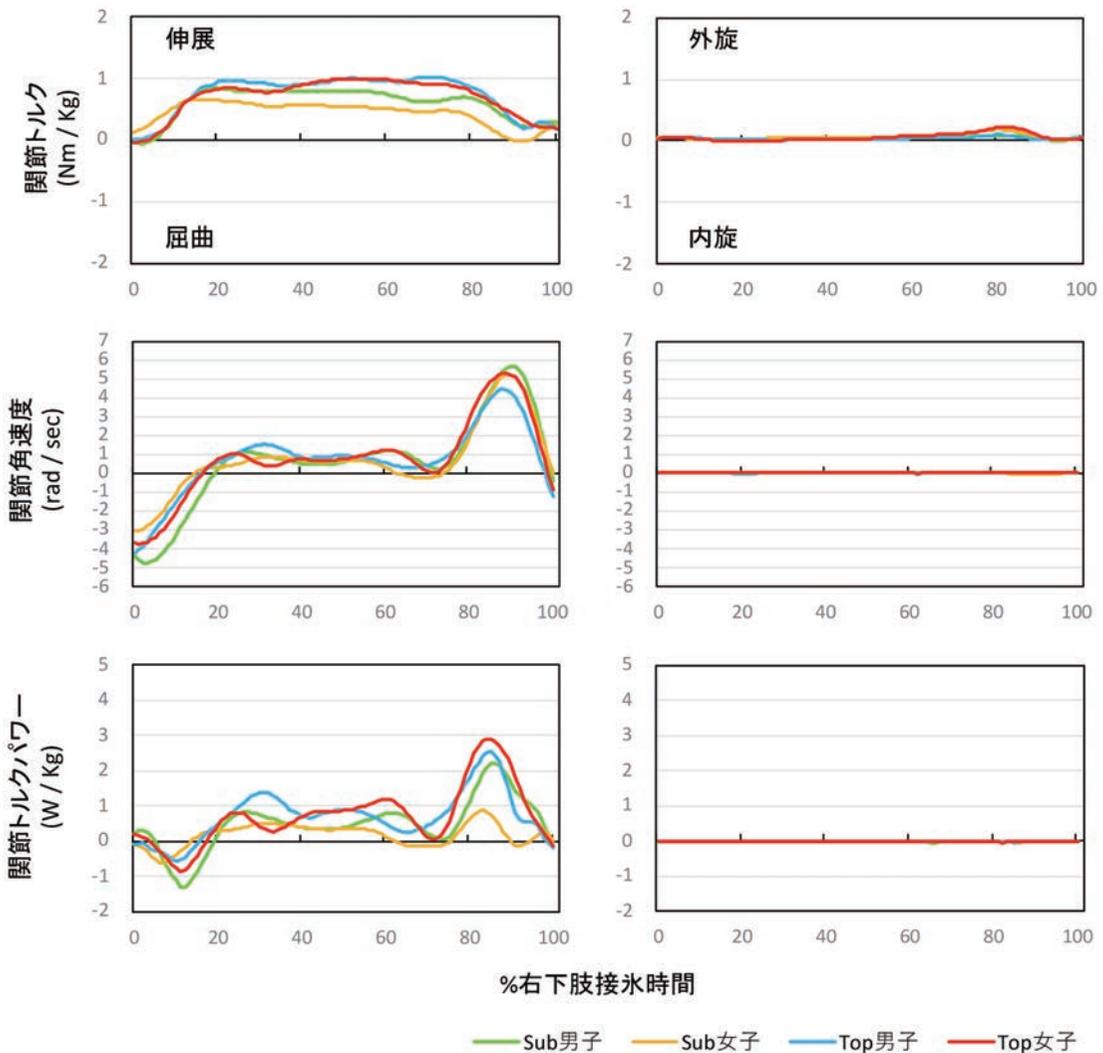


図9 カーブ滑走右下肢接氷時間における右膝関節トルク,角速度,トルクパワー

脚股関節, 膝関節, 足関節各軸回りの関節トルク, 関節角速度および関節トルクパワーについて, Top男子, Sub男子, Top女子, Sub女子の平均パターンを示した。

・股関節 (図11)

内外転軸では, いずれのパターンも20~80%時付近にかけて外転トルクがみられたが, 値は小さかった。関節トルクパワーに関しては, いずれのパターンも値が小さかった。

屈伸軸では, いずれのパターンも一定の伸展トルクがみられた。伸展角速度は90%時付近でピークを迎えていた。関節トルクパワーに関して, Top男子は60%時付近, Top女子およびSub男子は80%時付近で正パワーのピークを迎えていた。Sub女子については, 40%時付以後, 関節トルクパワーが小さかった。

内外旋軸では, いずれのパターンも関節トルクおよび関節トルクパワーが小さかった。

カーブ滑走 右足関節

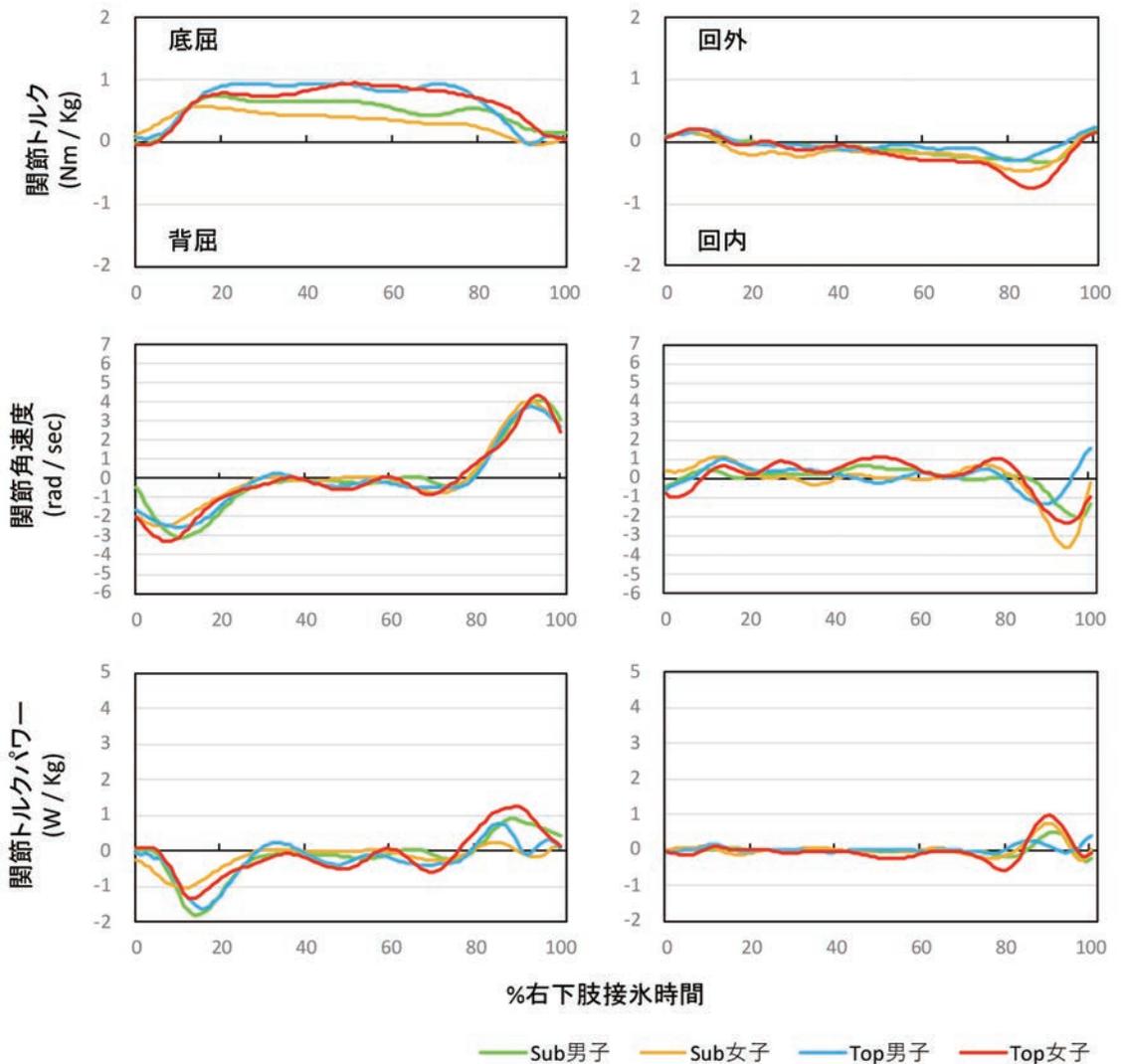


図10 カーブ滑走右下肢接水時間における右足関節トルク,角速度,トルクパワー

・膝関節 (図12)

屈伸軸では、いずれのパターンも10～90%時付近にかけて一定の伸展トルクがみられた。伸展角速度は、70%時付近から増大し、90%時付近でピークを迎えていた。Sub女子以外の関節トルクパワーは、70%時付近から増大し、80～90%時付近で正パワーのピークを迎えていた。80%時以後におけるピーク値はTop女子、Sub男子、Top男子、Sub女子の順に大きかった。

内外旋軸では、いずれのパターンも、関節トルク、角速度および関節トルクパワーの値が小さかった。

・足関節 (図13)

底背屈軸では、いずれのパターンも0～60%時付近にかけて底屈トルクがみられた。底屈角速度は、80%時付近からブレード離氷に向けて増大していた。関節トルクパワーは、10～20%時付近で負のパワーが発揮されていた。

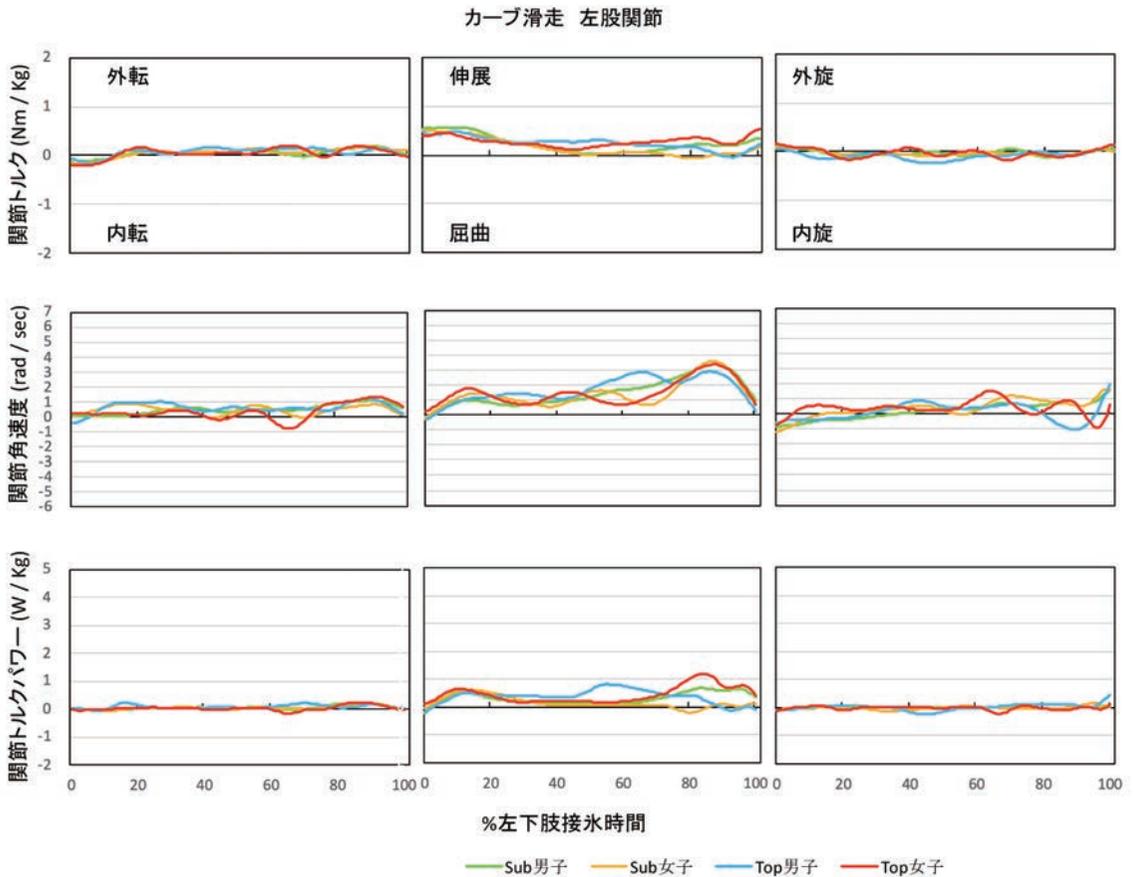


図11 カーブ滑走左下肢接水時間における左股関節トルク,角速度,トルクパワー

回内外軸では、いずれものパターンも関節トルクおよび関節トルクパワーが小さかった。

3. 考 察

ゴールタイムとストレートおよびカーブ滑走速度は、男女ともにいずれもTopの方がSubよりも優れていた。このことからTopとSubの比較を行うことで、高い滑走速度獲得およびより良いゴールタイムのために必要な要因を探ることができると考えられる。

ストレート滑走における右股関節伸展および右膝関節伸展トルクパワーのピーク値について、男女ともにSubよりもTopの方が大きい値であった(図5, 6)。スラップしないブレードを着用して400mを滑走した際のストレート滑走について、

全力高速滑走時は低速滑走時に比べて、股関節伸展トルクパワーの発揮が大きかったことが報告されている(結城⁹⁾)。本研究ではスラップスケートを用いて3,000m模擬レースを行い、競技水準間で比較を行った結果、ストレート滑走では股関節伸展および膝関節伸展トルクパワーの発揮が重要であることが考えられる。

カーブ滑走における右股関節外転および右膝関節伸展トルクパワーのピーク値について、男女ともにSubよりもTopの方が大きい値であった(図8, 9)。また、右股関節伸展トルクパワーの80%時における値は、男女ともにSubよりもTopの方が大きい値であった(図8)。カーブ滑走右下肢の関節トルクおよび関節トルクパワーに関する先行研究は見当たらない。カーブ滑走右下肢では、ス

カーブ滑走 左膝関節

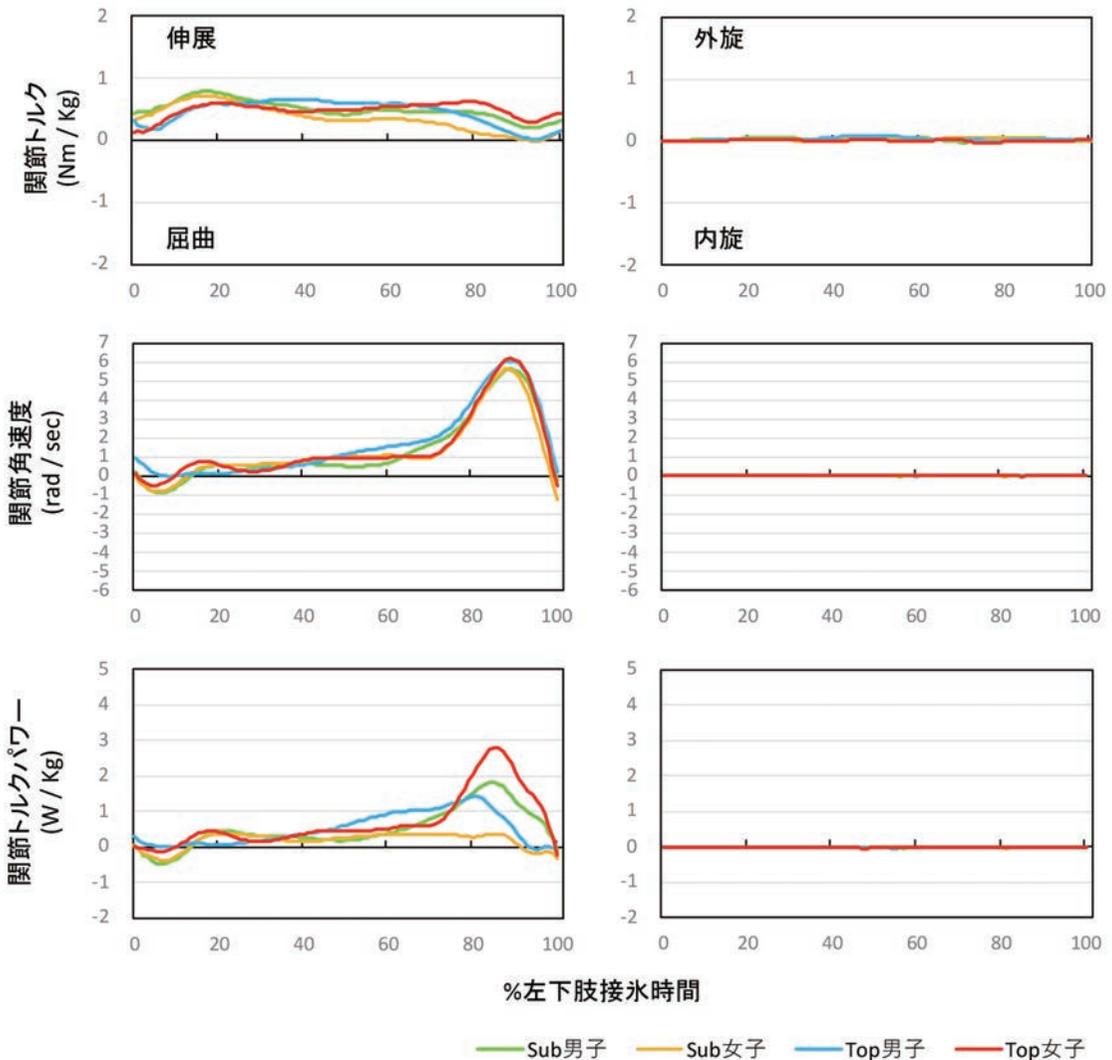


図12 カーブ滑走左下肢接氷時間における左膝関節トルク,角速度,トルクパワー

トレート滑走右下肢と同様に身体の右側後方へ氷面を押し出すため、ストレート滑走と同様に股関節伸展および膝関節伸展トルクパワーの発揮が重要となることが考えられる。さらに加えて、カーブ滑走右下肢ではストレート滑走よりも股関節外転トルクパワーの発揮が重要であることが考えられる。一方、カーブ滑走における右足関節底屈トルクパワーについては、男女で異なる傾向がみられ、女子ではSubよりもTopの方が大きいピーク

値であったのに対し、男子ではTopよりもSubの方が大きいピーク値を示していた(図10)。女子選手においては、右足関節底屈トルク発揮も、滑走速度獲得のために重要である可能性が考えられ、今後より詳細な分析が必要である。

カーブ滑走における左股関節外転、および右股関節伸展トルクパワーについては、ストレート滑走およびカーブ滑走の右股関節に比べて小さい値であった(図11)。カーブ滑走における左膝関節

カーブ滑走 左足関節

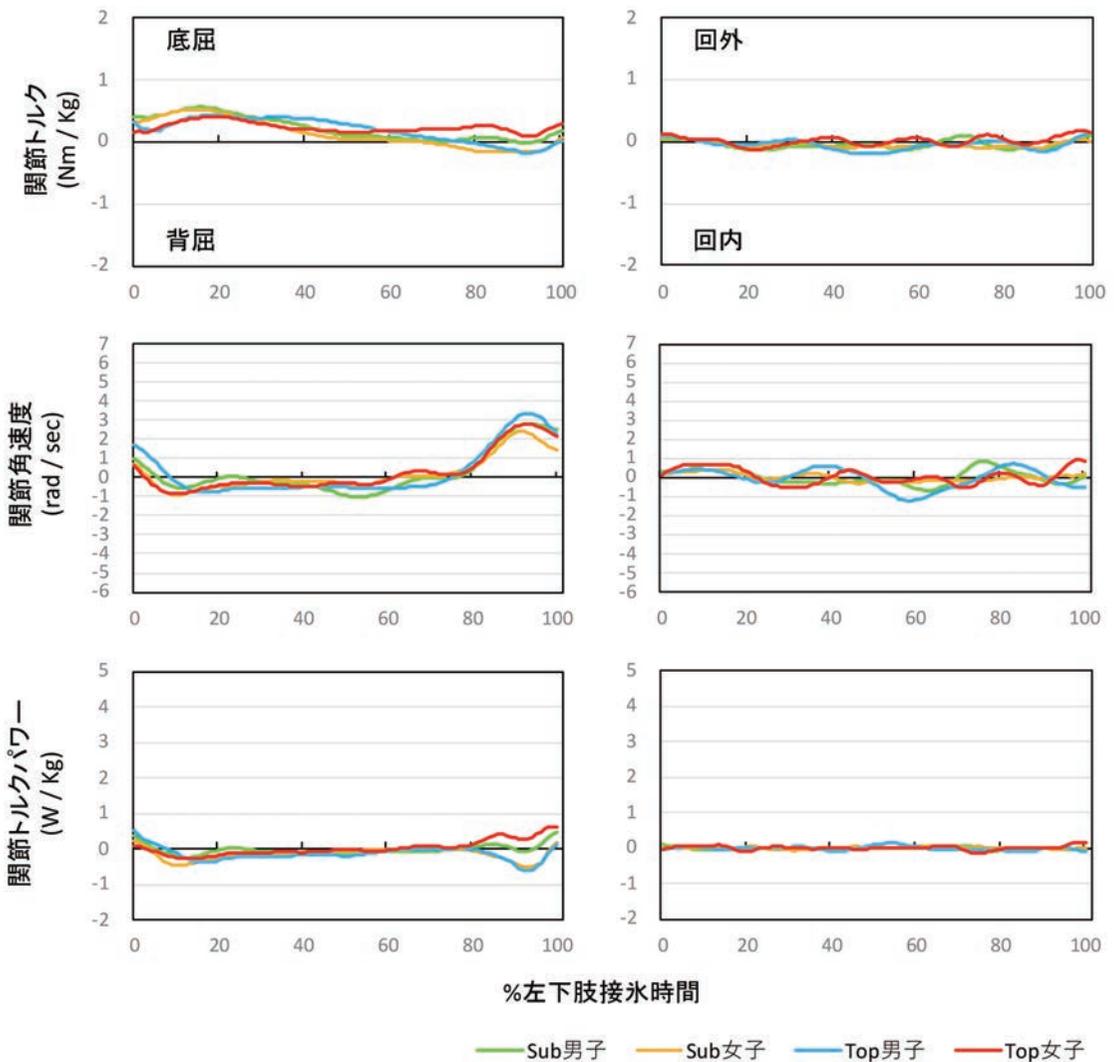


図13 カーブ滑走左下肢接氷時間における左足関節トルク,角速度,トルクパワー

伸展トルクパワーについては、男女で異なる傾向がみられ、女子ではSubよりもTopの方が大きいピーク値であったのに対し、男子ではTopよりもSubの方が大きいピーク値を示していた(図12)。男子選手による4,000m模擬レースを行った際のカーブ滑走左下肢について、レース後半ではレース前半よりも膝関節伸展トルクパワーが小さく、滑走速度を維持するためには膝関節伸展トルクの減少を抑えることが重要であると報告されている(湯田ほか⁴⁾)。本研究の結果、特に女子選手において、カーブ滑走で左膝関節伸展トルクパワーの発揮が重要であると考えられる。今後、レース経過に伴う変化も観察し、競技水準間および男女間での比較を行い、検討を深める必要がある。

結論

本研究の目的は、ワイヤレス式インソール型足圧センサを使用してブレード反力を推定し、実際

のレースにより近いパフォーマンス発揮時での、滑走中における下肢の関節トルクおよび関節トルクパワーの特徴を明らかにすることで、高い滑走速度獲得およびより良いゴールタイムのために必要な力学的要因を解明することを目的とすることであった。

本研究の結果、ゴールタイムが優れ、滑走速度の高い成績上位選手は、ストレート滑走およびカーブ滑走右下肢の、股関節伸展および膝関節伸展トルクパワー発揮が大きかった。またカーブ滑走右下肢の股関節外転トルクパワーの発揮が大きかった。より良いパフォーマンスのためにはこれらのパワー発揮が重要であることが示唆された。さらに、カーブ滑走右下肢の足関節底屈およびカーブ滑走左下肢の膝関節伸展トルクパワーについては男女で異なる傾向となり、特に女子選手ではこれらのパワー発揮も重要であることが示唆された。

謝 辞

本研究に対してご助成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、本研究を実施するにあたり、実験にご協力いただいた公益財団法人日本スケート連盟ならびに選手、コーチの皆様に御礼申し上げます。

文 献

- 1) de Koning, J. J., de Boer, R. W., de Groot, G., van Ingen Schenau, G. J., Push-off force in speed skating., *International Journal of Sport Biomechanics*, **3**: 103-109(1987)
- 2) 結城匡啓・阿江通良・藤井範久, スピードスケート滑走中のブレード反力. *バイオメカニズム*, **13**: 41-51(1996)
- 3) Yuda J., Yuki M., Aoyanagi T., Fujii N., Ae M., Changes in blade reaction forces during the curve phase due to fatigue in long distance speed skating., *International Journal of Sport and Health Science*, **2**: 195-204(2004)
- 4) 湯田淳・結城匡啓・青柳徹・藤井範久・阿江通良, スピードスケート長距離種目におけるカーブ滑走中の下肢キネティクスの変化. *バイオメカニクス研究*, **9** (2) : 53-68(2005)
- 5) van der Kruk, E., den Braver, O., Schwab, A. L., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J., Wireless instrumented klapskates for long-track speed skating., *Sports Engineering*, **19**: 273-281(2016)
- 6) 皆川唯, インラインローラースケート滑走動作における支持脚関節の役割. 平成25年度筑波大学大学院修士論文(2014)
- 7) Winter, D. A., Kinematics. In Winter, D.A. (Eds.), *Biomechanics and motor control of human movement*, 3rd edition., *John Wiley and Sons: New York*, pp.13-58(2005)
- 8) 横澤俊治・辻村諒太・窪康之・高橋英幸・岡田英孝, 国内一流競技者の競技別身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Elite Sports Support*, **8**: 11-27(2015)
- 9) 結城匡啓, スピードスケート滑走動作のバイオメカニクスの研究—加速動作の力学的メカニズム—, 平成8年度筑波大学大学院博士論文(1996)

Deep Learning を用いた画像解析による 足部セルフチェックシステムの開発

新潟医療福祉大学 小 宮 諒
(共同研究者) 第一工科大学 竹 下 康 文
同 松 田 翔 太
令和健康科学大学 中 井 雄 貴
新潟医療福祉大学 江 玉 睦 明

Development of a Foot Morphology Self-Check System by Image Analysis Using Deep Learning

by

Makoto Komiya, Mutsuaki Edama
Niigata University of Health and Welfare
Yasufumi Takeshita, Shota Matsuda
Daiichi Institute of Technology
Yuki Nakai
Reiwa Health Sciences University

ABSTRACT

Foot posture assessment is recognized as a screening tool in the prevention of sports-related injuries. However, the practical application of clinical foot posture evaluation indices in field settings remains limited due to the need for specialized knowledge and training among medical professionals. This study aimed to develop and validate a deep learning-based model that classifies foot posture using images of the hindfoot. The classification was based on indicators derived from the Foot Posture Index, focusing on the relative alignment of Abduction/Adduction of the forefoot on the rearfoot, as well

as Frontal plane alignment and position of the calcaneus. The model was designed to categorize foot posture into five types: adduction, abduction, varus, valgus, and neutral. A total of 750 posterior foot images were collected and divided into training (70%), validation (20%), and test (10%) datasets. During training, the model demonstrated progressive improvement, with increasing precision and decreasing loss values across epochs, indicating effective learning. The model achieved a mean Average Precision (mAP (B)) of 0.72 at IoU thresholds ranging from 0.50 to 0.95 (mAP50-95 (B)), and 0.80 at an IoU threshold of 0.50 (mAP50 (B)), reflecting high overall accuracy.

Evaluation using the test dataset revealed that while the classification accuracy for the neutral foot posture was relatively low (accuracy: 0.26), the model performed well in identifying the other four postures, with accuracy ranging from 0.69 to 1.00. These results suggest that the model has practical potential for use in sports and clinical settings, particularly for non-specialists who require accessible and automated tools for foot posture assessment. Future work will focus on improving the classification of neutral posture and expanding the dataset to enhance generalizability.

キーワード

足部形態, 深層学習, 判別モデル, 前足部内・外転, 踵骨アライメント

Keyword

Foot posture, Deep learning, Discriminant model, Forefoot adduction/abduction, Calcaneal Alignment

要 旨

足部形態評価はスポーツ障害予防に有用であるが、医療従事者向けの足部形態評価の指標を現場で運用するには課題がある。

本研究ではDeep Learningを用い、足部形態評価の指標であるFoot posture indexの後方写真から判別できる指標を参考に内転・外転・内反・外反・通常の5つの足部形態を識別するモデルを開発した。750枚の画像を学習(70%)・検証(20%)・テスト(10%)に分割して開発と検証を進めた。適合率はエポック数の増加に伴い上昇し、損失関数は同様に減少する傾向を示し、適切にモデルが学習したことが確認され、mAP50-95=0.72,

mAP50=0.82と高精度を示した。

通常の足部画像の分類は正答率:0.26と低くなり精度の向上の必要性が課題にあがったが、4つの足部形態(内転, 外転, 内反, 外反)は、正答率が0.69~1.00と実用可能な精度であることが確認された。

緒 言

スポーツ関連傷害の約20%は足部・足関節に関連する傷害であり¹⁾、傷害予防のために様々な視点から対策が考えられている。対策のひとつとして、足部形態の評価があり、静止立位時の足部形態の評価は臨床的にも簡便に実施できることから利用されている。特に、過度な回内として知ら

れる扁平足は、後脛骨筋炎や脛骨過労性滑膜炎といったランニング障害との関連も報告されており²⁾、これらの足部形態の変化を早期に確認できる意義は高い。このような足部形態を評価できる指標のなかにFoot Posture Index (FPI)がある³⁾。この指標は、5つの視診と1つの触診から、-12～12までのスコアに分類することで足部形態を簡便に評価することが可能であり、特別な道具が必要でないことから、臨床現場やスポーツ現場でも導入しやすい。しかし、この指標は普段から足部・足関節の評価を実施する医療従事者にとっては簡便に評価可能であるが、実際にスポーツ現場で活動をする選手や監督にとっては、現場での活用の敷居が高いという課題も存在している。この課題解決に繋がる取り組みとして、5つの視診で可能な評価を写真で代替する方法があげられる⁴⁾。これにより、評価時間の短縮や現場にいない医療従事者が評価者として関わるができる可能性が示された。しかし、撮影された画像による評価を用いても評価者間での評価精度が十分でないという課題が残っている⁴⁾。

近年、Deep Learning技術を用いることで、適切な処理パラメータを決めることができるようになってきている。特に画像処理においては、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network ; CNN) を活用することが多く、2012年の画像認識のコンテストILSVRCで優秀な結果を残している⁵⁾。この手法では、画像から得られる色、形状、テクスチャといった情報を用いて機械学習アルゴリズムを介して識別モデルを構築するため、評価者に依存せずに物体の認識と識別を高い精度で実施できると考えられている⁶⁾。実際、医療業界における医用画像分野では、医師の診断補助ツールとして導入される場面も増えており、肺結核の分類や腫瘍のサブタイプ分類など、医療資源の節約や医療の発展に貢献している⁷⁻⁹⁾。筆者らは、このような背景から、CNNの手法を足

部形態の評価に応用することで、これまでFPIを用いた足部形態評価で課題とされている検者間の評価精度や現場での活用の難しさを解決できる可能性があると考えた。しかし、現在までにこのような識別モデルは存在せず、検証に向けてモデルの開発と精度検証が必要となる。

本研究の目的は、1. FPI-6の後方写真から判断可能な「後足部に対する前足部の内外転」と「踵骨の前額面上の位置」を参考に前足部の内転・外転、踵骨の内反・外反、通常の5つの識別が可能なモデルを開発すること、2. 足部写真を用いた精度検証を行い、実用可能性を確認することとした。

1. 実験方法

1. 1 YOLOv11を用いた足部形態判別モデルのアルゴリズムの概要

本研究では、Ultralytics HUBチームによって開発されている物体検出アルゴリズム、You Only Look Once version 11 (YOLOv11)¹⁰⁾を用いて判別モデルを開発した。YOLOは、画像内の複数物体を同時に検出し、その位置とクラスを一括で出力できるアルゴリズムである。特にYOLOv11は、従来の検出方式と比較して、より軽量かつ高精度な物体検出を実現する最新のモデルである。画像識別の手法として広く用いられているCNNは、通常、画像全体をひとつのクラスに分類する。CNNの中でも代表的なモデル (Alex Net) を図1に示す⁵⁾。一方、YOLOは画像を格子状に分割し、区画ごとに物体の有無を判定し、存在する場合はその位置 (バウンディングボックス) とクラスを同時に推定する。YOLOの物体検知の仕組みを図2に示す¹¹⁾。このようにして、画像中に複数の物体が存在する場合でも、それらの位置とラベルを一度に出力することが可能である。YOLOは、画像全体に対して一度のCNN推論でこれらの処理を完結できるため、従来手法に比べて高速

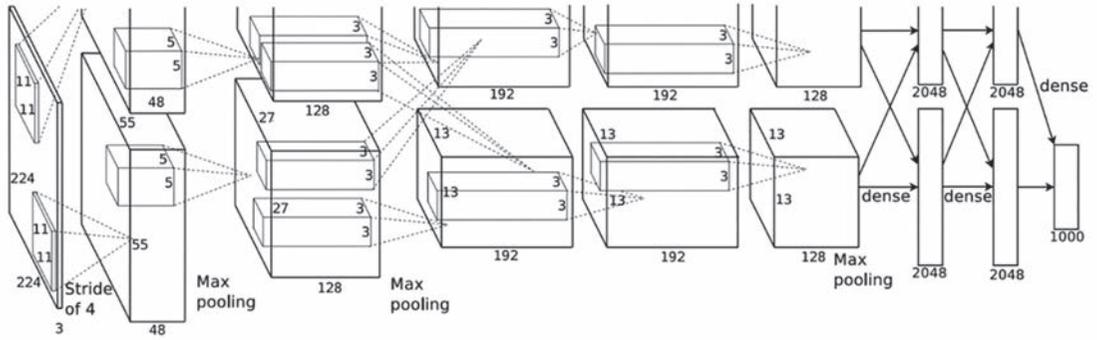


図1 CNNで代表的なAlexNetの構造⁵⁾

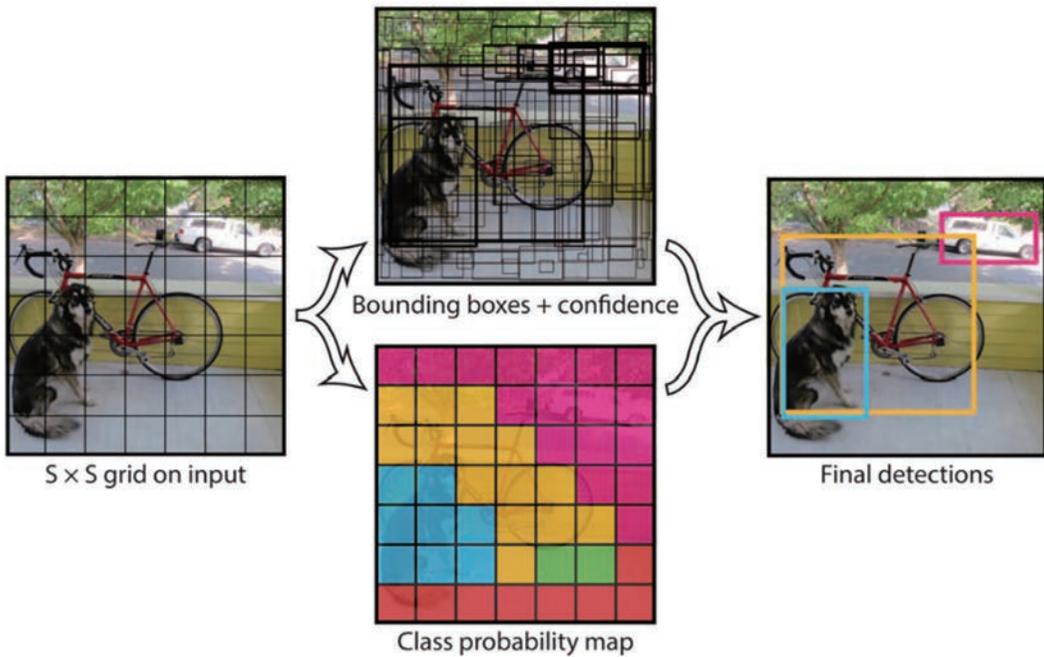


図2 YOLOによる物体検出の仕組み¹¹⁾

かつ低コストで認識処理が可能である。このようなYOLOの特徴は、本研究で検証を実施するFPIという評価指標において、足部の形態を画像中の足首から下の領域のみで簡便に評価できる点で非常に有効であると考えた。物体検出アルゴリズムであるYOLOを用いることで、画像中から足部のみを自動で検出し、その領域に対して状態の識別（内転、外転、内反、外反、通常）を行うことが可能になる。また、画像処理においては、評価

対象となる領域が正確に選ばれていない場合、背景や衣類などのノイズの影響により、誤った判断がなされる危険性がある。特に、実験環境では問題がなくても、実際の運用環境においては、この影響が無視できない場合がある。したがって、評価対象の領域が適切に選択されているかをモデルが確認可能であることは、実運用を見据えた精度保証の観点から重要である。YOLOは、検出と分類を同時に行うことができるため、対象領域が適

切に選ばれたかどうかと、足の状態分類の結果を一度に得ることができる。このような構成により、正確性と効率性を両立した実験および運用が可能となる。

1. 2 データセットの作成

1. 2. 1 データサンプルの収集

対象は健康成人男性75名150足（平均±標準偏差：身長 170.8 ± 6.1 cm，体重 65.7 ± 12.7 kg，足長 25.0 ± 1.1 cm，足幅 9.8 ± 0.5 cm）とした。本研究は、ヘルシンキ宣言に基づき、所属機関の倫理委員会の承認を得て実施された（承認番号：19544-250424）。

対象ごとに「踵の位置は変えずに親指が見えるような足部位置（内転と定義）」、「踵の位置は変えず小指が見えるような足部位置（外転と定義）」、「踵をできるだけ内側に倒す姿勢（外反と定義）」、「踵をできるだけ外側に倒す姿勢（内反と定義）」、「通常の立位」の5条件で撮影を実施した。本研究に必要なデータサンプルの撮影は図3に示す撮影環境で実施した。撮影には、4台のアクションカメラ（GoPro12, GoPro Inc.）を用い、足部形態の撮影はすべてのカメラを同期して実施した。



図3 データサンプルの撮影環境

また、対象ごとに必要な足部・足関節の画像が取得できるようにカメラの設置距離と角度を設定した。具体的には、前方から撮影するカメラは高さ30 cmの三脚に固定したカメラを30°前方に傾けて設置し、内側から撮影するカメラは、足長の約50%の位置にカメラレンズの中心をあわせ、足部内側から踵骨-母趾がすべて写る位置に設置した。後方のカメラは踵骨の中心とカメラレンズの中心が一致する位置に設置し、後内側のカメラは踵骨に対して約30°の角度をつけて距舟関節が写る位置で撮影した。これらの撮影で得られた合計2100のデータサンプルのうち、本研究では後方からの撮影で得られた750のデータサンプルを使用して、「後足部に対する前足部の内転と外転」と「踵骨の前額面上の位置（内反と外反）」を通常とあわせて5つに識別するモデル構築に取り組んだ。なお、全750データの内訳は、5条件各150足であった。

1. 2. 2 データセットの準備、モデルの学習環境

本研究における足部形態識別モデルの学習は、Google Colabを用いて実施した。まず、収集した足部画像に対して、Roboflowを用いてアノテーションおよびデータセットの作成を行った。Roboflowでは、対象領域（足部）に対してバウンディングボックスを手動で設定し、各画像に「内転」、「外転」、「内反」、「外反」、「通常」のラベルを割り当てた。作成したデータセットは、YOLOv11形式でエクスポートした。また、学習・検証・テストの分割比（本研究では、学習画像70%、検証画像20%、テスト画像10%）や、画像の前処理（リサイズ）についても、Roboflow環境内で一貫して実施した。

次に、作成したデータセットをUltralytics社が提供するUltralytics HUBにアップロードし、クラス構成の視覚的確認、ラベル数の偏りの確認、学習用構成ファイル（.yaml）の自動生成を行っ

た。Ultralytics HUBはGUIベースの操作が可能であり、データセットの構造や設定内容を直感的に把握・管理できる点で有用である。また、エポック数、バッチサイズ、学習率などの学習条件を試行的に調整しやすい設計となっており、モデル構築前の準備段階を円滑に進めることができた。

モデルの学習は、Google Colab上のPyTorch環境にて実行した。Ultralyticsが提供するYOLOv11の公式実装を用い、エポック数100、バッチサイズ16、学習率0.01という条件下でトレーニングを行った。最適化手法にはAuto（自動選択）を採用し、モデルの性能向上を図った。学習の過程では、検証画像を用いた際の適合率（Precision）および損失関数（Loss）、再現率（Recall）、Intersection over Union Intersection over Union（IoU）閾値を条件設定した際の適合率といった主要な評価指標をエポックごとに出力し、学習の進捗を定量的に評価した。特に重要な指標の説明として、適合率はモデルが検出した対象のうち、正しく検出できた割合を示す指標であり、誤検出の少なさを反映する。一方、損失関数は、予測と正解ラベルとの誤差を示す指標であり、学習が進むにつれて減少することが望ましい。これらの指標がそれぞれ望ましい傾向を示している場合、モデルが適切に学習

されていると判断できる¹²⁾。

最終的に、学習中に一度も使用していないテスト用データを用いて、モデルの汎化性能を検証した。これにより、訓練されたモデルが未知の画像に対しても正確に足部形態を識別できるかを評価した。以上のように、本研究では、Roboflowによるデータセット構築、Ultralytics HUBによる設定支援、Google Colabによる学習実行と評価という役割分担のもと、クラウドツールを効果的に連携させることで、実用的かつ再現性の高いDeep Learning環境を構築した。ツール連携の流れを図4に示す。

結果

図5に、Google Colab上で100エポックの学習を行った際の適合率および損失関数の推移を示す。適合率はエポック数の増加に伴い上昇し、損失関数は同様に減少する傾向を示した。これにより、モデルが学習を通じて徐々に性能を向上させていることが確認された。Ultralyticsの評価指標に基づく詳細なメトリクスは以下の通りである：

metrics/precision (B) = 0.78, metrics/recall (B) = 1.00, metrics/mAP50-95 (B) = 0.72, metrics/mAP50 (B) = 0.82.



図4 モデル作成から学習までの流れ

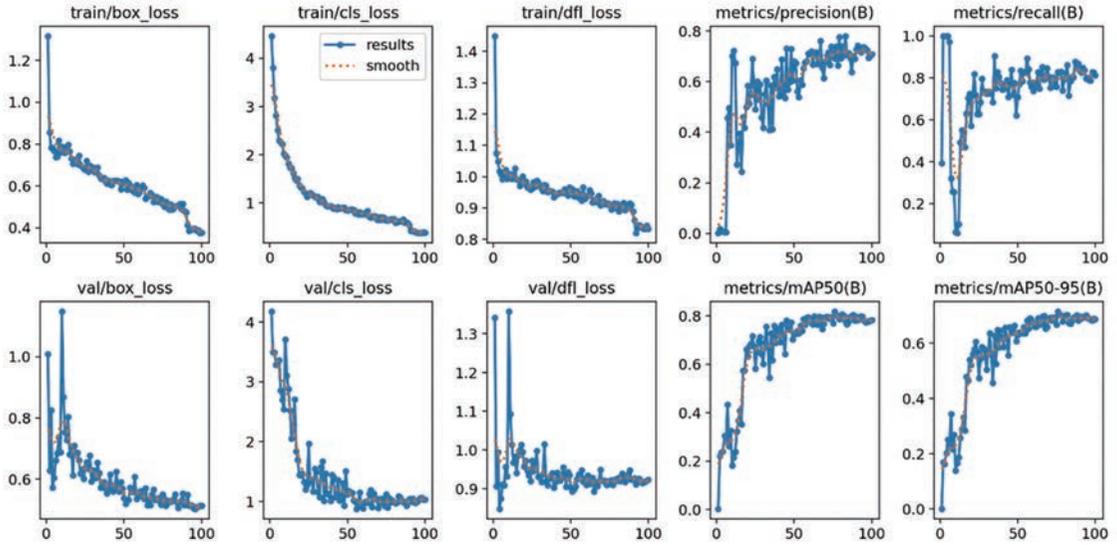


図5 Google Colabによる適合率 (Precision), 損失関数 (Loss) 率の変位

表1 テスト用データを用いた検証結果

	正解数	誤認識数	正解率
内転	15	0	1.00
外転	11	4	0.73
内反	11	3	0.85
外反	11	5	0.69
通常	4	11	0.26
平均	0.69	0.31	—

モデルの学習後、テスト用データを用いてモデルの汎化性能を評価した結果を表1に示す。全体の適合率は0.69、損失関数は0.31であった。誤認識の内訳としては、外転に属する4枚の画像が内転と誤認識された。通常に分類されるべき画像のうち、9枚が内反、2枚が外反と誤認識された。内反に分類されるべき画像のうち3枚が外反と誤認識され、外反に分類されるべき画像では、4枚が通常、1枚が内反と誤認識された。

考察

本研究では、YOLOv11を用いた足部形態識別モデルの構築と評価を行い、学習過程およびテストデータによる性能検証を通じて、モデルの有効性を確認した。本研究で得られた学習過程において、適合率がエポック数の増加に伴い上昇し、損

失関数は減少する傾向を示した。この結果は、モデルが学習を通じて徐々に識別性能を向上させていることを示しており¹²⁾、学習が安定して進行したことを裏付けるものである。

テスト用データによる評価結果から、全体の適合率が0.69、損失関数が0.31と算出された。さらに、Ultralyticsの評価指標に基づく metrics/precision (B) = 0.78, metrics/recall (B) = 1.00, metrics/mAP50-95 (B) = 0.72, metrics/mAP50 (B) = 0.82 という結果は、モデルが高い再現率を維持しつつ、精度および平均適合率においても良好な性能を示していることを意味する。特に、mAP50-95は、IoU閾値を0.50から0.95まで段階的に評価する厳密な指標であり、COCOやPASCAL VOCなどのベンチマークでも標準的に用いられている^{13,14)}。mAP50-95 = 0.72は、最新の物体検出モデルの報告と比較しても同程度の数値を示しており¹⁵⁾、本研究のモデルが実用的な識別能力を有したものであると評価できる。

さらに、mAP50 (B) = 0.82 という結果は、バウンディングボックスの位置精度が高く、足部形態の空間的特徴を正確に捉えていることを示

している。Liらは、分類と位置推定の性能を分離して評価することの重要性を指摘しており¹⁶⁾、mAP50のような位置推定における信頼性の高い指標をとり入れることの重要性が強調されている。また、mAP50は視覚的に類似した対象の識別精度において検証すべき指標であることが示されている¹⁷⁾。これらの知見を踏まえると、mAP50 (B) で得られた値は、足部のように微細な形態差を識別するタスクにおいて、モデルの有効性を裏付ける精度の高さを示していると考えられる。

一方、誤認識の分析からは、特定のクラス間で混同が生じている傾向が確認された。外転では4枚の画像が内転と誤認識され、通常では9枚が内反、2枚が外反と誤認識された。内反では3枚が外反と誤認識され、外反では4枚が通常、1枚が内反と誤認識された。外転で内転と誤認識された画像では、小趾は出ているものの出ている面積が小さいことが視覚的に確認された。つまり、内外転の認識において、人が判断する際には母趾が見えているか、小趾が見えているかという基準で判断しているが、今回のモデルでは単に足の横幅の面積を判断基準にしている可能性があり、今後モデルを改良していくうえで検討課題になると考える。また、外反と内反を判断する際には、視覚的ではあるがアキレス腱の角度がバウンディングボックスからみて垂直に近い場合には通常、内側では内反、外側では外反と識別している傾向がみてとれたため、この点に焦点をあててアノテーションの仕方や撮影環境の調整を行うことで、精度向上につながる可能性があると考ええる。特に、通常の正解率が0.26と著しく低く、内反・外反の誤認が多く存在したためモデルの改善が必要となる。今回の研究では、通常の学習画像として通常の立位姿勢を設定したことが影響したと考えられる。通常の立位姿勢は、FPI-6のような足部形態評価での姿勢として用いられるなど、対象者の足

部の特徴を確認することができる点で有益であるが足部形態の通常とは定義が異なる。本研究では、そのような背景を踏まえたうえで、内反と外反という極端な設定を用いることで、通常を含めて内反と外反、通常を判別することができると考えてモデル開発に着手した。しかし、もともと外反の対象や内反の対象者が極端な条件で足部形態を変化させた場合では、判別閾値に影響するほどの足部形態の変化は生じず、これにより誤認識する確率が高まったのではないかと推察している。したがって、今後のモデル修正においては、踵骨が正常な条件での撮影を実施することやFPI-6の同じ分類項目内で0と判断される足部画像のみを学習に用いるなど、通常クラスの定義を再検討して修正と検証を進める必要があると考えている。

本研究にはいくつかの限界がある。はじめに、FPI-6では1つの項目ごとに-2～+2まで5つに分類してスコアをつける必要があるが、本研究では画像に対して、内転、外転、内反、外反、通常を認識して判別するモデルの開発にとどまっている。しかし、判別モデルを構築できたという点では新しい価値を提供しており、今後それぞれの特徴を学習させることで5つの分類モデルの作成とこれらの判別の組み合わせからスコア化を行いセルフチェックシステムの一般化に繋げることは可能と考える。また、対象が男性に限られているという点があげられる。女性の足部を対象としたサンプル画像の収集や、足のサイズが異なる対象など幅広い層をサンプルに組み込むことで、足部形態の評価精度を高めることにつながると思う。

まとめ

YOLOv11を用いて開発した足部形態識別モデルは、4つの足部状態（内転、外転、内反、外反）を実用可能な精度で識別可能であることが、検証画像とテスト画像の結果より確認できた。

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) Lievers W.B., Goggins K.A., Adamic P., Epidemiology of foot injuries using national collegiate athletic association data from the 2009–2010 through 2014–2015 seasons., *J. Athl. Train.*, **55** (2) : 181-187 (2020)
- 2) Pérez-Morcillo A., Gómez-Bernal A., Gil-Guillen V. F., et al., Association between the Foot Posture Index and running related injuries: A case-control study., *Clinical Biomechanics*, **61**: 217-221 (2019)
- 3) Redmond A.C., Crosbie J., Ouvrier R.A., Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: the Foot Posture Index., *Clinical Biomechanics*, **21** (1) : 89-98 (2006)
- 4) Terada M., Wittwer A.M., Gribble P.A., Intra- rater and inter- rater reliability of the five image- based criteria of the foot posture index- 6., *Int. J. Sports Phys. Ther.*, **9** (2) , 187-194 (2014)
- 5) Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E., Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *Advances in Neural Information Processing Systems*, **25**, 1097–1105 (2012)
- 6) Zhao X., Wang L., Zhang Y., et al., A review of convolutional neural networks in computer vision., *Artif. Intell. Rev.*, **57** (4) , 99 (2024)
- 7) Paez R., Kammer M.N., Balar A., et al., Longitudinal lung cancer prediction convolutional neural network model improves the classification of indeterminate pulmonary nodules., *Scientific reports*, **13** (1) , 6157 (2023)
- 8) Jia H., Zhang J., Ma K., et al., Application of convolutional neural networks in medical images: a bibliometric analysis., *Quant. Imaging Med. Surg.*, **14** (5) , 3501-3518 (2024)
- 9) Yuan M., Ding H., Guo B., et al., Image-based subtype classification for glioblastoma using deep learning: prognostic significance and biologic relevance., *JCO Clin. Cancer Info.*, **8**, e2300154 (2024)
- 10) Khanam R., Hussain M., Yolov11: An overview of the key architectural enhancements. *arXiv preprint arXiv*, 2410, 17725 (2024)
- 11) Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A., You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788 (2016)
- 12) Wang Q., Ma Y., Zhao K., Tian Y., A comprehensive survey of loss functions in machine learning., *Annals of Data Science*, **9** (2) , 187–212 (2022)
- 13) Wang W., Meng Y., Li H., Li S., Zhang C., Zhang G., Lei W., PDNet by Partial Deep Convolution: A Better Lightweight Detector., *Electronics*, **14** (3) , 591 (2025) .
- 14) Reis D., Kupec J., Hong J., Daoudi A., Real-time flying object detection with YOLOv8., *arXiv preprint, arXiv* : 2305.09972 (2023)
- 15) Wang Q., Wang Q.L., BT-YOLO11: Automatic Driving Road Target Detection in Complex Scenarios., *IEEE Access*, **13**, 3562747 (2025)
- 16) Li Y., Zhu E., Chen H., Tan J., Shen L., Dense crosstalk feature aggregation for classification and localization in object detection., *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, **33** (6) , 2683–2695 (2022)
- 17) Li S., Li Y., Li Y., Li M., Xu X., YOLO-FIRI: Improved YOLOv5 for Infrared Image Object Detection., *IEEE Access*, **9**, 141861–141875 (2021)

神経制御に基づく水中ドルフィンキックの 巧みな運動制御構造の解明

筑波大学 山川啓介

Research on The Structure of Segmental Coordination Based on Neural Control During Underwater Dolphin Kicking

by

Keisuke Kobayashi-Yamakawa
*Institute of Health and Sport Sciences,
University of Tsukuba*

ABSTRACT

Kinematic-muscle synergy analysis is a method capable of estimating the functional role of muscle synergies in real space. This study aimed to clarify the spatial role of muscle synergies involved in the underwater dolphin kick for competitive swimmers using this method. Eight female competitive swimmers participated in the study. They performed 15-m underwater dolphin kick swims with maximum effort. During the trials, kinematic and electromyography data were collected. A mixed factor decomposition algorithm was used to extract the kinematic-muscle synergies involved in one cycle of the movement from both the electromyography and segment angle data. The results revealed that four participants controlled their movements using three synergies, while the remaining four used four synergies. Four synergies were classified as a result of grouping the extracted synergies: Synergy 1, active during the first half of the downkick; Synergy 2, active during the transition from the downkick to the upkick; Synergy 3, active during the middle of the upkick; and Synergy 4, active during the latter half of the upkick and involved in core movements. Therefore, it was suggested that the underwater dolphin kick movement in competitive swimmers is primarily

achieved through these four coordinated actions related to the muscle synergies.

キーワード

競泳, 運動制御, 動作解析, 筋電図, 筋シナジー

Keyword

Competitive swimming, Motor control, Motion analysis, Electromyography, Muscle synergy

要旨

近年提案されている運動学—筋シナジー解析は、筋シナジーの実空間における機能的役割を推定できる手法である。本研究の目的は、この手法を用いて、競泳選手の水中ドルフィンキックに参与する筋シナジーの空間的な役割を明らかにすることであった。本研究には女性競泳選手8名が参加し、15 mの全力水中ドルフィンキック泳を実施した。その際、運動学的データおよび筋電図データを収集した。混合因子分解アルゴリズムを用いて、筋電図とセグメント角度データの双方から1周期の動作に参与する運動学—筋シナジーを抽出した。その結果、4名は3つのシナジー、残る4名は4つのシナジーを用いて動作を制御していたことが明らかになった。抽出シナジーのグループ化の結果、ダウンキックの前半に活性するSynergy 1、ダウンキックからアップキックの切り替えしに活性するSynergy 2、アップキックの中盤に活性するSynergy 3、アップキックの後半の体幹動作に参与するSynergy 4の4つのシナジーに分類できた。そのため、競泳選手における水中ドルフィンキックの動作は、主に筋シナジーに関連する4種類の協調動作によって達成していることが示唆された。

緒言

水泳は、歩行や走動作と同様に周期的な運動であり、ヒトにおける水中でのロコモーションの一デサントスポーツ科学 Vol. 47

形態である。支持点のない水中環境においては、バランスを維持しながら、移動時に生じる水の抵抗を最小限に抑えるために、身体は水平姿勢を取る必要がある。その中で、上肢によるストローク動作と下肢によるキック動作によって水に運動量を与え、推進力を生み出す。このように、水泳は全身を巧みに連携させる運動であり、複雑な運動制御が求められる。

近年、スポーツ動作における運動制御構造を明らかにする手法の一つとして、筋シナジー解析が用いられている¹⁾。筋シナジーとは、筋活動のまとまりを指し、筋シナジー解析は、ヒトの運動がシナジー単位で制御されているというベルンシュタインの仮説²⁾に基づいた手法である。この仮説では、多数の筋の活動を少数のシナジーに集約することで、運動制御の次元が簡略化されると考えられている。水泳に関する先行研究では、平泳ぎ³⁾、水中ドルフィンキック⁴⁾、バタフライ^{5, 6)}、自由形および背泳ぎ⁷⁾において筋シナジー解析が実施されており、いずれも2から4種類の筋シナジーが泳動作に参与していたことが報告されている。これらの知見は、水泳動作が中枢神経系から発せられる少数の運動指令によって制御されている可能性を示唆している。

一方、従来の筋シナジー解析には、方法論上のいくつかの制約がある。例えば、筋電図(EMG)データのみを用いて筋シナジーを抽出するため、得られたシナジーと関節運動との対応関係が不明瞭であり、抽出されたシナジーの実空間上の機能

的役割を正確に特定することはできていなかった。この課題に対する解決策として、近年、混合因子分解 (MMF) アルゴリズムを用いた新たな解析手法が提案されている^{8, 9)}。この手法では、EMGデータと関節角度などのキネマティクスデータの双方をアルゴリズムに入力し、データの特徴に応じた次元削減処理を通して、運動学一筋シナジーを抽出する。この運動学一筋シナジー解析では、筋シナジーに対応する運動学シナジー (キネマティクス由来のシナジー) も同時に得られるため、抽出された筋シナジーが空間的にどのような役割を担っているかを明確にすることができる。そのため、本手法を応用することで、泳動作に関与する筋シナジーの実空間上の機能的役割を特定できると考えられる。

水中ドルフィンキックは、競泳においてスタート後やターン後に用いられる潜水泳法であり、飛び込みや壁蹴りで得られた高い速度を維持する手段として広く活用されている。この泳法は、左右対称の下肢によるキック動作のみで推進するという比較的シンプルな運動構造を持つため、多くの水泳研究で取り上げられている。そこで本研究では、運動学一筋シナジー解析を用いて、競泳選手の水中ドルフィンキックに関わる筋シナジーの空間的な役割を明らかにすることを目的とした。この研究目的を達成することで、水中ドルフィンキックの動作がどのような神経制御によって達成されているかを明確にし、技術改善に向けた適切な指導やトレーニング方法の立案に役立つ情報を提示できると考えた。

1. 研究方法

1.1 対象者

本研究には、全国大会出場から入賞レベルの女性競泳選手8名 (年齢: 20.6 ± 1.8 歳, 身長: 1.63 ± 0.06 m, 体重: 55.5 ± 5.2 kg) が参加した。対象者は同一の大学水泳部に所属し、週6日、1日あたり

5000 - 12000 mの水泳トレーニングを行っていた。対象者の専門種目は、自由形2名、背泳ぎ1名、バタフライ3名、個人メドレー1名であった。全ての対象者は実験の方法、目的、リスク、安全対策について事前に説明を受け、書面にて研究への参加に同意した。なお、本研究は筑波大学の研究倫理委員会の承認を得て実施された。

1.2 実験試技

実験は屋内50mプールで実施された。対象者は30分間の任意のウォームアップを行った後、実験試技として最大努力での15m水中ドルフィンキック泳を3回行った。試技のスタートは水中プッシュオフスタートを採用し、水深0.5 - 1.0 m付近で可能な限り水平に移動すると指示した。また、疲労の影響を考慮して、試技間は最低でも5分以上の休息を挟んで実施した。

1.3 データ収集

試技中の映像データを収集するために、2台のカメラ (High speed 1394, Q'sfix社製) をプール側面の水中窓越しに設置して撮影した (図1a)。カメラのサンプリングレートは100 fps、シャッター速度は1/250 secに設定した。映像の画角は、スタート位置から8.0 - 14.0 mの範囲に調整した。

また、試技中の動作情報を収集するために、対象者の身体右側12点 (第5中手骨端、尺骨茎状突起、肘頭、肩峰、第5中足骨端、踵骨隆起、足関節外顆、大腿骨外側上顆、大転子、耳珠点、胸骨上縁、肋骨下端) に自発光LEDマーカー (煌, Nobby Tech社製) を取り付けた。

試技中のEMGデータは、防水型無線表面筋電計 (DL-5000, S&ME社製) を用いて、サンプリング周波数1000 Hzで計測した。筋電位の導出はディスプレイ電極を用いた双極導出法で行い、電極間距離は2 cmに設定した。本研究の被験筋は、右側の腹直筋 (RA)、脊柱起立筋 (ES)、大腿直筋

(RF), 大腿二頭筋 (BF), 前脛骨筋 (TA), 腓腹筋内側頭 (GAS) の6筋とした。また, Kobayashi et al.¹⁰⁾の方法に従い, 電極部分の防水処理を行った。撮影した映像とEMGデータの時間同期のために, LED同期装置 (PTS-110, Q'sfix社製) を用いて試技の開始タイミングが映像と筋電計の両方に記録されるように設定した。

1. 4 データ分析

撮影した映像データから, 画像解析ソフトウェア (Tracker, オープンソース) を用いて各身体分析点をデジタル化し, Direct Linear Transformation法を用いて二次元実座標値を得た。算出した実座標データは, 遮断周波数6 Hzのローパスフィルターを通して平滑化した。

本研究では, 水中ドルフィンキックの1周期を「足先 (第5中足骨端) が鉛直方向の最高点に達してから次の最高点に達する直前まで」と定義した。さらに, キック中の局面分けとして, 「足先が鉛直方向の最高点に達してから最低点に達する直前まで」をダウンキック (DK) 局面とし, 「足先が鉛直方向の最低点に達してから次の最高点に達する直前まで」をアップキック (UK) 局面と定義した。キック頻度 (KF) は, キック1周期に要した時間の逆数と定義した。けり幅 (KA) は, キック1周期における足先の鉛直方向の最高点から最低点までの鉛直距離と定義した。平均泳速度 (SV) は, キック1周期における身体合成重心位置の水

平移動速度の平均値と定義した。なお, 身体合成重心位置は日本人アスリートを対象とした身体部分慣性係数¹¹⁾を用いて計算した。また, 運動学-筋シナジー解析のために, 上脛のセグメント角度 (A_{UTrunk}), 下脛のセグメント角度 (A_{LTrunk}), 大腿のセグメント角度 (A_{Thigh}), 下腿のセグメント角度 (A_{Leg}), 足部のセグメント角度 (A_{Foot}) を算出した (図1b)。

収集したEMGデータは, 通過周波数帯20 - 500 Hzのバンドパスフィルターを用いてフィルタリングした。フィルタリングしたEMGデータは整流化し, 遮断周波数12 Hzの位相ずれのない4次のローパスフィルターを通して平滑化した。

1. 5 運動学-筋シナジー解析

運動学-筋シナジー解析は, 先行研究⁹⁾で提案されたMMFのアルゴリズムを用いてMATLABソフトウェア (Version 2024b, Math works社製) 上で実施した。本研究では, 6筋のEMGデータと5部位のセグメント角度データを用いて, 入力データセットを作成した。なお, EMGとセグメント角度の振幅は周期中の最大値を用いて正規化した。先行研究⁸⁾を参考に, EMG信号と関節運動の間のタイムラグは50 msに設定し, 周期の開始時点の50 ms前から1周期が終了するまでのデータセットを解析に用いた。入力データセット行列 (E) は, 変数 (m) × 時間数 (p) の行列とし, MMFアルゴリズムは式1が成立するように設計

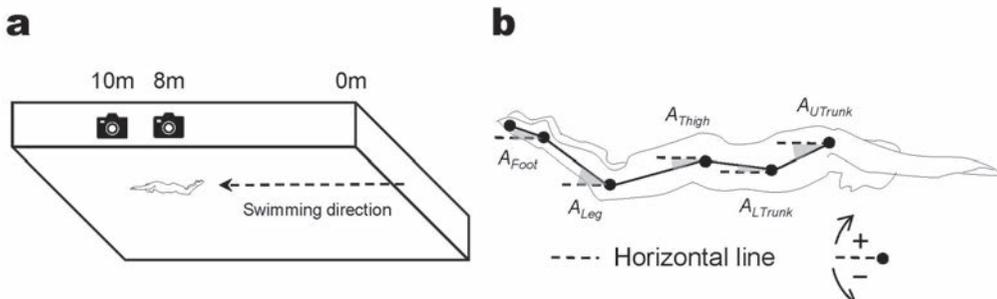


図1 実験設定図 (a) とセグメント角度の定義 (b)

された。

$$E \approx W \cdot C \quad (式1)$$

ここで、Wはm×シナジー数(s)の行列、Cはs×pの行列になる。Wはシナジーに含まれる筋とセグメント運動の組み合わせを反映する空間的要素、Cはシナジーが活性したタイミングを反映する時間的要素である。先行研究⁸⁾に従い、sはWとCを用いた入力データの再構築精度を反映する決定係数(R^2)を用いて決定した。本研究では、 R^2 が0.8を超える最小のsを分析周期のシナジー数とした。また、抽出したシナジーは、対象者間のWのコサイン類似度(CS)が0.60を超えるシナジーを同一グループのシナジーとして分類し、グループ化できなかったシナジーは対象者固有のシナジーとした。また、シナジーの活性タイミングの識別には信号の半値幅を採用した。

2. 結果

表1に、対象者における分析したキック3周期のシナジー数の結果を示した。本研究では、各対象者において分析した3周期の内、2周期以上で確認されたシナジー数を対象者のシナジー数として判断した。さらに、決定したシナジー数を有するキック周期において R^2 が最も高かった周期のデータをその後の分析に用いた。

表2に、分析対象となったキック周期のキネマティクス変数の結果を示した。図2に、シナジー数が3であったSwimmer Eとシナジー数が4で

表1 各対象者における分析周期のシナジー数の結果
網掛けはその後の分析対象として用いた周期を示す

	Number of synergies		
	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
Swimmer A	4	4	4
Swimmer B	4	4	4
Swimmer C	4	4	4
Swimmer D	3	3	4
Swimmer E	3	3	3
Swimmer F	3	3	4
Swimmer G	4	4	4
Swimmer H	3	3	4
Mean	3.5	3.5	3.9
SD	0.5	0.5	0.4

あったSwimmer Bにおける分析周期のスティックピクチャ(図2a)、EMGデータ(図2b)、セグメント角度データ(図2c)の例を示した。分析対象となったキック周期から抽出されたシナジーをグループ化した結果、4つのシナジーグループ(Synergy 1, Synergy 2, Synergy 3, Synergy 4)と3つの対象者固有シナジーに分類できた(表3)。各グループ内における対象者間のCSの平均値は、Synergy 1で0.90(±0.05)、Synergy 2で0.73(±0.20)、Synergy 3で0.70(±0.19)、Synergy 4で0.70(±0.23)であり、各シナジーグループの集団内類似度は中程度以上であった。グループ化されたシナジーと対象者固有シナジーのWとCの結果を図3と図4に示した

3. 考察

本研究の目的は、運動学-筋シナジー解析を用いて、競泳選手の水中ドルフィンキックに関与す

表2 分析周期におけるキネマティクス変数の結果

	SV (m/s)	KF (Hz)	Variables		
			KA (m)	DK phase (%)	UK phase (%)
Swimmer A	1.43	2.13	0.50	46.8	53.2
Swimmer B	1.31	1.92	0.50	48.1	51.9
Swimmer C	1.37	1.64	0.55	45.9	54.1
Swimmer D	1.40	2.22	0.46	46.7	53.3
Swimmer E	1.22	2.04	0.47	51.0	49.0
Swimmer F	1.36	2.08	0.44	52.1	47.9
Swimmer G	1.33	2.04	0.38	44.9	55.1
Swimmer H	1.45	2.00	0.51	46.0	54.0
Mean	1.36	2.01	0.48	47.7	52.3
SD	0.08	0.17	0.05	2.6	2.6

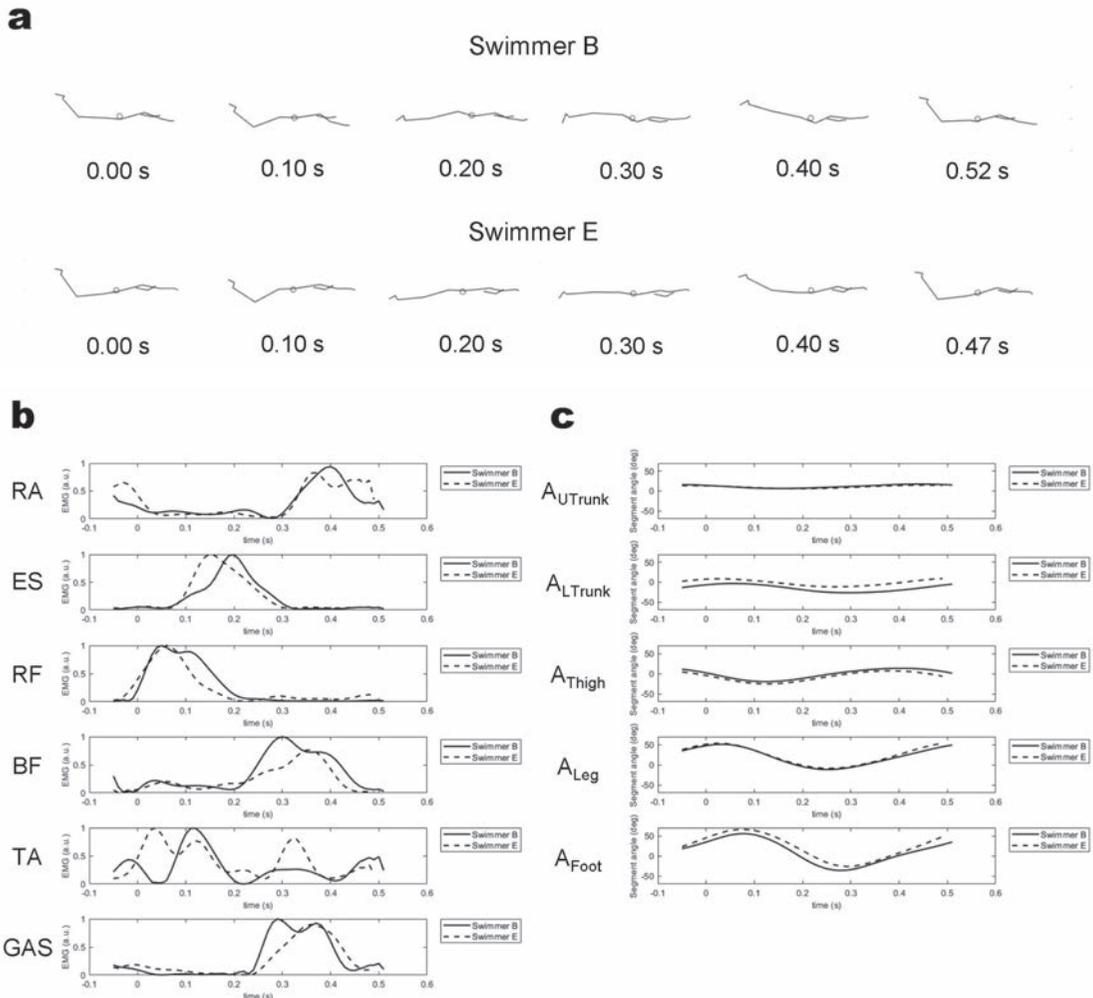


図2 対象者Bと対象者Eにおける分析周期のスティックピクチャ (a), 振幅を正規化した筋電図の包絡線 (b), セグメント角度の時系列データ (c).

表3 分析周期における抽出された運動学一筋シナジীরグループ化の結果

Swimmer A	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3, Synergy4
Swimmer B	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3, Synergy4
Swimmer C	Synergy2, Synergy 4, Subject-specific 1, Subject-specific 2
Swimmer D	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3
Swimmer E	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3
Swimmer F	Synergy1, Synergy 2, Synergy 4
Swimmer G	Synergy 2, Synergy 3, Synergy4, Subject-specific 3
Swimmer H	Synergy1, Synergy 2, Synergy 3

る筋シナジীর空間的な役割を明らかにすることであった。その結果、水中ドルフィンキックの運動制御には、3または4種類の運動学一筋シナジীর

が関与している可能性が示され、対象者間で共通する4つのシナジীরグループ化が確認された。

Matsuura et al.⁴⁾ は、エリート競泳選手を対象に水中ドルフィンキック中の8筋のEMGデータから筋シナジীর解析を行い、その結果、ダウンキックに関与するシナジীর、ダウンキックからアップキックへの切り返しに関与するシナジীর、アップキックに関与するシナジীর3つの筋シナジীর抽出されたことを報告している。本研究は、被験筋やシナジীর抽出方法において先行研究と異なる点があるものの、水中ドルフィンキックの動作

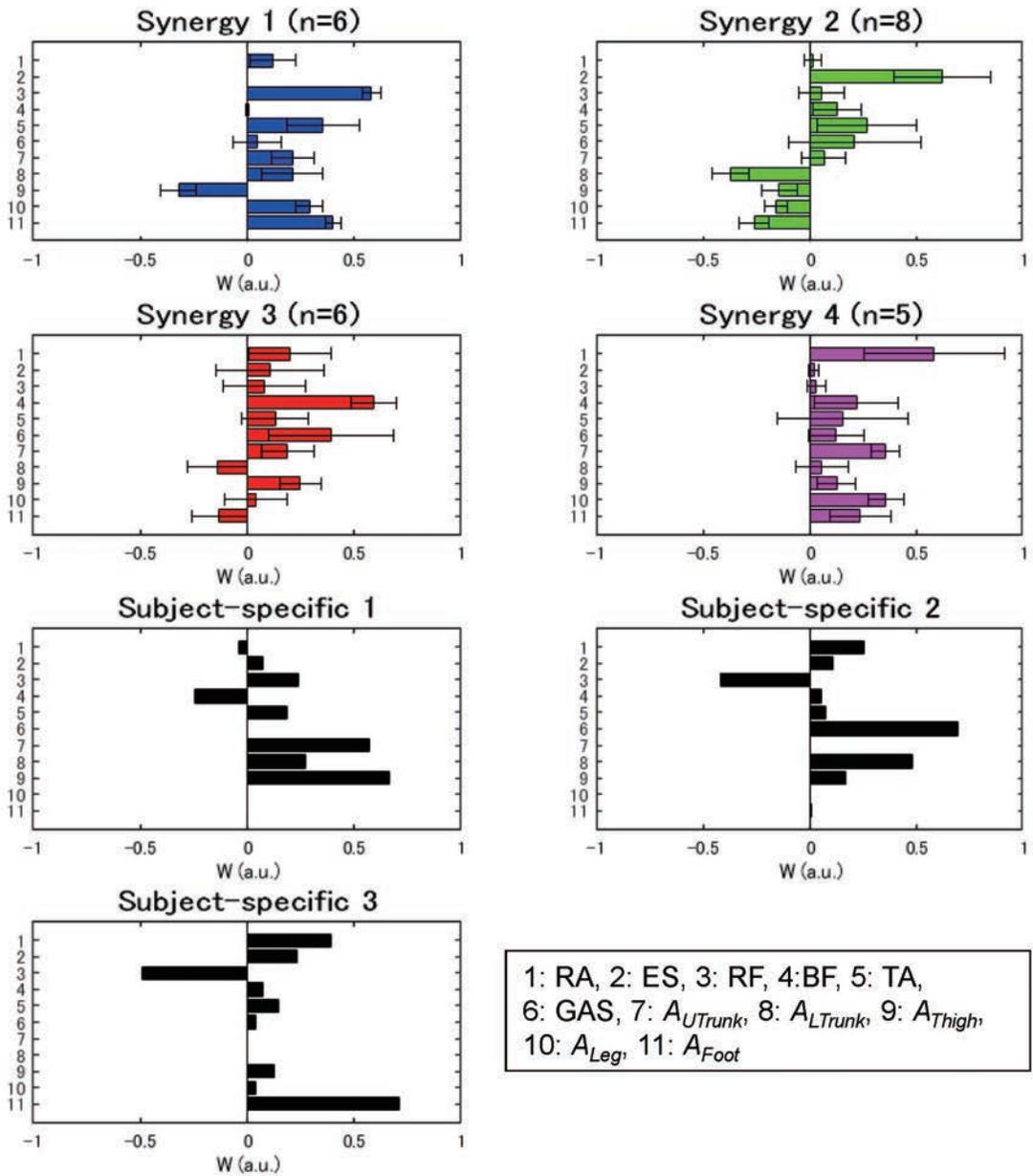


図3 分析周期から抽出された運動学-筋シナジーの空間要素 (W) の結果

が少数の筋シナジーによって制御されている可能性を支持する結果を示したと考えられた。

本研究では、抽出された運動学-筋シナジーをグループ化した結果、5名以上の対象者に共通する4つのシナジーグループが確認された(表3)。なお、4つのシナジーグループの平均的な活性化

イメージは図5に示す通りである。WとCの結果から、各シナジーグループが果たす主な空間的役割を特定することができる。Synergy 1はダウンキックの前半に活性し、主にRFとTAが寄与するシナジーであり、セグメント運動成分の結果から、体幹の屈曲、股関節および膝関節の屈曲、足

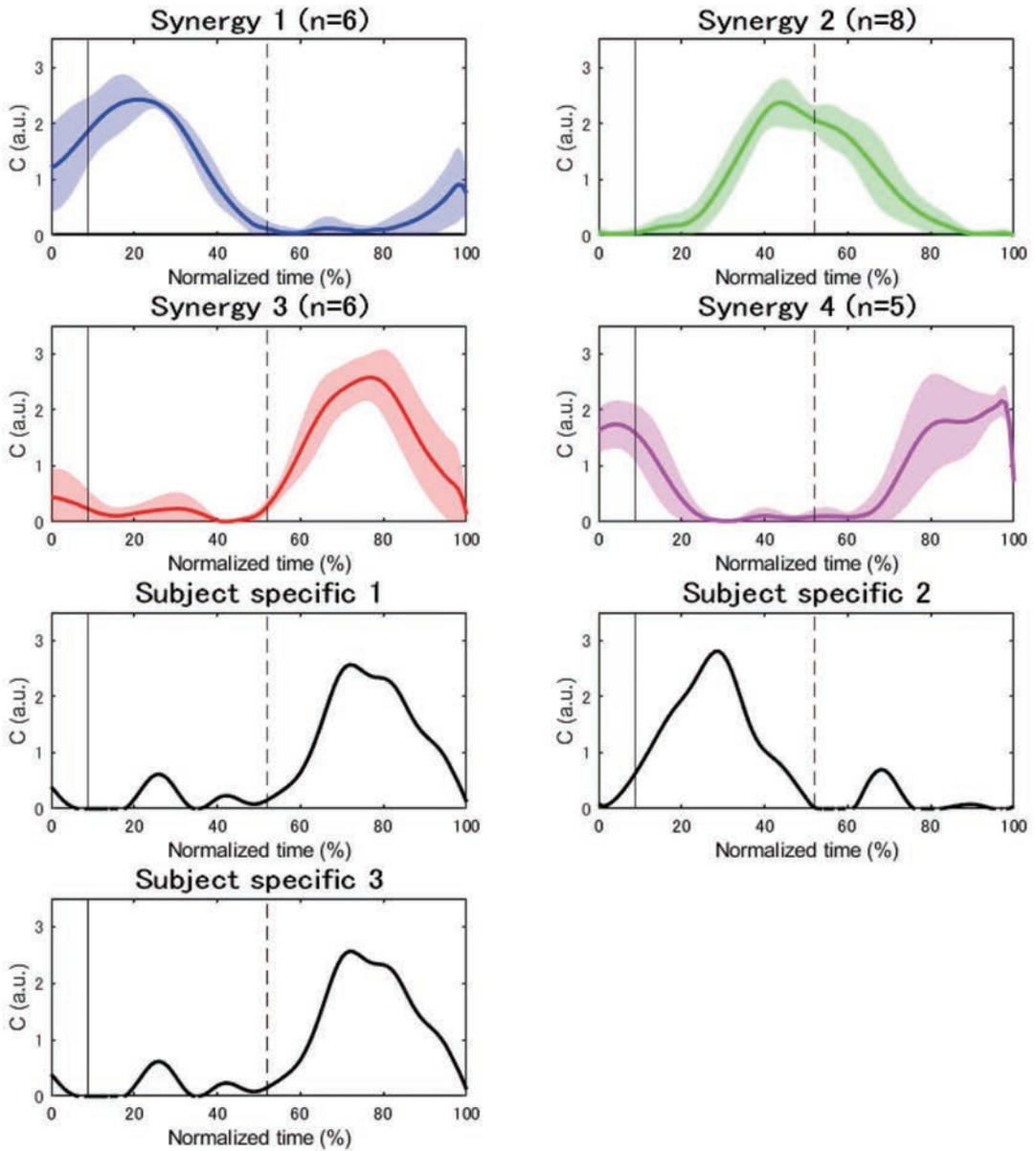


図4 分析周期から抽出された運動学-筋シナジーの時間的要素 (C) の結果
 縦の実線は平均的なダウンキックの開始タイミングを示し、縦の破線は平均的なアップキックの開始タイミングを示す

関節の底屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。Synergy 2はダウンキックの後半からアップキックの前半に活性し、主にES, TA, GASが寄与するシナジーであり、セグメント運動成分の結果から、体幹の伸展、股関節

および膝関節の伸展、足関節の背屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。Synergy 3はアップキックの中盤に活性し、主にBFとGASが寄与するシナジーである、セグメント運動成分の結果から、体幹の伸展、股関節の

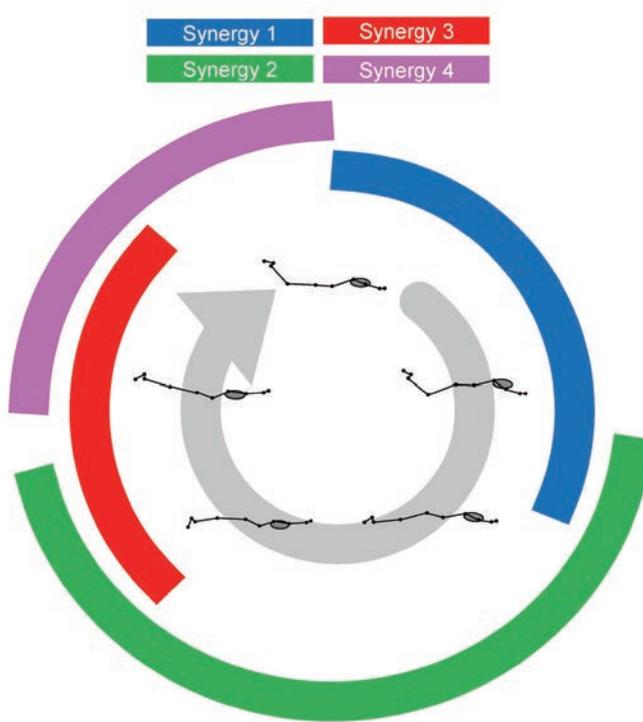


図5 4つのシナジーグループの平均的な活性タイミングとSwimmer Bの分析周期中のスティックピクチャの模式図

伸展、足関節の背屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。Synergy 4はアップキックの後半からダウンキックの序盤に活性し、主にRAとBFが寄与するシナジーであり、セグメント運動成分の結果から、体幹の伸展、膝関節の屈曲、足関節の底屈の協調動作がこのシナジーに関与していたことが示唆された。以上のように、本研究の結果から、競泳選手における水中ドルフィンキック中の筋間の協調構造とそれに対応する空間的役割について抽出された運動学-筋シナジーから明確に示すことができたと考えられた。

本研究に参加した6名の対象者は、Synergy 1 - 4のうち3または4種類のシナジーを用いて水中ドルフィンキック動作を達成していた(表3)。図2aに示すように、3つのシナジー(Synergy 1, 2, 3)を用いたSwimmer Eと、4つのシナジー

(Synergy 1 - 4)を用いたSwimmer Bの泳動作を比較すると、アップキックの中盤から終盤にかけて、Swimmer Bは体幹部の伸展・屈曲動作が大きく、これに対しSwimmer Eでは体幹部の動作が小さいことが確認された。Swimmer Bの動作にはSynergy 4が関与していたことから、体幹の屈曲を含む協調的な動作が別途生じていた可能性があると考えられた。水中ドルフィンキックにおける体幹動作は、下肢のキック動作に対する慣性ダンパーとして機能するとされており¹²⁾、下肢から発生するトルクの反動を抑制するために、体幹のトルク発揮が重要であることが指摘されている¹³⁾。このことから、体幹と下肢の協調動作は、効率的な泳動作の実現に寄与している可能性がある。しかしながら、本研究はサンプルサイズが小さく、パフォーマンスレベルの異なる対照群を設けていないことから、シナジー数や構成要素の違

いが水中ドルフィンキックのパフォーマンスに及ぼす影響については明確に論じることはできない。そのため、今後はより多くの対象者を用いた研究が求められる。

本研究の限界として、本研究では上肢の筋のEMGデータを収集しなかったため、上肢と体幹、上肢と下肢の協調動作については分析することができなかった。そのため、上肢と他の部位との協調動作については今後の研究課題であると考えられる。

4. まとめ

本研究は、国内大会レベルの女性競泳選手における水中ドルフィンキック中の動作と筋活動のデータから、運動学-筋シナジー解析を行った。その結果、対象者は3または4種類の運動学-筋シナジーを用いて水中ドルフィンキックの動作の達成していることが示唆された。また、各シナジーの空間的・時間的要素の結果から、抽出されたシナジーにおける空間上の機能的役割を特定することができた。今後はこれらの水中ドルフィンキックに内在する協調動作に関する知見が、適切な指導法やトレーニング法の検討に活用されることが期待される。

謝 辞

本研究の実験に参加した競泳選手ならびに実験協力者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下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47回自由課題学術研究）に深く御礼を申し上げる。

文 献

- 1) Scano A., Lanzani V., Brambilla C., How Recent Findings in Electromyographic Analysis and Synergistic Control Can Impact on New Directions
デサントスポーツ科学 Vol. 47
- 2) Bernstein N.A., The Coordination and Regulation of Movement. New York, NY: Pergamon Press (1967)
- 3) Vaz J.R., Olstad B.H., Cabri J., Kjendlie P.L., Pezarat-Correia P., Hug F., Muscle coordination during breaststroke swimming: comparison between elite swimmers and beginners., *Journal of sports sciences*, **34** (20), 1941-1948 (2016)
- 4) Matsuura Y., Matsunaga N., Iizuka S., Akuzawa H., Kaneoka K., Muscle synergy of the underwater undulatory swimming in elite male swimmers., *Frontiers in Sports and Active Living*, **2**, 62 (2020)
- 5) Matsuura Y., Matsunaga N., Akuzawa H., Kojima T., Oshikawa T., Iizuka S., Okuno K., Kaneoka K., Difference in muscle synergies of the butterfly technique with and without swimmer's shoulder., *Scientific reports*, **12** (1), 14546 (2022)
- 6) Yamakawa K.K., Nishiwaki R., Sengoku Y., Muscle Coordination During Maximal Butterfly Stroke Swimming: Comparison Between Competitive and Recreational Swimmers., *Journal of Applied Biomechanics*, **1**, 1-10 (2024)
- 7) Matsuura Y., Matsunaga N., Akuzawa H., Oshikawa T., Kaneoka K., Comparison of muscle coordination during front crawl and backstroke with and without swimmer's shoulder pain., *Sports Health*, **16** (1), 89-96 (2024)
- 8) Scano A., Mira R.M., d'Avella A., Mixed matrix factorization: A novel algorithm for the extraction of kinematic-muscular synergies., *Journal of Neurophysiology*, **127** (2), 529-547 (2022)
- 9) Russo M., Scano A., Brambilla C., d'Avella A., SynergyAnalyzer: A Matlab toolbox implementing mixed-matrix factorization to identify kinematic-muscular synergies., *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **251**, 108217 (2024)
- 10) Kobayashi K., Takagi H., Tsubakimoto S., Sengoku Y., Suitability of electrodes waterproofing treatment in underwater surface electromyography measurement. 筑波大学体育系紀要, **40**, 65-70 (2017)
- 11) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志, 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. バイオメカニズム, **11**, 23-33 (1992)
- 12) Nakashima M., Simulation analysis of the effect of trunk undulation on swimming performance

in underwater dolphin kick of human., *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 4 (1), 94-104(2009)

13) 杉本誠二, 中島求, 市川浩, 野村武男, 水中ド

ルフィンキックの推進力と関節トルクのシミュレーション解析. *バイオメカニズム学会誌*, 32 (2), 90-97(2008)

ギプス固定期間中の非固定部位での運動が 筋萎縮からの回復に与える効果

東京大学 高橋 祐美子
(共同研究者) 同 松本 竜 弥
同 八田 秀 雄

The Effect of Exercise by Non-immobilized Limbs on The Recovery From Atrophy Induced by Cast Immobilization

by

Yumiko Takahashi,
Tatsuya Matsumoto, Hideo Hatta
*The University of Tokyo,
Department of Sports Sciences*

ABSTRACT

Disuse of skeletal muscle leads to a reduction in muscle mass and alterations in mitochondrial function. We previously found that treadmill exercise primarily performed by forelimbs during a period of hindlimb muscle disuse attenuated atrophy and decrease in mitochondrial protein contents in the immobilized hindlimb muscles. In this study, we investigated the effects of treadmill exercise mainly performed by forelimb during bilateral hind limb immobilization on the adaptations in soleus muscle following cast removal in mice. Male Institute of Cancer Research (ICR) mice were divided into three groups: a control group without immobilization (CON), a remobilized group subjected to 14 days of hindlimb cast immobilization followed by 3 days of remobilization period (R), and an exercise-remobilized group that performed treadmill exercise during the immobilization period, followed by a 3 days of

remobilization period (ER). After the intervention, the soleus muscles were harvested and analyzed. The results showed that both R and ER groups had significantly lower total average cross-sectional area (CSA) and levels of mitochondrial-related proteins in the soleus muscle compared to those of the CON group. The average CSA of type IIa and IIx/b fibers were significantly lower in the R group compared to the CON group, while no significant difference was observed between the CON and ER groups. These findings suggest that treadmill exercise mainly performed by forelimb during hindlimb immobilization may induce fiber-type-specific responses in remobilized muscles.

キーワード

運動, ミトコンドリア, 不活動, 骨格筋, 筋線維タイプ

Keyword

exercise, mitochondria, disuse, skeletal muscle, fiber type

要 旨

骨格筋の不活動は筋量の低下, ミトコンドリアの機能変容を引き起こす. 一方, 我々は, マウスにおいて後肢不活動期間中に前肢を中心とした走行運動を実施することで, 後肢筋の萎縮の抑制やミトコンドリア適応が誘導されることを確認した. 本研究では, 両後肢不活動下における前肢を中心とした走行運動の実施が, ギプス固定解除後の後肢ヒラメ筋に与える影響を検討した.

雄性ICRマウスを, 安静群 (CON群), 14日間の後肢ギプス固定後に3日間の固定解除期間を設けた不活動回復群 (R群), および固定期間中に前肢を中心とした走行運動を行った後に固定解除期間を設けた群 (ER群) の3群に分けた. 介入終了後, ヒラメ筋を採取して解析した. その結果, ヒラメ筋の全体の横断面積およびミトコンドリア関連タンパク質量は, CON群と比較してR群, ER群にて有意に低値を示した. 一方, タイプIIaおよびIIx/b線維の横断面積は, CON群と比較して, R群にて有意に低い値を示したが, CON群とER群の間に有意な差は認められなかった. このこと

から, ギプス固定期間中の運動介入は不活動肢に対して, 固定解除後に筋線維タイプ特異的な適応をもたらす可能性が示唆された.

緒 言

骨格筋の量や筋力の維持は日常動作の実施機能に重要である. また, 骨格筋はエネルギー消費器官でもあり, 代謝性疾患の予防にも重要な役割を果たす. 一方, 日常生活では, 怪我や疾患治療などで身体活動の制限 (以下, 不活動) を余儀なくされる場面にしばしば直面する. ヒトを対象とした研究では, ベッドレストや装具固定, 歩数制限などの不活動時には1週間で概ね5%程度, 2週間で5-15%程度の骨格筋量の低下がみられる¹⁻³⁾. 怪我や疾患の治療など, 身体活動レベルを戻せるようになった後には, 可能な限り早い筋量や筋力の回復が求められる.

不活動は骨格筋でミトコンドリアの変容 (量的減少や呼吸機能低下, 活性酸素種増加など) をもたらす^{4,5)}. ミトコンドリアは骨格筋収縮やタンパク質合成のためのATP産生に関わる細胞小器官であり, 上記したミトコンドリアの変容が筋量・

筋力低下の進行に関わる可能性が示されている⁶⁻⁸⁾。一方で、遺伝子改変によりミトコンドリア生合成を促進すると筋萎縮が軽減される^{9,10)}。さらには、不活動期間終了後の筋量および筋力低下の継続とミトコンドリア変容の関連性が報告されている^{11,12)}。よって、不活動期間中のミトコンドリア変容を緩和する方法があれば、不活動期間終了後の回復にも有用な可能性がある。

近年、運動は液性因子などを介して活動筋以外の組織でも適応をもたらす可能性が示されている¹³⁾。運動による非活動筋の適応に関しても、ヒトを対象として、片脚での自転車運動によって非運動脚での遺伝子発現の変化が報告されている¹⁴⁾。そこで我々はICR系統のマウスを対象に、14日間の後肢ギプス固定時に前肢を中心とした持久的運動トレーニングを実施し、立位姿勢維持の主働筋である後肢ヒラメ筋への影響を検証した。その結果、後肢ギプスで対照群（非固定・運動非実施）と比較してヒラメ筋の筋横断面積の低下やミトコンドリア構成タンパク質量の低下がみられた（松本ら、未発表データ）。一方、後肢ギプス固定期間中に前肢を中心とした走行トレーニングを実施した群では、ヒラメ筋の筋横断面積の低下やミトコンドリア構成タンパク質量の低下が抑えられた。

以上の研究成果を応用し、本研究ではギプス固定期間中の活動可能な部位による運動が、固定解除後の骨格筋の適応に与える効果を検証する。

1. 研究方法

1.1 実験動物および実験概要

雄性ICRマウス（日本エスエルシー、東京）を用いた。12週齢になるまで予備飼育し、実験を開始した。マウスは23℃、12時間の明暗サイクルの環境（暗期；07:00-19:00）で個別ケージにて飼育した。飼育期間中は実験用飼料（MF; 3.6 kcal/g, 炭水化物 60%, 脂質 13%, タンパク質 27%; オリエンタル酵母工業、東京）および水を自由に摂取
デサントスポーツ科学 Vol. 47

させた。なお、本実験は東京大学大学院総合文化研究科・教養学部実験動物委員会による承認のもと行われた（2021-11）。予備飼育期間の後、マウスを対照群（CON群; n = 10）、2週間固定→3日間固定解除群（R群; n = 10）、2週間固定+走行トレーニング→3日間固定解除群（ER群; n = 10）の3群にランダムに分けた。ギプス固定日の3日前より3日間、全てのマウスは動物用トレッドミル（MK-680; 室町機械、東京）上での走行運動への慣らしとして速度10 m/分、10分間の走行運動を実施した。R群およびER群は、両後肢をギプスにより14日間固定した後、ギプスを解除した状態で3日間飼育した。ER群はギプス固定3日後からトレッドミル上で前肢を中心とした走行運動を実施した。介入終了後に組織を摘出した。

1.2 ギプス固定方法

R群とER群に塩酸メデトミジン（メデトミン注「Meiji」; 明治アニマルヘルス、東京; 0.3 mg/kg）、ミダゾラム（ミダゾラム; サンド、東京; 4 mg/kg）、酒石酸ブトルファノール（ベトルファール; Meiji Seika ファルマ、熊本; 5 mg/kg）を混合した三種混合麻酔薬を体重10 gあたり100 μ Lを腹腔内注射にて投与した。麻酔状態にあることを確認して、ギプス固定を実施した。麻酔中は38℃に設定された小動物用電気マット（ほっとうさ暖りバーシブルヒーター; マルカン、岩手）で保温した。最初に、1.5 cmに切断した1.5 mLのマイクロチューブを用いてマウスの後肢の足先を覆った。その後、両後肢を足関節から股関節にかけて非伸縮性テープ（Multipore™ Sports White Athletic Tape; 3M Japan、東京）にて膝関節最大伸展位、足関節最大底屈位で固定した。その上から重合レジン（UNIFAST II; GC、東京）を塗布した。最後に、第4、5腰椎から足趾に向けて股関節と両後肢を熱可塑性キャスト材（プライトン®; アルケア、東京）によって固定し、上から重合レジン

塗布した。固定処置終了後、三種混合麻酔の拮抗薬である塩酸アチパメゾール（アンチセダン[®]；日本全薬工業，福島；0.3 mg/kg）を体重10 gあたり100 μ L腹腔内注射によって投与し，全身麻酔からの覚醒を確認した。CON群もR群・ER群でのギプス固定処置と同等の時間，三種混合麻酔薬による麻酔状態においた。14日間のギプス固定期間終了後にイソフルランによる吸引麻酔下にて，ギプス固定を解除した。

1. 3 前肢を中心とした走行トレーニング

走行トレーニングは動物用トレッドミルを用いて実施した。走速度は毎分10 m，時間は60分間，トレッドミルの傾斜は0度とした。ER群は，ギプス固定3日後より，3日間走行実施と1日休みのサイクルを3回，すなわち，ギプス固定期間中に計9回の走行運動を行った。

1. 4 骨格筋摘出

固定解除期間終了後に，イソフルランによる吸入麻酔下にて後大静脈より採血して安楽死処置を行った後，ヒラメ筋を摘出した。ヒラメ筋は摘出後すぐに液体窒素で凍結し，-80℃で保管した。

1. 5 ホモジナイズ

摘出した片脚のヒラメ筋サンプルを2 mLネジ口マイクロチューブに入れ，5 mm ステンレスビーズと筋湿重量の30倍量のRIPA Lysisバッファ [50 mM Tris-HCl, pH 7.4, 150 mM NaCl, 0.25% deoxycholic acid, 1% NP-40, 1 mM ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) (Merck Milipore, Bedford, MA, USA) に，タンパク質分解酵素阻害剤 (cOmplete Mini; EDTA-free; Roche Applied Science, Germany) とリン酸化化合物加水分解酵素阻害剤 (PhosSTOP; Roche Applied Science) を添加したもの] を加えた後に，ビーズクラッシャーにて2,500 rpmでの30秒間の振盪を

3回行って破碎した。その後，可溶化処理として水上で30分間振盪させた後，4℃，2,800 rpmで15分間の遠心分離を行い，上清を回収し，サンプル溶液とした。

1. 6 クエン酸合成酵素 (CS) 最大活性の測定

CS最大活性は骨格筋ミトコンドリア量と高い正の相関関係にあることから，ミトコンドリア量の指標として多くの研究で用いられている (Larsen et al., 2012)。CS最大活性の測定はSrereの方法をもとにして実施した (Srere, 1969)。サンプル溶液を5倍量のホモジネートバッファ (100 mM KH_2PO_4 , 0.05% Bovine Serum Albumin, pH7.3) で希釈し，これをCS最大活性測定用サンプル溶液とした。サンプル溶液6 μ L, Tris-HCl 207 μ L, 5,5'-Dithiobis (2-nitrobenzoic acid) (DTNB) 18 μ L, アセチルCoA 12 μ L, オキサロ酢酸9 μ Lを37℃の96穴マイクロプレート内で混合し，マイクロプレート吸光分光光度計 (SpectraMax ABS Plus; モレキュラーデバイスジャパン，東京) を用いて，412 nm波長における吸光度 (Abs) の変化を測定した。CS活性 (μ mol/g wet tissue weight/min) は以下の式により算出した。

CS 活性 = Abs/min \times Total volume \times Dilution factor / (13.6 \times Sample volume)

Dilution factorは (tissue weight + buffer volume) / tissue weightとして求めた。また，13.6は412 nmにおけるDTNBのモル吸光係数である。

1. 7 ウェスタンブロット

サンプル溶液中のタンパク質濃度をBicinchoninic Acid Assay (BCA法) にて測定した (BCA Protein Assay Kit; 富士フィルム和光純薬，大阪)。RIPA Lysisバッファおよびサンプルバッファ (0.25 mol/L Tris-HCl, pH6.8, 8 (w/v) %Sodium Dodecyl Sulfate (SDS), 40 (w/v) %Glycerol, 0.02 (w/v)

%Bromophenol Blue, 20 (v/v) %3-mercapto-1,2-propandiol; 富士フィルム和光純薬) を用いてサンプル溶液を $1.0 \mu\text{g}/\mu\text{L}$ となるように希釈し、ウェスタンブロットリング用サンプルとした。この際、ウェスタンブロットリング用サンプルを2つに分け、一方は 90°C で5分間ボイルした。もう一方は OXPPOS のウェスタンブロット用サンプルとしてボイルを実施しなかった。7.5-15% の SDS ポリアクリルアミドゲルに、各レーン $10 \mu\text{g}$ のタンパク質をアプライし、150 V で60分間 SDS-ポリアクリルアミド電気泳動を行った。電気泳動後、ウェット法によりゲルから Polyvinylidene difluoride (PVDF) 膜 (Merck Millipore) への転写を行った (電圧 75-100 V で75分間)。転写終了後、メンブレンを Tris-buffered saline containing 0.1% Tween 20 (TTBS) に浸し、PVDF Blocking Reagent (東洋紡, 大阪) で60分間ブロッキング処理を行った。その後 TTBS で5分間3回洗浄し、一次抗体希釈液に浸して室温 (20°C) で1時間、 4°C で一晩反応させた。使用した一次抗体は OXPPOS (1:5000, ab110413, abcam, Cambridge, UK), COX IV (1:2000, ab14744, abcam), PGC-1 α (1:1000, #516557, Merck Millipore), 4HNE (1:1000, ab48506, abcam), SOD2 (1:1000, #13141, Cell Signaling Technology, Danvers, MA) である。反応終了後に TTBS で5分間3回洗浄し、Anti IgG (H+L) マウス (American Qualex, San Clemente, CA) または Anti IgG (H+L) ラビット (American Qualex) の二次抗体と60分間反応させた。二次抗体反応終了後、膜を再び TTBS で5分間3回洗浄し、化学発光検出試薬 (Pierce ECL Western Blotting Substrate; Thermo Fisher Scientific, USA) と反応させてバンドを可視化し、化学発光検出装置 (ChemiDoc XRS; Bio-Rad, Hercules, CA, USA) で撮影した。検出したバンドは、ImageLab software v 6.1.0. (Bio-Rad) により定量した。その後、メンブレンをボンソー S 溶液 (Beacle Inc., 京都) で染

色し、タンパク質の泳動像を確認した。

1. 8 組織標本作成

摘出した片側のヒラメ筋をトラガカントゴム (富士フィルム和光純薬) を付けた円状コルク上に垂直に立て、液体窒素で冷却させたイソペンタン中で素早く攪拌させることで凍結した。その後、クライオスタット (CM1950; Leica Microsystems, Germany) を用いて $8 \mu\text{m}$ で薄切し、組織標本を作成した。組織標本は免疫組織化学染色を行うまで -80°C で保管した。

1. 9 免疫組織化学染色

作成した組織標本を -20°C のアセトンで固定後に自然乾燥させた。十分に乾燥させた後、組織標本を 5% goat serum, 1% BSA/phosphate buffered saline (PBS), M.O.M. blocking reagent (Vector Laboratories, Newark, CA, USA) で60分間ブロッキング処理を行った。その後、一次抗体を加え、 4°C で一晩反応させた。使用した一次抗体は MyHC type I (1:50, # BA-D5; Developmental Studies Hybridoma Bank (DSHB), Iowa, IA), MyHC type IIa (1:100, # SC-71; DSHB), MyHC type IIb (1:100, # BF-F3; DSHB), Laminin (1:200, SC-59854, Santa Cruz Biotechnology, Dallas, TX) である。反応終了後、PBS で5分間2回洗浄し、二次抗体と 37°C で60分間反応させた。反応終了後、組織標本を VECTASHIELD Vibrance Antifade Mounting Medium (Vector Laboratories) で封入し、蛍光顕微鏡である BIOREVO BZ-X810 (KEYENCE, 大阪) にて撮影した。撮影した画像から、Hybrid Cell Count アプリケーション (KEYENCE) を用いて筋線維の横断面積を算出した。

1. 10 ヘマトキシリン/エオジン (HE) 染色

作成した組織標本を Mayer' s hematoxylin (富

士フィルム和光純薬)で7分間染色した。染色後、50℃で3分間流水洗浄を行い、エオジン(富士フィルム和光純薬)で50秒間染色した。その後、95%エタノール(富士フィルム和光純薬)で5秒間2回、100%エタノール(富士フィルム和光純薬)で5秒間2回脱水し、キシレン(富士フィルム和光純薬)で5分間3回透膜処理を行った。組織標本はDPXマウンティングメディウム(Sigma-Aldrich)で封入した。すべての標本を蛍光顕微鏡 BIOREVO BZ-X810 (KEYENCE) で撮影した。

1. 11 統計処理

データはすべて平均値±標準偏差で示した。また、統計処理にはGraphPad Prism 7を用いた。すべてのデータにおいて、Shapiro-Wilk検定を実施し正規性の検定を行なった。3群間の比較に関して、正規性が認められた場合は一元配置分散分析を行い、その後Tukey-Kramer法による多重比較検定を実施した。正規性が認められなかった場合、クラスカル・ウォリス検定を実施し、その後Dunn検定を用いて多重比較検定を実施した。すべての統計において、危険率が5%未満を有意とした。

2. 研究結果

2. 1 筋線維横断面積

筋線維全体における平均横断面積は、CON群と比較して、R群、ER群ともに有意に低い値を示した($p < 0.001$, $p < 0.01$; 図1-B)。

筋線維タイプ別の平均横断面積について、タイプI線維ではR群、ER群ともにCON群と比較して有意に低い値を示した($p < 0.001$; 図1-C)。タイプII aおよびII x/b線維では、CON群と比較してR群にて有意に低い値を示したが($p < 0.01$)、ER群とCON群の間に有意な差は認められなかった(図1-D, E)。

2. 2 ミトコンドリア関連酵素最大活性・タンパク質量

CS最大活性は、CON群と比較してR群およびER群ともに有意に低値を示した($p < 0.001$; 図2-B)。

電子伝達系を構成する主要な呼吸鎖複合体タンパク質についてウェスタンブロット法により定量化した。複合体Iの構成因子であるNDUFB8(図2-C)、複合体IIのSDHB(図2-D)、複合体IIIのUQCRC2(図2-E)、複合体IVのMTCO1(図2-F)、およびATP合成酵素である複合体VのATP5A(図2-G)いずれもCON群と比較してR群およびER群ともに有意に低値を示した($p < 0.05$)。複合体IVを構成するCOX IVタンパク質もCON群と比較してR群およびER群で有意に低い値を示した($p < 0.001$, 図2-H)。

ミトコンドリア生成の主要な制御因子であるPGC-1 α タンパク質はCON群と比較してR群およびER群で有意に低値を示した($p < 0.01$, $p < 0.001$, 図2-I)。

酸化ストレスの指標の一つである4HNEタンパク質はCON群と比較してR群およびER群で有意に高値を示した($p < 0.001$; 図2-J)。一方、抗酸化酵素であるSOD2タンパク質はCON群と比較してR群およびER群で有意に低値を示した($p < 0.001$, 図2-K)。

評価したいずれの項目においても、R群とER群の間に有意な差は認められなかった。

3. 考察

本研究では、後肢ギプス固定期間中の前肢を中心とした走行トレーニングの実施は、ギプス固定解除3日後において、不活動肢であるヒラメ筋の全体での筋横断面積の低下およびミトコンドリアに関連するタンパク質量の低下を抑制することはできなかったものの、タイプII a, II x/b線維の横断面積の低下を抑制した。

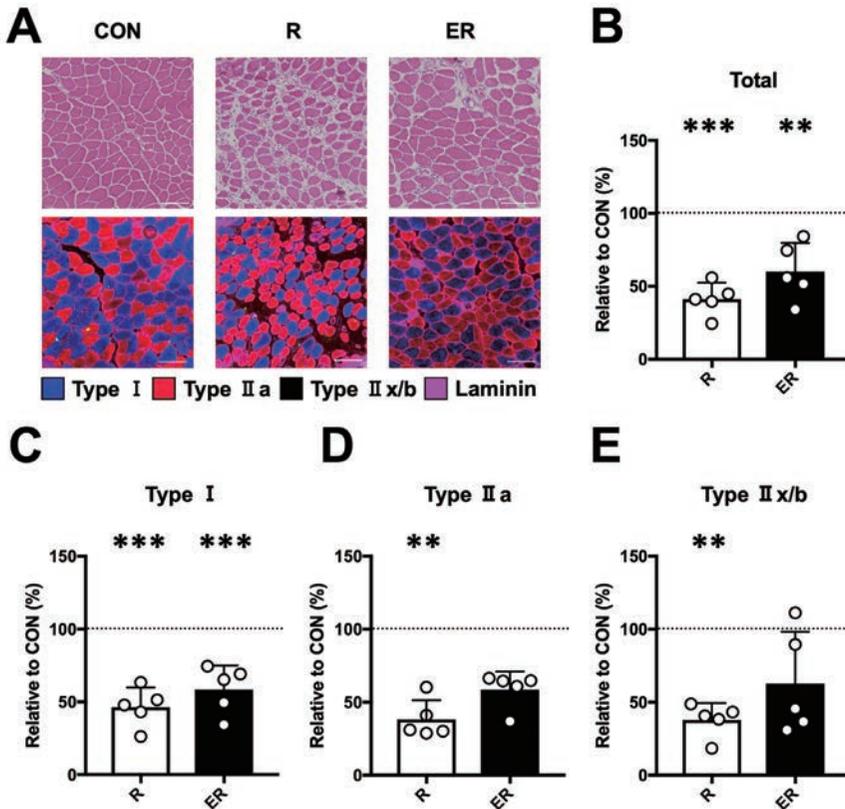


図1 ヒラメ筋の筋線維横断面面積

CON: 対照群 (固定をしない安静群); R: 2週間固定→3日間固定解除群; ER: 2週間固定+走行運動→3日間固定解除群. A: 筋線維免疫染色代表画像; B: 全体の筋線維横断面面積; C: タイプ I 線維横断面面積; D: タイプ II a 線維横断面面積; E: タイプ II x/b 線維横断面面積. データは平均値±標準偏差で示した. すべてのデータは, CON群に対する相対値で示した. ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ vs. CON群

我々は, ギプス固定期間中の前肢を中心とした走行トレーニングの実施が固定期間終了直後の筋横断面面積の低下やミトコンドリア関連タンパク質量の低下を抑制したことを確認している (松本ら, 未発表データ). 一方, 本研究の結果, ギプス固定解除から3日後の時点では, 筋線維全体での平均横断面面積の低下やミトコンドリアに関連するタンパク質量の低下に対して, 固定期間中の運動の効果は見られなかった. これには, ギプス固定解除後に筋萎縮が一時的に進行する現象が関与した可能性がある. ラットを用いてギプス固定解除後の骨格筋応答の経時的変化を追った研究で, 固定解除初期 (3~7日後) において, 固定期間終了直後よりも筋萎縮が一時的に進行し, 2週間後には筋横断面面積が固定解除初期より高まることが報告

されている¹⁵⁾. この現象は固定解除後の再荷重に伴う筋損傷が関わっている可能性がある. 先行研究にて, 後肢懸垂や宇宙飛行後の微小重力環境からの復帰後の再荷重初期に遠心性収縮様の筋損傷が生じることが報告されている¹⁶⁾. また, ギプス固定モデルを用いた研究でも, 固定解除2日後に損傷がみられると報告されている¹⁷⁾. このような現象の原因として, 除負荷状態によって骨格筋内部のサルコメアなどの構造的要素が弱体化し, 再荷重時の張力に耐えきれず損傷が誘発される可能性が示唆されている. 筋損傷は筋萎縮を誘発する要因の一つとして考えられていること¹⁸⁾から, 本研究におけるギプス固定解除後の筋萎縮には損傷が関与した可能性がある.

筋損傷の発生は, 筋線維タイプごとの活動特性

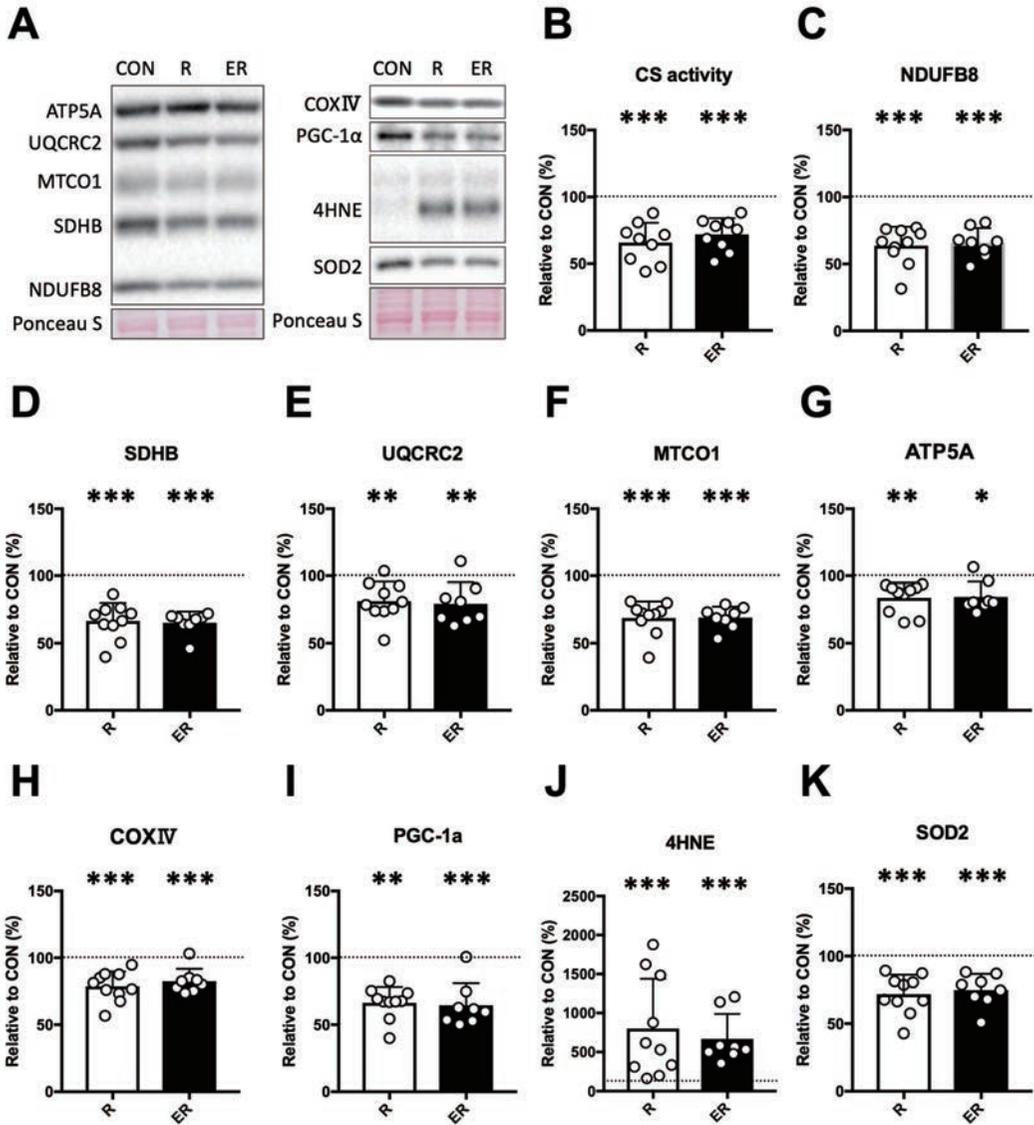


図2 ヒラメ筋のミトコンドリアに関連するタンパク質量

CON: 対照群 (固定をしない安静群) ; R: 2週間固定+3日間固定解除群; ER: 2週間固定+走行運動→3日間固定解除群. A: ウェスタンブロット代表画像; B: クエン酸合成酵素 (CS) 最大活性; C-H: 呼吸鎖複合体構成タンパク質量 (C: 複合体I_NDUFB8; D: 複合体II_SDHB; E: 複合体III_UQCRC2; F: 複合体IV_MTCO1; G: 複合体V_ATP5A; H: COX IV) ; I: PGC-1 *a* タンパク質量; J: 4HNE タンパク質量; K: SOD2 タンパク質量. データは平均値±標準偏差で示した. すべてのデータは, CON群に対する相対値で示した. **p* < 0.05, ***p* < 0.01, ****p* < 0.001 vs. CON群

に応じて異なる可能性がある. ラットにおいて, 日常的な行動では遅筋型運動単位 (S型) は速筋型運動単位 (FF型, FR型) に比べて高い活動時間を示すことが報告されており¹⁹⁾, S型運動単位が支配するタイプI線維は日常的な行動時に高頻度で活動していると考えられる. 本研究における

ギプス固定解除3日後というサンプリング時点では, 活動量の高いタイプI線維は再荷重による損傷の影響を受けやすかった一方, タイプII線維では再荷重によるダメージが比較的少なかった可能性がある. よって, ギプス固定期間中に実施した前肢を中心とした走行運動による効果がタイプII

線維でのみみられた可能性がある。

ミトコンドリアに関連する指標については、ギプス固定解除3日後において、後肢ギプス固定期間中に前肢を中心とした走行運動を実施していた群においても、運動を実施していなかった群と同様の低下がみられた。この結果は、ギプス固定解除後のミトコンドリア関連のタンパク質量の低下を報告した先行研究とも一致している¹⁵⁾。ラットを対象とした研究で、筋損傷を起こす実験モデルの一つの下り坂走行を行った後、ヒラメ筋にてCS最大活性や電子伝達系タンパク質の減少が報告されている^{20,21)}。固定解除初期には筋損傷の影響でミトコンドリア関連タンパク質量の顕著な低下が起こった可能性がある。

本研究では、タンパク質量の評価を骨格筋全体を破碎したサンプルで行ったことから、筋線維タイプ別のミトコンドリアの適応応答を検証できていない。よって、今後は筋線維タイプごとにミトコンドリア適応応答と筋横断面積変化の関係性を明らかにする必要がある。また、本研究のサンプリング時点では、ギプス固定解除に伴い一時的に増大するストレス応答の影響が大きかった可能性がある。そのため、今後はギプス固定期間中の運動実施が固定解除後の回復過程にもたらす効果について、より長期間での検証も必要である。

結 論

ギプス固定期間中の前肢を中心とした走行トレーニングは、固定解除3日後のヒラメ筋の全体の横断面積やミトコンドリア関連タンパク質量の低下を抑制することはできなかった。しかし、速筋線維であるタイプIIa, II x/b線維の横断面積の低下を抑制した。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、ご支援を賜りました公
デサントスポーツ科学 Vol. 47

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、実験遂行全般にご協力頂きました、東京大学大学院総合文化研究科の八田研究室ならびに高橋研究室の皆様、筋横断面積の評価にご協力いただきました筑波大学医学医療系の高橋智教授、藤田諒准教授、並びに高橋智研究室の皆様にご心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) Dirks M.L., Wall B.T., van de Valk B., Holloway T.M., Holloway G.P., Chabowski A., Goossens G.H., van Loon L.J., One Week of Bed Rest Leads to Substantial Muscle Atrophy and Induces Whole-Body Insulin Resistance in the Absence of Skeletal Muscle Lipid Accumulation., *Diabetes*, 65 (10), 2862–2875(2016)
- 2) Preobrazenski N., Janssen I., McGlory C., The effects of single-leg disuse on skeletal muscle strength and size in the nonimmobilized leg of uninjured adults: a meta-analysis., *Journal of applied physiology*, 134 (6), 1359–1363(2023)
- 3) Deane C.S., Piasecki M., Atherton P.J., Skeletal muscle immobilisation-induced atrophy: mechanistic insights from human studies., *Clinical science*, 138 (12), 741–756(2024)
- 4) Ringholm, S., Biensø, R.S., Kiilerich, K., Guadalupe-Grau, A., Aachmann-Andersen, N. J., Saltin, B., Plomgaard, P., Lundby, C., Wojtaszewski, J. F., Calbet, J. A., & Pilegaard, H., Bed rest reduces metabolic protein content and abolishes exercise-induced mRNA responses in human skeletal muscle., *American journal of physiology. Endocrinology and metabolism*, 301 (4), E649–E658(2011)
- 5) Brocca L., Cannavino J., Coletto L., Biolo G., Sandri M., Bottinelli R., Pellegrino M.A., The time course of the adaptations of human muscle proteome to bed rest and the underlying mechanisms., *The Journal of physiology*, 590 (20), 5211–5230(2012)
- 6) Min K., Smuder A.J., Kwon O.S., Kavazis A.N., Szeto H.H., Powers S.K., Mitochondrial-targeted antioxidants protect skeletal muscle against immobilization-induced muscle atrophy., *Journal of applied physiology*, 111 (5), 1459–1466(2011)

- 7) Hyatt H., Deminice R., Yoshihara T., Powers S.K., Mitochondrial dysfunction induces muscle atrophy during prolonged inactivity: A review of the causes and effects., *Archives of biochemistry and biophysics*, 662, 49–60(2019)
- 8) Memme J.M., Erlich A.T., Phukan G., Hood D.A., Exercise and mitochondrial health., *The Journal of physiology*, 599 (3), 803–817(2021)
- 9) Cannavino J., Brocca L., Sandri M., Bottinelli R., Pellegrino M.A., PGC1- α over-expression prevents metabolic alterations and soleus muscle atrophy in hindlimb unloaded mice., *The Journal of physiology*, 592 (20), 4575–4589(2014)
- 10) Kang C., Ji L.L., PGC-1 α overexpression via local transfection attenuates mitophagy pathway in muscle disuse atrophy., *Free radical biology & medicine*, 93, 32–40(2016)
- 11) Kang C., Ji L.L., Muscle immobilization and remobilization downregulates PGC-1 α signaling and the mitochondrial biogenesis pathway., *Journal of applied physiology*, 115 (11), 1618–1625(2013)
- 12) Trevino M.B., Zhang X., Standley R.A., Wang M., Han X., Reis F.C.G., Periasamy M., Yu G., Kelly D.P., Goodpaster B.H., Vega R.B., Coen P.M., Loss of mitochondrial energetics is associated with poor recovery of muscle function but not mass following disuse atrophy., *American journal of physiology. Endocrinology and metabolism*, 317 (5), E899–E910(2019)
- 13) MoTrPAC Study Group, Lead Analysts, & MoTrPAC Study Group, Temporal dynamics of the multi-omic response to endurance exercise training., *Nature*, 629 (8010), 174–183(2024)
- 14) Catoire M., Mensink M., Boekschoten M.V., Hangelbroek R., Müller M., Schrauwen P., Kersten S., Pronounced effects of acute endurance exercise on gene expression in resting and exercising human skeletal muscle., *PloS one*, 7 (11), e51066(2012)
- 15) Wang F., Zhou T., Zhou C.X., Zhang Q.B., Wang H., Zhou Y., The worsening of skeletal muscle atrophy induced by immobilization at the early stage of remobilization correlates with BNIP3-dependent mitophagy., *BMC musculoskeletal disorders*, 24 (1), 632(2023)
- 16) Riley D.A., Thompson J.L., Krippendorf B.B., Slocum G.R., Review of spaceflight and hindlimb suspension unloading induced sarcomere damage and repair., *Basic and applied myology : BAM*, 5 (2), 139–145(1995)
- 17) Frimel T.N., Kapadia F., Gaidosh G.S., Li Y., Walter G.A., Vandenborne K., A model of muscle atrophy using cast immobilization in mice., *Muscle & nerve*, 32 (5), 672–674(2005)
- 18) Kozakowska M., Pietraszek-Gremplewicz K., Jozkowicz A., Dulak J., The role of oxidative stress in skeletal muscle injury and regeneration: focus on antioxidant enzymes., *Journal of muscle research and cell motility*, 36 (6), 377–393(2015)
- 19) Hennig R., Lømo T., Firing patterns of motor units in normal rats., *Nature*, 314 (6007), 164–166(1985)
- 20) Shang H., Xia Z., Bai S., Zhang H.E., Gu B., Wang R., Downhill Running Acutely Elicits Mitophagy in Rat Soleus Muscle., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 51 (7), 1396–1403(2019)
- 21) Shang H., Ma R., Chen S., Deng H., Li M., Zheng S., Zhang H., Zhang D., Yang T., Yang Y., Xia Z., Downhill running induced mitophagy in rat soleus muscle via the AMPK pathway., *J. Physiol Biochem.*, Epub ahead of print(2025)

血流制限を併用したレジスタンス運動の有効閾値についての検討

北 翔 大 学 沖 田 孝 一

Exploring the Effective Thresholds for Resistance Exercise with Blood Flow Restriction

by

Koichi Okita
*Department of Sport Education,
Hokusho University*

ABSTRACT

In recent years, low-intensity exercise with muscle blood flow restriction has been used for the rehabilitation of patients with neurological and musculoskeletal disorders. Therefore, the purpose of this study was to examine the effective threshold and exercise volume, taking into account differences in load intensity, in order to obtain effective muscle hypertrophy and strength gain in resistance exercise with blood flow restriction so that it can be applied to a variety of clinical settings.

Twenty healthy university students performed plantar flexion exercise with blood flow restriction for 120 seconds, 60 times, using four levels of load intensity from 10% to 40% of one repetition maximum (1-RM). Intramuscular energy metabolism was measured, and the effective threshold was examined by comparing with exercise at 65% 1-RM, which provides an effective training effect, and exercise at 20% 1-RM under blood flow restriction.

It was shown that an external load of 20% 1-RM or more is appropriate for obtaining reliable effects in resistance exercise under blood flow restriction with a fixed exercise

time and number of repetitions of 60 times. However, it was also suggested that an effect may be obtained even with 10% 1-RM with blood flow restriction, because it obtains a stronger intramuscular metabolic stress than 20% 1-RM without blood flow restriction, which is usually considered to be less effective.

キーワード

血流制限, トレーニング, リハビリテーション, 筋肥大, 筋力増加, 代謝的ストレス

Keyword

threshold; blood flow restriction; metabolic stress; ischemia; training; muscle hypertrophy

要 旨

近年, 筋血流制限を併用した低負荷運動は神経疾患や運動器疾患を持つ患者のリハビリテーションなどに利用されてきている. 本研究は, 血流制限を併用したレジスタンス運動が多様な臨床現場に応用できるように, 有効な筋肥大・筋力増加効果を得るための負荷強度の違いを考慮した有効閾値・運動量について検討することを目的とした. 健常大学生 20 名に最大挙上重量 (1-RM) の 10% から 40% まで 4 段階の負荷強度を用いて, 120 秒・60 回の血流制限を併用した下腿三頭筋の底屈運動を行わせ, 筋内エネルギー代謝を測定した. さらに有効なトレーニング効果が得られる 65% 1-RM での運動 (血流制限なし) および血流制限下 20% 1-RM と比較し, 有効閾値を検討した. その結果, 運動時間・回数を固定した血流制限下のレジスタンス運動において標準的な効果を得るには 20% 1-RM 以上の外的負荷が適当であることが示された. しかしながら, 10% 1-RM においても, 通常は効果が乏しいと考えられる血流制限を併用しない 20% 1-RM より強い筋内代謝ストレスが得られることから, 効果が得られる可能性も示唆された.

緒 言

骨格筋は身体機能だけではなく糖・脂質代謝の

大部分を担い, 加えて内分泌組織としてマイオカインを分泌し人の健康を支えている¹⁻³⁾. 筋量・筋力の増加を得るためには, レジスタンス運動が有効であるが⁴⁾, 高強度の重量負荷は筋・関節や心血管系への負荷が大きいことから女性や中高年者, 疾患者に行うには困難な場合が多く, しばしば臨床現場での支障となる. 我々は, レジスタンス運動に血流制限を併用することで筋へのトレーニング刺激が増強され, 低強度の負荷であっても高強度負荷に匹敵する効果が得られる可能性に着目してきた⁵⁾. 石本記念デサントスポーツ科学振興財団の助成を受けて実施した研究では, トレーニング効果の大きさが, 血流制限によって増強される骨格筋内の代謝ストレス (クレアチンリン酸および pH の低下, 無機リン酸の蓄積) に依存することを明らかにし⁶⁾, これらの知見を基に, 個体差や疾患の有無を考慮した至適なトレーニング・プロトコルを提案してきた⁷⁻¹⁰⁾.

最近, 筋血流制限を併用した超低負荷運動が多発性硬化症などの神経疾患や運動器疾患を持つ患者^{11, 12)}, さらには前十字靭帯再建術後の理学療法やリハビリテーションにも試験的に利用されてきている¹³⁾.

本研究は, 多様な臨床現場に応用できるよう血流制限を併用したレジスタンス運動における有効な筋肥大・筋力増加効果を得るための, 負荷強度

の違いを考慮した有効閾値（トレーニング効果が期待できる運動量）について検討することを目的とした。なお、機械的「負荷」と区別するため、本研究ではエネルギー代謝によるクレアチンリン酸およびpHの低下を「筋内代謝ストレス」と定義した。

1. 方法

1. 1 被験者

対象は健常大学生20名（男性11，女性9人）とした。実験に先立ち、全ての被験者に本研究の目的、方法、安全性等を十分に説明し、本研究への参加の同意を得た。また本研究計画は、北翔大学倫理委員会の承認を受けている。

1. 2 運動プロトコール

独自に作成した運動装置を用いて、仰臥位右足関節底屈運動を1回/2秒のペースで行った。負荷量は、各被験者の最大挙上重量（1 repetition maximum, 1-RM）から設定した。1-RMの測定は同様の運動装置を用いて、仰臥位右足関節底屈運

動を行い、5cm挙上可能な最大重量とした。

プロトコールは以下の通りである。①10% 1-RM + 血流制限，②20% 1-RM + 血流制限，③30% 1-RM + 血流制限，④40% 1-RM + 血流制限，コントロールとして⑤65% 1-RM + 血流制限なし。各条件下の運動継続時間は120秒（繰り返し60回）に統一した。

各プロトコールは無作為順に施行し、2条件ずつ2日間に分けて行った。2回目の運動を開始する前には、変化したエネルギー代謝が安静時の状態まで回復していることを確認した。血流制限は、先行研究に基づき右脚大腿部に装着した空気圧式カフと急速空気注入機（E-20 rapid cuff inflator, Hokanson, USA）を用いて、被験者の安静時収縮期血圧の1.3倍の圧で施行した⁵⁻¹⁰。血流制限圧は急速空気注入機のデジタルディスプレイを監視し、正確に維持した。血流制限は運動期開始10秒前かけ、運動終了後迅速に解放した。

1. 3 骨格筋内エネルギー代謝の測定（図1）

被験者は全身用MR機器（55 cm-bore, 1.5 Tesla,

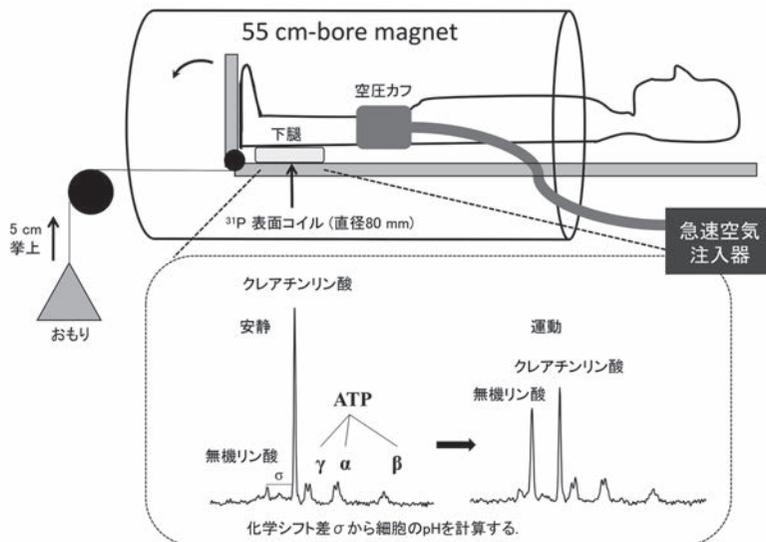


図 1 測定装置と運動方法。全身用MR装置内に2秒で1回の下腿三頭筋底屈運動を行い、下腿下面に設置した³¹P表面コイルにてエネルギー代謝を測定した。血流制限を施行した10%1-RM, 20%1-RM, 30%1-RM, 40%1-RMと対照として65%1-RM（非血流制限）を各2分間、60回を施行した。

BFR, blood flow restriction; RM, repetition maximum.

Magnetom Vision VB33G, Siemens, Erlangen, Germany) 内に設置した非磁性体で作成された運動装置において仰臥位となり、主動筋である下腿三頭筋の中央部下に31P励起用の表面コイル(直径80 mm)を固定し、磁気共鳴分光法による測定を安静時および運動中15秒ごとに行った。得られた高エネルギーリン酸スペクトルからクレアチンリン酸および無機リン酸の曲線下面積を算出した。スペクトルの大きさは相対値であるが、クレアチンリン酸が分解していく過程で[クレアチンリン酸]と[無機リン酸]の和は理論上一定であることから、先行研究に基づいて、その和を便宜上42.5 mMと仮定し、クレアチンリン酸量を絶対値として算出した¹⁴⁾。筋細胞内pHは、クレアチンリン酸と無機リン酸のピークのケミカルシフトの差を用いて算出した¹⁵⁾。

1. 4 統計処理

記述データは、平均±標準偏差で表し、図は、平均±標準誤差(クレアチンリン酸とpH)で表示した。運動条件間のクレアチンリン酸および筋細胞内pHの比較には、一元配置分散分析(ANOVA)を用いた。有意差が認められた場合は、Bonferroniの多重比較(post-hoc)により検定した。統計学的有意水準は、 $p < 0.05$ とし、すべての検定は統計解析ソフトIBM SPSS statistics version 29(IBM Japan)を用いて行った。

2. 結果

表1に被験者の基本特性、血圧・血流制限圧および最大挙上重量の結果を示した。

図2に各条件におけるクレアチンリン酸と筋内pHの経時的変化を示した。運動経過中の筋内クレアチンリン酸、pHは負荷強度に相応して低下した(図2)。一般的にレジスタンス・トレーニング効果得られにくいとされる血流制限を併用しな

表1 被験者の基本情報

項目	平均±標準偏差
被験者数	20
年齢, 才	21.6±1.2
身長 cm	165.4±7.9
体重, kg	57.9±8.1
体格指数, kg/m ²	21.1±1.8
収縮期血圧, mmHg	108.1±7.8
血流制限圧, mmHg	140.7±10.1
最大挙上重量, kg	45.0±10.6

い20%1-RMにおける筋内代謝ストレスのレベルを過去の報告から引用し二点鎖線で示した。一方、ガイドライン⁴⁾で推奨される65%1-RMにて60秒(30回)時点における筋内代謝ストレスを点線で示し、過去の我々の介入研究⁶⁾にて有効性を示した血流制限を併用した20%1-RMの120秒(60回)時は実践で示した。

今回の結果では、最も低負荷であった10%1-RM(血流制限あり)においてもクレアチンリン酸の低下は60秒(30回)以降で、筋細胞内pHは90秒(45回)以降にて、20%1-RM(血流制限なし)のレベルを超えていた。30%1-RM(血流制限あり)では、クレアチンリン酸の低下にて75秒(37.5回)の時点で20%1-RM(血流制限あり)120秒(60回)時と同等になっており、筋細胞内pHは、やや遅れて90秒(45回)にて同等になっていた。40%1-RM(血流制限あり)では、60秒(30回)の時点で20%1-RM(血流制限あり)120秒(60回)時と同等になっており、筋細胞内pHは、60秒(30回)の時点で65%1-RM(血流制限なし)60秒(30回)時と同等(有意差なし)になっていた。

3. 考察

本研究では、多様な臨床現場を想定し、固定した繰り返し回数・時間における負荷強度の違いを考慮した血流制限下レジスタンス運動の有効閾値を検討することを目的とした。後述するようにレジスタンス・トレーニングの最小限の強度閾値はまだ解明されていない。そこで、標準的な高強

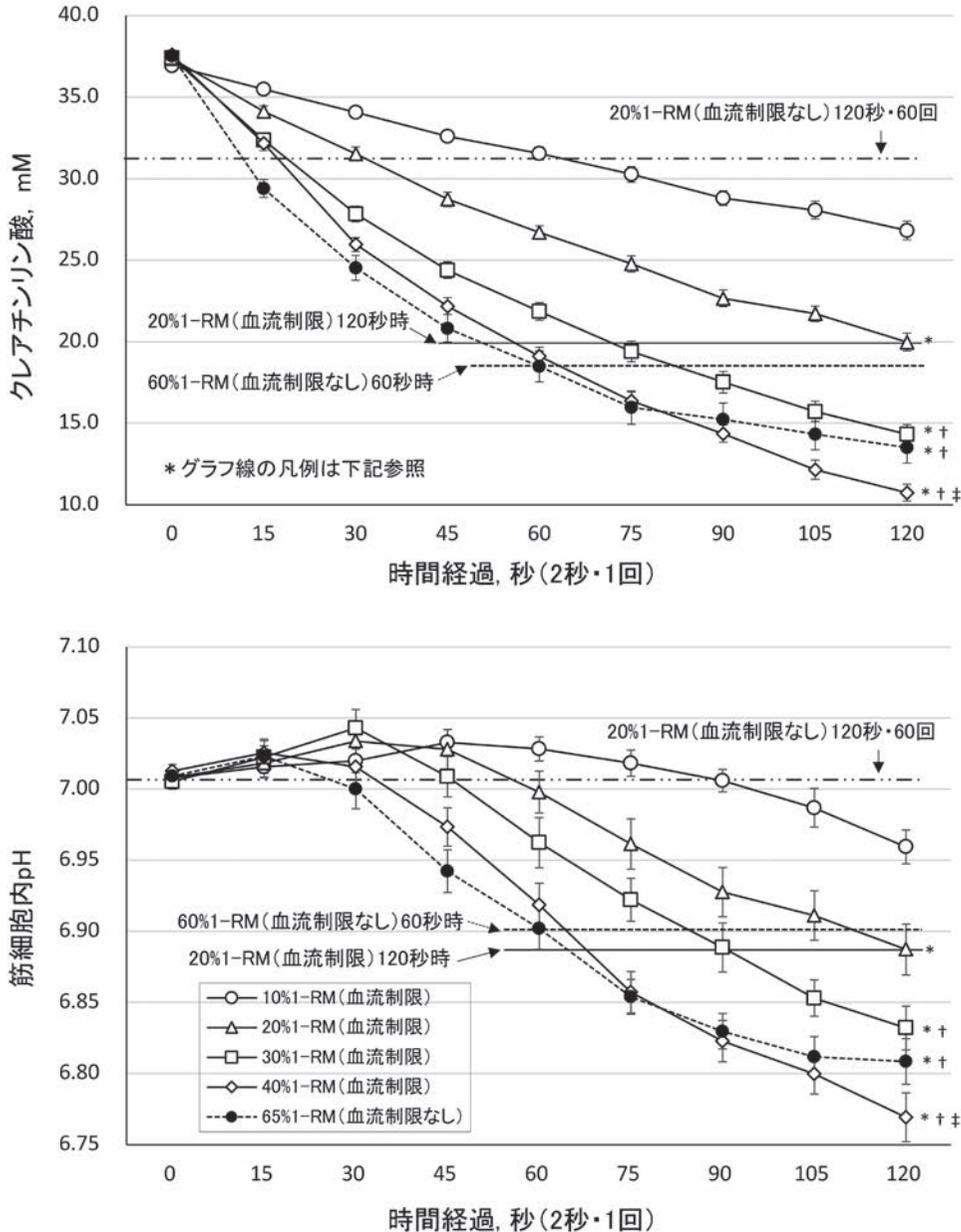


図2 運動中の筋内クレアチンリン酸と筋細胞内pHの経時変化。
 運動は2秒に1回の下腿三頭筋底屈運動を行った。エラーバー, 標準誤差。
 * $p < 0.05$ vs 20% 1-RM, † vs 30% 1-RM, ‡ vs 65% 1-RM.

度運動 (65% 1-RM) と過去に効果を確認することができた血流制限を併用した低強度運動 (20% 1-RM) における筋内代謝ストレスを目安として、各強度にて有効となる回数・時間を調べた。その結果、限定された回数では、血流制限を併用し

ても20% 1-RM以下では有効閾値に到達していなかった。一方、20% 1-RM以上であれば、60回以内(強度依存性により少ない回数で)で有効閾値に達することが示された。

本研究での最低強度である10% 1-RM (血流制

限あり)においても、血流制限なしの場合に比較し、時間経過(繰り返し増加)に相応して筋内代謝ストレスが増強するため、効果が得られる可能性はあり、前回の研究成果¹⁶⁾のように、運動量を固定せず、繰り返し回数を増やせば高強度運動と同等の筋刺激となり効果が得られると推測された。

筋量を増加させるための最小限の強度閾値が存在することは明らかであるが、正確な強度レベルはまだ解明されていない。これまでの研究では、血流制限を併用しない低強度の運動でも、未訓練者においては筋の適応を促進できることが示されており、これらの増加は機能的、代謝的、あるいは審美的に意味のあるものである可能性がある¹⁷⁾。また、低負荷を用いても all-out まで行うことで有意な筋肥大・筋力増加が得られることも示されている^{18, 19)}。しかしながら、自覚的限界までのトレーニングを継続的に行うことは、オーバートレーニングや心理的な燃え尽き症候群のリスクを高める可能性があると考えられている²⁰⁾。

トレーニング効果の目標をどう設定するかによって、負荷量の設定は変わってくる。仮に実践的な筋肥大・筋力増加が得られる標準的な高強度(1RMの65%以上)レジスタンス・トレーニングと同等の効果を血流制限運動で得たいとすれば、本研究の結果は参考になるとと思われる。

本研究の限界の一つは、疲労耐性の強い下腿三頭筋の運動を用いていることがあげられる。下腿三頭筋底屈運動は65%1-RMを用いても連続60回余の繰り返しが可能であり、上腕や大腿とは性質が異なると思われる。二つ目は長期的効果を見るための介入研究ではないことがあげられる。これまでに行った血流制限下20%1-RMを用いた1ヶ月間の介入研究により運動時の「筋内代謝ストレス」の程度が筋肥大および筋力増加と関連することを報告しているが⁶⁾、今回の研究では異なる負荷強度を用いており、結論を確証するためには実

際の介入研究が必要である。

結 論

運動時間・回数を固定した(120秒・60回)血流制限下のレジスタンス運動において標準的な効果を得るには20%1-RM以上の外的負荷が適当であることが示された。しかしながら、10%1-RMにおいても、通常は効果が乏しいとされる血流制限を併用しない20%1-RM以上の筋内代謝ストレスが得られることから、効果が得られる可能性も示唆された。

謝 辞

本研究にご協力いただきました被験者ならびに研究補助者の皆さまに心より感謝申し上げます。また、研究助成を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さまに深く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Goodpaster B.H., Park S.W., Harris T.B., et al., The loss of skeletal muscle strength, mass, and quality in older adults: the health, aging and body composition study., *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, **61** (10):1059-1064(2006)
- 2) Cooper R., Kuh D., Hardy R., Objectively measured physical capability levels and mortality: systematic review and meta-analysis., *BMJ.*, **341**:c4467(2010)
- 3) Baskin K.K., Winders B.R., Olson E.N., Muscle as a "mediator" of systemic metabolism., *Cell. Metab.*, **21** (2):237-248(2015)
- 4) Kraemer W.J., Ratamess N.A.: Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **36**:674-688(2004)
- 5) Takarada Y., Takazawa H., Sato, Y., et al.: Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans., *J. Appl. Physiol.*, **88**:2097-2106(2008)
- 6) Takada S., Okita K., Suga T., et al.: Low-intensity exercise can increase muscle mass and strength proportionally to enhanced metabolic stress under

- ischemic conditions., *J. Appl. Physiol.*, **113**:199-205 (2012)
- 7) Suga T., Okita K., Morita N., et al.: Intramuscular Metabolism during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction., *J. Appl. Physiol.*, **106**:1119-24(2009)
 - 8) Suga T., Okita K., Morita N., et al.: Dose Effect on Intramuscular Metabolic Stress during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction., *J. Appl. Physiol.*, **108**:1563-1567(2010)
 - 9) Takada S., Okita K., Suga T., et al.: Blood Flow Restriction Exercise in Sprinters and Endurance Runners., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **44**:413-9(2012)
 - 10) Okita K., Takada S., Morita N., et al.: Resistance training with interval blood flow restriction effectively enhances intramuscular metabolic stress with less ischemic duration and discomfort., *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **44**:759-764(2019)
 - 11) Lamberti N., Straudi S., Donadi M., et al.: Effectiveness of blood flow-restricted slow walking on mobility in severe multiple sclerosis: A pilot randomized trial., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **30**:1999-2009(2020)
 - 12) Petersson N., Langgård Jørgensen S., Kjeldsen T., et al.: Blood Flow Restricted Walking in Elderly Individuals with Knee Osteoarthritis: A Feasibility Study., *J. Rehabil. Med.*, **54**:jrm00282(2022)
 - 13) Colapietro M., Portnoff B., Miller S.J., et al.: Effects of Blood Flow Restriction Training on Clinical Outcomes for Patients With ACL Reconstruction: A Systematic Review., *Sports Health*, **15** (2) :260-273 (2023)
 - 14) Harris R.C., Hultman E., Nordesjö L.O.: Glycogen, glycolytic intermediates and high-energy phosphates determined in biopsy samples of musculus quadriceps femoris of man at rest. Method and variance of values., *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **33**: 109–120(1974)
 - 15) Lanza I.R., Befroy D.E., Kent-Braun J.A.: Age-related changes in ATP producing pathway in human skeletal muscle in vivo., *J. Appl. Physiol.*, **99**: 1736–1744(2005)
 - 16) Okita K., Omokawa M., Takada S., et al.: Muscular stress is equal when resistance exercise with blood flow restriction is matched in total work volume: A cross-sectional, cross-over study., *Acta. Physiol. (Oxf.)*, **240**:e14097(2024)
 - 17) Schoenfeld B.J.: Is there a minimum intensity threshold for resistance training-induced hypertrophic adaptations? *Sports Med.*, **43**: 1279-88 (2013)
 - 18) Wernbom M., Augustsson J., Thomeé R.: The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Med.*, **37** (3) : 225-64(2007)
 - 19) Holm L., Reitelsheder S., Pedersen T.G., et al.: Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity., *J. Appl. Physiol. (1985)*, **105** (5) : 1454-61 (2008)
 - 20) Fry A.C., Kraemer W.J.: Resistance exercise overtraining and overreaching. Neuroendocrine responses. *Sports Med.*, **23** (2) :106-29(1997)

爆発的な膝伸展筋力発揮中の運動神経活動を 非侵襲的に評価する方法の考案

中京大学大学院 西川 太 智
(共同研究者) 中 京 大 学 竹 田 良 祐
中京大学大学院 唐 木 茉里乃
中 京 大 学 渡 邊 航 平

Development of a Non-Invasive Method for Evaluating Motoneuron Activity During Explosive Knee Extensor Contractions

by

Taichi Nishikawa
Chukyo University / Ritsumeikan University
Ryosuke Takeda, Marino Karaki,
Kohei Watanabe
Chukyo University

ABSTRACT

The rate of force development observed during explosive knee extensor contractions is a physiologically meaningful index closely associated with motor performance and physical function, particularly in athletic and aging populations. This rapid force generation is underpinned by distinct motor unit behavior, including high-frequency discharges not typically observed during sustained contractions. This study aimed to determine how anatomical characteristics under the electrode—specifically subcutaneous tissue thickness and fascicle orientation—influence the number of motor units identified from high-density surface electromyography (HD-sEMG) during explosive contractions of the vastus lateralis.

Twelve healthy young adults performed explosive isometric knee extensions while HD-sEMG signals were recorded from the proximal, middle, and distal regions of the vastus lateralis. At each site, subcutaneous tissue thickness and the angle between the skin surface and muscle fascicles were assessed via ultrasonography. Motor unit discharge patterns were extracted using the convolution kernel compensation algorithm. The number of motor units detected during explosive contractions was significantly greater at the proximal and distal regions than at the middle region ($p < 0.001$). The proximal and distal sites yielded more motor units on average compared to the middle site. Significant negative correlations were observed between motor unit count and both subcutaneous tissue thickness ($p = 0.003$, $r = -0.475$) and fascicle angle ($p = 0.002$, $r = -0.506$) across all regions.

In conclusion, the proximal and distal regions of the vastus lateralis provide more favorable recording conditions for HD-sEMG-based motor unit decomposition during explosive contractions. These findings suggest the importance of accounting for local anatomical characteristics in electrode placement when assessing motor unit behavior in explosive contractions tasks.

キーワード

高密度表面筋電図, 外側広筋, 運動単位, 力の立ち上がり率, 筋力

Keyword

high-density surface electromyography, vastus lateralis, motor unit, rate of force development, muscle strength

要 旨

本研究は、爆発的筋力の発揮において外側広筋を対象により多くの運動単位を検出することを目的とし、外側広筋における高密度表面筋電図法による運動単位検出数と電極下の解剖学的特徴との関連を検証した。若年成人12名を対象に、外側広筋の近位・中位・遠位部における皮下組織厚および皮膚表面と筋束の角度を評価し、各部位で高密度表面筋電図を記録した。その結果、爆発的筋力の発揮中における運動単位検出数は中位に比べて近位および遠位で有意に多く ($p < 0.001$)、検出数は皮下組織厚および皮膚表面と筋束の角度と有

意な負の相関を示した ($p < 0.01$)。これらの結果から、外側広筋皮膚表面の近位または遠位への電極貼付が爆発的な膝伸展筋力発揮中の運動単位活動を評価する上で有用であることが明らかになった。また運動単位活動を評価するにあたって、電極下における解剖学的特徴を考慮することの重要性が示唆された。

緒 言

身体運動は、骨格筋が収縮することで発揮される張力が骨に伝わり、関節が運動して遂行される。したがって、筋力発揮能力は、アスリートの競技力や人々の自律した生活に重要である。筋力

発揮能力として、広く認識されている指標の一つに特に時間的制約のない中で随意的に発揮される最も大きな筋力である最大随意筋力 (MVC) がある。一方で、安静から急速に発揮される大きな筋力 (以下、爆発的筋力) によって観察される、限られた時間で発揮される筋力の大きさである力の立ち上がり率 (rate of force development, RFD) は、運動機能と関連する指標である。特に膝伸展筋力発揮の RFD は MVC と比較して、アスリートのスプリントパフォーマンスやジャンプパフォーマンスとより強く関連していることや¹⁾、膝伸展筋力発揮の RFD は MVC とは独立して高齢者の歩行などの身体機能と関連していることが報告されている²⁾。したがって、爆発的な膝伸展筋力発揮能力である RFD の評価や、改善する方策には重要な意義がある。

RFD は MVC とは異なる特異的な生理学的メカニズムによって規定されている。発揮筋力の大きさを規定する生理学的要因として、筋量などの形態学的要因に加えて、脳や脊髄などの中枢から運動神経を介して筋に対する神経入力である神経学的要因がある³⁻⁵⁾。そして、RFD は MVC と比べて神経学的要因の貢献が大きいことが報告されている^{6,7)}。運動神経細胞、運動神経および運動神経が支配する筋線維は運動単位と呼ばれ、運動単位は発揮筋力の大きさを規定する神経学的要因における最終共通経路である⁸⁾。持続的な筋力発揮の際には運動単位の発火頻度は最大で 20pps (pulse per second) から 50pps 程度を記録するが、爆発的な筋力発揮の際には運動単位の発火頻度は 100pps を超える⁹⁾。こうした爆発的筋力の発揮中の特異的な運動単位活動を評価することは重要な意義がある。

近年、2次元平面上に複数の表面筋電図電極を配列し表面筋電図を記録する高密度表面筋電図法と特殊なアルゴリズムによる信号処理を組み合わせることで、個々の運動単位活動を評価すること

が可能になった^{10,11)}。筋の収縮は、脊髄内にある運動神経細胞の興奮に伴う活動電位が運動神経を介して、筋線維へ伝播することで生じる。高密度表面筋電図法は、皮膚表面に設置した複数の電極に対して、Convolution Kernel Compensation (以降 CKC と記す) 法などの解析アルゴリズムを用いて各運動単位の活動電位波形を抽出することで、電極下に位置する筋線維を伝播する活動電位を評価する手法である¹²⁾。この手法は、非侵襲的に、複数の運動単位の活動を評価できる点に特徴がある¹⁰⁾。爆発的な膝伸展筋力発揮中の運動単位活動を高密度表面筋電図法によって評価する際、検出される運動単位の個数は、爆発的筋力の発揮を支える生理学的メカニズムを検証するにあたって重要である。

高密度表面筋電図法を用いた運動単位活動の評価において、検出される運動単位の個数は電極下における皮下組織などの解剖学的特徴の影響を受ける¹³⁾。例えば、電極下における皮下組織厚が厚くなると、高密度筋電図法によって検出される運動単位の数が減少することが報告されている¹³⁾。また、先行研究では紡錘状筋は羽状筋と比較して、検出される運動単位活動電位の形状における多様性が低いことが報告されている¹⁴⁾。したがって、電極下における皮下組織厚や皮膚表面と筋束の角度は、爆発的な筋力発揮中における高密度表面筋電図法を用いた運動単位の数に影響を及ぼすことが考えられる。膝伸展筋群の一つである外側広筋は、筋の構造が近位と遠位では構造が異なり、羽状角や皮下組織厚が部位によって変化するため¹⁵⁻¹⁷⁾、電極貼付位置の違いによって検出される運動単位の数が異なる可能性がある。そこで本研究は、爆発的筋力の発揮中において外側広筋を対象により多くの運動単位を検出することを目的として、外側広筋の近位部、中位部、遠位部における 1) 皮下組織厚、皮膚表面と筋束の角度を評価し、2) 爆発的筋力の発揮中に高密度表

面筋電図法を用いた運動単位の検出数との関連を検証した。

1. 研究方法

1. 1 対象者

若年成人12名（男性：8名，女性4名，年齢：21 ± 2歳，身長：163.2 ± 11.0cm，体重：64.1 ± 8.9kg）が本研究に参加した。すべての参加者は，本実験の内容及び危険性等の説明を受け，書面による参加の同意を得た。本実験はヘルシンキ宣言の原則に従い，中京大学における人を対象とする研究に関する倫理審査委員会（承認番号：2019-003）の承認を得て行われた。

1. 2 実験概要

参加者は実験室を2度訪れ，1度目は順化試行，2度目は測定を実施した。参加者は，身長と体重を測定後，股関節および膝関節角度を内角90度に固定し，着座した。右脚を対象に大転子から膝蓋骨外側上顆を結ぶ直線を4分割する3点を，それぞれ外側広筋の近位，中位，遠位とした（図1）。参加者は，超音波画像診断装置を用いた形態の評価を行い，その後爆発的な等尺性膝伸展筋力発揮中の高密度表面筋電図法を用いた運動単位活動の評価を実施した。

1. 3 超音波画像診断法

10MHzのリニアアレイ超音波プローブを備えた超音波診断装置（LOGIQ e Premium, GE Healthcare）を用いて，右脚の外側広筋の近位，中位，遠位を対象に超音波画像を撮影した。プローブの圧力を最小限に抑え，大腿骨表面が最も明るくなるようにプローブの角度を調整しながら，各部位でそれぞれ2つの縦断画像を取得した。皮下組織厚は，皮膚表面と脂肪組織の境界から脂肪組織と外側広筋の境界までの距離を測定し，2つの画像の平均値を算出した。皮膚表面と筋束の角度

は，皮膚表面の角度を0度とし，皮膚表面と外側広筋の筋束のなす角度を測定し，2つの画像の平均値を算出した。

1. 4 爆発的な等尺性膝伸展筋力発揮課題

参加者は，膝伸展筋力測定器（竹井機器工業，新潟，日本）に着座し，股関節と膝関節の角度を内角90度，力センサー（共和電業，愛知，日本）を腓骨外果と水平になるように，ベルトを用いて固定された。測定された発揮筋力は，膝関節中心から力センサーまでの鉛直距離をモーメントアームとするトルクに換算された。

ウォーミングアップとして，最大努力の30%，50%，80%で等尺性膝伸展筋力発揮を実施した。その後，RFDの測定のために，MVCを測定した。MVCは2回測定を実施し，5%以上増加した場合は，再度測定を行い，最高値をMVCとした。MVCの測定から4分の休憩を取り，それぞれ6回の爆発的筋力の発揮を3セット，計18回実施した。各筋力発揮の間には20秒の休憩を取り，セット間は2分間の休憩を取った。参加者は，できるだけ速く，爆発的に膝伸展筋力発揮を実施するように指示された⁷⁾。発揮筋力は参加者の目の前に設置されたモニターを通じて視覚的にフィードバックされた。爆発的な筋力発揮中は，モニター上に発揮筋力の目標値として75%MVCが表示された。運動単位活動の解析のため，爆発的筋力を発揮し，到達した発揮筋力は3秒間維持された。参加者は，予備動作をしないこと，姿勢を変化させないことが指示された。

発揮筋力は，2000Hzで計測され，16ビットアナログ／デジタル変換器（Sessantaquattro, OT Bioelectronica, Torino, Italy）でデジタル形式に変換した^{1, 6)}。先行研究に則り，発揮筋力は400Hzで低域通過濾波を適用した。筋力の発揮タイミングは，先行研究に則り，視覚的に特定した^{6, 7, 18)}。その後，発揮筋力は20Hzで再度，低域通過

濾波を適用した。各セットで記録された6回の試行のうち、150ms時点で大きな発揮筋力を記録した3回の試行をその後の解析に用いた。

1. 5 高密度表面筋電図法

運動単位活動は、高密度表面筋電図法およびCKC法によって測定された。高密度表面筋電図として、直径1mm、電極間距離8mmの電極64個が設置されたマトリックス電極 (GR08MM1305, OT Bioelettronica, Turin, Italy) を用いた。電極は13列5行に配置され、左下の隅の電極が1つ欠けていた。電極は、近位、中位、遠位の3箇所 に貼付された。セットが終了した時点で、記録する部位を変更し、無作為な順番で各部位の高密度表面筋電図が記録された。リファレンス電極としてベルト型電極 (WS2, OT Bioelettronica, Turin, Italy) を脛骨近位部に設置した。筋電図信号は、2000Hzで計測し、256倍に増幅された。その後、計測された信号に対して10-500Hzの範囲で帯域通過濾波を適用し、16ビットアナログ/デジタル変換器 (Sessantaquattro, OT Bioelettronica, Torino, Italy) でデジタル形式に変換した。

得られた高密度表面筋電図から、DEMUSEソフトウェア¹⁹⁾のCKC法を用いて、各運動単位の発火タイミングが検出された。随意筋力発揮中、複数の運動単位の活動電位は、重なり合うことで形成された相互干渉波形に由来した表面筋電図として皮膚表面から計測される。取得された高密度表面筋電図は、ブラインド信号源分離と呼ばれる混合信号をもとに信号源に分離する信号処理技術を用いて、各運動単位の活動波形を推定し、各運動単位の発火タイミングを評価した¹⁹⁻²¹⁾。運動単位活動電位以外の信号成分の混入度合いを示すパルスノイズ比を運動単位の識別精度の指標として、パルスノイズ比が基準を満たす (>30dB) 運動単位をさらなる解析に利用した²²⁾。解析ソフトウェアで同定された各運動単位の発火タイミン

グは、1名の経験豊富な研究者が視覚的に妥当性を確認し、各運動単位のパルスノイズ比を増加させる発火を採用し、低下させる発火を除外した⁶⁾。

1. 6 統計解析

結果は、平均値±標準偏差で報告する。統計分析はSPSS version 21.0 (日本アイ・ビー・エム, 東京, 日本) およびRstudio version 2024. 12. 1+563 (PBC, Boston, USA) を使用した。データの正規性はShapiro-Wilk検定で評価し、すべての変数において正規性が認められた。皮下組織厚、皮膚表面と筋束の角度、検出された運動単位の数は対応のある一元配置分散分析を用いて比較した。有意な主効果が認められた場合は、Bonferroni法によって事後検定を実施した。また、検出された運動単位の数と皮下組織厚または皮膚表面と筋束の角度の関係はPearson積率相関分析を用いて、部位ごとおよび3部位の合計を解析した。個人内の検出された運動単位の数と皮下組織厚または皮膚表面と筋束の角度の関係は、Rパッケージを用いて²³⁾、反復測定相関分析によって解析された。

2. 研究結果

皮下組織厚において、部位間で有意な主効果が認められた ($F(2,22) = 29.9, p < 0.001$) (図1A)。事後検定の結果、皮下組織厚は近位と比較して、中位および遠位は有意に小さく (いずれも $p < 0.001$)、中位と比較して遠位は有意に小さかった ($p = 0.016$) (図1A)。

皮膚表面と筋束の角度において、部位間で有意な主効果が認められた ($F(2,22) = 611.3, p < 0.001$) (図1B)。事後検定の結果、皮膚表面と筋束の角度は中位と比較して、近位および遠位は有意に小さく、遠位と比較して近位で有意に小さかった (いずれも $p < 0.001$) (図1B)。

爆発的な筋力発揮中に検出された運動単位の数において、部位間で有意な主効果が認められた (F

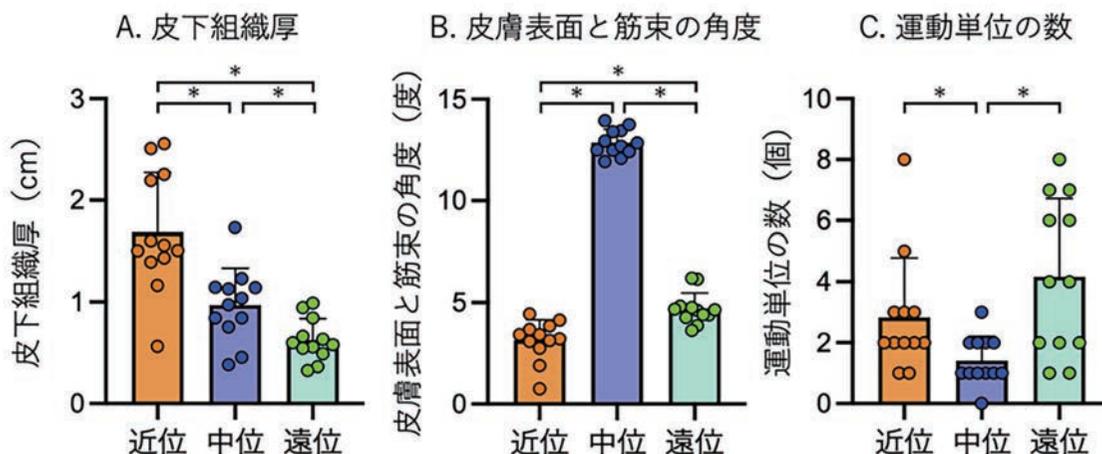


図1 皮下組織厚(A), 皮膚表面と筋束の角度(B), 検出された運動単位の数(C)
 円は対象者個人の値, 棒グラフは平均と標準偏差を表す. * $p < 0.05$

(2.22) = 12.1, $p < 0.001$) (図1C). 事後検定の結果, 検出された運動単位の数は, 中位と比較して近位 ($p = 0.022$) と遠位 ($p = 0.003$) で有意に多かったが, 近位と遠位では有意な差はなかった ($p = 0.163$) (図1C).

各部位および各部位の合計において, 検出された運動単位の数は, 皮下組織厚 (図2A) (近位: $p = 0.003$, 中位: $p < 0.001$, 遠位: $p = 0.014$, 合計: $p = 0.003$) および皮膚表面と筋束の角度は有意に負の相関 (近位: $p = 0.007$, 中位: $p = 0.040$, 遠位: $p = 0.015$, 合計: $p = 0.002$) を示した (図2B). また反復測定相関分析において, 検出された運動単位の数は, 皮膚表面と筋束の角度とは有意な負の個人内相関を示し ($p = 0.011$) (図2C), 皮下組織厚は負の個人内相関の傾向を示した ($p = 0.100$) (図2D).

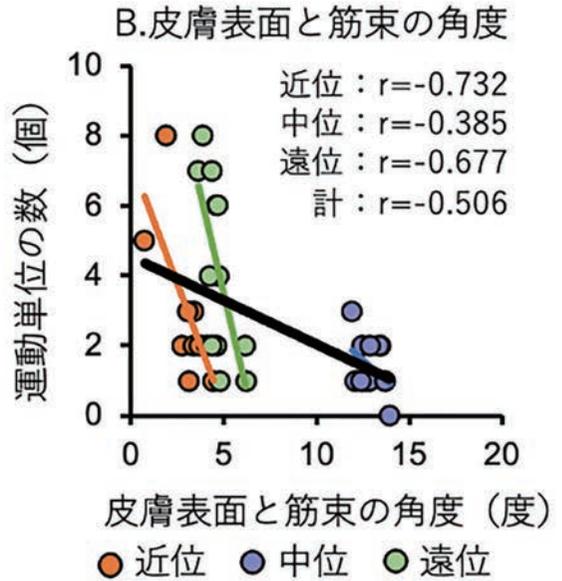
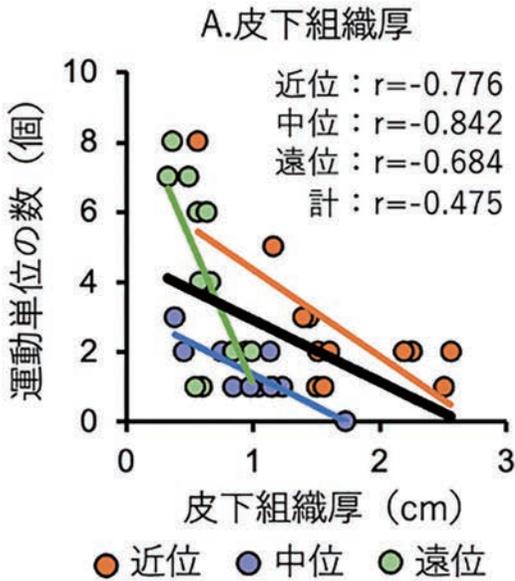
3. 考 察

本研究では, 爆発的筋力の発揮中において外側広筋を対象により多くの運動単位を検出することを目的として, 外側広筋の近位部, 中位部, 遠位部における解剖学的特徴と高密度表面筋電図法を用いた運動単位の検出数の関連を検証した. その結果, 外側広筋の遠位に高密度表面筋電図電極を

貼付することで, 外側広筋の中位や近位と比較して, 爆発的筋力の発揮における運動単位を多く検出できることが明らかになった (図1C). また, 爆発的筋力の発揮中に検出される運動単位の個数は, 皮下組織厚や皮膚表面と筋束の角度などの電極下の解剖学的特徴と関連することが示された (図2).

本研究では, 外側広筋を対象に筋電図電極を貼付する際に, 電極貼付位置における近位と比較して中位と遠位, 中位と比較して遠位で皮下組織厚は小さいことが示された (図1A). 複数の先行研究において, 外側広筋における筋エコー強度の部位差と皮下組織厚に基づく補正の影響を検討し, 補正前のエコー強度は近位と比較して中位および遠位で高く, 皮下組織厚に基づいて補正を行うことでこの部位差が顕著に縮小したことを報告している^{24, 25)}. このことは, 外側広筋において皮下組織厚が近位よりも中位, 中位よりも遠位で小さいことを示している. また, 本研究では外側広筋において, 中位と比較して近位と遠位, 遠位と比較して近位で皮膚表面と筋束の角度が小さかった (図1B). 外側広筋の近位, 中位, 遠位の羽状角を評価した先行研究では, 中位において, 最も羽状角が大きかったことを報告している¹⁵⁾. これ

部位別



個人別

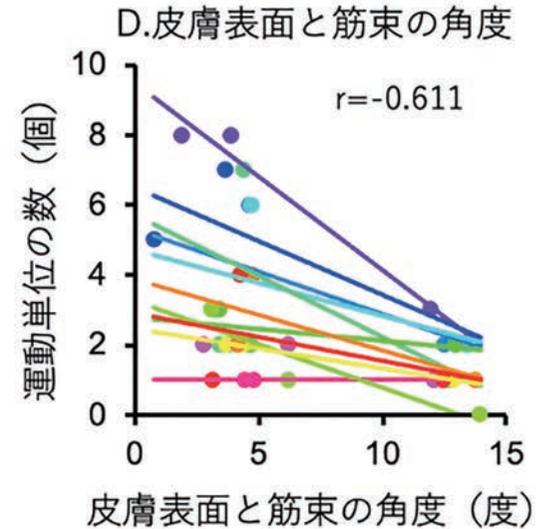
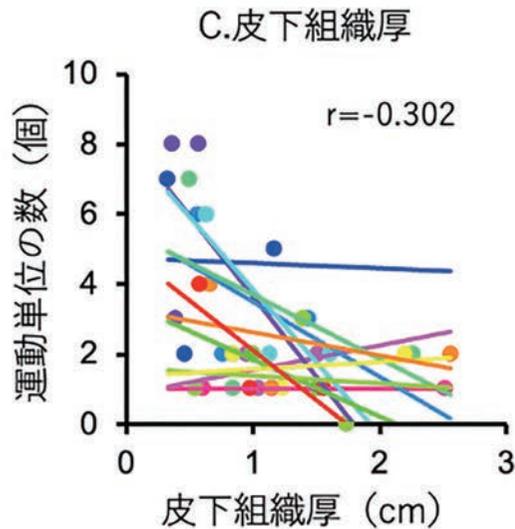


図2 検出された運動単位の数と皮下組織厚または皮膚表面と筋束の角度の関係

AとBは、測定部位別で表現した検出された運動単位の数と皮下組織厚(A)または皮膚表面と筋束の角度の関係(B)。円および線は対象者個人のデータ、回帰直線を示す。黒色の線は、すべての部位を合算した場合の回帰直線。CとDは、個人別で表現した検出された運動単位の数と皮下組織厚(C)または皮膚表面と筋束の角度の関係(D)。各対象者を異なる色で示す。

らの結果は、本研究で用いられた外側広筋を対象とした高密度表面筋電図電極の貼付において、貼付位置によって電極下における解剖学的特徴が異なることを示している。

本研究では、爆発的な筋力発揮中において、中位と比較して、近位および遠位でより多くの運動単位が高密度表面筋電図法によって取得された(図1C)。さらに、取得された運動単位の個数は、

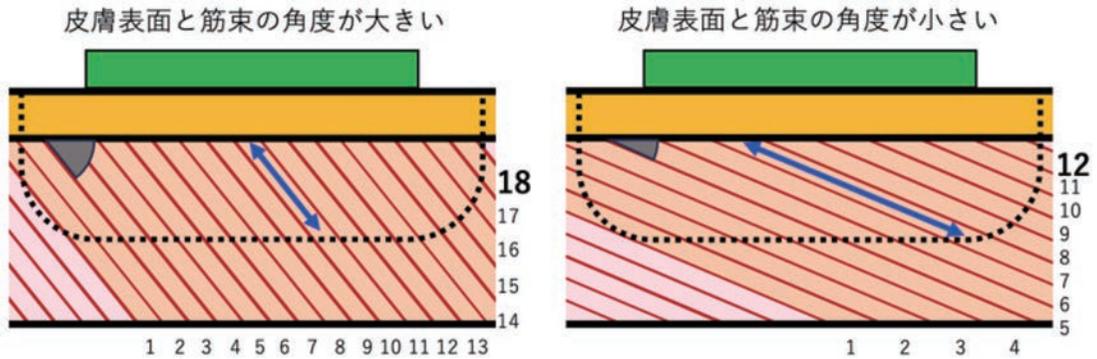


図3 皮膚表面と筋束の角度と検出領域に含まれる筋線維の数と長さの関係のモデル図

緑色の四角は高密度表面筋電図電極, 黒色の点線は電極の検出領域, 黄色は皮下組織, 桃色の領域は検出領域に含まれない筋線維, 橙色の領域は検出領域に含まれる筋線維, 数字は検出領域に含まれる筋線維の数, 青色の矢印は検出領域内に含まれる個々の筋線維の長さを示す。

電極下における解剖学的特徴と関連することが示された(図2)。持続的な筋力発揮中の外側広筋の運動単位を評価した先行研究の多くは, 中位や^{26, 27, 28)}, 遠位に電極を貼付することが多い²⁹⁾。本研究では, 取得された運動単位の数は, 電極下の皮下組織厚と有意な負の相関が示された。先行研究は, 皮下組織厚と高密度表面筋電図法によって取得される運動単位の数には, 有意な負の相関があることを報告している¹³⁾。皮下組織厚は, 運動単位から取得される電気信号の高い周波数の成分を減減する, いわゆる低域通過濾波としてはたらく³⁰⁾。このことは, 異なる活動電位が類似することになり, 高密度表面筋電図を用いた運動単位の活動電位の識別に必要な情報量の減少を招く¹⁰⁾。これらの先行研究の結果は, 本研究の結果と一致している。また, 本研究では, 取得された運動単位の数は, 皮膚表面と筋束の角度と負の相関を示した。高密度表面筋電図法を用いて持続的な筋力発揮中の運動単位を解析した先行研究では, 皮膚表面と筋束の角度が小さい紡錘状筋である上腕二頭筋は, 皮膚表面と筋束の角度が大きい羽状筋である前脛骨筋と比較して, 高密度表面筋電図法を用いて検出される運動単位の個数が少なかったことを明らかにしている¹⁴⁾。この結果は, 本研究の結果とは一致しない。先行研究では, 紡錘状筋は羽状筋と比較して, 運動単位活動電位

の形状の多様性が低いことが報告されている¹⁴⁾。皮膚表面と筋束の角度が大きい場合, 皮膚表面と筋束の角度が小さい場合と比較して, 電極の検出領域内に含まれる筋線維の数は多くなるが, 検出領域内に含まれる個々の筋線維の長さは短くなる(図3)。このことは, 持続的な筋力発揮を検証した先行研究と, 爆発的筋力の発揮を検証した本研究において結果が異なる要因である可能性がある。本研究の結果から, 爆発的な筋力発揮中の運動単位活動を評価するにあたって, 対象とする筋の電極下における解剖学的な特徴を考慮して, 電極貼付位置を決定することが, 検出される運動単位の数において重要であることが示唆された。

膝伸展筋力発揮のRFDはMVCと比較して, アスリートの運動パフォーマンスや¹⁾, 高齢者の身体機能と関連しており²⁾, こうした爆発的筋力の発揮中は特異的な運動単位活動によって実施されている。したがって, 本研究で示された高密度表面筋電図法を用いた爆発的筋力の発揮中における運動単位の検出数と解剖学的特徴の関連は, トレーニング科学や健康科学において重要な示唆を与える。本研究で用いられた高密度表面筋電図法は, 爆発的な筋力発揮中の運動単位活動の急性変化または慢性変化を非侵襲的に評価することができる。先行研究では, RFDが単回の運動前後において, MVCよりも大きく急性的に低下するこ

とから、神経筋系の疲労の指標として利用できる可能性を示している³¹⁾。また、中程度の強度で実施されることが多いアスリートを対象とした従来のリハビリテーションプログラムの実施において、MVCは回復する一方で、RFDが回復しないことが報告されている³²⁾。また、特定の筋力トレーニングはMVCを増加させた一方で、RFDおよび爆発的な筋力発揮中の運動単位活動は改善しないことを報告しており、RFDを改善するためには、特異的なトレーニングが必要である可能性が指摘されている³³⁾。また、加齢や神経疾患による神経活動の変性において、RFDはMVC以上に早期に変化を捉える指標となる可能性が示されている^{34, 35)}。本研究は、アスリートのコンディショニング、トレーニングやリハビリテーションのプログラム立案、加齢や神経疾患などに用いられるバイオマーカーとしてのRFDおよびそれを支える生理メカニズムである運動単位活動の評価方法に重要な示唆を与える。今後は、本研究で提供される方法論的知見をもとに、RFDおよびそれを支える生理メカニズムである運動単位活動の評価を通じて、アスリートのコンディショニング、トレーニングやリハビリテーションのプログラム立案、加齢や神経疾患の早期発見など、各種研究領域で詳細な検討が行われることが期待される。

結 論

本研究では、高密度表面筋電図法を用いた爆発的筋力の発揮中における外側広筋の運動単位活動の記録において、電極を外側広筋の皮膚表面における遠位または近位に貼付することによって、中に貼付する場合と比較して、より多くの運動単位が検出できることが明らかになった。また、こうした電極貼付位置の違いによる運動単位の検出数の違いには、電極下における皮下組織厚および皮膚表面と筋束の角度が関連していることが示された。

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) Tillin N.A., Pain M.T., Folland J.: Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players, *J. Sports Sci.*, **31**: 66-76, 2013. doi: 10.1080/02640414.720704(2012)
- 2) Osawa Y., Studenski S.A., Ferrucci L.: Knee extension rate of torque development and peak torque: associations with lower extremity function, *J. Cachexia Sarcopenia Muscle*, **9**: 530-539, doi: 10.1002/jcsm.12285(2018)
- 3) Moritani T.: Neuromuscular adaptations during the acquisition of muscle strength, power and motor tasks, *J. Biomech.*, **26** Suppl 1: 95-107, doi: 10.1016/0021-9290(93)90082-p(1993)
- 4) Moritani T., deVries H.A.: Potential for gross muscle hypertrophy in older men, *J. Gerontol.*, **35**: 672-682, doi: 10.1093/geronj/35.5.672(1980)
- 5) Balshaw T.G., Massey G.J., Maden-Wilkinson T.M., Morales-Artacho A.J., McKeown A., Appleby C.L., Folland J.P.: Changes in agonist neural drive, hypertrophy and pre-training strength all contribute to the individual strength gains after resistance training, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **117**: 631-640, doi: 10.1007/s00421-017-3560-x(2017)
- 6) Del Vecchio A., Negro F., Holobar A., Casolo A., Folland J.P., Felici F., Farina D.: You are as fast as your motor neurons: speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans, *J. Physiol.*, **597**: 2445-2456, doi: 10.1113/JP277396(2019)
- 7) Maffiuletti N.A., Aagaard P., Blazevich A.J., Folland J., Tillin N., Duchateau J.: Rate of force development: physiological and methodological considerations, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **116**: 1091-1116, doi: 10.1007/s00421-016-3346-6(2016)
- 8) Hunter S.K., Pereira H.M., Keenan K.G.: The aging neuromuscular system and motor performance, *J.*

- Appl. Physiol. (1985)*, **121**: 982-995, doi: 10.1152/jappphysiol.00475.2016(2016)
- 9) Duchateau J., Baudry S.: Maximal discharge rate of motor units determines the maximal rate of force development during ballistic contractions in human, *Front. Hum. Neurosci.*, **8**: 234, doi: 10.3389/fnhum.2014.00234(2014)
 - 10) Del Vecchio A., Holobar A., Falla D., Felici F., Enoka R.M., Farina D.: Tutorial: Analysis of motor unit discharge characteristics from high-density surface EMG signals, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **53**: 102426, 2020. doi: 10.1016/j.jelekin.102426(2020)
 - 11) Martinez-Valdes E., Enoka R.M., Holobar A., McGill K., Farina D., Besomi M., Hug F., Falla D., Carson R.G., Clancy E.A., Disselhorst-Klug C., van Dieen J.H., Tucker K., Gandevia S., Lowery M., Sogaard K., Besier T., Merletti R., Kiernan M.C., Rothwell J.C., Perreault E., Hodges P.W.: Consensus for experimental design in electromyography (CEDE) project: Single motor unit matrix, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **68**: 102726, doi: 10.1016/j.jelekin.2022.102726(2023)
 - 12) Holobar A., Farina D., Gazzoni M., Merletti R., Zazula D.: Estimating motor unit discharge patterns from high-density surface electromyogram, *Clin. Neurophysiol.*, **120**: 551-562, doi: 10.1016/j.clinph.2008.10.160(2009)
 - 13) Oliveira D.S., Casolo A., Balshaw T.G., Maeo S., Lanza M.B., Martin N.R.W., Maffulli N., Kinfe T.M., Eskofier B.M., Folland J.P., Farina D., Del Vecchio A.: Neural decoding from surface high-density EMG signals: influence of anatomy and synchronization on the number of identified motor units, *J. Neural. Eng.*, **19**, doi: 10.1088/1741-2552/ac823d(2022)
 - 14) Francic A., Holobar A.: On the Reuse of Motor Unit Filters in High Density Surface Electromyograms Recorded at Different Contraction Levels, *Ieee Access*, **9**: 115227-115236, doi: 10.1109/Access.2021.3104762(2021)
 - 15) Blazeovich A.J., Gill N.D., Zhou S.: Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo, *J. Anat.*, **209**: 289-310, doi: 10.1111/j.1469-7580.2006.00619.x(2006)
 - 16) Martin-Rodriguez S., Gonzalez-Henriquez J.J., Diaz-Conde J.C., Calbet J.A.L., Sanchis-Moysi J.: The relationship between muscle thickness and pennation angle is mediated by fascicle length in the muscles of the lower extremities, *Sci. Rep.*, **14**: 14847, doi: 10.1038/s41598-024-65100-6(2024)
 - 17) Lanza M.B., Baghi R., Frakes N., Lateef S., Martins L.T.C., Zhang L.Q., Gray V.L.: Differences in muscle morphology assessed by ultrasound at various muscle regions and their impact on voluntary and involuntary force production, *Sci. Rep.*, **15**: 9247, doi: 10.1038/s41598-025-94158-z(2025)
 - 18) Tillin N.A., Jimenez-Reyes P., Pain M.T., Folland J.P.: Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42**: 781-790, doi: 10.1249/MSS.0b013e3181be9c7e(2010)
 - 19) Holobar A., Zazula D.: Multichannel blind source separation using convolution kernel compensation, *Ieee Transactions on Signal Processing*, **55**: 4487-4496, doi: 10.1109/Tsp.2007.896108(2007)
 - 20) Holobar A., Minetto M.A., Farina D.: Accurate identification of motor unit discharge patterns from high-density surface EMG and validation with a novel signal-based performance metric, *J. Neural. Eng.*, **11**: 016008, doi: 10.1088/1741-2560/11/1/016008(2014)
 - 21) Holobar A., Zazula D.: Correlation-based decomposition of surface electromyograms at low contraction forces, *Med. Biol. Eng. Comput.*, **42**: 487-495, doi: 10.1007/BF02350989(2004)
 - 22) Del Vecchio A., Casolo A., Negro F., Scorcelletti M., Bazzucchi I., Enoka R., Felici F., Farina D.: The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding, *J. Physiol.*, **597**: 1873-1887, doi: 10.1113/JP277250(2019)
 - 23) Bakdash J. Z., Marusich L.R.: Repeated Measures Correlation, *Front. Psychol.*, **8**: 456, doi: 10.3389/fpsyg.2017.00456(2017)
 - 24) Stock M.S., Oranchuk D.J., Burton A.M., Phan D.C.: Age-, sex-, and region-specific differences in skeletal muscle size and quality, *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **45**: 1253-1260, doi: 10.1139/apnm-2020-0114(2020)
 - 25) Oranchuk D.J., Stock M.S., Nelson A.R., Storey A.G., Cronin J.B.: Variability of regional quadriceps echo intensity in active young men with and without subcutaneous fat correction, *Appl. Physiol. Nutr.*

- Metab.*, **45**: 745-752, doi: 10.1139/apnm-2019-0601 (2020)
- 26) Nishikawa T., Takeda R., Ueda S., Igawa K., Hirono T., Okudaira M., Mita Y., Ohya T., Watanabe K.: Quercetin ingestion alters motor unit behavior and enhances improvement in muscle strength following resistance training in older adults: a randomized, double-blind, controlled trial, *Eur. J. Nutr.*, **64**: 117, doi: 10.1007/s00394-025-03634-9 (2025)
- 27) Watanabe K., Holobar A., Kouzaki M., Ogawa M., Akima H., Moritani T.: Age-related changes in motor unit firing pattern of vastus lateralis muscle during low-moderate contraction, *Age. (Dordr.)*, **38**: 48, doi: 10.1007/s11357-016-9915-0 (2016)
- 28) Hirono T., Igawa K., Okudaira M., Takeda R., Nishikawa T., Watanabe K.: Time-of-day effects on motor unit firing and muscle contractile properties in humans, *J. Neurophysiol.*, **131**: 472-479, doi: 10.1152/jn.00368.2023 (2024)
- 29) Martinez-Valdes E., Negro F., Falla D., De Nunzio A.M., Farina D.: Surface electromyographic amplitude does not identify differences in neural drive to synergistic muscles, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **124**: 1071-1079, doi: 10.1152/jappphysiol.01115.2017 (2018)
- 30) Farina D., Negro F., Gazzoni M., Enoka R.M.: Detecting the unique representation of motor-unit action potentials in the surface electromyogram, *J. Neurophysiol.*, **100**: 1223-1233, doi: 10.1152/jn.90219.2008 (2008)
- 31) D'Emanuele S., Maffioletti N.A., Tarperi C., Rainoldi A., Schena F., Boccia G.: Rate of Force Development as an Indicator of Neuromuscular Fatigue: A Scoping Review, *Front. Hum. Neurosci.*, **15**: 701916, doi: 10.3389/fnhum.2021.701916 (2021)
- 32) Buckthorpe M., Roi G.S.: The time has come to incorporate a greater focus on rate of force development training in the sports injury rehabilitation process, *Muscles Ligaments Tendons J.*, **7**: 435-441, doi: 10.11138/mltj/2017.7.3.435 (2017)
- 33) Del Vecchio A., Casolo A., Dideriksen J.L., Aagaard P., Felici F., Falla D., Farina D.: Lack of increased rate of force development after strength training is explained by specific neural, not muscular, motor unit adaptations, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **132**: 84-94, doi: 10.1152/jappphysiol.00218.2021 (2022)
- 34) Lomborg S.D., Dalgas U., Hvid L.G.: The importance of neuromuscular rate of force development for physical function in aging and common neurodegenerative disorders - a systematic review, *J. Musculoskelet. Neuronal Interact.*, **22**: 562-586 (2022)
- 35) Kamo T., Asahi R., Azami M., Ogihara H., Ikeda T., Suzuki K., Nishida Y.: Rate of torque development and the risk of falls among community dwelling older adults in Japan, *Gait. Posture.*, **72**: 28-33, doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.05.019 (2019)

筋・軟部組織の滑走性から筋疲労度を判定する AI システムの構築

令和健康科学大学 中井雄貴
(共同研究者) 第一工科大学 渋谷良太
同 竹下康文

Development of a System to Estimate Muscle Fatigue Level and Provide Feedback Based on Muscle and Soft Tissue Gliding

by

Yuki Nakai

*Department of Physical Therapy, Faculty of Rehabilitation,
Reiwa Health Sciences University*

Ryota Shibusawa, Yasufumi Takeshita

*Department of Information, Artificial Intelligence and Data Science,
Daiichi Institute of Technology*

ABSTRACT

This study aimed to investigate the relationship between changes in fascial glide, ankle dorsiflexion flexibility, jump performance, and subjective fatigue (measured by the Visual Analog Scale; VAS) before and after running. Seventeen collegiate long-distance runners participated in this study. Fascial glide was evaluated by acquiring dynamic ultrasound images of the lower leg and calculating cross-correlation coefficients between the fascia and muscle layers. The differences (Δ values) of each variable before and after treadmill running were analyzed using Lasso regression. Cross-validation determined the optimal regularization parameter (α) as 0.163. Among the predictors, the standardized regression coefficient for Δ fascial glide

was the highest ($\beta = 0.271$), indicating the strongest contribution to changes in VAS scores. This result suggests that a decrease in fascial glide is closely associated with an increase in subjective fatigue. The findings provide preliminary evidence that quantifying fascial glide may serve as a useful objective indicator for fatigue assessment. This study highlights the potential importance of fascial mobility as a target for both fatigue monitoring and future AI-based prediction systems.

キーワード

滑走性係数, 主観的疲労感, Lasso回帰, 長距離走選手, 超音波エコー

Keyword

glide coefficient, subjective fatigue, lasso regression, runners, ultrasonography

要 旨

本研究では、ランニング前後の筋膜の滑走性・足関節背屈柔軟性・ジャンプ能力の変化量と、主観的疲労感（VASスコア）の変化量との関連性を検証することを目的とした。筋膜の滑走性は超音波エコーを用いて下腿の筋膜と筋の動画を撮影し、相互相関係数を算出した。参加者は大学陸上長距離選手17名であり、各指標のランニング前後の差分（ Δ ）を用いてLasso回帰分析を実施した。交差検証の結果、最適な正則化パラメータ（ α ）は0.163と決定され、 Δ 滑走性係数の標準化回帰係数が0.271と最も高く、VASの変化に対する寄与が大きいことが示された。これにより、滑走性の低下が主観的疲労感の増大に強く関与している可能性が示唆された。本研究は、疲労を客観的に捉える指標として滑走性の評価が重要な役割を担うことを示す初期的な知見を提供するものである。

緒 言

笹川スポーツ財団調査では、週2回以上、1回30分以上、運動強度「ややきつい」以上の運動・スポーツ実施者は18歳以上で推計2,100万人にの

ぼる。スポーツ障害は20 - 30%の割合で発生し、そのうち37% - 68%がオーバーユースによる¹⁾。障害予防にオーバーユースの把握は重要だが、自己評価のアンケート調査が主である。身体的問題を抱えたまま参加を続けるアスリートが多く、オーバーユース障害は過小評価されやすい²⁾。アスリートはオーバーユースにより、筋の張りや重怠さをよく訴える。筋のエネルギー不足による一過性の代謝的な問題ではなく、数日間持続する器質的な問題でありFascia異常が関与する。Fasciaは筋膜を含む線維性結合組織の総称で2018年に国際疾病分類（ICD-11）の改正で記載された。オーバーユースによる反復動作は筋や組織の炎症と修復によりFasciaの癒着を伴う。長時間運動による筋の持続的な緊張はFasciaを硬くし柔軟性低下を来す。Fasciaは皮下から深部組織まで存在し、筋膜間では滑走に関与する。Fasciaをリリースする治療が疼痛と可動域や機能改善に効果を示している³⁾。しかし、Fasciaの癒着による筋膜間の滑走性低下をオーバーユースによる筋疲労の指標とした報告はない。

スポーツ障害調査の多くは「練習参加が制限される状態（時間的損失）」を障害の定義とし、その期間が長いほど重症度が高いと考えら

れてきた。これに対して、オーバーユース障害の有病率や重症度の縦断的観察を可能とする Oslo Sports Trauma Research Centre overuse injury questionnaire が開発され⁴⁾、諸外国では様々な競技で調査報告されている。これは過去1週間の疼痛レベルと練習や試合への参加やパフォーマンスに対する障害の影響についての質問票である。しかし、これは主観的な質問調査であり、過小評価されやすい問題がある。他にも筋疲労の測定方法として、運動による筋の血中乳酸濃度測定や交感神経作用による唾液アミラーゼ濃度測定がある。これらは他の要素や変動が大きく身体の特定位は不明であり、客観性に欠ける。筋電図測定もあるが手間と解析に時間がかかる。筋力や可動域測定は外的評価であり、どの生体組織が原因かわからない。

そこで本研究では、陸上長距離選手に対して、ランニング前後の客観的な筋・筋膜の動態変化が主観的な疲労感を予測する有効な指標となり得るか検証することを目的とした。

1. 研究方法

1.1 対象

対象は大学男性長距離ランナーとし、半年以内に骨折や既往、怪我が無い17名が参加した (20.1 ± 0.8歳, 170.1 ± 4.5 cm, 54.6 ± 3.9 kg)。週に5日～6日、一日平均20 km以上走行しており、陸上歴は7.7 ± 3.4年、5000 mのベストタイムは15分36秒 ± 36秒を有するランナー集団であった。研究倫理委員会の承認 (R5_006) を得て、ヘルシンキ宣言に則り研究の説明を行い口頭と書面にて全ての対象者に同意を得て実施した。

1.2 介入方法

測定を行う前にウォーミングアップとして踵上げ、スクワット、カウンタームーブメントジャンプを各10回、2セット行った。事前測定として荷

重位足関節ランジテスト (Weight-Bearing Lunge Test, WBLT)、主観的疲労感 (Visual Analog Scale, VAS)、超音波エコー、5回リバウンドジャンプによる反応筋力指数 (Reactive Strength Index, RSI) の順で測定した。乱数表によりランダムに測定する片脚を決定した。トレッドミルに慣れるために時速10km/hで1分間のランニングを実施し、その後時速10km/hから8分毎に時速2km/hずつ上げ、時速16km/hまで計32分間のランニングを行った。この設定は、対象である大学男子長距離ランナーの通常のペース走に相当し、VO₂maxの約75～85%程度に該当する運動強度であると想定し設定した。汗の清拭と水分補給のため3分間の休憩後に一連の事後測定を行った。

1.3 評価方法

1.3.1 荷重位足関節ランジテスト (Weight-Bearing Lunge Test, WBLT)

WBLTは足関節背屈可動域を評価するテストである。両手を壁に付け、計測する足側の踵が床から離れないようにし、計測する側の膝が壁に触れる位置まで近づける。母趾先端から壁までの距離を計測した⁵⁾。

1.3.2 主観的疲労感 (Visual Analog Scale, VAS)

下腿筋の疲労感を評価するためにVASを用いた⁶⁾。左端を疲労感が無い (0mm)、右端を最も疲労感がある (100mm) として、ランニング前後に参加者に下腿の疲労感を記入してもらい主観的疲労感を数値化した。

1.3.3 超音波エコー動画分析

本研究では下腿後面の動画を超音波画像診断装置 (SONIMAGE MX1 a, KONICA MINOLTA Inc.) を使用し撮像した。高感度広帯域リニアプローブ (L11-3, KONICA MINOLTA Inc.) を腓腹

筋内側等近位1/3に長軸方向に当てて固定した。サンプリング周波数は30Hzに設定した。介入中にプローブが動かないように、プローブの固定装置を設計図作成CAD (Rhino7, Robert McNeel & Associates) で描画し、3Dプリンター (Form2, Formlabs Inc.) で作成した。プローブを固定した状態でステップ台に踵を出して乗り、60bpmに設定したデジタルメトロノーム (ME-150, YAMAHA Inc.) でリズムに合わせて踵を1秒で下げて1秒で水平まで戻して1秒で上げてそのままキープする一連の動きを行った (図1)。練習後に3回測定した。本研究では、経験豊富な理学療法士1名が超音波エコーの操作と解析を行った。測定環境と方法は事前に検証した。



図1 プローブ固定による超音波エコー動画撮影

エコー動画解析ソフトウェア (Echolizer, GLAB Inc.) を使用して、エコー動画における筋膜と腓腹筋の動きの速度を定量化した。このソフトウェアは、Farneback法 (frame offset: 3) を使用しており、画像を重ね合わせることによってオプティカルフローを算出する⁷⁾。超音波画像を使用した組

織運動の定量化におけるEcholizerソフトウェアの妥当性および信頼性は、以前に報告されている⁸⁾。プログラム内の回帰方程式を適用した後の相対誤差は0.2%であり、優れた精度が実証されている。グリッドを使用して、関心領域 (ROI) の位置とサイズを定義した。ROIにおいて、X軸は頭側と尾側、Y軸は腹側と背側に定義した。ROIは、表在部 (筋膜組織, X軸12.45mm × Y軸0.38mm) と深在部 (腓腹筋内側頭, X軸12.45mm × Y軸0.75mm) の2つの部位に定めた。次に、各X軸 (頭尾方向) に沿った平均移動速度を算出した (図2)。筋膜と腓腹筋の動きの速度の時系列間の相互相関係数を算出し、3回の試行の平均値を採用した。相互相関係数が高い場合は、2つの組織が同様に動き、滑走が減少することを示し、相互相関係数が低い場合は、2つの組織が独立して動き、滑走が増加することを示した。これは、膝の動きにおける外側広筋と皮下組織の滑走を調査した先行研究に基づいている⁹⁾。この相互相関係数を滑走性係数と定義した。

1. 3. 4 反応筋力指数 (Reactive Strength Index, RSI)

RSIは、ジャンプの高さを接地時間で割った値で、短時間でのパワー発揮を評価するために多くのスポーツに活用されている¹⁰⁾。今回の実験では腰に手を当てた姿勢で短い接地で高く5回跳ぶよう指示した。測定には光学式分析機器 (OptojumpNext, Microgate Inc.) を使用した。RSIの数値が高いほど接地が短く高く跳べるということを意味しており、エネルギーコストを抑えて効率よく高いパフォーマンスが発揮できると示されている。5回の平均値を採用した。

1. 4 統計解析手法

まず、各指標の事後から事前の測定値を引いた変化量を算出して、 Δ WBLT、 Δ VAS、 Δ 滑走

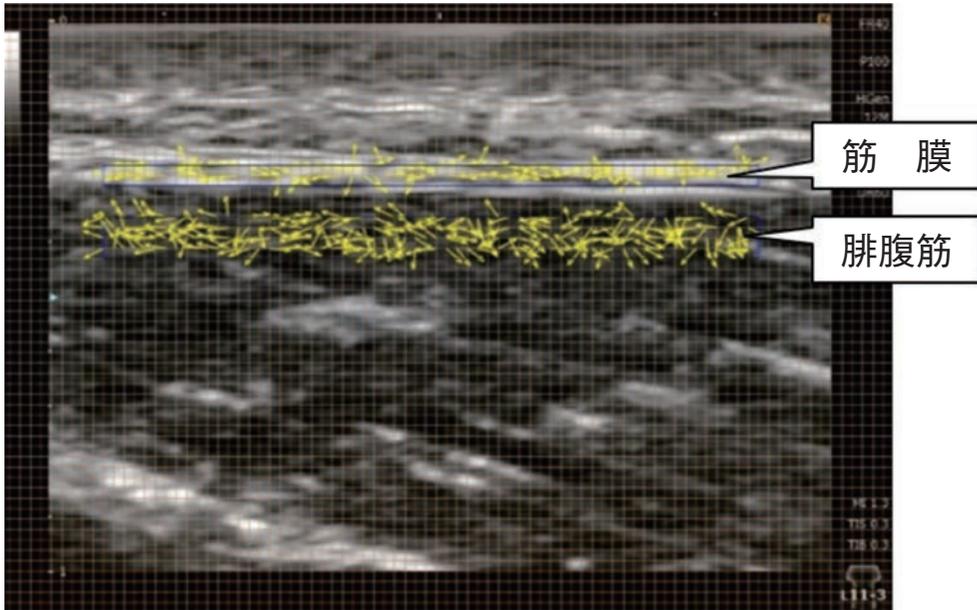


図2 超音波エコー動画解析

性係数, Δ RSIとした. 本研究では, VASに関連する身体機能指標を抽出するため, 交差検証付きのLasso回帰分析を用いて変数選択およびモデル構築を行った. Lasso回帰分析は, 変数選択と過学習抑制を同時に行える線形回帰手法である. Δ WBLT, Δ 滑走性係数, Δ RSIを説明変数, Δ VASを目的変数とし, Lasso回帰分析を実施した. 5分割交差検証によって正則化パラメータ (α) を自動選定した. また, 各変数のスケールの違いによる影響を排除し, 相対的な寄与度を評価するため, 説明変数を標準化 (z スコア変換) した上で再度Lasso回帰を行い, 標準化回帰係数 (β) を算出した. 解析にはPython (Version 3.11) およびscikit-learnライブラリ (Version 1.4.2) を使用した.

2. 結果

各指標のランニング前後の数値を表1に示す. Lasso回帰分析の結果, 交差検証によって選定された最適な正則化パラメータは $\alpha = 0.163$ であり(図3), この条件下では Δ 滑走性係数および Δ

表1 各変数のランニング前後の値

	介入前	介入後
WBLT (cm)	11.0 \pm 2.9	11.7 \pm 2.8
VAS (mm)	43.6 \pm 25.0	46.9 \pm 27.7
滑走性係数	0.616 \pm 0.133	0.630 \pm 0.119
RSI	0.522 \pm 0.088	0.495 \pm 0.091

平均値 \pm 標準偏差. WBLT; Weight-Bearing Lunge Test, VAS; Visual Analog Scale, RSI; Reactive Strength Index.

WBLTがモデルに残存した. 一方, Δ RSIは係数が0となり, モデルから除外された. また, 変数間のスケールの違いを考慮するために標準化回帰係数を求めた結果, 各変数の相対的寄与が認められた(表2).

3. 考察

本研究では, ランニング介入の前後で得られた身体機能指標の変化と主観的疲労感の変化との関連性をLasso回帰分析により検討した. その結果, 滑走性係数の変化が主観的疲労感の変化に最も寄与することが示された. Δ 滑走性係数の標準化回帰係数0.271は, 他の変数を一定とした場合, 滑走性の低下が疲労感の増加と有意に関連することを示唆している. 筋膜の構造的および分子的变化

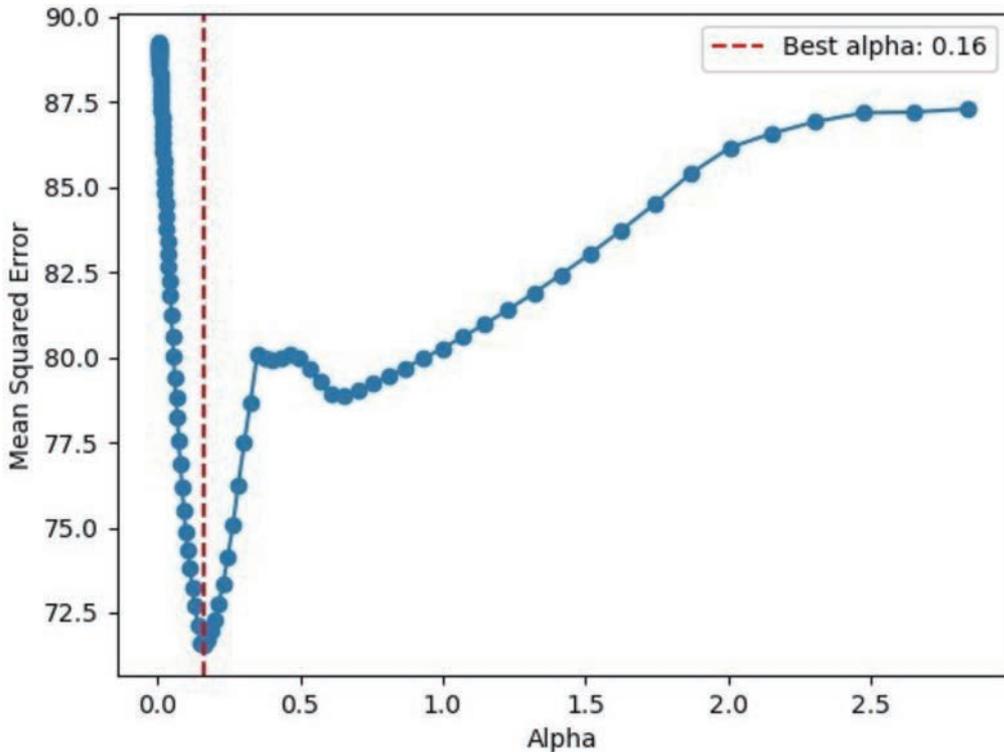


図3 アルファ値を選択するための交差検証

表2 Lasso回帰分析による各変数の回帰係数

	回帰係数 (非標準化)	標準化回帰係数 (β)
Δ 滑走性係数	19.29	0.271
Δ RSI	0.00(除外)	-0.064
Δ WBLT	-2.47	-0.038

SI; Reactive Strength Index,
WBLT; Weight-Bearing Lunge Test.

は、運動時の組織間の摩擦軽減や力伝達効率に関与すると示されている¹¹⁾。軟部組織層間の滑りを改善し、疼痛を軽減し、柔軟性を高め、機能的パフォーマンスを改善するために筋膜リリースが行われている¹²⁾。しかし、滑走性の定量的変化と主観的な筋の状態変化との関連を明確に示した報告は少ない。本研究の結果から、標準化回帰係数($\beta = 0.271$)を実スケールに換算した結果、滑走性係数が0.1単位増加するごとにVASスコアは約6.3 mm増加すると予測された。この換算は、「VAS変化量 = $\beta \times$ (滑走性変化量 / 介入後滑走性標準偏差) \times 介入後VAS標準偏差」に基づくもので

あり、本研究では、介入後滑走性標準偏差 = 0.119, 介入後VAS標準偏差 = 27.7 mmを用いて算出した。この結果は、滑走性の低下が主観的疲労感の悪化に臨床的に知覚可能な影響を及ぼす可能性を示唆する。したがって、運動後の疲労評価や介入効果の指標として、超音波エコーを用いた滑走性の定量的評価は有用な指標となりうると考える。

一方で、柔軟性指標の Δ WBLTおよびジャンプ能力指標の Δ RSIは、Lasso回帰による回帰係数が極めて小さい値であった。本研究対象の範囲においてはVASスコアに対する影響は限定的であると示された。これは、筋と筋膜の関係は滑走面の状態を直接評価するものであるが、WBLTやRSIは主に筋や腱そのものの可動性や反応性を反映するものである。WBLTやRSIは個人差が大きく、神経筋系の制御や筋腱の粘弾特性、反射応答、筋内代謝や炎症反応といった生化学的狀態など複数の要因が複雑に絡んでいる^{13, 14)}。よって、

WBLTやRSIが主観的疲労感に与える影響は一様ではなく、関与が小さかった要因と考えられる。

本研究にはいくつかの限界がある。第一に、対象者数が比較的少数であり、モデルの一般化には慎重な解釈が必要である。第二に、VASスコアは主観的な指標であるため、心理的要因の影響を完全に排除することは難しい。第三に、滑走性の評価には超音波エコーによる解析を用いたが、測定誤差や手技の影響を受ける可能性も考慮する必要がある。最後に、生理学的要因を含めた検討ができていないので今後の課題である。今後は、より大規模な対象者での縦断的研究や、異なる介入手法を比較する研究が求められる。

本研究ではサンプル数が限られていたことから、過学習のリスクを抑制しつつ有用な予測因子を特定するための手法として、Lasso回帰分析を用いた。Lasso回帰分析は、不要な変数を自動的に排除する正則化の機能を持ち、少数例における信頼性の高いモデル構築に適している。この特徴により、滑走性係数が主観的疲労感に対して寄与することが明らかとなった。今後は、より多くのサンプルを収集し交差検証の強化を行うことで、モデルの汎化性能を向上させるとともに、ランダムフォレスト回帰やニューラルネットワークなどの機械学習アルゴリズムへの発展的応用を図る予定である。本研究の成果は、将来的な疲労度を推定・可視化するAIシステムの構築に向けた基礎的知見として活用されることが期待される。

4. まとめ

本研究では、筋膜の滑走性・足関節柔軟性・ジャンプ能力の変化と、主観的疲労感の変化との関連をLasso回帰分析により検討した。その結果、標準化回帰係数の比較において、滑走性の変化は、柔軟性やジャンプ能力よりも主観的疲労感に対して大きな影響を与えていた。これにより、滑走性低下が運動後の疲労感の増大と関連しており、滑

走性の維持・改善が疲労増加を抑制する上で重要な指標となり得ることが示唆された。本研究の成果は、疲労管理を目的とした介入設計やAIシステムによる疲労度推定のための要素抽出において、滑走性の定量評価が有効であることを支持する初期的な知見となる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、貴重なご支援と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、心より深く御礼申し上げます。

文 献

- 1) DiFiori J.P., Benjamin H.J., Brenner J.S., et al.: Overuse injuries and burnout in youth sports: a position statement from the American Medical Society for Sports Medicine., *Br. J. Sports Med.*, **48**: 287-288(2014)
- 2) Clarsen B., Bahr R., Myklebust G., et al.: Improved reporting of overuse injuries and health problems in sport: an update of the Oslo Sport Trauma Research Center questionnaires., *Br. J. Sports Med.*, **54**: 390-396(2020)
- 3) Ajimsha M.S., Al-Mudahka N.R., Al-Madzhar J.A.: Effectiveness of myofascial release: systematic review of randomized controlled trials., *J. Bodyw. Mov. Ther.*, **19**: 102-112(2015)
- 4) Clarsen B., Myklebust G., Bahr R.: Development and validation of a new method for the registration of overuse injuries in sports injury epidemiology: the Oslo Sports Trauma Research Centre (OSTRC) overuse injury questionnaire., *Br. J. Sports Med.*, **47**: 495-502(2013)
- 5) Powden C.J., Hoch J.M., Hoch M.C.: Reliability and minimal detectable change of the weight-bearing lunge test: A systematic review., *Man. Ther.*, **20**: 524-532(2015)
- 6) Åström M., Thet Lwin Z.M., Teni F.S., et al.: Use of the visual analogue scale for health state valuation: a scoping review., *Qual. Life Res.*, **32**: 2719-2729(2023)
- 7) G. F.: Two-Frame Motion Estimation Based

- on Polynomial Expansion. In: *Lecture Notes in Computer Science*, 363–370 (2003)
- 8) Yamashita T. OK, Gamada K.: Validity and reliability of velocity measurements on ultrasonography using custom software with an optical-flow algorithm., *Journal of physical therapy science*, 32: 130–139 (2020)
 - 9) Kawanishi K., Kudo S., Yokoi K.: Relationship Between Gliding and Lateral Femoral Pain in Patients With Trochanteric Fracture., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 101: 457–463 (2020)
 - 10) Morikawa M., Maeda N., Komiya M., et al.: The effect of two types of ankle orthoses on the repetitive rebound jump performance., *BMC. Sports Sci. Med. Rehabil.*, 14: 88 (2022)
 - 11) Wilke J., Schleip R., Yucesoy C.A., et al.: Not merely a protective packing organ? A review of fascia and its force transmission capacity., *J. Appl. Physiol. (1985)*, 124: 234–244 (2018)
 - 12) Beardsley C., Skarabot J.: Effects of self-myofascial release: A systematic review., *J. Bodyw. Mov. Ther.*, 19: 747–758 (2015)
 - 13) Aragón-Vargas L.F., Gross M.M.: Kinesiological Factors in Vertical Jump Performance: Differences among Individuals., *Journal of Applied Biomechanics*, 13: 24–44 (1997)
 - 14) Abellaneda S., Guissard N., Duchateau J.: The relative lengthening of the myotendinous structures in the medial gastrocnemius during passive stretching differs among individuals., *J. Appl. Physiol. (1985)*, 106: 169–177 (2009)

女性における体幹部筋内脂肪の 1年間の変化と関連する因子の検討 —若齢および高齢女性を対象として—

名古屋大学大学院 北川 芙南
(共同研究者) 名古屋大学 田中 憲子
同 秋間 広
同 小池 晃彦
名古屋大学大学院 三戸 詠里加

Factors Associated with One-Year Changes in Trunk Intramuscular Adipose Tissue in Young and Elderly Women

by

Funa Kitagawa, Erika Sando
*Graduate school of education and human development,
Nagoya university*
Noriko I. Tanaka, Hiroshi Akima, Teruhiko Koike
*Research center of health, physical fitness and sports,
Nagoya university*

ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify the factors associated with changes in trunk intramuscular adipose tissue (IntraMAT) content over one year in young and elderly women. Twelve young women (age: 19.4 ± 1.3 years, body mass index (BMI) : 20.0 ± 2.6 kg/m²) and 18 elderly women (age: 72.7 ± 3.1 years, BMI: 21.8 ± 2.7 kg/m²) participated. IntraMAT content at the third lumbar level was measured using magnetic resonance imaging. In addition to fasting blood tests, we assessed total energy expenditure and the percentage of energy from major nutrients using questionnaires.

These items were measured twice with a one-year interval. As a result, among the percent changes (Δ) of each item in young women, Δ IntraMAT content had a significant correlation with Δ total energy expenditure, Δ protein, and Δ carbohydrate ($r = -0.726$ to 0.642). In elderly women, Δ IntraMAT content significantly and positively correlated with Δ fat and Δ saturated fatty acids ($r = 0.516$ and 0.523).

These results suggest that the content of trunk IntraMAT might be influenced by daily physical activity and the percentage of energy from dietary macronutrients.

キーワード

異所性脂肪, 栄養摂取状況, 磁気共鳴画像, 加齢, 骨格筋の質

Keyword

ectopic fat, dietary intake, magnetic resonance imaging, aging, skeletal muscle quality

要 旨

本研究では、女性における体幹部筋内脂肪蓄積度の1年間の変化と関連する因子を年代別に明らかにすることを目的とした。若齢群12名(年齢: 19.4 ± 1.3 歳, 体格指数: 20.0 ± 2.6 kg/m²), 高齢群18名(年齢: 72.7 ± 3.1 歳, 体格指数: 21.8 ± 2.7 kg/m²)を対象とし、磁気共鳴画像法を用いて、第3腰椎レベルにおける筋内脂肪蓄積度を測定した。空腹時の血液採取により血液性状を評価し、質問紙法を用いて身体活動量および栄養摂取状況を推定した。これらの項目を、1年の間隔を空けて計2回測定した。その結果、各項目の変化率(Δ)のうち、若齢女性の Δ 筋内脂肪蓄積度は、 Δ 総エネルギー消費量、 Δ タンパク質と Δ 炭水化物のエネルギー比率と有意な相関関係($r = -0.726 \sim 0.642$)を示した。高齢女性の Δ 筋内脂肪蓄積度は、 Δ 脂質および Δ 飽和脂肪酸のエネルギー比率と有意な相関関係($r = 0.516$ および 0.523)を示した。以上の結果から、女性の体幹部筋内脂肪の蓄積は、日常における身体活動量や主要栄養素のエネルギー比率と有意に関連することが示された。

緒 言

加齢に伴い、骨格筋の量の減少や筋力・身体機能の低下、すなわちサルコペニアを発症する可能性がある。サルコペニアには骨格筋の量の低下だけでなく、骨格筋の質の低下も影響する。骨格筋の質は、主に骨格筋内に蓄積する異所性脂肪(筋内脂肪)により評価される¹⁾。筋内脂肪は、骨格筋の量や筋力・歩行能力などの身体機能と有意な負の相関関係を示すだけでなく^{2,3)}、骨格筋内への糖の取り込みを低下させ、インスリン抵抗性やメタボリックシンドローム等の代謝性疾患リスクや心血管疾患の発症リスクなどとも関連する⁴⁻⁶⁾。そのため、筋内脂肪と関連する因子を明確にすることは、筋内脂肪の蓄積を予防し、将来的な代謝性疾患等の発症の予防・改善に寄与することが期待できる。しかしながら、筋内脂肪に関する研究の大半は横断的な検討にとどまっている。そのため、横断研究において有意な関連を示した項目同士の因果関係は不明である。

一般に、筋内脂肪は、加齢の影響を受ける。なかでも体幹部における筋内脂肪の蓄積は、他の身体セグメントと比較し、若齢期から生じることが

示唆されている⁷⁾。また、体幹部における筋内脂肪蓄積度は、メタボリックシンドローム、2型糖尿病、心血管疾患、動脈硬化などのリスクと有意に関連することが報告されている^{4,8)}。以上の知見を踏まえると、体幹部における筋内脂肪の過度な蓄積の予防ならびに改善は、生活習慣病の一次予防（発症予防）および二次予防（早期発見・対処）の観点において重要である。

本研究の目的は、体幹部筋内脂肪蓄積度の1年間の変化と関連する因子を明らかにすることである。先行研究にて、筋内脂肪蓄積度との有意な関係が報告されている血液性状、身体活動量、栄養摂取状況等^{6,9,10)}に着目し、これらと筋内脂肪蓄積度の1年間の変化がどのように関連するかを検討する。脂肪の蓄積は生活習慣による影響が大きいと予想されることから、筋内脂肪蓄積度の変化も特に身体活動量や栄養摂取状況の影響を受けるといふ仮説を立てた。

1. 研究方法

1.1 研究対象者

健康な女性30名を、若齢群12名（年齢：19.4 ± 1.3歳、体格指数：20.0 ± 2.6 kg/m²）と高齢群18名（年齢：72.7 ± 3.1歳、体格指数：21.8 ± 2.7 kg/m²）に分類した。本研究は名古屋大学総合保健体育科学センター倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号 23-04）。研究対象者には書面を用いて研究目的や方法などを十分に説明し、自由意思により研究参加の同意を得た。初回測定（0年）から1年の間隔を空け、以下の測定項目を合計2回測定した。

1.2 形態学的項目

身長と体重を測定し、体格指数（BMI）を算出した。また、メジャーを用いて臍のレベルにおける腹囲の測定を行った。

1.3 磁気共鳴画像

3テスラ磁気共鳴画像診断装置（MAGNETOM Verio, Siemens Healthcare）を用いて、第3腰椎レベルにおける体幹部の横断画像を2-point Dixon法により撮影した。撮影中、研究対象者は上肢と下肢を伸展した状態で仰臥位になり、スキャン中の呼吸運動によるアーチファクト軽減のために、吸気後、約15秒間の息止めを行った。

撮影した画像の解析には、画像ソフト Slice Omatic 5.0（TomoVision, Magog, Quebec, Canada）を利用した。SliceOmaticの2D、region growing、morphology機能を用いて、骨格筋（腹直筋、腹斜筋群、腸腰筋群、脊柱起立筋群）における筋内脂肪蓄積度および筋組織横断面積を算出した¹¹⁾。

1.4 血液性状

測定前日の激しい運動を禁止し、10時間以上の絶食状態にて研究対象者の肘正中静脈より採血を行った。分析はLSIメディエンス社に依頼した。分析項目は、グルコース、総コレステロール、HDLコレステロール、インスリンであった。

1.5 身体活動量

世界標準化身体活動質問票¹²⁾を用いて、1日あたりの総エネルギー消費量を算出した⁹⁾。なお、中強度および高強度の身体活動は、それぞれ4メッツおよび8メッツとし、それ以外の活動を1メッツとして1日あたりの総エネルギー消費量を算出した¹³⁾。

1.6 栄養摂取状況

簡易型自記式食事歴法質問票¹⁴⁾を用いて、1日あたりのエネルギー摂取量のほか、タンパク質、脂質（飽和脂肪酸）、炭水化物のエネルギー比率を推定した。分析はジェンダーメディカルリサーチDHQサポートセンターに依頼した。

1. 7 統計解析

全ての測定値はShapiro-Wilkの検定を用いて、正規性の確認を行った。0年目における各項目の群間(若齢群と高齢群)の比較は、正規分布を示した項目については対応のないt検定を、正規分布を示さなかった項目についてはMann-WhitneyのU検定を行った。若齢群および高齢群それぞれにおける測定前後(0年目と1年後)の比較には、正規分布を示した項目については反復測定の実験配置分散分析(群x時間)を行い、主効果あるいは交互作用が認められた場合には、Bonferroniの多重比較検定を用いて多重比較を行った。正規分布を示さなかった項目については、Wilcoxonの符号順位検定を行い測定前後の比較を、Mann-WhitneyのU検定を用いて群間の比較を行った。また、各測定項目の1年間の変化率(Δ)を求め、群ごとにΔ筋内脂肪蓄積度との相関関係をPearsonの相関係数にて評価した。その後、従属変数をΔ筋内脂肪蓄積度、独立変数をΔBMI、Δ総エネルギー消費量、Δ主要栄養素のエネルギー

比率としたステップワイズ法の重回帰分析を行った。有意水準は5%未満とした。統計解析にはIBM SPSS Statistics 20を使用した。

2. 研究結果

表1と2に、0年目と1年後における若齢および高齢群の形態学的項目、血液性状、身体活動量、栄養摂取状況の測定値および1年間の変化率を示した。

形態学的項目では、反復測定の実験配置分散分析の結果、筋内脂肪蓄積度で群と時間の交互作用が認められた(F = 7.692, p = 0.019)。Bonferroniの多重比較検定を行った結果、若齢群において、筋内脂肪蓄積度が1年間で有意に低下した。身長、腹囲、筋組織横断面積には有意な交互作用は認められなかったものの、1年間で若齢群の身長は有意に増加し、高齢者群の腹囲および筋組織横断面積はそれぞれ有意に低下した(p<0.05またはp<0.01)。また、身長および筋組織横断面積は、若齢群が高齢群よりも有意に高値を、腹囲および筋内脂肪蓄積度は高齢群が若齢群よりも有意に高

表1 若齢群(n=12)における各測定時での測定値と1年間の変化率(%)

	0年	1年	変化率
	平均値±SD	平均値±SD	平均値±SD
年齢(歳)	19.4±1.3		
<形態学的項目>			
身長(cm)	157.0±5.0	157.2±4.9*	0.2±0.2
体重(kg)	49.5±8.5	48.8±7.7	-1.0±4.7
BMI(kg/m ²)	20.0±2.6	19.7±2.4	-1.3±4.5
腹囲(cm)	69.5±7.4	70.0±7.8	0.7±3.9
筋内脂肪蓄積度(%)	11.6±2.2	9.8±1.6**	-1.8±2.2
筋組織横断面積(cm ²)	80.1±17.4	79.2±17.6	-1.0±5.4
<血液性状>			
グルコース(mg/dL)	79.3±5.9	76.8±7.8	-2.8±9.4
総コレステロール(mg/dL)	167.7±33.3	179.6±35.8*	7.5±10.6
HDL-コレステロール(mg/dL)	71.6±12.7	71.5±12.2	0.4±8.8
インスリン(μU/mL)	4.0±1.9	4.0±1.6	35.9±92.7
<身体活動量>			
総エネルギー消費量(kcal)	1517.8±415.9	1465.5±377.7	-2.8±5.8
<栄養摂取状況>			
エネルギー摂取量(kcal)	1458±650	1519±467	13.1±33.6
タンパク質(%)	15.8±2.1	16.8±3.8	1.0±4.0
脂質(%)	31.4±4.1	30.8±5.2	-0.6±8.0
飽和脂肪酸(%)	7.9±1.5	8.1±1.8	0.2±2.7
炭水化物(%)	52.8±6.0	52.4±8.3	-0.4±11.1

BMI: 体格指数, HDL: High-density lipoprotein, *p<0.05, **p<0.01 vs. 0年

表2 高齢群(n=18)における各測定時での測定値と1年間の変化率(%)

	0年	1年	変化率
	平均値±SD	平均値±SD	平均値±SD
年齢(歳)	72.7±3.1		
<形態学的項目>			
身長(cm)	152.3±4.5	152.2±4.6	0.0±0.2
体重(kg)	50.2±5.6	49.8±5.8	-0.5±2.1
BMI(kg/m ²)	21.7±2.4	21.5±2.4	-0.4±2.0
腹囲(cm)	80.5±6.8	82.5±7.2*	2.9±4.8
筋内脂肪蓄積度(%)	25.9±7.7	26.3±7.3	0.3±2.0
筋組織横断面積(cm ²)	61.6±33.2	58.2±30.9*	-5.7±4.8
<血液性状>			
グルコース(mg/dL)	93.0±9.6	92.0±10.0	-0.7±7.5
総コレステロール(mg/dL)	228.0±28.0	221.3±33.5	-2.8±9.0
HDL-コレステロール(mg/dL)	75.6±21.1	74.5±22.2	-1.8±10.7
インスリン(μU/mL)	5.0±2.0	5.2±3.2	5.3±3.2
<身体活動量>			
総エネルギー消費量(kcal)	1550.7±348.2	1500.5±247.8	-0.5±14.5
<栄養摂取状況>			
エネルギー摂取量(kcal)	1785±560	1806±588	4.9±19.2
タンパク質(%)	18.2±3.3	19.3±4.3	0.2±3.3
脂質(%)	31.8±5.3	31.5±3.8	-1.0±5.2
飽和脂肪酸(%)	8.4±1.5	8.4±1.5	-0.1±1.7
炭水化物(%)	49.9±6.9	49.2±5.9	0.8±7.3

BMI: 体格指数, HDL: High-density lipoprotein, *p<0.05, **p<0.01 vs. 0年

値を示し、群の主効果が認められた(p<0.05またはp<0.01)。その他の項目に、有意な変化や群間差は認められなかった。

血液性状の項目では、反復測定の実験配置分散分析の結果、血中総コレステロールで群と時間の交互作用が認められた(F=6.152, p=0.010)。

Bonferroniの多重比較検定を行った結果、若齢群の血中総コレステロールが1年間で有意に増加した(p<0.05)。グルコースおよび総コレステロー

ルは、高齢群が若齢群よりも有意に高値を示した(p<0.01)。その他の項目に、有意な変化や群間差は認められなかった。

総エネルギー消費量、エネルギー摂取量および主要栄養素のエネルギー比率に、有意な変化や群間差は認められなかった。

Δ筋内脂肪蓄積度とΔ血液性状、Δ身体活動量およびΔ栄養摂取状況の相関関係を表3に示した。各項目のうち、若齢群のΔ筋内脂肪蓄積度は、

表3 各群におけるΔ筋内脂肪蓄積度(%)とΔ各測定項目(%)との相関関係

	若齢群(n=12)		高齢群(n=18)	
	r	p	r	p
<血液性状(%)>				
Δグルコース	-0.156	0.629	0.122	0.631
Δ総コレステロール	0.187	0.560	-0.137	0.589
ΔHDL-コレステロール	0.033	0.918	-0.189	0.452
Δインスリン	-0.468	0.125	0.077	0.762
<身体活動量(%)>				
Δ総エネルギー消費量	-0.646*	0.023	0.333	0.177
<栄養摂取状況(%)>				
Δエネルギー摂取量	0.090	0.782	-0.278	0.263
Δタンパク質	-0.726**	0.008	0.195	0.439
Δ脂質	-0.530	0.076	0.516*	0.028
Δ飽和脂肪酸	-0.550	0.064	0.523*	0.026
Δ炭水化物	0.642*	0.025	-0.410	0.091

Δ: 1年間の変化率(%), HDL: High-density lipoprotein, *p<0.05, **p<0.01

Δ総エネルギー消費量およびΔタンパク質エネルギー比率と有意な負の相関関係 ($r = -0.646$ および -0.726) を, Δ炭水化物エネルギー比率と有意な正の相関関係 ($r = 0.642$) を示した. 一方, 高齢群のΔ筋内脂肪蓄積度は, Δ脂質およびΔ飽和脂肪酸のエネルギー比率と有意な正の相関関係 ($r = 0.516$ および 0.523) を示した.

表4に, 従属変数をΔ筋内脂肪蓄積度, 独立変数をΔBMI, Δ総エネルギー消費量, Δタンパク質, Δ飽和脂肪酸およびΔ炭水化物のエネルギー比率としたステップワイズ法による重回帰分析の結果を示した. Δ筋内脂肪蓄積度の有意な予測因子として, 若齢群ではΔタンパク質エネルギー比率が, 高齢群ではΔ飽和脂肪酸エネルギー比率が選択された.

3. 考 察

本研究は, 健康な若齢および高齢女性を対象に, 体幹部筋内脂肪蓄積度の1年間の変化と関連する因子を検討した. その結果, 体幹部筋内脂肪蓄積度の変化には, 若齢群および高齢群ともに栄養素の摂取状況が有意に関係し, その栄養素は年代により異なっていた. すなわち, 若齢群ではΔタンパク質の摂取状況が, 高齢群ではΔ飽和脂肪酸の摂取状況が, Δ筋内脂肪蓄積度の予測因子となることが明らかとなった. また, 若齢群では, Δ総エネルギー消費量がΔ筋内脂肪蓄積度の有意な予測因子としては選ばれなかったものの, Δ筋内脂肪蓄積度と有意な負の相関関係を示したことから, 栄養素の摂取状況に加え, 身体活動量も筋内脂肪の変化に有意に関わっている可能性がある.

本研究において, 若齢群のΔ筋内脂肪蓄積度は, Δ総エネルギー消費量およびΔタンパク質エネル

ギー比率と有意な負の相関関係を, Δ炭水化物エネルギー比率と有意な正の相関関係を示した. また, 重回帰分析により, Δ筋内脂肪蓄積度の予測因子としてΔタンパク質エネルギー比率が選択された. 対象者の年代, 性, および筋内脂肪蓄積度の測定部位は異なるものの, 縦断的検討をした先行研究^{15, 16)}においても同様に, 筋内脂肪蓄積度はタンパク質の摂取状況による影響を受けることが示唆されている. 例えば, 高齢入院患者を対象とした縦断研究では, タンパク質の摂取量の変化と筋内脂肪蓄積度の変化の間に有意な負の相関関係が認められた¹⁵⁾. 健康な中高齢者を対象とした縦断研究では, タンパク質エネルギー比率が高い群が, 低い群に比べ筋内脂肪蓄積度の低下が顕著であった¹⁶⁾. これらの研究結果と本研究の結果から, タンパク質の摂取状況が筋内脂肪蓄積度と有意に関連することが明らかである. しかしながら, 現在までのところ, タンパク質の摂取状況と筋内脂肪の蓄積に関するメカニズムは不明である. 適度な運動や適切な量のタンパク質の摂取は, 筋タンパク質の合成を促進する¹⁷⁾. また, タンパク質の摂取状況は, ビフィズス菌や乳酸桿菌などの腸内細菌叢の存在率と有意な正の相関関係を示し, 食事誘発性肥満の減少やインスリン感受性の改善に寄与する^{18, 19)}. タンパク質を摂取することにより, インスリン抵抗性の改善, レプチン分泌量の増加, TNF- α 等の炎症性サイトカインの低下などを誘発することが報告されている²⁰⁾. インスリン抵抗性や炎症性サイトカインは, 筋内脂肪の蓄積度と有意な正の相関関係を示す^{21, 22)}. 以上のことから, タンパク質を摂取することによるインスリン感受性の改善や抗炎症作用が, 筋内脂肪の蓄積を予防することに関わっている可能性

表4 各群におけるΔ筋内脂肪蓄積度(%)を従属変数としたステップワイズ法による重回帰分析の結果

群	有意な独立変数	回帰係数	標準誤差	標準化偏回帰係数	p	R	調整済み決定係数
若齢群	Δタンパク質(%)	-0.408	0.122	-0.726	0.008	-0.726	0.480
高齢群	Δ飽和脂肪酸(%)	0.629	0.256	0.523	0.026	0.523	0.228

がある。

高齢群の Δ 筋内脂肪蓄積度は、 Δ 脂質および Δ 飽和脂肪酸のエネルギー比率との間に有意な正の相関関係が認められた。また重回帰分析の結果、 Δ 筋内脂肪蓄積度の有意な予測因子として Δ 飽和脂肪酸エネルギー比率が選択された。この結果は若齢男性を対象としたKitagawa et al. (2025) による横断研究の結果を支持している⁹⁾。ただし、飽和脂肪酸の摂取状況と筋内脂肪の蓄積との関係は詳しく検討されておらず、そのメカニズムは不明である。一般に、飽和脂肪酸の過剰摂取は、血中のLDLコレステロールや総コレステロールの増加を誘発し、その結果として、体重増加、インスリン抵抗性や脂肪細胞の炎症反応が亢進する²³⁾。脂肪細胞における炎症反応は、筋内脂肪の蓄積にも関与する²¹⁾。本研究の対象者における飽和脂肪酸エネルギー比率は、若齢群で $7.9 \pm 1.5\%$ 、高齢群で $8.4 \pm 3.3\%$ であり、両群ともに日本人の食事摂取基準(7%以下；厚生労働省、日本人の食事摂取基準(2025年版)より)に比べ高値を示した。したがって、飽和脂肪酸を基準値以上摂取することが脂肪細胞の炎症を誘発し、筋内脂肪の蓄積を促した可能性がある。今後は、介入研究等を通して、本研究で認められた関係の詳細なメカニズムを明らかにする必要がある。

本研究では、先行研究²⁴⁾に倣い、0年目および1年後にそれぞれ1回ずつ、血液性状、身体活動量、栄養摂取状況の評価を行った。血液性状は食事内容や運動等の影響を受けるため、前日からの絶食時間の確保と運動禁止を指示したものの、長期的な食事および運動習慣の影響を受ける可能性がある²⁵⁾。また、身体活動量や栄養摂取状況の調査についても、妥当性が検証されている質問紙^{12, 26, 27)}を用いたことに加え、先行研究においても1回のみの評価値が分析に利用されているものの、季節による影響を受ける可能性がある²⁸⁾。本研究の測定間隔は1年であり、同一対象者内に
デサントスポーツ科学 Vol. 47

においては季節変動による影響は少ないと考えられるが、対象者間における調査時期の違いが測定値に影響を及ぼしている可能性は否定できない。今後は、調査回数の増加も視野に入れつつ、さらなる検討が必要である。

4. 総括

本研究では、若齢および高齢女性30名を対象とし、体幹部における筋内脂肪蓄積度の1年間の変化と関連する因子について検討した。その結果、若齢群では総エネルギー消費量の変化とタンパク質および炭水化物の摂取状況の変化が、高齢群では脂質と飽和脂肪酸の摂取状況の変化が、体幹部筋内脂肪蓄積度の変化に関連していることが明らかとなった。したがって、若齢女性では運動習慣や食生活の改善が、高齢女性では食生活の改善が、筋内脂肪の蓄積の予防や対策につながる可能性がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、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深くお礼申し上げます。また、本研究にご協力いただきました研究対象者の皆様と共同研究者の方々、磁気共鳴画像の撮影にご協力いただきました名古屋大学・脳とこころの研究センターの先生方に心より感謝申し上げます。

文献

- 1) Cruz-Jentoft A.J., Bahat G., Bauer J., Boirie Y., Bruyère O., Cederholm T., et al., Sarcopenia: Revised European consensus on definition and diagnosis., *Age Ageing*, 48 (1) :16–31 (2019)
- 2) Yoshiko A., Kaji T., Sugiyama H., Koike T., Oshida Y., Akima H., Muscle quality characteristics of muscles in the thigh, upper arm and lower back in elderly men and women., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 118 (7) :1385–95 (2018)
- 3) Akima H., Yoshiko A., Tomita A., Ando R., Saito A.,

- Ogawa M., et al., Relationship between quadriceps echo intensity and functional and morphological characteristics in older men and women., *Arch. Gerontol. Geriatr.*, **70**:105–11(2017)
- 4) Maltais A., Alm eras N., Lemieux I., Tremblay A., Bergeron J., Poirier P., et al., Trunk muscle quality assessed by computed tomography: Association with adiposity indices and glucose tolerance in men., *Metabolism*, **85**:205–12(2018)
 - 5) Tanaka N.I., Maeda H., Tomita A., Suwa M., Imoto T., Akima H., Comparison of metabolic risk factors, physical performances, and prevalence of low back pain among categories determined by visceral adipose tissue and trunk skeletal muscle mass in middle-aged men., *Exp. Gerontol.*, **155**:111554 (2021)
 - 6) Kitagawa F., Ogawa M., Yoshiko A., Oshida Y., Koike T., Akima H., et al., Factors related to trunk intramuscular adipose tissue content – A comparison of younger and older men., *Exp. Gerontol.*, **168**:111922(2022)
 - 7) Fukumoto Y., Ikezoe T., Yamada Y., Tsukagoshi R., Nakamura M., Takagi Y., et al., Age-Related Ultrasound Changes in Muscle Quantity and Quality in Women., *Ultrasound Med. Biol.*, **11** (41) :3013–7 (2015)
 - 8) Tanaka N.I., Suwa M., Maeda H., Tomita A., Imoto T., Akima H., Relationship between trunk intramuscular adipose tissue content and prevalence of metabolic syndrome in middle-aged Japanese men., *Nutrition*, **113**:112083(2023)
 - 9) Kitagawa F., Akima H., Ishiguro-Tanaka N., Factors associated with trunk skeletal muscle thickness and echo intensity in young Japanese men and women., *PLoS One*, **20** (1) :e0312523(2025)
 - 10) Whitaker K.M., Buman M.P., Odegaard A.O., Carpenter K.C., Jacobs D.R., Sidney S., et al., Sedentary Behaviors and Cardiometabolic Risk: An Isotemporal Substitution Analysis., *Am. J. Epidemiol.*, **187** (2) :181–9(2018)
 - 11) Dennis R.A., Long D.E., Landes R.D., Padala K.P., Padala P.R., Garner K.K., et al., Tutorial for using SliceOmatic to calculate thigh area and composition from computed tomography images from older adults., *PLoS One*, **13** (10) :e0204529(2018)
 - 12) Bull F.C., Maslin T.S., Armstrong T., Global physical activity questionnaire (GPAQ) : Nine country reliability and validity study., *J. Phy. Act. Health*, **6** (6) :790–804(2009)
 - 13) 中田由夫, 笹井浩行, 村上晴香, 川上諒子, 田中茂穂, 宮地元彦. 国内のコホート研究で使用されている身体活動質問票による総エネルギー消費量の算出に向けたスコアリングプロトコル., *JAEE*, **19** (5) :83–92(2017)
 - 14) Sasaki S., Serum Biomarker-based Validation of a Self-administered Diet History Questionnaire for Japanese Subjects., *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, **46**:285–96(2000)
 - 15) Akazawa N., Funai K., Hino T., Tsuji R., Tamura W., Tamura K., et al., Increase in protein intake is related to decreasing intramuscular adipose tissue of the quadriceps in older inpatients: A longitudinal study., *Clin. Nutr. ESPEN.*, **58**:136–43(2023)
 - 16) Peng L.N., Yu P.C., Lee H.F., Lin M.H., Chen L.K., Protein-enriched diet improved muscle endurance and marginally reduced intramuscular adiposity: Results from a randomized controlled trial among middle-aged and older adults., *Arch. Gerontol. Geriatr.*, **96**:104436(2021)
 - 17) Yang Y., Breen L., Burd N.A., Hector A.J., Churchward-Venne T.A., Josse A.R., et al., Resistance exercise enhances myofibrillar protein synthesis with graded intakes of whey protein in older men., *Br. J. Nutr.*, **108** (10) :1780–8(2012)
 - 18) Prokopidis K., Cervo M.M., Gandham A., Scott D., Impact of protein intake in older adults with sarcopenia and obesity: A gut microbiota perspective., *Nutrients*, **12** (8) :1–24(2020)
 - 19) Huang H., Krishnan H.B., Pham Q., Yu L.L., Wang T.T.Y., Soy and Gut Microbiota: Interaction and Implication for Human Health., *J. Agric. Food Chem.*, **64** (46) :8695–709(2016)
 - 20) Madani Z., Louchami K., Sener A., Malaisse W.J., Yahia D.A., Dietary sardine protein lowers insulin resistance, leptin and TNF- α and beneficially affects adipose tissue oxidative stress in rats with fructose-induced metabolic syndrome., *Int. J. Mol. Med.*, **29** (2) :311–8(2012)
 - 21) Vella C.A., Allison M.A., Associations of abdominal intermuscular adipose tissue and inflammation: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis., *Obes. Res. Clin. Pract.*, **12** (6) :534–40(2018)
 - 22) Goodpaster B.H., Thaete F.L., Simoneau J.A., Kelley D.E., Subcutaneous Abdominal Fat and

- Thigh Muscle Composition Predict Insulin Sensitivity Independently of Visceral Fat., *Diabetes*, 46 (10) :1579–85(1997)
- 23) Hammad S., Pu S., Jones P.J., Current Evidence Supporting the Link Between Dietary Fatty Acids and Cardiovascular Disease., *Lipids*, 51 (5) :507–17 (2016)
- 24) Tanaka N.I., Kitagawa F., Akima H., Relationships between trunk tissue distribution, metabolic risk factors and physical performance in young people— A pilot study., *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, 45 (1) :1-10(2024)
- 25) 小川恒夫, 木本早紀, 川北久美子, 小松洋一. 女子学生における血糖値および中性脂肪値についての検討. 南九州大学研報. 47A:1–9(2017)
- 26) Kobayashi S., Honda S., Murakami K., Sasaki S., Okubo H., Hirota N., et al., Both comprehensive and brief self-administered diet history questionnaires satisfactorily rank nutrient intakes in Japanese adults., *J. Epidemiol.*, 22 (2) :151–9(2012)
- 27) Kobayashi S., Murakami K., Sasaki S., Okubo H., Hirota N., Notsu A., et al., Comparison of relative validity of food group intakes estimated by comprehensive and brief-type self-administered diet history questionnaires against 16 d dietary records in Japanese adults., *Public Health Nutr.*, 14 (7) :1200–11(2011)
- 28) Yoshimura E., Tajiri E., Hatamoto Y., Tanaka S., Changes in season affect body weight, physical activity, food intake, and sleep in female college students: A preliminary study., *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17 (23) :1–10(2020)

高強度インターバルトレーニングが 座位による血管内皮機能に及ぼす影響

中京大学 森嶋 琢真
(共同研究者) 愛知淑徳大学 笠井 信一

The Effects of High-Intensity Interval Training on Sitting-Induced Endothelial Dysfunction

by

Takuma Morishima
*Faculty of Liberal Arts and Sciences,
Chukyo University*
Nobukazu Kasai
*Faculty of Health and Medical Sciences,
Aichi Shukutoku University*

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study was to investigate whether eight weeks of high-intensity interval training (HIIT) can attenuate sitting-induced impairment in endothelial function.

Methods: Twenty-one young, healthy, recreationally active young men and women were randomly assigned to either a control group (CON group, n = 10) or a training group (TR group, n = 11). The TR group performed cycling ergometer-based and bodyweight-based HIIT four times per week for eight weeks. Before and after the intervention period, participants completed a three-hour sitting test during which popliteal artery flow-mediated dilation (FMD) were measured before and after sitting.

Results: In both groups, popliteal artery FMD significantly decreased after three

hours of sitting both before and after the intervention period ($P < 0.05$). However, post-sitting FMD after the intervention period was significantly higher in the TR group compared to the CON group ($P < 0.05$). This group difference remained significant even after adjusting for pre-sitting popliteal artery FMD after the intervention period as a covariate ($P < 0.05$).

Conclusion: These findings indicate that eight weeks of HIIT did not completely prevent sitting-induced endothelial dysfunction. However, the degree of impairment was attenuated by the HIIT.

キーワード

高強度トレーニング, 座位, 血管内皮機能, 血流, 一酸化窒素

Keyword

HIIT, Sitting, Endothelial function, Blood flow, Nitric oxide

要 旨

目的:本研究の目的は, 8週間の高強度インターバルトレーニング (HIIT) が座位による血管内皮機能の低下を抑制するか否かを明らかにすることとした。

方法: 普段余暇的に運動している健康な若年男女21名を対象とし, 無作為にコントロール群 (CON群) 10名およびトレーニング群 (TR群) 11名に分類した。TR群には, 週4回・8週間の自転車エルゴメーターおよび自体重を用いたHIITを導入した。介入期間前後において, 3時間の座位テストを実施し, 座位前後における膝窩動脈の血流依存性血管拡張反応 (FMD) を測定した。

結果: 介入期間前後において, 両群とも3時間の座位後に膝窩動脈FMDは有意に低下した ($P < 0.05$)。一方で, 介入期間後における座位後の膝窩動脈FMDはTR群がCON群に比較して有意に高値を示した ($P < 0.05$)。この群間差は, 介入期間後における座位前の膝窩動脈FMDを共変量として補正した際にも同様に認められた。

結論: 以上の結果から, 8週間のHIITは座位に
デサントスポーツ科学 Vol. 47

よる血管内皮機能の低下を予防できないものの, その低下を軽減することが明らかになった。

諸 言

座位行動は誰もが行うものであるが, 長時間の座位行動は糖尿病や動脈硬化症, 悪性新生物 (ガン) など様々な疾患を引き起こすことが知られている¹⁾。この点に関して, 日本人の座位時間は1日7時間を超えており, 欧米を含む世界20カ国の中でもトップである²⁾。したがって, 座位行動による健康被害への対策は, 我が国にとって喫緊の課題である。座位行動が心血管疾患を引き起こすメカニズムは複数存在するが, その1つとして座位中に下肢への血流量が低下することが挙げられる。血流量の低下は, 血管を柔らかく保つ作用のある一酸化窒素 (NO) の合成を減少させる。このNOの合成減少は血管内皮機能の低下を引き起こす。血管内皮機能は血管の収縮や拡張を調節する機能であり, 血管内皮機能の悪化は心血管系疾患の独立した危険因子である。事実, 長時間の座位行動後には血管内皮機能が低下する³⁾。

我々はこれまで, 座位中に温熱負荷⁴⁾や貧乏ゆ

すり⁵⁾などを行うことで座位後における血管内皮機能の低下を予防できることを明らかにしてきた。また、興味深いことに、普段から激しい運動トレーニングを継続している競技選手（自転車競技選手）は座位後にも血管内皮機能が低下しないことが認められている⁶⁾。この結果は、高い有酸素能力を有する者は座位行動に伴う血管内皮機能の低下を予防できる可能性を示している。しかし、上記の研究は競技選手と一般成人を比較した横断研究であり、一般成人に運動トレーニングを導入した縦断研究は行われていない。

1. 方法

1.1 対象者

本研究は普段余暇的に運動している健康な若年男性14名および女性7名を対象とした。すべての対象者は非喫煙者であり、心血管系、呼吸器系、代謝系、または神経系の疾患の既往歴や症状はなかった。研究の実施手順については、すべての対象者に対して詳細な説明を行い、参加に先立ってインフォームド・コンセントを取得した。本研究

はヘルシンキ宣言の原則に則り実施され、中京大学の人を対象とした研究倫理審査委員会により承認された（承認番号：2024-006）。

1.2 実験手順

対象者は無作為にコントロール群（CON群：n=10、男性=7、女性=3）およびトレーニング群（TR群：n=11、男性=7、女性=4）に分けられた。介入期間前の両群間において、基本的な身体特性に有意差は認められなかった（表1）。CON群の対象者は8週間にわたり通常の身体活動および食生活を維持した。TR群の対象者は、8週間の間に週4回、計32回のHIITを実施した（詳細は後述のトレーニング手順参照）。最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_2\text{max}$ ）の測定および3時間の座位テストは、介入前後に実施された。トレーニング強度を調整するため、 $\dot{V}O_2\text{max}$ の測定はTR群のみ介入期間中の4週目にも再評価された。

1.3 トレーニング手順

TR群の対象者は、8週間にわたるHIITを実施

表1 Physical characteristics, $\dot{V}O_2\text{max}$ and blood parameters before and after the intervention period

		0-week	8-week	two-way ANOVA
Body mass (kg)	CON group	64.3 ± 11.8	65.5 ± 11.5	Interaction: <i>P</i> = 0.55 Time: <i>P</i> = 0.051 Group: <i>P</i> = 0.82
	TR group	65.2 ± 9.4	64.2 ± 9.3	
Muscle mass (kg)	CON group	29.5 ± 5.7	30.4 ± 5.4	Interaction: <i>P</i> = 0.67 Time: <i>P</i> = 0.30 Group: <i>P</i> = 0.93
	TR group	29.9 ± 6.4	30.2 ± 6	
BMI (kg/m ²)	CON group	22.8 ± 3	23.2 ± 2.9	Interaction: <i>P</i> = 0.41 Time: <i>P</i> = 0.24 Group: <i>P</i> = 0.55
	TR group	22.7 ± 2.1	22.4 ± 2	
Percentage fat (%)	CON group	18.5 ± 5.6	17.9 ± 5.7	Interaction: <i>P</i> = 0.27 Time: <i>P</i> < 0.001 Group: <i>P</i> = 0.93
	TR group	19.1 ± 6.4	17.2 ± 6.1*	
$\dot{V}O_2\text{max}$ (mL/min/kg)	CON group	43 ± 6.1	42.9 ± 7	Interaction: <i>P</i> < 0.001
	TR group	44 ± 4.6	49.3 ± 4.9* †	
Serum Klotho (pg/mL)	CON group	485 ± 61	444 ± 117	Interaction: <i>P</i> = 0.68 Time: <i>P</i> = 0.02 Group: <i>P</i> = 0.06
	TR group	383 ± 106	354 ± 96	
Plasma ET-1 (pg/mL)	CON group	1.19 ± 0.51	1.17 ± 0.45	Interaction: <i>P</i> = 0.40 Time: <i>P</i> = 0.52 Group: <i>P</i> = 0.47
	TR group	0.92 ± 0.55	1.09 ± 0.44	
Plasma NOx (μmol/L)	CON group	42.6 ± 14.5	43.7 ± 11.3	Interaction: <i>P</i> = 0.47 Time: <i>P</i> = 0.61 Group: <i>P</i> = 0.56
	TR group	49.9 ± 17.2	43.2 ± 10.4	

Mean ± SD. **P* < 0.05 vs. 0-week. †*P* < 0.05 vs. CON group in 8-week.

した。HIITは2種類あり、1種類目は自転車エルゴメーター (PowerMax VIII, コナミ株式会社) を用いたトレーニングであった。具体的には、 $\dot{V}O_2\max$ の約170%に設定された強度での20秒間のサイクリングを7~8セット行い、その間に10秒の休息を挟んだ。ペダリング速度は90rpmとした。対象者には7~8セットの完遂が促され、ペダリング速度が85rpmを5秒以上下回った場合に運動を終了した。このトレーニングは、正味の運動時間が4分間というきわめて短時間であるにも関わらず、有酸素性能力および無酸素性能力を改善させることが明らかになっている⁷⁾。8セット以上を完遂した場合には、負荷を11W増加させた。すべてのセッションは研究者が監督した。このトレーニングは週3回の頻度で行われ、8週間の間に合計24セッション実施された。

さらに、上述のサイクリングに加え、対象者は週1回、計8回の自重によるHIITを自宅等で実施した。このHIITの構成は、運動時間 (20秒)、休息时间 (10秒)、セット数 (8セット) のすべてにおいてサイクリングHIITと同一であった。各セッションの具体的な種目は以下のとおりである。

セット1: ジャンピングジャック

セット2: スクワットジャンプ

セット3: ランジジャンプ

セット4: バーピージャンプ

セット5: マウンテンクライマー

セット6: ハイニー

セット7: タックジャンプ

セット8: ジャンピングジャック (再度)

予備実験において、自重によるHIITの運動強度を確認する為、HIIT中の酸素摂取量を測定した (Portable metabolic analyzer K5, COSMED)。その結果、HIIT中の酸素摂取量は最大酸素摂取量の90%程度にまで達することを確認した。なお、トレーニングの遵守状況を監視し、適切なトレーニングの実施を確保するために、対象者にはト

レーニングセッション中の自分自身を録画するよう依頼した。

1. 4 介入前後の測定

1. 4. 1 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$)

対象者は、自転車エルゴメーター (PowerMax VIII, コナミ株式会社) を用いた漸増負荷テストを実施し、 $\dot{V}O_2\max$ を測定した。テストは50Wから開始され、2分ごとに30Wずつ負荷を増加させた。対象者のペダリング速度が70rpm未満で5秒以上継続した場合、あるいは $\dot{V}O_2$ がプラトーに達した場合に終了とした。呼気ガスは自動ガス分析装置 (AE300S, ミナト医科学株式会社) により収集・分析され、30秒ごとに平均化された。運動中に観察された最高の $\dot{V}O_2$ 値を $\dot{V}O_2\max$ とした。

1. 4. 2 3時間座位テスト

このテストは、急性の運動効果を避けるため、最後のトレーニングセッションから少なくとも48時間以上空けて実施した。加えて、試験前10時間はカフェインおよびアルコールの摂取を禁止した。また、対象者には、試験前24時間は運動を控えるよう指示した。試験当日は、対象者は少なくとも10時間の夜間絶食 (飲水のみ可) 後、午前8時に研究室へ入室した。すべての試験は、室温23~24°Cに保たれた研究室で実施された。

入室後、まず体組成を生体インピーダンス法 (InBody430, インボディ・ジャパン) にて測定した。その後、対象者を仰臥位にし、10分間安静を維持した。10分間の安静後、前腕静脈に留置針を挿入し、安静時の血液サンプルを採取した。膝窩動脈の血管測定は、すべて片脚にて実施した。血管径および血流速度は、ドプラ超音波装置 (LOGIQe, GE Healthcare社) を用いて測定した。10MHzの線形プローブを膝窩動脈部に設置し、再現性を確保するため皮膚に印を付けて位置を固定した。測定はデュプレックスモードにて、30MHzのパルス周波数で、60°のインソネーショ

ン角で補正し行った。膝窩動脈FMDは先行研究⁸⁾に従って測定した。カフを下腿中央部に装着し、1分間の基準値測定後、220mmHgにて5分間駆血を行った。カフ解放後、3分間の血管径および血流速度を連続記録した。記録はCardiovascular Suite (Quipu srl, Pisa社)による専用ソフトにてオフライン解析した。

ベースラインのFMD測定後、対象者は3時間の座位姿勢を保持した。脚の動きを最小限にするため、研究者が座位中の監視を行った。座位中、対象者は読書やスマートフォン操作などを行って過ごした。3時間の座位後、対象者を研究者が手動で再び仰臥位に戻し、FMDを再測定した。

1. 5 データ解析

膝窩動脈のFMDの変化率(%)は以下の式から算出した：

$$(\text{最大血管径}-\text{ベース血管径})/\text{ベース血管径}\times 100$$

1. 6 血液分析

血清Klotho(株式会社免疫生物研究所)および血漿Endothelin-1(ET-1)(R&D Systems社)濃度の測定には、酵素免疫測定法を用いた。血漿中のNOx(硝酸塩/亜硝酸塩)濃度は、Griess法に基づくTotal Nitric Oxide and Nitrate/Nitrite Parameter Assay Kit(R&D Systems社)を用いて測定した。吸光度は、KlothoおよびET-1では450nm、NOxでは540nmにてマイクロプレート分光光度計(MULTISCAN FC, Thermo Fisher Scientific)で測定した。血清Klotho、血漿ET-1およびNOxはすべて2重測定を行った。

1. 7 統計処理

体組成、 $\dot{V}O_2\text{max}$ 、血液パラメータは、Period(0週 vs. 8週)×Group(CON群 vs. TR群)の二要因分散分析(ANOVA)およびBonferroniの事後検定を用いて解析した。3時間座位テストにおける

膝窩動脈FMDに対しては、Period(0週 vs. 8週)、Sitting(座位前 vs. 座位後)、およびGroup(CON群 vs. TR群)を要因とした三要因のANOVAを実施した。多重比較にはBonferroniの事後検定を用いた。介入期間後における座位後の膝窩動脈FMDを群間で比較する際、ベースライン(介入期間後の座位前FMD)の影響を補正するため、共分散分析(ANCOVA)を実施した。Group(CON群 vs. TR群)を固定因子、介入後における座位前の膝窩動脈FMDを共変量とした。すべての解析はSPSSソフトウェア(バージョン23)を用いて実施した。有意水準は $P<0.05$ とした。データは平均±標準偏差(SD)で表記した。

2. 結果

2. 1 トレーニングの遵守率

TR群におけるトレーニングの遵守率は100%であった。

2. 2 体組成および $\dot{V}O_2\text{max}$

体脂肪率は、TR群においてのみ、介入期間後に有意に低下した($P<0.05$)。その他の指標に有意な変化はなく、群間差も認められなかった。

$\dot{V}O_2\text{max}$ はTR群においてのみ、介入期間後に有意に増加した($P<0.05$)。また、介入期間後における $\dot{V}O_2\text{max}$ はTR群がCON群に比較して有意に高値を示した($P<0.05$, 表1)。

2. 3 血液パラメータ

血清Klotho、血漿ET-1およびNOxはいずれの項目においても交互作用は認められなかった(表1)。

2. 4 3時間座位テストに対する膝窩動脈FMD

介入期間前において、膝窩動脈FMDは両群とも3時間の座位後に有意に低下した($P<0.05$)。介入期間後、座位前の膝窩動脈FMDはTR群に

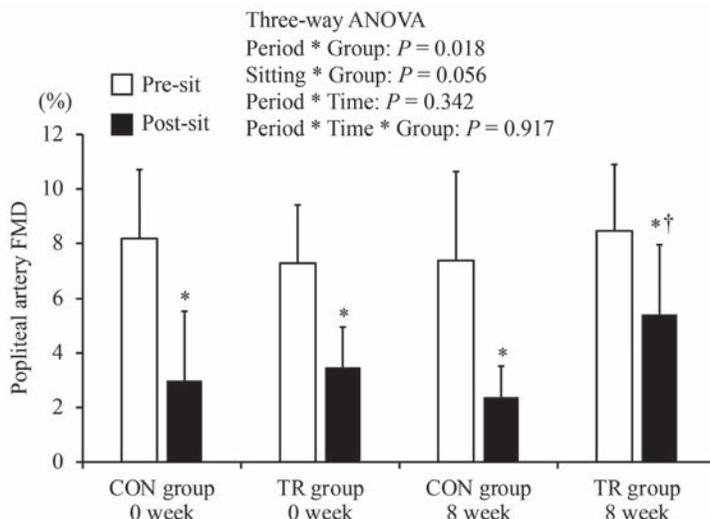


図1 Popliteal artery FMD (%) pre- and post-sitting before and after the intervention period
 * $P < 0.05$ vs. Pre-sit. † $P < 0.05$ vs. Post-sit in CON group 8 week

表2 ANCOVA of post-sitting FMD adjusted for pre-sitting FMD after the intervention period

	df	F	p-value	Partial η^2
Group	1	9.438	0.007	0.344
pre-sitting FMD	1	1.278	0.273	0.066
Error	18			

Analysis of covariance (ANCOVA) was conducted to compare post-sitting FMD between groups, adjusting for pre-sitting FMD measured after the intervention period. Group remained a significant predictor after controlling for baseline values. df = degrees of freedom. Partial η^2 = Partial Eta Squared.

において1.2%上昇したものの、統計学的有意差には至らなかった。介入期間後においても、介入期間前と同様、膝窩動脈FMDは両群とも3時間の座位後に有意に低下した ($P < 0.05$)。一方で、座位後における膝窩動脈FMDはTR群がCON群に比較して有意に高値を示した ($P < 0.05$, 図1)。

介入期間後における座位後の膝窩動脈FMDがTR群において高値を示した要因を明らかにするため、介入期間後における座位前の膝窩動脈FMDを共変量としたANCOVAを行なった。その結果、座位後の膝窩動脈FMDには有意な群間差が認められた ($P < 0.05$, 表2)。

3. 考察

本研究の主な結果は以下の通りである。1) 3時間の座位は介入期間前後の双方において、両群

の膝窩動脈FMDを有意に低下させた。2) 介入期間後における座位後の膝窩動脈FMDはTR群がCON群に比較して有意に高値を示した。3) 介入期間後における座位後の膝窩動脈FMDの群間差は、介入期間後における座位前の膝窩動脈FMDを共変量として補正した場合でも有意であった。以上より、8週間のHIITは座位による血管内皮機能の低下を予防できないものの、その低下を軽減することが明らかになった。

本研究では、介入期間後においても、3時間の座位によってTR群の膝窩動脈FMDは有意に低下した。これは、我々の仮説とは異なるものであり、先行研究⁶⁾とは一致しない結果である。一方で、先行研究で対象としたのは競技レベルの高い自転車選手であったのに対し、本研究の対象者は普段余暇的に運動している健康な若年男女であっ

た。事実、 $\dot{V}O_2\text{max}$ の値は本研究のTR群（介入期間後）で $49.3 \pm 4.9\text{mL}/\text{min}/\text{kg}$ であるのに対し、先行研究の自転車選手は $60.8 \pm 3.6\text{mL}/\text{min}/\text{kg}$ であり、直接的に結果を比較するのは難しい。したがって、座位による血管内皮機能の低下を予防するには、自転車競技選手と同程度の体力レベルが必要になるかもしれない。言い換えれば、座位が血管内皮機能の悪化に及ぼす影響はそれだけ強力であり、8週間のHIITでは座位による血管内皮機能の低下を完全に予防することはできないと考えられる。したがって、一般成人においては、運動習慣があったとしても、座位行動中にはなるべく長時間の座位姿勢を取らず、座位を中断して歩くなどの日常生活の工夫が求められる。

一方で、興味深いことに、介入期間後における座位後の膝窩動脈FMDはTR群がCON群に比較して有意に高値を示した。さらに、この群間差は、介入期間後における座位前の膝窩動脈FMDを共変量として補正した際にも同様に認められた。つまりこの結果は、8週間のHIITは座位による血管内皮機能の低下を軽減することを示している。一方、この詳細なメカニズムは未だ不明である。本研究では、血管内皮機能に関連する血中パラメータとして、血清Klotho、血漿ET-1、血漿NOx濃度を測定した。しかし、いずれの項目においても交互作用は認められなかった。したがって、少なくとも血清Klotho、血漿ET-1、血漿NOx濃度の変化はTR群で観察された効果には関与していないと考えられる。今後は、座位中の抹消循環や中心循環の変化にも焦点を当て、更なる検討をしていく必要があるかもしれない。

結 論

健康な若年男女に対する8週間のHIITは、座位による血管内皮機能の低下を予防できないことが明らかになった。一方で、その低下の程度は抑制されることが認められた。

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いただきました対象者の皆さまにも感謝申し上げます。

文 献

- 1) Biswas A., Oh P.I., Faulkner G.E., Bajaj R.R., Silver M.A., Mitchell M.S., Alter D.A., Sedentary time and its association with risk for disease incidence, mortality, and hospitalization in adults: a systematic review and meta-analysis., *Ann. Intern. Med.*, 162: 123-132(2015)
- 2) Bauman A., Ainsworth B.E., Sallis J.F., Hagstromer M., Craig C.L., Bull F.C., Pratt M., Venugopal K., Chau J., Sjostrom M., Group IPS., The descriptive epidemiology of sitting. A 20-country comparison using the International Physical Activity Questionnaire (IPAQ)., *Am. J. Prev. Med.*, 41: 228-235(2011)
- 3) Thosar S.S., Bielko S.L., Mather K.J., Johnston J.D., Wallace J.P., Effect of prolonged sitting and breaks in sitting time on endothelial function., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 47: 843-849(2015)
- 4) Restaino R.M., Walsh L.K., Morishima T., Vranish J.R., Martinez-Lemus L.A., Fadel P.J., Padilla J., Endothelial dysfunction following prolonged sitting is mediated by a reduction in shear stress., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 310: H648-653(2016)
- 5) Morishima T., Restaino R.M., Walsh L.K., Kanaley J.A., Fadel P.J., Padilla J., Prolonged sitting-induced leg endothelial dysfunction is prevented by fidgeting., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 311: H177-182(2016)
- 6) Morishima T., Tsuchiya Y., Ueda H., Tsuji K., Ochi E., Sitting-induced Endothelial Dysfunction Is Prevented in Endurance-trained Individuals., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 52: 1770-1775(2020)
- 7) Tabata I., Nishimura K., Kouzaki M., Hirai Y., Ogita F., Miyachi M., Yamamoto K., Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and $\dot{V}O_2\text{max}$., *Med.*

- Sci. Sports Exerc.*, 28 (10) :1327-30(1996)
- 8) Boyle L.J., Credeur D.P., Jenkins N.T., Padilla J., Leidy H.J., Thyfault J.P., Fadel P.J., Impact of reduced daily physical activity on conduit artery flow-mediated dilation and circulating endothelial microparticles., *J. Appl. Physiol.* (1985), 115: 1519-1525(2013)

知的障害アスリートにおける 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) 同 塩田有規
同 高澤祐治
スペシャル
オリンピックス日本 和田武久

Sports Injuries in Deaf Japanese National Soccer Players

by

Yuki Someya, Yuki Shiota
*Faculty of Health and Sports Science,
Graduate school of Health and Sports Science,
Juntendo University, Chiba, Japan*
Yuji Takazawa
*Sports Medicine, Graduate school of Medicine
Juntendo University, Tokyo, Japan*
Takehisa Wada
Special Olympics Nippon, Tokyo, Japan

ABSTRACT

[INTRODUCTION]

Few studies of sports injuries and illness in athletes with intellectual disabilities have been conducted. The purpose of this study was to determine the incidence and characteristics of sports injuries and illness among Special Olympics athletes.

[METHODS]

A total of 503 athletes who participated in the 8th Special Olympics Japan Winter Games 2024 and the Special Olympics World Winter Games Torino 2025, and a total of 30 Unified Partners (able-bodied people) who play sports with athletes were subjects of the study. The number of cases of sports injuries and illness, the incidence rate per 1,000 athlete-days, and the mechanisms and modes of occurrence were investigated.

[RESULTS]

A total of 31 injuries and illnesses (Any complaint) occurred during the study period (6 days for National Games and 7 days for World Games) ; the incidence rate per 1000Athlete-days was 9.6 for athletes in the National Games, 93.8 for Athletes and 83.3 for Unified Partners in the World Games. Among them, 2 (2.1/1000 athlete-days) Time-loss injuries and illnesses that forced the discontinuation of sports activities occurred in the National Games and 4 (21.7/1000 athlete-days) in the World Games, Mood/emotional disorders and worsening of pre-existing medical conditions were also identified.

[CONCLUSION]

Sports injuries and illnesses in athletes with intellectual disabilities ranged from severe cases to aggravation of pre-existing conditions.

キーワード

スポーツ外傷・障害, 知的障害, スペシャルオリンピックス, 疫学調査

Keyword

Sports injury, Intellectual disabilities, Special Olympics, Epidemiology

要 旨

[背 景]

知的障害を有するアスリートを対象としたスポーツ外傷・障害, 疾病の調査はほとんど行われていない. 本研究は, スペシャルオリンピックスアスリートにおけるスポーツ外傷・障害, 疾病の発生率と特徴を明らかにすることを目的とした.

[方 法]

2024年第8回スペシャルオリンピックス日本冬季ナショナルゲームおよび2025年スペシャルオリンピックス冬季世界大会・トリノに参加したア

スリート総計503名, アスリートと一緒にスポーツを行うユニファイドパートナー(健常者)総計30名を対象とし, スポーツ外傷・障害, 疾病の発生件数, 1000Athlete-daysあたりの発生率, 発生の機序や様式などを調査した.

[結 果]

調査期間中(ナショナルゲーム6日間, ワールドゲーム7日間)に合計31件の外傷と疾病(Any complaint)が発生した. 1000Athlete-daysあたりの発生率はナショナルゲーム9.6, ワールドゲームのアスリートで93.8, ユニファイドパートナーで83.3であった. そのうち, スポーツ活動を中止

せざるを得ないTime-lossの外傷と疾病はナショナルゲームで2件(2.1/1000 Athlete-days), ワールドゲームで4件(21.7/1000 Athlete-days)発生し、いずれもアスリートのみであった。Time-loss以外の外傷と疾病では、発生機序や臨床所見が不明確な訴え、気分・感情障害や既往症の悪化も確認された。

[結 論]

知的障害アスリートにおけるスポーツ外傷・障害、疾病は、重症例から既往歴の悪化まで多岐にわたった。

緒 言

スポーツは年齢、性別、障害の有無を問わず、すべての人が楽しむことができる活動であり、身体的・心理的健康に良い影響を与えるだけでなく、人と人を結びつける機会にもなる。しかし、障害を持つ人々のスポーツ実施率は依然として低く、特に知的障害者では26.6%に留まっている。障害者がスポーツを安心して実施するためには、健常者以上にスポーツ現場でのメディカルサポートが大切である。知的障害者は、先天性疾患や内科系疾患が併存¹⁾していることが多く、さらに運動調整能力(特に平衡感覚)が劣っているなどの身体的特性があることが報告されている²⁾。加えて、自身の身体の痛みや症状を適切に伝えることが難しい場合も多く、知的障害アスリートの身体的特徴やスポーツ外傷・障害、疾病のリスクを正確に把握し、予防する取り組みは、競技参加の安全性を高め、継続的なスポーツ実施を支えるために重要である。

スポーツ現場における外傷・障害や疾病の予防策を講じるためには、まず各競技における発生頻度や重症度などの実態を明らかにする必要がある³⁾。オリンピックなどの大規模スポーツイベントでは、これまで多くの疫学調査が実施され、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。しかしながら、知的障害者を対象としたスポーツ競技会(スペシャルオリンピックスなど)での外傷・障害、疾病に関する調査は極めて限られており、知的障害アスリート特有の傷病や発生リスクについては不明である。

そこで、本研究では、国内外で実施されるスペシャルオリンピックス冬季大会において、知的障害アスリートを対象にスポーツ外傷・障害及び疾病の発生状況を調査し、その特徴を明らかにすることを目的とした。これにより、今後のメディカルサポート体制の構築や予防的取り組みの基礎資料としての活用が期待される。

1. 調査方法

1. 1 対象者

2024年第8回スペシャルオリンピックス日本冬季ナショナルゲーム(ナショナルゲーム)および2025年スペシャルオリンピックス冬季世界大会・トリノ(ワールドゲーム)に参加したアスリート総計503名と、アスリートと一緒に競技に参加するユニファイドパートナー(健常者)総計30名を対象とした。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:順大ス倫第2024-80号)。

1. 2 データ取得期間

2023年11月から2024年2月に開催されたナショナルゲーム計6日間および2025年3月に開催されたワールドゲーム7日間とした。

1. 3 データ取得方法

ナショナルゲーム救護スタッフおよびワールドゲーム日本代表メディカルスタッフが記録・管理した外傷・障害、疾病に関する記録、コンディション情報、並びにフィジカルデータを二次利用した。また、ナショナルゲームおよびワールドゲームで

の公式記録（スタートリストやリザルト）をもとに、大会期間中の選手の活動状況も調査対象とした。

調査項目を下記に示す。

(1) 基本情報

年齢，競技種目

(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，診断名など）

*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（IOC）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⁴⁾に準拠して記録した。日本代表メディカルチームの診断をもとに分類し，まず，全ての身体の不調（外傷・障害，疾病）を示す「Any complaint」の発生状況を調査した。次に，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」となった外傷・障害，疾病を詳細に調査した。これらの記録から，スポーツ外傷・障害，疾病の発生件数，および発生率を算出した。発生率は，練習や試合の参加日数の合計および，その合計日数における1,000 Athlete-daysあたりの外傷・障害，疾病の発生件数（発生率=外傷・障害発生件数÷Athlete-days×1,000）

として算出した。

(3) 活動情報

練習，試合への参加の有無，試合，練習におけるプレー時間

1. 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。

2. 調査結果

2. 1 対象者とスポーツ活動

本研究対象のアスリート503名，ユニファイドパートナー30名のスポーツ種目を大会ごとに表1に示す。平均年齢（公表されているデータのみ）はナショナルゲームで29.6±8.9歳，ワールドゲームでは30.3±8.9歳であった。

対象者の総スポーツ活動日は，ナショナルゲームで合計994日，ワールドゲームで合計184日であった。

2. 2 外傷・障害，疾病発生率

観察期間中に発生したAny complaint，Time-lossに該当する外傷・障害，疾病の発生件数，発生率を表2に示す。

Any complaintに該当する外傷・障害の総件数

表1 各大会における種目別参加者数

	ナショナルゲーム		ワールドゲーム	
	アスリート	ユニファイド パートナー	アスリート	ユニファイド パートナー
アスリート数(人)	485	26	28	4
フロアボール	40 (36/4)	26 (7/9)	6 (6/0)	4 (4/0)
フロアボール(個人技能)	10 (8/2)	-	-	-
フロアホッケー	131 (112/19)	-	-	-
フロアホッケー(個人技能)	18 (15/3)	-	-	-
フィギュアスケート	35 (10/25)	-	2 (1/1)	-
ショートトラックスケート	41 (33/8)	-	2 (1/1)	-
アルペンスキー	117 (88/29)	-	9 (4/5)	-
クロスカントリースキー	26 (22/4)	-	3 (1/2)	-
スノーボード	18 (15/3)	-	2 (1/1)	-
スノーシューイング	49 (39/10)	-	4 (2/2)	-

値は人数(男性/女性)で示す

表2 各大会における暴露時間とスポーツ外傷・障害、疾病の発生状況

	ナショナルゲーム		ワールドゲーム	
	アスリート	ユニファイド パートナー	アスリート	ユニファイド パートナー
人数(人)	485	26	28	4
観察期間(日)	6	2	7	6
総暴露時間(日)	942	52	160	24
外傷・障害				
Any complaint				
発生件数	9	0	15	2
発生率(/1000Athlete-days)	9.6	0	93.8	83.3
Time-loss				
発生件数	2	0	3	0
発生率(/1000Athlete-days)	2.1	0	16.3	0
疾病				
Any complaint				
発生件数	1	0	4	0
発症率(/1000Athlete-days)	1.1	0	25	0
Time-loss				
発生件数	0	0	1	0
発生率(/1000Athlete-days)	0	0	5.4	0

はナショナルゲームで9件、ワールドゲームで17件であり、うち24件(ナショナルゲームで9件、ワールドゲームで15件)がアスリートで発生していた。1000Athlete-daysあたりの発生率はナショナルゲームで9.6であり、すべて外傷であった。ワールドゲームにおける発生率はアスリートで93.8、ユニファイドパートナー 83.3で、いずれも外傷で発生率に大きな差はなかった。一方で、試合や練習に参加できないTime-lossに該当する外傷・障害の発生率は、ナショナルゲーム2.1/1000 Athlete-days、ワールドゲーム16.3/1000 Athlete-daysであり、いずれもアスリートのみで発生していた。

疾病に関しては、Any complaintに該当する疾病はナショナルゲーム1件(1.1/1000 Athlete-days)、ワールドゲーム4件(25.0/1000 Athlete-days)で、すべてアスリートのみで発生していた。Time-lossに該当する疾病はワールドゲームのみで発生し、発生率5.4/1000 Athlete-daysであった。

2.3 外傷の発生部位の内訳

アスリートにおけるAny complaintとして報告

された外傷(全24件)のうち18件(75.0%)が下肢に発生していた。Time-lossとなった外傷(全5件)では下肢および頭部・顔面における発生がそれぞれ2件(各40.0%)と多く発生していた(図1)。

2.4 外傷の種類の内訳

アスリートにおいて発生した外傷の種類別内訳を図2に示す。Any complaintでは、筋・腱に関する外傷が最も多く、全24件中11件(45.8%)を占めた。一方、Time-lossとなった外傷(全5件)では、骨及び神経系の外傷がそれぞれ2件(各20.0%)と多い結果であった。

2.5 外傷の発生様式

外傷の発生様式の内訳は、Any complaintとして報告された外傷(全24件)では、急性外傷が17件(70.8%)、負荷の反復による障害が7件(29.2%)であり、急性外傷が多数を占めた。Time-lossとなった外傷・障害は、全て急性外傷であった(図3)。

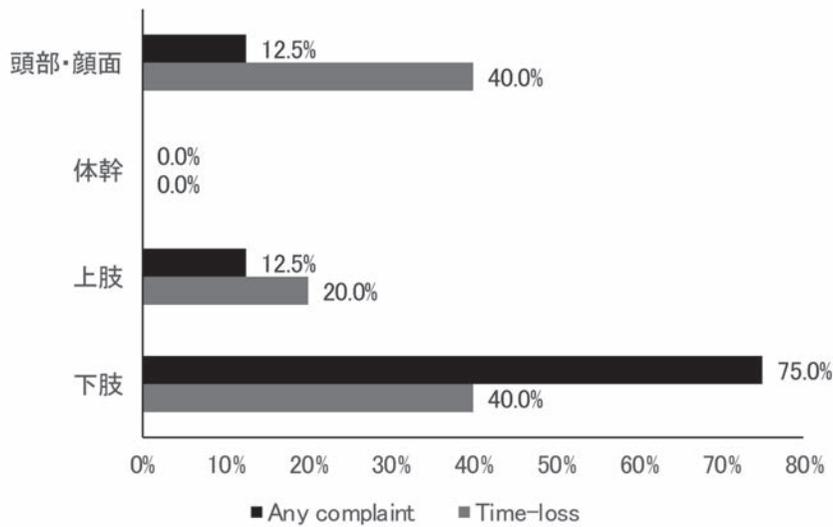


図1 外傷の発生部位の内訳

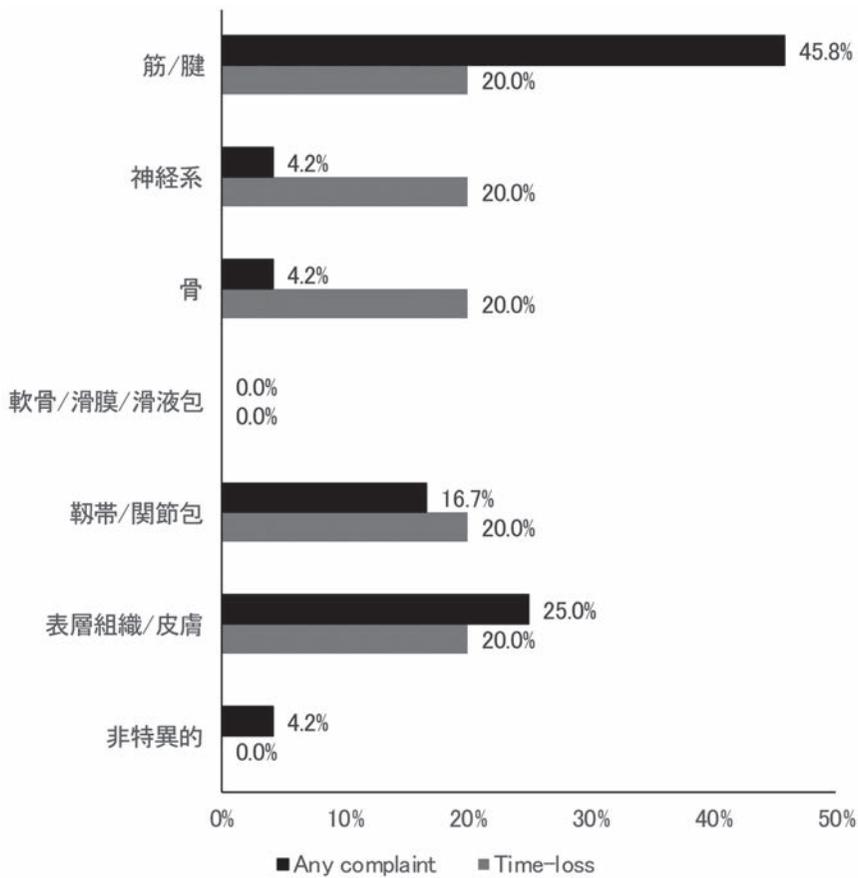


図2 外傷の種類の内訳

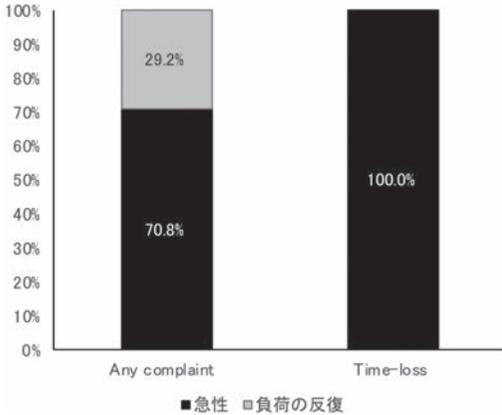


図3 外傷の発生様式の内訳

2. 6 外傷の発生メカニズム

外傷の発生メカニズムの内訳を図4及び5に示す。Any complaintとして報告された外傷ではコンタクトによる受傷は17件中5件(29.4%)、ノンコンタクト(非接触)による受傷が12件(70.6%)で非接触による受傷が多かった。コンタクトによる外傷・障害のうち80.0%が人や物との衝突によるダイレクトコンタクトによる受傷であった。

一方、Time-lossとなった外傷では、コンタクトによる受傷が5件中3件(60.0%)、ノンコンタクトによる受傷が2件(40.0%)であった。コンタクトによる外傷のすべてがダイレクトコンタクトによる受傷であり、接触が要因となる外傷がやや多かった。

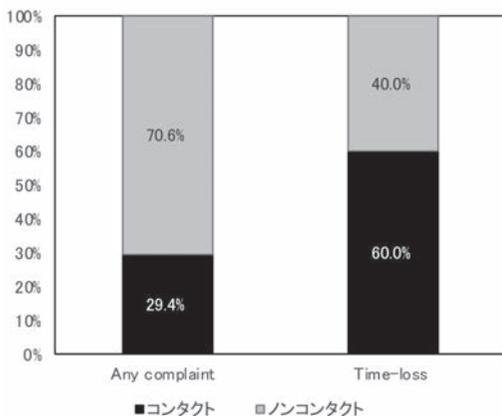


図4 外傷のメカニズムの内訳

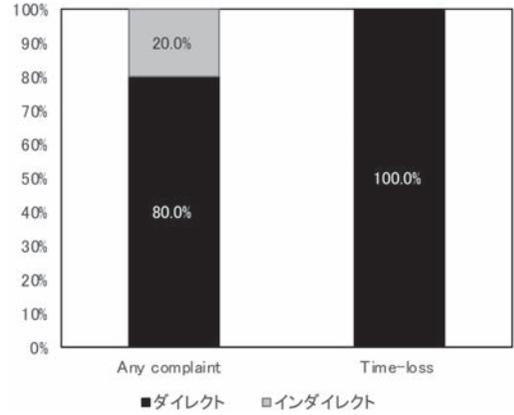


図5 外傷のコンタクトの内訳

2. 7 疾病の詳細

スポーツ活動中に発生したAny complaintとしての疾病は多岐にわたり、その大半が軽症であった。発生機序や臨床所見が不明確な身体的不調に加え、気分・感情障害や既往症の悪化と考えられる訴えも確認された(表3)。

表3 疾病の詳細

	Any complaint	Time-loss
件数	5	1
部位		
消化器系	3(60.0%)	0(0.0%)
血管	1(20.0%)	0(0.0%)
体温調節	1(20.0%)	1(100.0%)
病因		
環境-非運動関連	1(20.0%)	0(0.0%)
感染症	0(20.0%)	1(100.0%)
代謝/栄養	1(20.0%)	0(0.0%)
非特異的	2(40.0%)	0(0.0%)

3. 考 察

本研究は、知的障害を有するアスリートを対象に、国内外の大規模スポーツ大会期間中に発生したスポーツ外傷・障害および疾病の発生状況を調査したものである。観察期間中に外傷・障害は24件発生し、その発生率は、ナショナルゲームで9.6/1000 Athlete-days、ワールドゲームで93.8/1000 Athlete-daysであった。疾病はナショナルゲームで1件(1.1/1000 Athlete-days)、ワールドゲームで4件(25.0/1000 Athlete-days)確認され

た。アスリートに発生したTime-lossの外傷は頭部や下肢で多く、人や物との接触による急性外傷が主であった。疾病の発生件数は比較的少なかったが、発生機序や臨床所見が不明確な訴え、気分・感情障害や既往症の悪化も確認された。

2022年に開催された北京オリンピック・パラリンピックUSAチームで発生した外傷・障害、疾病の報告では、スポーツ外傷・障害の発生率は1000Athlete-daysあたりオリンピックで16.5、パラリンピックで29.1、疾病はオリンピックで6.8、パラリンピックで16.5であった⁵⁾。競技種目が異なるため単純に比較することはできないものの、国際的なスポーツ大会での知的障害を有するアスリートのスポーツ外傷・障害、疾病の発生率はこれらと比較しても高い可能性が示された。スペシャルオリンピックにおける過去の報告では、2009年に開催された7日間のイギリスナショナルゲーム夏季大会では、約2500名のアスリートが参加し550件の外傷・障害、疾病が発生し⁶⁾、2015年にアメリカで開催されたワールドゲーム夏季大会では大会前後も含めた15日間で、6,221名のアスリートが参加し2,374件の外傷・障害、疾病が発生したと報告されている⁷⁾。いずれの調査でも、活動記録がないため、発生率は算出されていないが、大会期間中に多くの外傷・障害および疾病への対応が必要であったことが述べられていた。

また、本研究において知的障害を有するアスリートの外傷・障害の発生部位が頭部や下肢に多いことが明らかとなった。先行研究では、体幹部の外傷・障害は少なく、下肢で多いこと⁷⁾、また、筋骨格系の外傷が56.7%と最も多く、脳振盪などの頭部外傷も約1.5%と報告されており⁶⁾、本調査結果と同様の結果であった。知的障害を有する人は身体動作の調整能力、特に平衡感覚に課題があるとされ²⁾、転倒リスクが高く^{2,8,9)}、それに起因する頭部外傷も多いことが報告されている¹⁰⁾。

¹¹⁾ このことから、知的障害を有するアスリートの身体的特性が外傷・障害の発生に関与していることが考えられる。

一方で、知的障害を有するアスリートを対象とした先行研究は少なく、また、本研究も症例数が少ないため、スポーツ外傷・障害、疾病の詳細な比較や原因の特定までは至っていない。継続的な調査により、対象者数や症例数を蓄積することで、より詳細な分析が可能と考えられる。さらに、本研究の調査結果が広く共有され、スペシャルオリンピックを含むパラスポーツにおけるメディカルサポートが拡充することで、今後の外傷・障害の予防に貢献できることが期待される。引き続き、調査を継続し、知的障害を有するアスリートの安全で健康的な競技活動を支えるための基盤作りに貢献していきたいと考えている。

結 語

知的障害アスリートにおけるスポーツ外傷・障害、疾病は、重症例から既往歴の悪化まで多岐にわたる。

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、本調査のご協力くださいましたスペシャルオリンピックスメディカルスタッフの皆様にご心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) van den Bemd M., Schalk B.W.M., Bischoff E., Cuypers M., Leusink G.L., Chronic diseases and comorbidities in adults with and without intellectual disabilities: comparative cross-sectional study in Dutch general practice., *Fam. Pract.*, **39** (6) :1056-62(2022)
- 2) Enkelaar L., Smulders E., van Schrojenstein Lantman-de Valk H., Geurts A.C., Weerdesteyn V., A review of balance and gait capacities in relation to

- falls in persons with intellectual disability., *Res. Dev. Disabil.*, **33** (1) :291-306(2012)
- 3) 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)
 - 4) 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)
 - 5) Anderson T., Cali M.G., Clark S.C., Hasley I., Larson E.G., Noble-Taylor K.E., et al., Team USA injury and illness incidence at the 2022 Beijing Winter Olympic and Paralympic Games., *Br. J. Sports Med.*, (2023)
 - 6) Wheeler P.C., Williamson T., Stephens C., Ferguson M., A report of the medical team activity at the 2009 Special Olympics GB., *Br. J. Sports Med.*, **46** (2) :143-9(2012)
 - 7) Rubin A.L., Woodward T., Harrison L., Simon L., Rodriguez J., Medical Learning from the Special Olympics World Games 2015., *Curr. Sports Med. Rep.*, **15** (3) :134-9(2016)
 - 8) Smulders E., Enkelaar L., Weerdesteyn V., Geurts A.C., van Schrojenstein Lantman-de Valk H., Falls in older persons with intellectual disabilities: fall rate, circumstances and consequences., *J. Intellect. Disabil. Res.*, **57** (12) :1173-82(2013)
 - 9) Cox C.R., Clemson L., Stancliffe R.J., Durvasula S., Sherrington C., Incidence of and risk factors for falls among adults with an intellectual disability., *J. Intellect. Disabil. Res.*, **54** (12) :1045-57(2010)
 - 10) Fudge J.R., Improving Concussion Care for Athletes with Intellectual Disabilities., *Curr. Sports Med. Rep.*, **19** (4) :131-2(2020)
 - 11) Seto K., Lloyd M., Chan V., Chung H., Balogh R., Traumatic Brain Injury Incidence in Adults with Intellectual and Developmental Disabilities., *Can. J. Neurol. Sci.*, **48** (3) :392-9(2021)

カーボローディングが 体水分状態と暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響

宮崎大学 塩瀬圭佑
(共同研究者) 福岡大学 富賀理恵
北海学園大学 内藤貴司
鹿屋体育大学 藤田英二

Effects of Carbohydrate Loading on Hydration Status and Thermoregulatory Responses During Exercise in a Hot Environment

by

Keisuke Shiose

Faculty of Education, University of Miyazaki

Rie Takae-Tomiga

Faculty of Sports and Health Sciences, Fukuoka University

Takashi Naito

Faculty of Law, Hokkai-Gakuen University

Eiji Fujita

*Faculty of Sports and Life Science,
National Institute of Fitness and Sports in Kanoya*

ABSTRACT

In this study, we investigated the effects of carbohydrate loading on hydration status and thermoregulatory responses during exercise in a hot environment.

Ten healthy adult males consumed either a standard diet (CON condition; carbohydrate: 6.1 ± 0.5 g/kg BW/day) or a high-carbohydrate diet (CL condition; carbohydrate: 11.2 ± 0.6 g/kg BW/day) for three consecutive days. Total body water

(TBW) was assessed using the stable isotope dilution method. Participants performed 40 minutes of cycling at 60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ in a hot environment (31°C , 70% relative humidity). Rectal temperature (T_{re}) and mean skin temperature (T_{sk}) were measured before exercise and every 10 minutes during exercise. TBW after exercise was estimated by subtracting sweat loss from the pre-exercise TBW.

Pre-exercise TBW was significantly higher in the CL condition compared to the CON condition (37.7 ± 4.7 kg vs. 37.0 ± 4.9 kg, $p < 0.05$). After 40 minutes of exercise, both T_{re} and T_{sk} increased in both conditions, with no significant interaction. Since sweat loss did not differ significantly between the two conditions, post-exercise TBW remained significantly higher in the CL condition than in the CON condition (36.9 ± 4.8 kg vs. 36.2 ± 4.8 kg, $p < 0.05$).

In conclusion, while carbohydrate loading did not significantly alter thermoregulatory responses, it may help maintain body water content during exercise in a hot environment.

キーワード

カーボローディング, 体水分量, 深部体温, 体温調整, 暑熱環境

Keyword

Carbohydrate loading, Total body water, Core temperature, Thermoregulation, Hot environment

要 旨

本研究では、カーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に与える影響を調査した。成人男性10名は、標準食 (CON条件, 炭水化物 6.1 ± 0.5 g/kg 体重/日) または高糖質食 (CL条件, 炭水化物 11.2 ± 0.6 g/kg 体重/日) を3日間摂取した。体水分量を安定同位体希釈法を用いて測定し、温度 31°C 、相対湿度70%の下、60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 強度で40分間の自転車運動を行った。運動前および運動中10分ごとに直腸温 (T_{re}) と平均皮膚温 (T_{sk}) を測定した。運動前後の体重差から発汗量を算出し、運動前の体水分量から減じて運動後の体水分量を推定した。運動前の体水分量はCL条件で有意に高かった ($p < 0.05$)。 T_{re} および T_{sk} は運動中に上昇したが、条件間差は認め

られなかった。発汗量に差はなく、運動後の推定体水分量はCL条件の方が高値であった ($p < 0.05$)。以上より、カーボローディングは暑熱環境下運動時の体温変動には影響を及ぼさないが、運動中の体水分量の保持に寄与する可能性が示唆された。

背 景

暑熱環境下での運動においては、脱水や過度な深部体温の上昇が運動パフォーマンスの低下や熱中症の発生要因となることが知られている¹⁾。これらを防ぐため、運動前の身体冷却、水分補給、運動前の体水分量増加を目的とした栄養戦略など、様々な暑熱対策が開発・実践されている。

運動前に体水分量を増加させることは、脱水の進行を遅延させ、運動時の体温上昇を抑制する可能性がある。運動を実施する数時間から数日前よ

りクレアチンやグリセリンの摂取量を増加させるクレアチンローディングやグリセリンローディングといわれる栄養戦略がある。これらの方法によって、体水分量が数百グラムから1.5 kg程度増加するとともに^{2,4)}、運動中の深部体温上昇が軽減されることや⁵⁾、運動中の脱水が抑制されることが報告されている⁶⁾。以上より、これらの栄養戦略は暑熱対策として一定の有効性を有すると考えられている。

数日間にわたり8-12g/kg体重/日の糖質を摂取し、骨格筋内に貯蔵されたグリコーゲン量が通常の2倍程度まで増加させるカーボローディングといわれる栄養戦略がある⁷⁾。筋グリコーゲンは運動時の主要なエネルギー基質であり、その貯蔵量の増加によって主には持久性パフォーマンスの向上が期待される⁸⁾。そのため、持久性アスリートにおいては、試合直前にパフォーマンス向上を目的にカーボローディングが実践されることがある。一方、カーボローディングを行うことで、体水分量の増加に起因する体重の増加が生じることが広く知られる。先行研究では、クレアチンローディングやグリセリンローディングと同様に、カーボローディングによっても体水分量が数百グラムから1.5kg程度増加することが報告される^{9,10)}。また、カーボローディングによる体水分量増加の背景として、グリコーゲンの高い親水性により、グリコーゲン1gあたり約3-4gの水分が骨格筋内に結合・貯蔵されるためであると考えられる¹¹⁾。

しかし、カーボローディングの暑熱対策としての有効性に着目した研究は非常に限定的である。唯一、Pitsiladis et al.の研究において、カーボローディング実施時における暑熱環境下持久性運動時の体温変動とパフォーマンスが報告されており、持続可能運動時間の延長が認められた一方、体温変動に対するは明確な影響は示されなかった¹²⁾。ただし、この研究では体水分量が測定されておら

ず、カーボローディングにより体水分量の増加が生じていたかや、運動中の脱水状況の違いがあったかについては不明であった。以上のように、カーボローディングが暑熱環境下運動時に及ぼす影響に関する先行研究は限られており、運動条件や評価項目も限定的であるという点から更なる検討の余地がある。

そこで、本研究ではカーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

1. 方法

1.1 対象者

本研究は10名の成人男性(年齢 20 ± 2 歳, 身長 171.0 ± 4.3 cm, 体重 65.6 ± 9.8 kg, BMI 22.4 ± 3.2 kg/m², VO₂max 39.5 ± 7.5 mL/kg/min)を対象に、2024年と2025年の3月に実施された。全ての対象者は部活動、地域スポーツクラブ活動、授業等において日常的な運動習慣をしていた。全ての対象者に対し、研究の方法および危険性について口頭で説明し、同意を得た後で署名によるインフォームド・コンセントを取得した。本研究は宮崎大学教育学部倫理審査委員会(承認番号:2023-16-E-1201)および鹿屋体育大学自然科学系倫理審査小委員会(承認番号:23-1-61号)による承認を得て実施された。

1.2 介入条件

対象者は標準食を摂取する条件(CON条件)、または高糖質食を摂取する条件(Carbohydrate loading; CL条件)のいずれかに、無作為に振り分けられた。それぞれの条件において、対象者は規定された食事を3日間摂取し、その前後で各測定を行った。実験期間中、水は自由摂取とし、トレーニング等の日常生活を超える運動は実施しないよう指示をした。本研究は、ランダム化クロスオーバーデザインで実施され、全ての対象者がCON

条件とCL条件の両条件をランダム順で実施した。

1. 3 介入前後の測定

全ての対象者は事前に、自転車エルゴメータ（風神雷神，株式会社OCL，東京）を用いて最大酸素摂取量（ VO_2max ）の測定を実施した。 VO_2max の測定は、先行研究を参考に²⁾、常温環境下（21℃）で行った。運動中は呼気ガス分析装置（AE-310S，株式会社ミナト医科学，大阪）を用いて呼気ガスを採取・分析し、酸素摂取量を算出した。酸素摂取量と負荷量の関係式を作成し、各対象者における100%および60% VO_2max に相当する運動負荷を決定した。

本研究の概要を図1に示す。実験1日目、対象者は起床後に280 mLの水のみを摂取し、8時間以上の絶食状態で来研した。その後、排尿を済ませた上で、体重計（HW-100KC，A&D社製，東京）を用いて0.01kg単位で体重を測定した。CL条件では、筋グリコーゲン量の低下を目的として、約60分間の高強度間欠式自転車運動を行った（枯渇運動）。枯渇運動は、先行研究に準じて¹³⁾、100% VO_2max 強度で1分間の運動を、30Wでの4分間のインターバルを挟み、計12セット実施した。

そして、CON条件とCL条件において規定された食事を3日間にわたり摂取した。

実験4日目には、1日目と同様の条件で体重の測定を行い、さらに空気置換法および安定同位体希釈法を用いて身体組成を測定した。その後、先行研究を参考に²⁾、気温31℃、相対湿度70%に設定された環境試験室（ESPEC社，大阪）にて10分の安静後、自転車エルゴメータを用いて60% VO_2max 強度で40分間の持久性運動を実施した。運動中は、先行研究に従い²⁾、10分おきに体重1kgあたり2.14 gの室温の水を摂取した。運動前後で裸体体重を測定し、発汗量を算出した。

1. 4 食事内容

CON条件とCL条件では、それぞれ2,000 kcal/日、2,500 kcal/日、3,000 kcal/日の3種類の食事内容を設定し、対象者の性別、年齢、体重から推定した総エネルギー消費量に近似するエネルギー量の食事を提供した。各条件におけるエネルギー摂取量および栄養素量の概要を表1に示す。CON条件では6.1 g/kg 体重/日の炭水化物が摂取され、CL条件では11.2 g/kg 体重/日の炭水化物が摂取された。

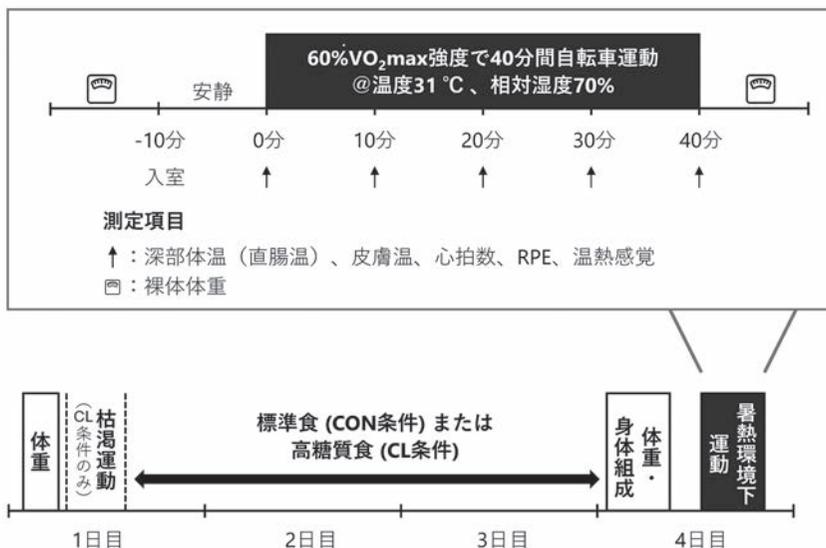


図1 研究の概要

表 1 各介入条件のエネルギー摂取量, 栄養素量

	CON条件	CL条件
エネルギー (kcal/日)	2716±243	3458±397
たんぱく質 (g/日)	97±6	94±5
脂質 (g/日)	82±9	26±7
炭水化物 (g/日)	397±38	731±81
(g/kg/日)	6.1±0.5	11.2±0.6
PFC比	14:27:58	11:7:83

数値は平均値±標準偏差で示す

1. 5 身体組成

身体密度はBOD POD (COSMED SRL社, イタリア)を用いた空気置換法により測定した。体水分量は安定同位体希釈法により測定した。安定同位体希釈法では, 推定体水分量あたり0.06gの重水素 (Deuterium Oxide filtered ≥ 99.8 atom% D, 太陽日酸株式会社, 東京) を経口投与した。推定体水分量は体脂肪率を15%, 除脂肪組織の水和率を73.2%と仮定して算出した。尿サンプルは, 投与前, 投与3時間後, 投与4時間後に自然採尿により採取し, -30°C で保管した。尿中の安定同位体比は, 安定同位体比質量分析計 (Hydra 20-20 Stable Isotope Mass Spectrometer, Sercon, Crewe, UK) を用いて測定した。測定された安定同位体比から, 先行研究に基づき^{14, 15)}, 体水分量を算出した。得られた身体密度と体水分量から, 3成分モデルによって脂肪量, 体脂肪率, 除脂肪量を算出し¹⁶⁾, 除脂肪量から体水分量を差し引いて除脂肪固形量を求めた。

1. 6 暑熱環境下運動時の主観的運動強度, 温熱感覚, 心拍数, 体温

暑熱環境下での40分の持久性運動時では, 主観的運動強度 (RPE), 温熱感覚, 心拍数, 深部体温, 皮膚温を10分ごとに測定した。RPEの測定にはBorgスケールを用い¹⁷⁾, 温熱感覚の測定には21段階のスケール (-10 ; 非常に寒い, $+10$; 非常に暑い, 0 ; どちらでもない) を用いた¹⁸⁾。

深部体温は直腸温 (T_{re}) で評価された。 T_{re} は, デサントスポーツ科学 Vol. 47

直腸温用プローブ (ITP010-11, 日機装サーモ社, 東京) とデータロガー (N543, 日機装サーモ社, 東京) により 0.01°C 単位で記録された。プローブには専用ゴムカバーを装着し, 潤滑剤を塗布の上, 先端を肛門から10-15cm挿入して測定を行った。皮膚温は, ボタン型温度ロガー (サーモクロンSL, KNラボラトリー, 大阪) により 0.5°C 単位で記録された。ボタン型温度ロガーは専用ゴムカバーを装着し, 腕前, 胸部, 大腿前の3点に固定した。平均皮膚温 (T_{sk}) は先行研究に基づき¹⁹⁾, 以下の式で算出した:

$$T_{sk} = 0.43 \times \text{胸部皮膚温} + 0.25 \times \text{上腕部皮膚温} + 0.32 \times \text{大腿部皮膚温}$$

1. 7 発汗量, 運動後の体水分量

運動前後に汗を十分に拭きとった状態で裸体体重を 0.05 kg単位で測定し, 以下の式を用いより発汗量を算出した:

$$\text{発汗量} = \text{運動前体重} - (\text{運動後体重} + \text{運動時飲水量})$$

また, 運動前の体水分量から発汗量を減じ, 運動後の体水分量を推定した。

2. 統計

結果は全て平均値±標準偏差で示した。体重および暑熱環境下運動時の評価項目については, 繰り返しのある二元配置分散分析により条件間の差を検討した。有意な交互作用が認められた場合には, Bonferroni法による多重比較検定を用いた。その他の評価項目は, 対応のあるt検定により条件間の差を検討した。統計処理はSPSS Statistics

ver.27 (IBM社製) を用いて実施し、有意水準は5%未満とした。

3. 結果

3.1 身体組成

体重は有意な条件×時間の交互作用が認められた ($p = 0.009$, $\text{partial } \eta^2 = 0.552$)。実験1日目の体重に条件間で有意な差はなかった (CON条件 65.9 ± 9.7 kg, CL条件 65.7 ± 10.0 kg, $p = 0.441$)。一方、実験4日目の体重は条件間に有意差があり

(CON条件 65.4 ± 9.6 , CL条件 66.0 ± 9.9 kg, $p = 0.004$)、CL条件で高値を示した。実験4日目の身体組成を表2に示す。除脂肪量、体水分量は、条件間に有意差があり (いずれも $p < 0.05$)、CL条件で高値を示した。一方、体脂肪量および除脂肪固形量には条件間で有意な差は認められなかった。

3.2 主観的運動強度 (RPE)、温熱感覚、心拍数

暑熱環境下運動時のRPE、温熱感覚、心拍数

表2 身体組成の比較

		CON条件	CL条件
体重	(kg)	65.4 ± 9.5	$66.0 \pm 9.9^{**}$
体脂肪量	(kg)	13.9 ± 6	13.2 ± 5.4
除脂肪量	(kg)	55.7 ± 6.2	$56.6 \pm 6.3^{**}$
体水分量	(kg)	37.0 ± 4.9	$37.7 \pm 4.7^*$
除脂肪固形	(kg)	18.7 ± 1.6	18.8 ± 1.8

数値は平均値±標準偏差で示す。* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ vs CON条件。

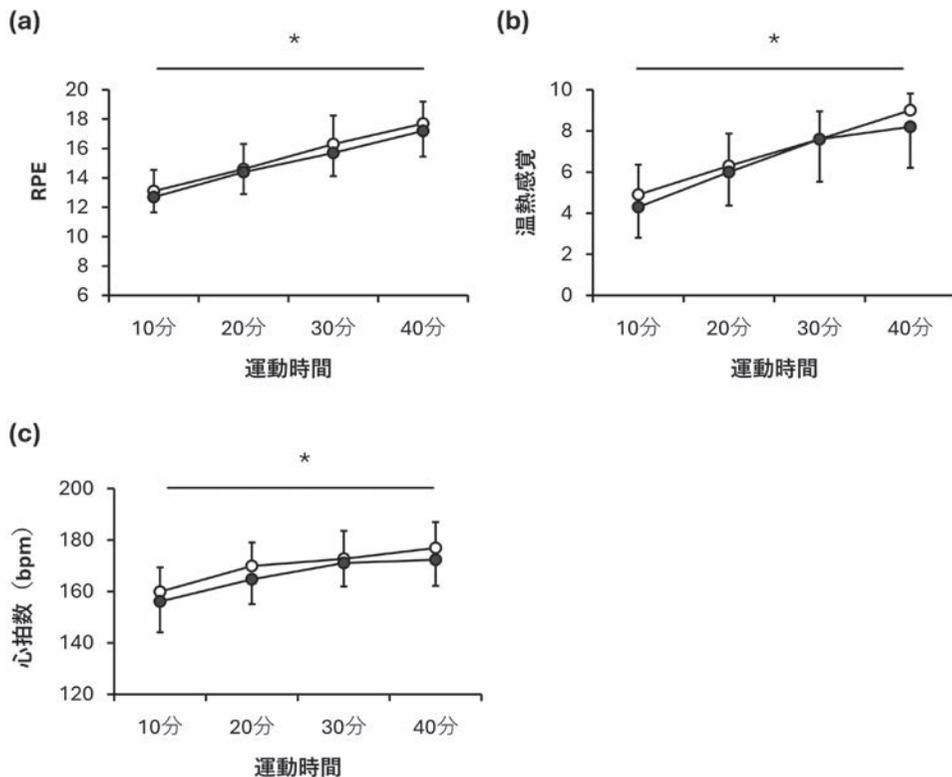


図2 暑熱環境下運動時の (a) 主観的運動強度, (b) 温熱感覚, (c) 心拍数の変化
平均値±標準偏差で示す。○CON条件, ●CL条件。時間の主効果 * $p < 0.05$ 。

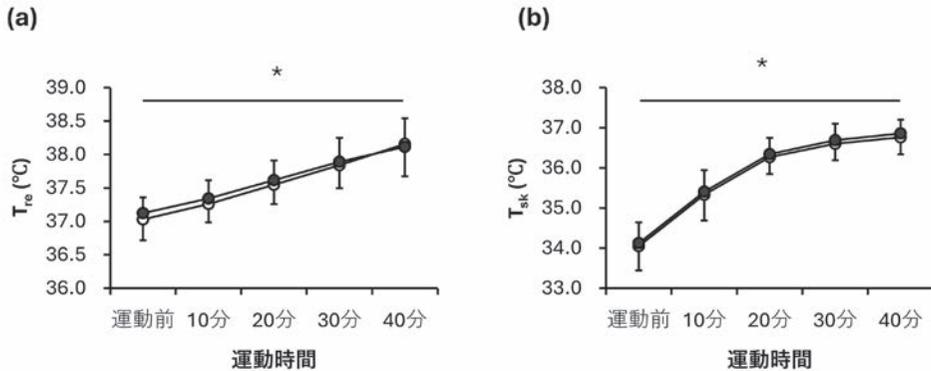


図3 暑熱環境下運動時の (a) 直腸温, (b) 平均皮膚温の変化
 平均値±標準偏差で示す。○CON条件, ●CL条件. 時間の主効果 * $p < 0.05$.

の変化を図2に示す。RPE, 温熱感覚, 心拍数はいずれも運動中に有意に変化し(時間の主効果: RPE $p < 0.01$, $\text{partial } \eta^2 = 0.949$; 温熱感覚 $p < 0.01$, $\text{partial } \eta^2 = 0.922$; 心拍数 $p < 0.01$, $\text{partial } \eta^2 = 0.949$), 運動時間が経過するごとに高値を示した。しかし, RPEと温熱感覚に有意な条件×時間の交互作用は認められなかった (RPE $p = 0.688$, $\text{partial } \eta^2 = 0.052$; 温熱感覚 $p = 0.279$, $\text{partial } \eta^2 = 0.132$)。心拍数は条件間で差がある傾向が認められ(条件の主効果 $p = 0.075$, $\text{partial } \eta^2 = 0.310$), CL条件で低値を示した。しかし, 心拍数に有意な条件×時間の交互作用は認められなかった ($p = 0.360$, $\text{partial } \eta^2 = 0.107$)。

3. 3 深部体温 (T_{re}), 平均皮膚温 (T_{sk})

暑熱環境下運動時の T_{re} と T_{sk} の変化を図3に示す。 T_{re} と T_{sk} は運動中に有意に変化し(時間の主効果: T_{re} $p < 0.01$, $\text{partial } \eta^2 = 0.927$; T_{sk} $p < 0.01$, $\text{partial } \eta^2 = 0.985$), 運動時間が経過するごとに高値を示した。 T_{re} は, CON条件で $37.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$ から $38.2 \pm 0.4^\circ\text{C}$, CL条件では $37.1 \pm 0.2^\circ\text{C}$ から $38.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$ へと上昇した。 T_{re} に条件×時間の交互作用は認められなかった ($p = 0.202$, $\text{partial } \eta^2 = 0.169$)。 T_{sk} も同様に, CON条件では $34.1 \pm 0.6^\circ\text{C}$ から $36.8 \pm 0.4^\circ\text{C}$, CL条件では $34.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$

から $36.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$ へと上昇し, 条件×時間の交互作用は認められなかった ($p = 0.977$, $\text{partial } \eta^2 = 0.001$)。

3. 4 発汗量, 運動後の体水分量

発汗量はCON条件で 0.79 ± 0.25 kg, CL条件で 0.77 ± 0.27 kgであり, 条件間で有意な差は認められなかった ($p = 0.770$, Cohen's $d = 0.095$)。運動後の推定体水分量はCON条件で 36.2 ± 4.8 kg, CL条件で 36.9 ± 4.8 kgであり, 条件間に有意差があり ($p = 0.008$, Cohen's $d = 1.082$), CL条件で高値を示した。

4. 考 察

本研究では, 3日間のカーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響を検討した。その結果, CL条件では運動前に体水分量の増加が生じたが, 暑熱環境下運動時における深部体温と平均皮膚温には変化が認められなかった。一方, CL条件では運動後においても体水分量が高い状態が維持されていた。

本研究では, CL条件において, 体重, 除脂肪量, 体水分量が高値を示した。本研究では, カーボローディング前後で直接的に身体組成の評価を行っていないものの, 先行研究においてはカーボ

ローディング後の体重および体水分量の増加が報告される^{9,10)}。したがって、CL条件とCON条件の身体組成の差はカーボローディングによる身体組成変化を反映した可能性が高い。体水分量の増加には、筋グリコーゲンの蓄積に伴う結合水の増加が寄与していると考えられる。グリコーゲンは分子構造上、親水性が高く、骨格筋内に貯蔵される際に一定の水分と結合すると考えられる(結合水)。本研究では筋グリコーゲン量を測定していないが、CL条件での糖質摂取量は11.2 g/kg体重/日であり、36-48時間で筋グリコーゲン量が約2倍増加することを報告した先行研究の摂取量と同程度であった^{10,20,21)}。また、カーボローディングによる筋グリコーゲンの超回復は、事前に筋グリコーゲン量の減少があった部位に特異的に生じる⁷⁾。本研究では事前に自転車運動を行っており、下肢筋群において筋グリコーゲンの蓄積があったと推察される。本研究対象者と年齢、体格が近似した日本人男性における下肢筋量の報告や²²⁾、標準的な筋グリコーゲンの単位組織量あたり貯蔵量から²³⁾、下肢筋群には通常150g程度の筋グリコーゲンが貯蔵されていると見積もられる。さらに、1gのグリコーゲン分子に対し約3-4gの水分が結合すると推察されているという先行研究の報告からも¹¹⁾、CL条件で観察された約0.7 kgの体水分量の増加は、下肢筋群における筋グリコーゲン量の増加が主な要因であると考えられる。

暑熱環境下での運動時に生じる過度な体温の上昇は、運動パフォーマンスの低下や、熱中症の誘因となる。先行研究では、クレアチンローディングやグリセリンローディングによって体水分量が増加し、これにより深部体温の上昇が抑制されることが報告されている^{2,24)}。本研究は、カーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に与える影響を初めて報告したものである。CL条件ではCON条件と比べ体水分量が高値を示し、この差はクレアチンローディングやグリ

セリンローディングによって生じる体水分の増加量と同程度であった^{2,24)}。しかし、CL条件ではカーボローディングが暑熱環境下の運動時の T_{re} や T_{sk} に与える明確な影響は示されなかった。この結果について、カーボローディング時に増加する体水分の性質が関与している可能性がある。グリセリンローディングでは、細胞内液と細胞外液のいずれも増加することが報告されている²⁾。一方、カーボローディングによって生じる体水分の増加は、生体電気インピーダンス法やMRIを用いた研究において、主に細胞内液の増加に起因するとされている^{10,25)}。特に、細胞内部に存在する水分の多くは高分子の周囲に密に保持されている結合水であり、細胞外液に含まれる自由水とは異なる熱力学的特性を有すると考えられる²⁶⁾。結合水が体温調整に果たす生理機能は明らかではないものの、カーボローディングによって細胞内液量が増加したことで、体温調整に及ぼす影響が限定的であった可能性がある。一方で、クレアチンローディングでもカーボローディングと同様に細胞内液量を主とする体水分量の増加が起こる²⁾。ただし、カーボローディングでは筋グリコーゲン量の増加に伴って局所的な体水分量の増加が生じる可能性が指摘される¹⁰⁾。クレアチンローディングにおける体水分の分布特性は明確ではないが、カーボローディングではこのような局所性が影響し、クレアチンローディングほどの体温調整効果を示さなかった可能性がある。

暑熱環境下運動時のRPEおよび温熱感覚に条件間で差は認められなかった。これは、運動中の T_{re} 、 T_{sk} も条件間に差がなかったことから、両条件において同程度の熱ストレスが加わっていたことが一因と考えられる。一方、運動中の心拍数はCL条件で低値を示す傾向が認められた。本研究では自転車運動を実施したが、CL条件においては体重の増加により相対的負荷量が僅かに低下し、その結果として心拍数の低下傾向が認められ

た可能性がある。一方、ランニングなどの体重が直接的に運動時負荷に影響する運動様式では、体重の増加が相対的負荷の増加につながると考えられる。したがって、カーボローディングが運動時心拍数に及ぼす影響については、運動様式を考慮した更なる検討が必要である。

CL条件では、CON条件と比較して運動中の発汗量に差がなく、運動前後において体水分量が多い状態が保持されていた。脱水は、深部体温の上昇と関連し、運動パフォーマンスの低下や、熱中症発生の一要因となるとされる。本研究では温度31℃、相対湿度71%の暑熱環境下において40分間の中強度持久性運動を実施し、発汗率は1.2 kg/時間に相当した。先行研究では体重の2%に相当する脱水により運動パフォーマンスの低下が惹起されると報告されている²⁷⁾。本研究の環境条件下ではおよそ60分の運動を行った場合に脱水が体重の2%に達すると推定される。一方、CL条件では約0.7 kgの体水分量増加が認められており、この増加分により、体重の2%に相当する脱水が生じるまでの時間をCON条件と比べておよそ40分遅延できると推算される。このように、CL条件において運動後の体水分量が高く保たれていたことは、カーボローディングが暑熱環境下での脱水予防に寄与する可能性を示唆しており、暑熱対策としての一手段としての有効性を支持する結果であった。

本研究の限界としていくつかの点が挙げられる。まず、本研究では対象者数が限定的であった。運動中の深部体温の変化について統計的に有意な差は認められなかったものの、10名中8名において、運動40分後の T_{re} がCL条件で低値を示した。したがって、今後は対象者数を増加させたうえで、カーボローディングが暑熱環境下運動時の体温変動や体水分状態に及ぼす影響を、より高い検出力をもって検討する必要がある。次に、本研究では運動習慣のある一般成人とし、40分間の中強度

デサントスポーツ科学 Vol. 47

自転車運動中の生理応答を調査したが、実際の競技場面においてカーボローディングが暑熱環境下でのパフォーマンスに与える影響については明らかにできなかった。本研究の結果から、カーボローディングによる体水分量の増加が脱水予防に貢献する可能性が示唆された一方で、体重の増加が運動時のエネルギーコストの増加につながる可能性も否定できない。今後の研究では、競技レベルの高いアスリートを含め、より実際的なパフォーマンス評価指標を用いた研究が求められる。

結 論

カーボローディングは暑熱環境下における持久性運動時の体温変動に対して明確な影響を及ぼさなかった。一方で、カーボローディングにより生じた体水分量の増加は、運動中の体水分量の保持に寄与した。この結果は、脱水の予防という観点から、カーボローディングが暑熱環境下での対策として有効である可能性を示唆するものである。

謝 辞

本研究の遂行にあたり助成を承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お礼申し上げます。

文 献

- 1) 長谷川博., 暑熱環境下におけるスポーツでの暑さ対策., *フットボールの科学*, **16**: 3-9, (2021)
- 2) Easton C., Turner S., Pitsiladis Y., Creatine and glycerol hyperhydration in trained subjects before exercise in the heat., *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, **17**: 70-91 (2007)
- 3) Volek J.S., Mazzetti S.A., Farquhar W.B., Barnes B.R., Gómez A.L., Kraemer W.J., Physiological responses to short-term exercise in the heat after creatine loading., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **33**: 1101-1108 (2001)
- 4) 西島壮, 征矢英昭., 暑熱下運動時の脱水を防ぐグリセリンローディング., *体育の科学* **54**: 810-814, (2004)

- 5) Kreider R.B., Kalman D.S., Antonio J., Ziegenfuss T.N., Wildman R., Collins R., Candow D.G., Kleiner S.M., Almada A.L., Lopez H.L., International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine., *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, **14**: 18 (2017)
- 6) Latzka W.A., Sawka M.N., Montain S.J., Skrinar G.S., Fielding R.A., Matott R.P., Pandolf K.B., Hyperhydration: tolerance and cardiovascular effects during uncompensable exercise-heat stress., *J. Appl. Physiol.*, **84**: 1858-1864 (1998)
- 7) Bergström J., Hultman E., Muscle glycogen synthesis after exercise: an enhancing factor localized to the muscle cells in man., *Nature*, **210**: 309-310 (1966)
- 8) Bergström J., Hermansen L., Hultman E., Saltin B., Diet, muscle glycogen and physical performance., *Acta. Physiol. Scand.*, **71**: 140-150 (1967)
- 9) Olsson K.E., Saltin B., Variation in total body water with muscle glycogen changes in man., *Acta. Physiol. Scand.*, **80**: 11-18 (1970)
- 10) Shiose K., Yamada Y., Motonaga K., Sagayama H., Higaki Y., Tanaka H., Takahashi H., Segmental extracellular and intracellular water distribution and muscle glycogen after 72-h carbohydrate loading using spectroscopic techniques., *J. Appl. Physiol.*, **121**: 205-211 (2016)
- 11) Shiose K., Takahashi H., Yamada Y., Muscle Glycogen Assessment and Relationship with Body Hydration Status: A Narrative Review., *Nutrients*, **15**: 155 (2022)
- 12) Pitsiladis Y., Maughan R., The effects of exercise and diet manipulation on the capacity to perform prolonged exercise in the heat and in the cold in trained humans., *J. Physiol.*, **517**: 919-930 (1999)
- 13) Shiose K., Tobina T., Higaki Y., Kiyonaga A., Tanaka H., Effectiveness of sub-maximal intermittent exercise on muscle glycogen depletion, PGC-1 α and PDK-4 gene expression., *Open Journal of Molecular and Integrative Physiology*, **2**: 119-126 (2012)
- 14) Yamada Y., Yokoyama K., Noriyasu R., Osaki T., Adachi T., Itoi A., Naito Y., Morimoto T., Kimura M., Oda S., Light-intensity activities are important for estimating physical activity energy expenditure using uniaxial and triaxial accelerometers., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **105** (2009)
- 15) Sagayama H., Yoshimura E., Yamada Y., Ichikawa M., Ebine N., Higaki Y., Kiyonaga A., Tanaka H., Effects of rapid weight loss and regain on body composition and energy expenditure., *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **39**: 21-27 (2014)
- 16) Siri W.E., Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. In: Techniques for Measuring Body Composition (Brozek J, Henschel A, eds.), *National Academy of Sciences*, Washington, DC, 223-244 (1961)
- 17) Borg G.A., Psychophysical bases of perceived exertion., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **14**: 377-381 (1982)
- 18) Watson P., Hasegawa H., Roelands B., Piacentini M.F., Looverie R., Meeusen R., Acute dopamine/noradrenaline reuptake inhibition enhances human exercise performance in warm, but not temperate conditions., *J. Physiol.*, **565**: 873-883 (2005)
- 19) Roberts M.F., Wenger C.B., Stolwijk J., Nadel E.R., Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation., *J. Appl. Physiol.*, **43**: 133-137 (1977)
- 20) Sherman W.M., Costill D.L., Fink W.J., Miller J.M., Effect of exercise-diet manipulation on muscle glycogen and its subsequent utilization during performance., *Int. J. Sports Med.*, **2**: 114-118 (1981)
- 21) Bussau V.A., Fairchild T.J., Rao A., Steele P., Fournier P.A., Carbohydrate loading in human muscle: an improved 1 day protocol., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **87**: 290-295 (2002)
- 22) Abe T., Kearns C.F., Fukunaga T., Sex differences in whole body skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging and its distribution in young Japanese adults., *Br. J. Sports Med.*, **37**: 436-440 (2003)
- 23) Areta J.L., Hopkins W.G., Skeletal Muscle Glycogen Content at Rest and During Endurance Exercise in Humans: A Meta-Analysis., *Sports Med.*, **48**: 2091-2102 (2018)
- 24) Lyons T., Riedesel M., Meuli L., Chick T., Effects of glycerol-induced hyperhydration prior to exercise in the heat on sweating and core temperature., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **22**: 477-483 (1990)
- 25) Nygren A.T., Karlsson M., Norman B., Kaijser L., Effect of glycogen loading on skeletal muscle cross-sectional area and T2 relaxation time., *Acta. Physiol.*

- Scand.*, **173**: 385-390 (2001)
- 26) パスカル・マントレ, 細胞の中の水, 東京大学出版会 (2006)
- 27) 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., *European Journal of Applied Physiology*, **87**: 529-534 (2002)

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所 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	奥 林 里 子	京都工芸繊維大学 繊維学系 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所 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	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 和 明 (常 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

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

田 島 文 博

1960年代の日本はパラスポーツどころか障がい者や車いすユーザーに対して親切であったとは言えない環境であった。歩道は車いすを使用する事は不可能なほどバリアだらけであったし、公共交通機関は車いすユーザーをなかなか受け入れなかった。その様な環境で、日本のパラスポーツの導入と発展は大分県の太陽の家創設者故中村裕先生の情熱により推進された。1964年の東京オリンピックに引き続き開催された東京パラリンピックは中村裕先生の尽力により実現され、国際的にも高く評価された。しかし、社会の実情はすぐには変わらず、わたくしが大学生となった1970年代でさえ、町中で車いすを見かけることはなかった。その様な障がい者に厳しい環境ではあったものの、日本では、世界に誇る医療体制と看護体制、そしてリハビリテーション診療体制が徐々に構築されていき、パラスポーツも一般に受け入れられていった。

1980年代に入り、中村裕先生が大分国際車いすマラソン大会を企画したが、障がい者に過酷なマラソンを走らせるのは医学的に危険であるという理由で、ハーフマラソンでの開催にせざるをえなかった。その時に車いすマラソンの安全性を担保するためのメディカルチェックと研究を中村裕先生から依頼されたのが産業医科大学リハビリテーション医学講座初代教授緒方甫先生であった。この頃に緒方先生の門下生となった私は、まず、レース前に参加選手全員を診察し、一人もレース中に身体的な急変などを起こさないように努めた。同

時に助教授の浅山晃先生がパラアスリートは健常者に劣らず十分な心肺機能と筋力を備え、レース中の心電図にも問題が無いと雑誌Paraplegiaに発表した。その論文を元に、英国Stoke Mandeville病院の公認を得て、第3回大会からフルマラソン大会として開催された。

この頃からパラスポーツにおけるメディカルチェックの重要性は認識された。まずは競技が安全に行えるようにという観点で、パラスポーツ協会がパラアスリートのメディカルチェック体制を整えて下さった。陶山哲生先生が中心となり草野修輔先生とわたくしでパラアスリートのためのメディカルチェックとアンチドーピング態勢を提案した。2000年代以降、少なくともパラリンピックにおいて、医学的問題で選手が棄権せざるを得なくなる事態は避けられている。現在は、さらにパラスポーツ競技中の事故防止と選手の健康維持増進が求められている。その声に応える基礎となる研究が今回紹介する2つの研究と言える。

染谷由希、塩田有規、高澤祐治、和田武久の「知的障害アスリートにおけるスポーツ外傷・障害、疾病調査」は、知的障害を有するアスリートを対象としたスポーツ外傷・障害および疾病の実態を、国内外の大規模競技大会で明らかにした点に大きな意義がある。知的障害アスリートを対象とした体系的な疫学調査は極めて少なく、本研究は日本では初めてといえる基礎資料である。特に、国際オリンピック委員会 (IOC) の2020年コンセンサスステートメントに準拠し、「Any complaint」と

「Time-loss」に分類して記録・分析した方法論は、国際的な研究との比較を可能としており、高く評価できる。また、ナショナルゲームとワールドゲームの両大会を対象とし、単なる件数報告にとどまらず、競技環境の違いを考慮した解釈を可能にしている。特に、疾病において気分・感情障害や既往症の悪化といった、知的障害アスリート特有と考えられる訴えが含まれていた点などは今後のメディカルサポート体制改善に寄与する重要な知見である。

一方で、いくつかの課題も認められる。症例数が限られている点や、記述統計にとどまっている点など、リスク要因や発生要因を統計学的に検討することは難しい。それでもなお、知的障害アスリートにおけるスポーツ障害が重症外傷から軽微な体調不良、既往症の増悪まで多岐にわたることを示しており、今後の継続調査や予防戦略の基盤となる重要な報告である。パラアスリートメディカルサポートの発展に大きく貢献する研究である。

鳥山 実, 伊藤 創, 居倉怜央, 廣田智弘, 三上幸夫の「超音波を用いた四肢欠損パラアスリートの新たな体組成評価の基盤研究」は、四肢欠損パラアスリートにおける体組成評価という、これ

まで評価が困難であった領域に対し、超音波を用いた新たな取組を示し、実学的で選手の健康に寄与する内容である。健常アスリートのメディカルチェックやトレーニング成果の評価などに活用するための体組成評価には生体電気インピーダンス分析 (BIA) が広く用いられている。しかし、四肢切断者は適用困難であるため、他の方法が必要となる。本研究は、超音波による皮下脂肪厚 (US-SFT) および筋質評価の妥当性を示しており、臨床・競技現場双方において高く評価できる。ただし、今回の対象者は整形外科疾患患者でパラアスリートではない点とサンプルサイズ数が21名と少数である。また、解析対象が部位ごとにさらに限定されている点が挙げられる。これらの点を勘案しても、本研究は、四肢欠損パラアスリートにおける体組成評価の新たな可能性を切り拓く基盤的研究として高く評価でき、今後の標準化や現場応用に向けた重要な一歩となる成果である。

今回の2つの論文は、日本のパラスポーツにおけるスポーツ傷害予防と健康維持増進や競技成績改善への貢献という新たなフェーズを拓く成果を示した。パラスポーツの発展を支援する財団事業の趣旨に合致した意義深い成果であると評価できる。

入選研究者成果報告書講評

学術委員
信州大学 繊維学部 繊維学部コーディネータ 梶原莞爾

No.06 熱的快適性は脳活動から評価できるか？
—ブレインインターフェース型熱的快適性の評価
方法の開発を目指して—

渡邊裕宣, 渋谷 賢, 杉 泰佑, 永島 計

ヒトの熱知覚は温・冷感と熱的快適感の2要素に分類されるということであるが、それぞれに対応する温熱刺激下で測定される脳波スペクトルを、熱知覚形成に関連する脳活動時空間パターンに変換し、ヒトの熱知覚形成を脳活動から定量的に評価する試みがなされた。

温・冷刺激にはペルチェ素子を被験者の右手示指・中指に接触させて冷刺激(24℃)と温刺激(40℃)をそれぞれ10秒間与える。10回の温・冷対刺激を、休息をはさんだ一定の間隔で与え、視覚の評価尺度を用いて局所・全身の温冷感及び快・不快感を主観評価させる。同時に脳波を配置した15電極で測定し、スペクトル解析を行った。

熱的快適感の評価に際しては、水循環スーツ着用で一定温度の冷水(17℃)あるいは温水(47℃)を灌流することにより全身の温熱刺激を与え、局所刺激には両側頸部にペルチェ素子を装着し冷刺激(24℃)及び温刺激(40℃)を与えた。まず全身刺激を与え、温度が安定したのち局所刺激を開始し、脳波を測定、解析を行った。

局所温・冷刺激に対しては、10か所の重複する脳領域が活性化されたが、温・冷刺激では異なる時間的神経振動パターンが観測された。温熱快適性と不快感では明らかに異なる時空間活動パ

ターンが観測されたが、全身熱刺激が違くと主観的快適性が変化し、脳活動パターンも違う。つまり脳活動の時空間パターンから、温・冷感や熱的快適感の評価が可能であることが示されたが、個人差の評価ができるほどの精度には達していない。

No.07 適切なFootwear着用による身体動作の「軽やかさ」の定量化

工藤慎太郎, 渡邊貴博, 宮下敏紀

運動中身体が重くて動きにくい時もあり、軽やかで動くのが楽しい時もある。適切なFootwear着用により身体動作が軽やかになることを定量的にバイオメカニカル因子(jerk, 動作中の関節運動の剛性, 主動作筋と拮抗筋の同時収縮, 下肢関節の協調性のばらつき)によって評価する提案が本報の目的である。

快適性の高いFootwearの着用はランニングパフォーマンスを向上する。「軽やかさ」がランニング時の快適性を表す主観的な評価であるが、では「軽やかさ」は客観的にバイオメカニカルの観点からはどのように評価でき、そのバイオメカニカル因子は「軽やかさ」とどのように相関しているのだろうか。本研究では足部アーチの支持がランニング中の運動に影響を与えることに着目し、アーチサポートインソールを応用して主観的な「軽やかさ」感とバイオメカニカル因子と相関があるかを検証した。

まず市販の4種のアーチサポートインソール着用時の足部アーチ変形挙動を伸縮性歪センサーで測定し、靴内の足部アーチ挙動の定量的評価を試みた。アーチサポートインソールは運動時のアーチ変形を抑制するが、アーチ変形が最小であった条件（アーチ制動条件）では「軽やかさ」感の主観評価が最高点であった。

ではなぜ運動時のアーチ変形が小さい時足が軽いと感じるのだろうか。バイオメカニカル因子はアーチ制動条件下の運動ではいずれも低下しており、動作の円滑性が「軽やかさ」に関連することが示唆された。バイオメカニカル因子がそれぞれ独立した指標であるかどうかは明確でないが、これらの客観的指標をより高機能な Footwear の開発に応用できる期待を抱かせる。

No.08 衝撃吸収材を目指したキトサン誘導体による新規高分子材料創製

網代広治

近年海洋中のマイクロプラスチックが社会的悪として環境規制の対象になり、石油由来からの脱却を目指してバイオマスを基本にした生分解性バイオ由来プラスチックの開発が盛んにおこなわれている。本研究もその流れに沿ったもので、バイオマスであるキトサンを基材にして、生体吸収性素材として商業的に体内縫糸などに応用されているポリトリメチレンカーボネート (PTMC) の誘導体とのブレンドにより、実用に耐えうる引張強度と伸張性を併せ持つ高分子素材を創製した。

キトサンはセルロースに次ぐバイオマスで、骨格はセルロースと同じ1, 4βグルカンであるため、剛直で脆く実用性に乏しい。そのため誘導体化や可塑剤添加等様々な改善が試みられている。他の生分解性高分子とのブレンドも試みられているが、一般に高分子-高分子のブレンドは相溶性が悪く、必ずしも実用的特性を改善するものでは

ない。

本研究では2種のPTMCの誘導体とキトサンのブレンドを試みている。特にPTTG(グルカミン側鎖がグラフトされている)との相溶性がNH₂基:OH基が2:1で最適であることから、グルカミンがキトサン分子間水素結合を割ってPTTG-キトサン分子間水素結合を形成し、コンプレックス状になっていることが示唆されている。ただ反応収率が悪くキャラクタリゼーションも十分でないので、応用分野は付加価値の高い医学分野に限定されるかもしれない。

No.09 暑熱下運動中におけるペルチエ素子による頸部冷却の有用性の検討

内藤貴司, 林 聡太郎, 斎藤辰哉, 斎藤敦司

ここ数年、毎年夏の平均気温は上昇し、地球温暖化の現実を実感させられる。熱中症患者数も増加し、その対策が必要なことは言うまでもない。熱中症発症は深部体温の過度な上昇が主要因として考えられており、その抑制対策としてアイススラリー経口摂取による深部体温低下が有効とされている。一方頸部冷却は脳血流の熱負荷軽減効果が期待される。本研究では簡便に装着できるペルチエ素子ネッククーラーの有用性を、アイススラリー経口摂取と比較してその効果を検証している。

被験者は恒温室(室温20℃, 相対湿度50%)内で30分以上安静を保ったのち、外部雰囲気と各被験者身体との間に同一の熱的平衡条件になる半そでシャツ, 短パン, 運動靴を着用, 採尿・身長と体重測定, 測定器具を装着して暑熱環境(室温34.0 ± 1.0℃, 相対湿度52 ± 3%, 黒球湿球温度29.5 ± 0.6℃)に曝し, 全身反応時間を測定後自転車エルゴメーター上で5分間安静を保ち, 自転車運動を15分, 休息5分のサイクルを3回反復, 運動終了後全身反応時間, 体重測定, 採尿を行っ

た。運動開始前5分間安静の間に、体内冷却の場合はアイススラリーを摂取、頸部冷却の場合はペルチェ素子ネッククーラーを運動開始時に装着した。

頸部冷却は、温熱不快感や主観的運動強度には体内冷却に比べ優位な差は認められなかったが、運動時間が長くなると直腸温の上昇を抑制できなくなり、暑熱障害予防には適切な冷却方式ではな

い。これは冷却部位体表面積が狭小であることによるとされているが、一定の熱負荷軽減による認知機能の改善効果や主観的不快感の軽減による持久運動能力低下の抑制が認められていることから、冷却部位や冷却温度オン・オフ等冷却方式の最適化により、簡便な暑熱障害予防に資する装置の開発ができるかもしれない。

入選研究者成果報告書講評

学術委員

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)

下 光 輝 一

1. 福家真里那など:「運動時の左室一動脈カップリングにおける大動脈インピーダンスの寄与を解明: MRI 計測による検討」

左室からの血液駆出の動態を調べる際に用いられる生理学的指標は、臨床研究で一般的に用いられている末梢血管抵抗や平均動脈圧であるが、これらは定常的な後負荷の指標であるために、運動時に心臓と血管がダイナミックに相互作用する人の循環における負荷を正確にとらえられない可能性があるという問題点があった。本研究では、MRI を用いて大動脈インピーダンスをリアルタイムで経時的に計測することにより、運動時の左室一動脈カップリングの変化を的確にとらえることを目的として、2種類の運動様式(レジスタンス運動および有酸素運動)における大動脈インピーダンスが左室エネルギー動態へ及ぼす影響、並びに持久性競技選手におけるインピーダンス特性が、左室機械的・代謝的エネルギーに関連するかについて検討した。

結果は、レジスタンス運動では動脈スティッフネスのような構造的特性による左室後負荷が、また有酸素運動では反射波や末梢血管の収縮・弛緩による平均血圧の変化が、左室一動脈カップリングに大きく影響されることが示唆された。さらに持久系競技選手の安静時データでは、末梢血管抵抗ではなく動脈スティッフネスが低いという特性が認められた。運動の急性効果と慢性効果が、動脈の異なる部位に異なる影響を及ぼす可能性が示唆された。

本研究結果は、MRI を用いて運動中のリアルタイムでの循環動態の変化を計測することにより新しい知見が得られ、運動処方への適正化や循環器疾患患者におけるリスク評価に重要な示唆を与えるものである。

2. 横山寛子:「ウェアラブルセンサーを用いたバスケットボール競技中の膝関節衝撃負荷の解明」

バスケットボール競技においては、膝関節に大きな衝撃がかかり前十字靭帯などの損傷が起きることが多い。女子高校生を対象としてウェアラブルセンサーを装着して、どのような動作が膝関節に高衝撃をもたらすかについて評価検討した。その結果、高衝撃動作は「ストップ」「スプリント」「減速」などの動作に高頻度に見られたが、バスケットボールにおける急減速が特に膝関節への衝撃を増大させることが分かった。一方、利き脚、非利き脚の間に有意差は認められなかった。

本研究は、膝関節における運動時の損傷の予防に資する研究であり、意義があるものと考えられる。今後は、性・年齢などにおいて対象範囲を広げ、また様々な条件における衝撃特性について検討していく必要がある。

3. 渡邊裕宣など:「ウェアラブルデバイスを用いた深部体温の予測モデルの構築—熱中症罹患リスクのリアルタイム評価法の開発を目指して」

最近のウェアラブルデバイスの進歩は注目すべきものがある。

本研究では、熱中症予防に重要な深部体温モニタリングをスマートウォッチ型ウェアラブルセンサーへのモデル搭載を最終目標として、研究を行った。方法は、前腕皮膚温と生理・環境、個人パラメータを変数とした新しい深部体温予測モデルを開発するために、暑熱環境下での多段階トレッドミル運動において、耳内温（深部体温の指標として）の予測モデルにおける各変数を重回帰分析に投入し検討した。その結果開発された前腕皮膚温を用いた深部体温予測モデルが、深部体温のリアルタイムセンシングに実用的なアプローチとなる可能性が示唆された。

このような皮膚温の変化から深部体温の変化を簡便に同定できる技術の開発が実用化されると、今後の熱中症予防に役立つ可能性がある。さらに対象集団を広げ、様々な環境条件の下で、より実証的な研究が望まれる。

4. 中井雄貴：「筋・南部組織の滑走性から筋

疲労度を判定する AI システムの構築」

国民の健康の維持・増進のためには、人々がより一層、運動・スポーツに親しむ必要がある。しかし、運動スポーツの推進における問題には、「スポーツ障害」や「オーバーユーズ」の問題も挙げられている。

そこで、本研究では、運動時における疲労感の出現に対して、どのような筋肉の動態変化が関わるのかについて検討を行った。方法は、ランニングにおける主観的疲労感の出現に対して、筋膜の滑走性、足関節の柔軟性、ジャンプ能力の変化の中でどれが最も関連性があるかについて、超音波エコー検査法により得られた結果を Lasso 回帰分析により検討したところ、筋膜の滑走性の低下が疲労間の増大に最も関連していることが明らかになった。滑走性の維持・改善が疲労増加を抑制するうえで重要に指標になりうることが明らかになり、今後の運動後の疲労管理や対策の一助になることが考えられ、意義のある研究と考えられた。

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員
医療法人三良会 村上新町病院 院長 吉 岡 利 忠

講評を依頼された5本の報告書について目的、方法、結果、考察、参考文献および謝辞についてそれぞれ体裁が整えられている。

(01) 成瀬正敏氏らによる「血管内皮機能改善のための食後高脂血症管理：身体活動量と有酸素性運動の影響」は学術論文として極めて完成されたものと評価する。食後の中性脂肪上昇は動脈硬化の進行の要因となり、ひいては脳動脈のみならず心冠状動脈疾患を誘発する危険因子である。これらを予防するためには血管内皮機能低下および中性脂肪の上昇を抑制することが重要であり、本報告では3種類の条件下での有酸素性運動を与えた結果が報告されている。血管内皮機能は上腕動脈において血流依存性血管拡張反応から分析しており、その他、体組成、最大酸素摂取量、運動負荷量を決定し、血液生化学などの分析を正確に進めている。日中の身体不活動、不活動に運動、活動に運動を加えたグループで比較し、いわゆる有酸素運動で食後高脂血症や血管内皮機能低下を軽減する効果があり、身体不活動によってこの効果が制限されることを明瞭に示している。また、動脈硬化予防には単なる運動習慣だけではなく身体活動量全体の見直しが必要であるとの考察は重要である。

(18) 西川太智氏らによる「爆発的な膝伸展力発揮中の運動神経活動を非侵襲的に評価する方法の考察」は高密度表面筋電図を筋組織の部位的な運動単位を記録したユニークな論文である。外側広筋の近位、中位および遠位から高密度表面筋電

図を導出している。さらに皮下組織厚、皮膚表面の筋束の角度を考慮して分析していることが特徴的であり、そのことから電極下の解剖学的特徴を考えなければならないと結論している。爆発的な膝伸展筋力発揮能力はトップアスリートには極めて重要な因子となる。爆発的な等尺性伸展力発揮中の高密度表面筋電図法を用いた運動単位活動の分析により、爆発的筋力発揮はトップアスリートのスプリントおよびジャンプパフォーマンスに最も必要な能力であることが分かるが、競技者に限らず高齢者にとっても重要な意味を持つ。結果として運動単位検出数は中位に比べて近位および遠位で有意に高いという新しい知見を得ている。このことは電極下の皮下組織および皮膚表面と筋束の角度が関連しているという新しい知見が示された。

(20) 北川美南氏らによる「女性における体幹部筋内脂肪の1年間の変化と関連する因子の検討—若齢および高齢女性を対象にして」では若齢群12名、高齢群18名の体幹部筋内脂肪蓄積度を栄養調査、身体活動量のみならず3テスラ核磁気共鳴画像(MRI)を利用して分析した報告である。さらに一年間の間隔を経てそれらの変動を両者間で比較している。骨格筋の質や機能は筋内脂肪により評価されるが加齢による影響もある。その体幹部における筋内脂肪の過度な蓄積は生活習慣病の一次予防(発症予防)および二次予防(疾病の早期発見・早期対応)に対して負に働く。その結果、若齢群では総エネルギー消費量の変化とタン

バク質および炭水化物摂取状況の変化に依存していた。高齢群では脂質および飽和脂肪酸の摂取状況に深く関連していることが明らかになり、若年女性では運動習慣や食生活の改善が必要であり、高齢女性では特に食生活改善が筋肉内脂肪の蓄積の予防につながるとしている。MRI から多くの筋肉の形態学的データのみならず、身体活動量、栄養摂取状況、血液生化学検査のデータが今回の結果をサポートしておりより質の高い報告書となっている。是非、一般市民らにこれらの結果を還元してほしいものである。

(21) 森嶋琢真氏らによる「高強度インターバルトレーニングが座位による血管内皮機能に及ぼす影響」は血流依存性血管拡張反応を分析した報告書である。この機能は血管の収縮や拡張を調節する機能でありその機能低下は心血管系疾患発症の危険因子である。8週間の自転車エルゴメータによる高強度インターバルトレーニングは座位による膝窩動脈の血管内皮機能の低下を予防できなかったもののその低下を軽減することが明らかになった。高い体力のある被験者では座位による血管内皮機能の低下がみられているが、やはり一般人では長時間の座位姿勢を取るべきではなく歩くなどの日常生活の工夫が求められるということを明確に証明した報告書である。長時間の座位は糖尿病や動脈硬化など引き起こすことが知られており、下肢の血流の低下が一つの要因でありここに注目したことに対しても高く評価されるものである。内容の濃い報告書である。本研究で用いたトレーニング内容や測定項目などの詳細な実験手順

によって、今回の貴重な結果が支援されたものと考ええる。

(23) 塩瀬圭佑氏らによる「カーボローディングが体水分状態と暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響」では、カーボローディングが体温変動には影響を及ぼさないが運動中の体水分量の保持に寄与するという結果を示し、このことからカーボローディングが暑熱環境下では脱水の予防において有効であるだろうとしている。しかし体水分量による体重増加によってエネルギーコストの増加もつながるといった可能性も考察されている。暑熱環境下での運動では脱水や体温上昇によって運動パフォーマンス低下や熱中症発症の危険性もあり、これらによって単に身体冷却、水分補給などの対処だけでは十分でないと考えられることから、今回のカーボローディングに注目した報告書である。さらにカーボローディングによって持久性アスリートのパフォーマンス向上が示されることが報告された。カーボローディングが暑熱環境下での運動における体水分の状態や体温変動の影響について詳細な実験方法、実験手法が駆使されこれらの結果を導きだしており質の高い報告書であると評価できる。今後の研究ではトップアスリートを含めより実地的なパフォーマンス評価指標が求められるものと考察している。

以上、5本の報告書とも目的に添った手法が取られておりそれらから導き出された明瞭な結果が示され多くの示唆を与えるものと考ええる。

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員
立命館大学 スポーツ健康科学部 特命教員(教授) 田 畑 泉

ここでは『デサントスポーツ科学』第47巻の5件の成果報告書について講評する。

木村裕也らは、“スピードスケートの高い滑走速度を生み出す関節パワー発揮特性の解明”において、熟練選手16名を対象にスケート靴内に装着したワイヤレスの側圧センサーを用いて、3000m 模擬レース滑走中の力学的特性を明らかにした。その結果、ストレート滑走及びカーブ滑走時の下肢の股関節及び膝関節の伸展トルク及びカーブ滑走時の右下肢の股関節外転トルクパワーが高い方が、競技成績が高いことが明らかとなった。また、カーブ滑走時の右下肢の足関節底屈及び左下肢の膝関節伸展トルクについては男女差が見られ、女子選手についてはこの2つの発揮パワーが重要であることが明らかとなった。これらの結果は、それらの発揮パワーを高めるための滑走テクニックの開発や、それらの発揮パワーを増加させるためのレジスタンストレーニングの開発に寄する貴重な研究であると評価できる。

小宮諒らは“Deep Learning を用いた画像 (750枚) 解析による足部セルフチェックシステムの開発”において、75名150足関節の4台の同期カメラから得られた画像に Deep Learning の手法を用いて、「内展」、「外展」、「内反」、「外反」、「通常」に区分された場合の適合率を明らかにした。その結果、正答率は0.69～1.00と、通常の足部画像分類による正答率(0.26)よりも高かった。この新しい Deep Learning を用いた新規性のある研究

の結果より、多くのスポーツ障害のリスクとなる外反などの足部形態評価の正確性を高めることによりスポーツ障害の予防に寄与する可能性を示したものであり有意義な研究であると評価される。

山川啓介は“神経制御に基づく水中ドルフィンキックの巧みな運動制御構造の解明”で、成人女性を対象に、15mの全力ドルフィンキックにおける、筋電図による筋活動と高速画像データから得られた関節角度を加えた筋シナジー解析を行った。その結果、ドルフィンキックは3つ(4名)あるいは4つ(3名)の運動学一筋シナジーにより動作が制御されていることを明らかにした。これらのドルフィンキックの協調動作に関する知見は、今後、それに基づいた指導法やトレーニング方法の開発に有益であるという点で評価される。

高橋祐美子らは“ギプス固定期間中の非固定部位での運動が筋萎縮からの回復に与える効果”において、12週齢雄性 ICR マウスを対象に、対照群 (CON 群)、2週間の後肢ギプス固定後3日間固定解除群 (R 群) 及び2週間の後肢ギプス固定2週間に前肢を用いた走行トレーニング (速度: 10m/分, 傾斜: 0°, 時間: 60分/日, 頻度: 9日/2週間) を行った群 (ER 群) 間で、ヒラメ筋の形態的・生理学的・生化学的特性を観察した。その結果、筋線維タイプ別の筋線維断面積は、Type I 及び Type II a で CON 群に比べて R 群及び ER 群では有意に低かった。一方 Type II x/b では CON 群に

比べて R 群は有意に低値を示したが、ER 群では ER 群は有意差が無かった。またクエン酸合成酵素等のミトコンドリアの酸化系の酵素タンパク量は、Type I 及び Type II a で CON 群に比べて R 群及び ER 群では有意に低かった。また、PGC1 *a* も同様な結果であった。これらの結果は、不活動中の前肢を用いた運動は、不活動による後肢骨格筋の筋萎縮に対して、筋線維タイプ特異的に影響を与えることが示唆された。この研究結果は、競技選手が障害等で下肢を動かせることができなくなった場合に上肢を用いた運動を行うことにより、下肢の筋萎縮を一部抑制する可能性を示唆するものであり価値ある研究と評価される。

沖田孝一は“血流制限を併用したレジスタンス運動の有効閾値についての検討”において成人男

女 20 名を対象に、間欠的等尺性足関節底屈運動中 (2 秒運動 1 秒休息を 60 回) に筋血流阻止を加えた場合の筋代謝を核磁気共鳴機器により観察した。その結果、10%~40% 1RM (repetition max) では、強度依存性にクレアチンリン酸の低下と pH の低下がみられた。血流阻止併用 20% 1RM による筋中 pH の低下の程度は、血流阻止無しで通常トレーニングに用いられている 60% 1RM (30 回) と同程度まで低下することが示された。この結果は、間欠的等尺性筋運動に血流阻止を併用することで、より低い負荷で、同様の効果が期待できる可能性を明らかにした。この結果は血流阻止を併用することにより、より低い負荷で安全なレジスタンストレーニングを行うことができる可能性を示した有意義な研究と評価できる。

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	公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団
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	戸 床 文 彦	デサントジャパン株式会社 部長代行
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	上 田 憲	さくら法律事務所 代表弁護士
監 事	寺 廣 映 輝	檜垣・鎌倉・寺廣法律事務所パートナー

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	デサントアパレル株式会社 専務取締役

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

活 動 報 告

- (1) 第 47 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 7 年 3 月 21 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 7 年 3 月 31 日

- (3) 臨時書面理事会（決議の省略）
開催日：令和 7 年 5 月 14 日
議 題：① 評議員会招集の件

- (4) 定時理事会
開催日：令和 7 年 6 月 6 日
議 題：① 令和 6 年度事業報告承認の件
② 令和 6 年度決算報告書承認の件
③ 役員等候補者名簿承認の件
④ 任期満了に伴う学術委員選任の件
⑤ 評議員会招集の件

- (5) 第 48 回学術研究公募開始
令和 7 年 6 月 2 日

- (6) 定時書面評議員会（決議の省略）
開催日：令和 7 年 6 月 20 日
議 題：① 令和 6 年度事業報告承認の件
② 令和 6 年度決算報告書承認の件
③ 理事・監事選任の件

- (7) 第 47 回学術研究成果報告書提出締切
令和 7 年 6 月 30 日

- (8) 第 48 回学術研究公募締切
令和 7 年 7 月 31 日
- (9) 第 48 回学術研究公募申請書審査
令和 7 年 8 月 1 日～令和 7 年 11 月 13 日
- (10) 学術委員会
開催日：令和 7 年 11 月 14 日
議 題：① 第 48 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 7 年 12 月 19 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 8 年 2 月 19 日
議 題：① 令和 8 年度事業計画承認の件
② 令和 8 年度収支予算承認の件
③ 規程変更
- (13) 助成金目録贈呈式
開催日：令和 8 年 2 月 19 日
- (14) 機関誌「デサントスポーツ科学」第 47 巻発行
令和 8 年 2 月

以 上

一 編 集 後 記 一

機関誌「デサントスポーツ科学第47巻」を20編の研究報告書を掲載して発行することができました。スポーツ科学の領域に現実に役立たせるご研究に取り組み、完遂いただきました研究者の皆様、査読・指導・講評をいただきました学術委員の皆様、また機関誌の発行にご尽力いただきました関係の皆様、まことにありがとうございました。

当財団の研究助成への応募件数は、コロナ禍の影響もあり減少していましたが、ようやく回復してきました。大変多くの申請をいただける様になっております。研究を取り巻く環境も良くなってきているのだと思います。

研究助成への応募方法につきましては、新たにWebシステムを導入しました。従来の郵送での応募をWeb化することで、利便性が向上しております。スポーツ科学領域の発展のための契機として当財団の研究助成をご活用いただき、より多くの皆様にご研究いただければ大変うれしいです。

今後とも、当財団へのご支援を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47巻 DESCENTE SPORTS SCIENCE Vol. 47

(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8年2月19日
Feb. 19, 2026
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. 080-4394-8095, 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/>