

# デサントスポーツ科学

Vol.45

目 次

巻頭言

健康づくりのための身体活動・運動 2023 とスポーツ科学研究の役割

廣田 アンチエイジング研究所

石本記念デサントスポーツ科学振興財団 評議員

廣田 孝子

(1)

第 45 回助成金研究報告

【最優秀入選】

〈体力医学系〉

骨格筋への電気刺激はどこまで運動の代替となるか？応用可能性の検証

Is Electrical Muscle Stimulation an Alternative to Exercise?

電気通信大学 安藤 創一

(3)

6 軸触覚センサ搭載インソールを用いた走行時の足裏反力計測

Measurement of Ground Reaction Forces in Sprint Running Using Insoles

With 6-Axis Tactile Sensors.

慶應義塾大学 高橋 英俊

(12)

【優秀入選】

〈被服・工学系〉

3D 着装シミュレーションにおけるスポーツ衣料の質感の評価基準

Evaluation Criteria for Texture of Sportswear in 3D Wearing Simulation

信州大学 金 晃屋

(22)

衣服と皮膚の接触に伴う皮膚振動に関する基礎研究

Basic Study of The Skin Vibration Caused by The Contact of Clothing

with Skin

文化学園大学 佐藤 真理子

(35)

発汗による機能性スポーツ用インナーのパフォーマンスへの影響

Influence of Perspiration on Performance of Functional Sports Innerwear

大妻女子大学 水谷 千代美 (48)

野球投手の血行障害予防に向けたクールダウン手法の開発

Development of Cooling-Down Methods for the Prevention of Circulatory Disorders in Baseball Pitchers

筑波大学 小崎 恵生 (57)

Foot wear 装着下での足部運動解析手法の確立

Development for Foot Motion Analysis System with Footwear

森ノ宮医療大学 工藤 慎太郎 (66)

全方位二軸変形試験法から導かれたひずみエネルギー密度関数を用いた衣服圧のCAEシミュレーション

Study on CAE Simulation of Garment Pressure Using Strain Energy Density Function Derived from Biaxial Deformation Test Method

福井大学 山下 義裕 (73)

〈体力医学系〉

スポーツ脳震盪の診断と競技復帰に関わる唾液中のバイオマーカー探索研究

Study of Biomarkers in Saliva as Indicators for Diagnosis of Sports Related Concussion and Return to Play

大阪大学大学院 中村 洋平 (84)

膝関節伸展位固定を用いた運動連鎖の遮断による慢性足関節不安定症の新たな評価手法の開発

Development of a New Evaluation Method for Chronic Ankle Instability by Blocking the Kinetic Chain Using Knee-Extension Immobilization

新潟医療福祉大学 菊元 孝則 (94)

血流制限を併用したレジスタンス運動の効果：

低負荷×長時間と高負荷×短時間の比較

Effect of Blood Flow Restriction Exercises: Light and Long vs Hard and Short Protocol

北翔大学 沖田 孝一 (103)

トレーニングがもたらす骨格筋の腎保護作用

Training and Exercise Effect on The Kidney Diseases

東京大学医学部附属病院 西 裕志 (110)

運動後の筋痛は筋損傷の指標となるか？

－非侵襲的な筋損傷の測定手法の開発と応用－

Does Delayed-Onset Muscle Soreness Indicate Muscle Damage?  
Non-Invasive Methods for Measuring Muscle Damage :  
Developments and Applications

新潟大学 国正陽子 (117)

運動イメージが感覚運動統合能力に及ぼす影響の検討

－効果的な運動イメージトレーニングの開発を目指して－

The Influence of Motor Imagery on Sensorimotor Integration:  
Implications for Effective Motor Imagery Training Development

大阪大学大学院 佐々木 睦 (126)

過去の運動習慣が将来のうつ・不安を予防するメカニズムの解明

Effects of Past-Exercise Training on Mood-Related Behaviors and Epigenetic  
Modification in Mice

佐賀大学 富賀裕貴 (134)

発育期の子どもにおける運動制御の正確性と運動単位活動との関連

The Association between Accuracy of Motor Control and Motor Unit  
Activity in Developing Children

岩手大学・中京大学 奥平 柁道 (142)

異なるハーフタイム戦略がサッカー選手の反復性スプリントパフォーマンスに与える影響

Effect of Different Half-Time Strategies on Repeated-Sprint Ability in  
Soccer Players

広島大学大学院 柳岡 拓磨 (152)

膝前十字靭帯再建術後の筋力低下に対する新たな治療方法としての Cryotherapy の効果

Effect of Cryotherapy as New Treatment Method on Muscle Dysfunction  
Induced Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

山梨大学 吉井 諒 (162)

2型糖尿病患者・肥満患者における病態と爪郭毛細血管の定量評価の関連について

The Relationship of Morphology and Color of Nailfold Capillaries with  
Disease State of Diabetes and Obesity: An Observational Study

東京大学大学院 三好 建吾 (169)

運動時の温熱性発汗量から血液の濃縮度を評価し、水分摂取の緊急度をスマホに告知する装置の開発：  
熱中症予防システムへの応用

Heatstroke Risk Informing System Using Wearable Perspiration Ratemeter:  
Human Experiments to Decide The Timing Point for Informing  
Heatstroke and to Evaluate The Validity of Wearable Appratus

信州大学 大橋 俊夫 (177)

〈パラスポーツ系〉

妊娠中に競技復帰目的のトレーニングを行った選手の体組成変化の記録

Documentation of Changes in Body Composition in Athletes  
Who Trained for Return to Competition During Pregnancy

国立病院機構西別府病院 松田 貴雄 (182)

講 評

学術委員 檜 垣 靖 樹 (193)

学術委員 永 富 良 一 (195)

学術委員 田 畑 泉 (198)

学術委員 西 村 太 良 (200)

学術委員 田 島 文 博 (203)

財団ニュース

事業内容 . . . . . (205)

役員名簿 . . . . . (206)

計 報 . . . . . (209)

活動報告 . . . . . (210)

# 健康づくりのための身体活動・運動 2023 と スポーツ科学研究の役割

廣田アンチエイジング研究所

石本記念デサントスポーツ科学振興財団 評議員 廣 田 孝 子

世界でトップクラスを占める日本人の平均寿命と健康寿命には、適切な医療や衛生状態、そして栄養状態が大きく寄与していることは言うまでもない。WHO が示す死亡のリスクを高める因子は、高血圧、喫煙、高血糖、そして4番目に身体活動・運動不足が位置付けられている。適切な運動習慣が日本人の健康寿命の延伸、また介護される時間の短縮に大きく貢献しているであろう。

2023年には、厚労省による新しい「健康づくりのための身体活動・運動ガイド」が策定された。対象者別（成人、こども、高齢者）の適正な身体活動と運動量の推奨量が示され、その科学的根拠と現状の分析、働く人が職場で活動的に過ごすためのポイント、そして慢性疾患（高血圧、2型糖尿病、脂質異常症、変形性関節症）を有する人の身体活動のポイントも示された。中でも、じっとしている座り過ぎを”座位行動”として新しい概念を取り入れ、少しでも身体を動かし、活動的に過ごすためのポイントも加えられた。科学的根拠により裏付けされた身体活動基準「健康づくりのための身体活動・運動ガイド 2023」が10年ぶりに改訂された。

これらの科学的根拠は、多くは海外の研究成果が基となり、身体活動量が多い人ほど疾患発症や死亡リスクの低下が観察され、有意な相関が認められたこと、そして座位の時間が長くなるほど、死亡リスクが増加することなどもコホースタディにより示されている。したがって、健康づくりのための身体活動・運動量として、成人では毎日8000歩以上、高齢者は6000歩以上の歩行が推奨され、加えて週2～3日以上筋力トレーニングの実施も薦められている。また、日本人の座位時間は仕事のデジタル化、DX化により、世界的にも長いことが観察されていることから、すべての人ができるだけ座位を減らし、30分毎に座位を中断し身体を動かすことが推奨されている。労働生産性の向上にも効果がある。また、1日に60分以上の中強度以上の身体活動を行うと、座位行動（座りっぱなし）による死亡リスクの低減が期待でき、座位行動を頻繁に中断することで、食後血糖値や中性脂肪、インスリン抵抗性などの血管代謝疾患のリスク低下にも効果があることも示されている。

このように、日本人の健康づくりのための身体活動・運動ガイド 2023は、我々の日常の運動量の不足を改善するための指標が示され、健康長寿に貢献するであろう。しかし、これらの科学的根拠となるデータの多くは欧米からの研究であり、日本人のデータを基にした科学的根拠は少ない。言うまでもなく、日本人の遺伝子、食生活、生活活動・運動などのライフスタイルは、欧米人とは大きく異

なっているだろう。したがって、日本人独自の食生活などライフスタイルが影響を与える身体活動・運動の影響は、さらに検討されなければならないだろう。1979年設立されたデサントスポーツ科学振興財団は「デサントスポーツ科学」誌を通じて、長年、我々の研究をサポートしている。

例えば、例を挙げると、欧米とは異なり、日本には昔から背が低く、腰が曲がった高齢女性が多く、海外研究者から不思議がられていた。これは、後になり、更年期から増加する骨粗鬆症による脊椎の圧迫骨折によることが判明した。更年期の女性ホルモン減少による骨密度の低下だけでなく、カルシウム不足などの食生活や運動習慣の影響を強く受けること等、日本人固有の原因も明らかになっている。現在では学会や財団の示す「骨粗鬆症の予防と治療のガイドライン」にも栄養、運動の重要性が必ず明記されている。著者らは、早くからの骨粗鬆症予防を目的として、日本で初めて思春期女子の骨密度の測定を行い、骨密度上昇期の運動や栄養の重要性、効果的な運動の種類や量、実施時期のタイミングなどを横断的、縦断的に検討しようと、研究助成に初めて応募したのがデサントスポーツ科学振興財団であった(1994年16巻, 2001年22巻)。この研究助成のおかげで、研究の目的や方向性、意義について確信を持つことが出来、研究の継続が可能となった。さらに、日本(長野)で初めて開催された知的障害者の健康のためのスポーツ増進を目的とした“国際スペシャルオリンピックス”における、知的障害者の骨密度測定やその改善の研究についても助成(2006年27巻)を受けた。このように日本のローカルな研究から、国際的な知的障害者を対象とした研究へと発展した。デサントスポーツ財団の研究助成は、研究の精神と物質両面からの支えとなった。

日本では、社会や生活環境の変動により、運動はますます重要な健康促進要素となってきている。しかし、ヒトを対象とした研究は少なく、研究成果を得るには苦労を要し、根気と多くの協力者の理解が必要となる。また、運動の研究であっても、栄養状態の把握も必要となることが多い。これらを考慮しながら、ヒトのスポーツサイエンスの研究をもっとすすめなければならないであろう。これからも日本人の健康増進や長寿、抗加齢のための研究、多くの人を幸福に導く研究にチャレンジしてほしい。

# 骨格筋への電気刺激はどこまで運動の代替となるか？ 応用可能性の検証

電気通信大学 安藤 創一  
(共同研究者) 日本体育大学 岡本 孝信  
同 橋本 佑斗

## Is Electrical Muscle Stimulation an Alternative to Exercise?

by

Soichi Ando

*The University of Electro-Communications*

Takanobu Okamoto, Yuto Hashimoto

*Nippon Sport Science University*

### ABSTRACT

Recent studies suggest that electrical muscle stimulation (EMS) has the potential to be an alternative modality to voluntary exercise. However, the effects of EMS on human body are not well understood. Thus, the purpose of this study was to examine the effects of EMS training on quadriceps muscle hypertrophy and strength, vascular endothelial function, autonomic nervous system function, and cognitive function. Methods: Thirty healthy male participants were divided into EMS training, resistance exercise training, and control groups. In the EMS training group, the participants performed EMS three times per week for 8 weeks. In the resistance exercise training group performed leg-press three times per week for 8 weeks. Cross-sectional area (CSA) of the quadriceps muscle was assessed at mid-thigh (50% of the femur) and distal (70%) regions using magnetic resonance imaging. At mid-thigh and distal regions, muscle CSA increased after both EMS and resistance exercise trainings.

Isometric knee extension strength increased in the EMS group. The EMS training also increased vascular endothelial function. Both training did not affect autonomic nervous system activation and cognitive function. These results indicate that EMS potentially induces muscle hypertrophy, increases muscle strength, and improves vascular endothelial function. The present findings suggest that EMS can be an alternative to voluntary exercise.

キーワード

電気刺激, 骨格筋, 抵抗性運動, 血管内皮機能, トレーニング

Keyword

electrical stimulation, skeletal muscle, resistance exercise, vascular function, training

## 要 旨

近年、骨格筋への電気刺激 (EMS) が生体にもたらす効果が注目を集めており、運動の代替となることが期待されている。しかし、EMSが生体にもたらす効果についてはまだ十分に分かっていない。そこで本研究はEMSが骨格筋の肥大と筋機能、血管内皮機能、自律神経活動、認知機能にもたらす効果を検討することを目的とした。30名の実験参加者はEMSトレーニング群、抵抗性運動トレーニング群、コントロール群の3群に分けられた。トレーニング群は週に3回のトレーニングを8週間行った。そして、トレーニング前後で大腿四頭筋の筋横断面積、膝伸展トルク、血管内皮機能、自律神経活動、認知機能を評価した。EMSトレーニング群、抵抗性運動トレーニング群の両方で筋横断面積の増加がみられた。等尺性膝伸展トルクおよび血管内皮機能はEMSトレーニング群のみで向上がみられた。トレーニングにより自律神経活動と認知機能に変化はみられなかった。これらの結果は、骨格筋への電気刺激は筋肥大をもたらす、筋機能を向上させ、血管内皮機能を向上させる可能性があることを示唆している。

## 緒 言

運動が健康の維持・増進に効果的であることを示すエビデンスは溢れており、運動が健康寿命の延伸に有効であることは広く知られている。しかし、すべてのヒトが必ずしも運動のメリットを享受できるわけではない。そこで近年、骨格筋への電気刺激 (EMS) が注目を集めているが、EMSが生体にもたらす効果は、随意運動と比較して、何が同じで何が異なるのかについては、エビデンスが十分ではないと言える。例えば、生体外から骨格筋に対して刺激を行うEMSでは、筋の深部まで刺激が十分に届かない可能性が指摘されている<sup>1)</sup>。また、抵抗性運動トレーニングは血管内皮機能を低下させる可能性が指摘されている一方で<sup>2)</sup>、近年のメタアナリシスでは上腕動脈の血管内皮機能を向上させることが報告されている<sup>3)</sup>。さらに、抵抗性運動トレーニングにより健常な若年男性では心拍変動で評価した自律神経活動には影響がみられないという報告や<sup>4)</sup>、抵抗性運動が認知機能には有益な効果をもたらすことも報告されている<sup>5)</sup>。しかしながら、EMSトレーニングが筋肥大や筋機能、血管機能や自律神経活動、認知機能にもたらす影響についてはほとんど明らかに

なっていない。

そこで本研究では、深部の筋の形態変化も評価することが可能な磁気共鳴画像法 (Magnetic resonance imaging: MRI) を用いて、EMSトレーニングと抵抗性運動トレーニングによる筋肥大を評価する。併せて、EMSトレーニングと抵抗性運動トレーニングが最大膝伸展力、血管内皮機能、自律神経機能、認知機能にもたらす影響を明らかにする。本研究では、これらの測定からEMSトレーニングの効果の特性を明らかにすることを目的とした。そして、加齢や身体不活動による筋萎縮や全身の機能低下に対抗する手法としてのEMSの有効性について検証した。

## 1 研究方法

### 1.1 参加者

本実験には健康な若年男性30名 (平均値 ± 標準

偏差, 年齢 =  $22.0 \pm 1.3$ yr, 身長 =  $1.71 \pm 0.06$ m, 体重 =  $62.3 \pm 9.5$ kg) が参加した。実験は電気通信大学および日本体育大学の倫理委員会の承認を受けて行った。実験参加者には事前に測定項目や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。

### 1.2 実験手順

実験参加者はEMSトレーニング群、抵抗性運動トレーニング群、コントロール群の3群に分けられた (各群10名)。それぞれの群でトレーニングおよびコントロール期間の前後に筋横断面積、最大膝伸展トルク、血管内皮機能、自律神経機能、認知機能を評価した。EMSトレーニングには、ベルト型電極による電気刺激方式の装置 (AUTO TENS PRO Rehabili Unit, 株式会社ホームイオン研究所, 東京) を用いた (図1A)。EMSトレ

A



B



図1 電気刺激(A)と抵抗性運動(B)トレーニング

ニングは週3回(1回あたり20分), 8週間継続して行った。EMSの刺激周波数は20Hz, パルス幅は0.25msで2秒の刺激オンと2秒の刺激オフを繰り返した。刺激強度は実験参加者が耐えられることができる最大の強度とし<sup>6,7)</sup>, 刺激強度は実験参加者が耐えられる強度が上がるにつれて徐々に増加させた。

抵抗性運動トレーニングには, 電気刺激と同様に下肢全体の骨格筋を収縮することができるという観点からレッグプレスを採用した(図1B)。抵抗性運動にはEMSと同じ筋群を動員するレッグプレス(レッグプレスマシンBM5300, セノー株式会社, 松戸)を用い, 運動強度および頻度は筋肥大を引き起こすことを報告した先行研究のレベルを用いた<sup>8)</sup>。抵抗性運動トレーニングはEMSトレーニング群と同様に週3回, 8週間継続して行った。トレーニング開始の1週間前にレッグプレスの最大挙上重量(1 repetition maximum: 1RM)を測定し, トレーニング期間中の1-3週までは1RM-70%で12回, 4-6週までは1RM-75%で10回, 7-8週は1RM-80%で8回, 1日あたり3セット実施した。全ての期間でトレーニングの直前にレッグプレスの1RM-50%で15回のウォーミングアップを実施した。コントロール群には実験期間中には通常の生活を継続してもらい, 強度の強い運動やスポーツ活動等に参加しないように指示した。

### 1. 3 測定項目

#### 1. 3. 1 筋横断面積および筋トルク

筋横断面積の評価にはMRIを用いた(1.5T-MRI装置, ECHELON OVAL, 株式会社日立メディコ社, 東京)。撮像位置は右脚の大転子から大腿骨外側顆までとし, 大転子から大腿骨外側顆までを結んだ線分の50%および70%の位置にマーカー(魚油錠剤)を置いた。撮像プロトコールはTE: 8ms, TR: 520ms, FOV: 256mm, スライス厚

: 5mmであった。得られたMRI画像から医療画像分析ツール(Slice Omatic, イメージラボ社, 埼玉)を用いて, マーカーを目印として50%位置, 70%位置での大腿四頭筋(大腿直筋, 中間広筋, 外側広筋, 内側広筋)の各筋の横断面積を算出した。筋力測定では, ダイナモメータ(Biodex社製)を用いて等尺性収縮と等速性収縮(60°/s, 180°/s, 300°/s)による膝伸展の最大トルクを測定した。

#### 1. 3. 2 血管内皮機能

血管内皮機能の指標である血流依存性血管拡張反応(Flow-mediated dilation: FMD)の測定・解析は国際的ガイドライン<sup>9)</sup>に従い実施した。被験者は仰臥位で右前腕に駆血用カフを装着し, 右上腕動脈径を10MHzのリニアートランスデューサーで血管径半自動追従システムが内蔵された超音波診断装置(ユネクスイーエフ38G, ユネクス社, 名古屋)を用いて計測した。ベースライン値として安静時血管径を計測した後, 前腕に装着したカフに収縮期血圧+50mmHgの圧を加え駆血し, 5分後に圧を急激に解放した。カフ解放後は2分間連続で血管径を計測し, 最も拡張したピーク値を最大拡張血管径とした。血管径は上腕動脈長軸画像を記録し, 前壁と後壁の内膜表面間の距離として測定・解析した。血管径の変化率である%FMDはカフで駆血される前のベースライン値からカフによる駆血が解放された後のピーク値までの動脈直径の変化率として以下の式を用いて算出した。

$$\% \text{FMD} = \{(\text{最大拡張血管径} - \text{安静時血管径}) / \text{安静時血管径}\} \times 100$$

安静時血管径の測定値に関する検者内の変動係数は4.2%であった。心拍数は両手首に装着した電極を用いてFMD計測と並行して行い, 血圧はオシロメトリック式血圧計(デジタル血圧計UA-767, エー・アンド・デイ社, 東京)を用いて, カ

フ圧迫前に左上腕にて計測した。

### 1. 3. 3 自律神経活動

自律神経活動の指標である心拍変動 (HRV) は腕時計型心拍モニター (Polar V800, Polar Electro社, Kempele, Finland) を用いて得られたR-R間隔 (RRI) から分析した。7分間の座位安静中のRRIを記録し、後半の5分間を分析対象とした。HRVの分析は専用ソフトウェアであるKubios HRV Standard ver. 3.5.0 (Kubios社, Kuopio, Finland) を用いて高速フーリエ変換を行った。解析された周波数成分は低周波成分 (power in low frequency range: LF) を0.04-0.15Hz, 高周波成分 (power in high frequency range: HF) を0.15-0.4Hzとし<sup>10)</sup>, 交感神経活動の指標としてLF/HFを算出した。LFおよびHFの分析は正規分布から外れるため自然対数 (ln) 変換を行った。

### 1. 3. 4 認知機能

認知課題は実行機能の中でも選択的注意と反応抑制を評価するGo/No-Go課題を用いた(11, 12)。認知課題のプログラムはソフトウェア (Presentation ver.19; NeuroBehavioral Systems, California, USA) を用いて作成した。認知機能の

評価には反応時間 (ms) と正答率 (%) を用いた。

### 1. 4 データ解析および統計検定

統計解析には, JASP (Jeffreys's Amazing Statistics Program) ver.17.1を用い, 時間×群の2元配置分散分析を行った。交互作用がみられた場合は対応のあるt検定による分析を行い, Bonferroniの多重比較補正を行った。

## 2. 研究結果

表1にトレーニング前後での筋横断面積および膝伸展トルクの変化を示す。50%位置の筋横断面積において, 大腿四頭筋, 中間広筋, および外側広筋に交互作用がみられ, EMSと抵抗性運動トレーニング群において筋横断面積が増加した。また, 大腿直筋では時間と群に主効果がみられた。これらの結果は, 内側広筋を除く筋群ではトレーニングにより筋横断面積が増加したことを示している。70%位置の筋横断面積において, 大腿四頭筋に交互作用がみられ, EMSと抵抗性運動トレーニング群において筋横断面積が増加した。大腿直筋, 外側広筋, 内側広筋では時間によるのみ主効果が

表1 筋横断面積と膝進展トルクの変化

	EMS		抵抗性運動		コントロール		分散分析(主効果, 交互作用)		
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	時間	群	時間×群
筋横断面積(50%), cm <sup>2</sup>									
大腿四頭筋	61.3±7.8	65.0±7.5 **	66.2±10.3	70.8±9.4 ***	70.1±10.3	70.4±9.8	p=0.002 **	p=0.214	p<0.001 ***
大腿直筋	6.7±1.0	7.6±1.2	8.2±1.8	8.5±1.7	9.1±2.4	9.8±2.7	p=0.013 *	p=0.025 *	p=0.708
中間広筋	20.3±1.6	21.4±1.7 *	20.9±3.8	22.4±3.6 **	24.9±5.9	24.8±5.4	p<0.001 ***	p=0.164	p<0.001 ***
外側広筋	21.6±3.3	23.3±3.1 *	23.8±4.1	26.3±4.0 ***	23.9±3.4	23.9±3.0	p<0.001 ***	p<0.001 ***	p<0.001 ***
内側広筋	12.7±3.7	12.6±3.4	13.3±2.0	13.6±2.4	12.1±3.5	11.9±2.5	p=0.891	p=0.538	p=0.811
筋横断面積(70%), cm <sup>2</sup>									
大腿四頭筋	45.9±6.9	51.7±5.3 ***	51.0±9.2	55.3±8.7 ***	57.7±11.0	58.1±9.6	p<0.001 ***	p=0.075	p=0.004 **
大腿直筋	1.1±0.9	1.8±1.2	1.7±0.8	1.9±0.8	2.3±1.1	2.6±1.3	p=0.003 **	p=0.080	p=0.228
中間広筋	12.0±1.2	13.8±2.2	13.0±2.1	14.2±2.2	17.6±3.0	17.6±3.5	p=0.005 **	p<0.001 ***	p=0.101
外側広筋	12.0±3.2	13.9±2.5	13.7±3.9	15.5±3.5	16.1±3.5	16.2±3.4	p=0.001 **	p=0.096	p=0.082
内側広筋	20.9±4.0	22.3±3.7	22.5±3.5	23.7±3.7	21.7±4.7	21.7±4.4	p=0.013 *	p=0.616	p=0.166
膝伸展トルク, N·m									
等尺性	177±34	207±31 **	200±27	184±28	195±60	180±59	p=0.910	p=0.970	p<0.001 ***
等速性 60°/sec	159±38	169±31	154±27	164±27	163±55	163±54	p=0.041 *	p=0.975	p=0.314
等速性 180°/sec	111±19	118±38 **	107±23	114±16	118±38	120±37	p<0.001 ***	p=0.867	p=0.035 *
等速性 300°/sec	86±14	94±18	84±16	89±13	94±30	95±30	p=0.005 **	p=0.813	p=0.146

\*\*\* p<0.001, \*\* p<0.01, \* p<0.05.

みられ、中間広筋では、時間と群に主効果がみられた。これらの結果から、70%の位置でも大腿四頭筋の各筋群において筋横断面積に増加がみられたと言える。

膝伸展トルクについては等尺性および180°/secの等速性収縮条件において交互作用がみられ、EMSトレーニング群においてのみ、膝伸展トルクに向上がみられた（それぞれ $p=0.003$ と $p=0.002$ ）。一方、抵抗性運動トレーニング群において変化はみられなかった。

表2に血管内皮機能、自律神経活動、認知機能の結果を示す。血管内皮機能において群と時間との間に交互作用がみられた。その後の検定から、EMSトレーニング群においてのみ%FMDに有意な向上がみられた（ $p=0.009$ ）。しかし、抵抗性運動トレーニング群において変化はみられなかった。交感神経活動の指標であるLF/HFにトレーニングによる変化は認められなかった。一方、認知課題の反応時間において群に主効果がみられた。これは抵抗性運動トレーニング群において反応時間が遅かったことが要因であり、EMSおよび抵抗性運動トレーニングによる影響はみられなかったと言える。正答率には変化がみられなかった。

### 3. 考 察

本研究では、骨格筋へのEMSおよび抵抗性運動トレーニングによる大腿四頭筋の横断面積の変化を中間部（50%）と遠位部（70%）の2か所で

評価した。その結果、EMSおよび抵抗性運動トレーニングにより50%と70%の両方の位置で大腿四頭筋において筋肥大がみられた。筋ごとに見ると50%位置では、EMSと抵抗性運動トレーニングにより内側広筋を除く筋群で肥大がみられた。70%位置でもすべての筋群で肥大がみられた。これらの結果は、EMSと抵抗性運動のどちらのトレーニングでも筋肥大がみられることを示している。したがって、筋横断面積による評価ではEMSと抵抗性運動トレーニングによる筋肥大のパターンに明確な違いはみられなかったと言える。しかし、先行研究では、EMSによる刺激が筋の深部まで十分に届かない可能性が指摘されている<sup>1)</sup>。これはEMSによる大腿全体への刺激が均一でない可能性を示唆しており、この点については引き続き検討が必要であると考えられる。また、本研究のトレーニング期間は8週間と比較的短期間であったことから、より長期間でEMSトレーニングと抵抗性運動トレーニングを行った際の効果の違いについても検討する必要があると考えられる。

本研究では筋機能の評価として等尺性及び等張性膝伸展トルクを用いたが、等尺性収縮において効果がみられたのはEMSトレーニングのみであった。本研究で用いたEMSトレーニングの筋の収縮様式は等尺性収縮であったことから、本研究の結果はEMSの収縮様式を反映していると考えられる。一方、本研究の抵抗性運動はレッグブ

表2 血管内皮機能, 自律神経活動, 認知機能の変化

	EMS		抵抗性運動		コントロール		分散分析(主効果, 交互作用)		
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	時間	群	時間×群
血管内皮機能									
%FMD, %	5.8±1.0	7.7±1.6**	6.1±1.1	6.1±1.5	6.8±2.3	6.9±1.8	p=0.022	p=0.507	p=0.019*
交感神経活動									
LH/HF	1.15±0.21	1.16±0.15	1.12±0.16	1.20±0.23	1.03±0.07	1.10±0.18	p=0.084	p=0.376	p=0.690
認知機能									
RT, ms	334±17	331±35	418±96	417±116	332±42	334±36	p=0.940	p=0.013*	p=0.967
Accuracy, %	100	99.5±1.1	99.2±0.8	98.7±1.9	99.8±0.5	99.5±1.1	p=0.116	p=0.074	p=0.960

\*\* p<0.01, \* p<0.05.

レスという動的な運動であったことから、トレーニングにより等尺性収縮に変化がみられなかったと考えられる。

血管内皮は主に血管拡張物質である一酸化窒素(NO)や血管収縮物質であるエンドセリン-1(ET-1)の産生・放出を介して血管平滑筋の緊張を制御し適度な動脈伸展性を保つ重要な役割を持っている。NOは血流の増加などによる血管内皮細胞へのシェアストレスを起因として内皮型NO合成酵素から放出され、血管中膜に存在する平滑筋を弛緩させることで動脈伸展性を向上させることが知られている<sup>13)</sup>。運動による活動筋への血流増加とそれに伴うシェアストレスの増加はNO産生を促すだけでなく、内皮細胞からのNO産生量の増加や生物学的利用能を向上させることによって血管内皮機能を向上させる<sup>13)</sup>。興味深いことに、本研究ではEMSトレーニングにより血管内皮機能の向上がみられた一方で、抵抗性運動では変化はみられなかった。高強度レジスタンス運動は急激な運動誘発性高血圧により一過性に上腕動脈FMDが低下することが報告されている<sup>14)</sup>。また、筋収縮に伴う血圧の増加はET-1の産生を惹起し血管内皮機能を低下させる可能性がある<sup>15)</sup>。短縮性収縮を中心とした高強度レジスタンス運動は伸張性のレジスタンス運動と比較し、運動中の血圧が高くET-1を増加させ<sup>16, 17)</sup>、高血圧状態の持続は血管内皮細胞からのNO放出が減少する<sup>18)</sup>。したがって、本研究における抵抗性運動トレーニング群は運動誘発性高血圧がシェアストレスによる血管内皮機能の向上を減弱したことによって、FMDが変化しなかったことが考えられる。我々は以前に、EMS中に内頸動脈と椎骨動脈の血流が有意に増加し、その際心拍数は約21拍/分、平均血圧は約8mmHg増加したことを報告している<sup>6)</sup>。下肢EMS運動中における昇圧などの循環器系の変化は比較的小さいだけでなく、EMS中は低強度の動的レジスタンス運動と同様に上腕動脈

に対してもシェアストレスがかかることは十分に予想される。以上のことから、本研究における下肢EMSは昇圧など循環器系への負荷は低いトレーニングであるためシェアストレスの効果が血管内皮機能の改善に寄与したと考えられる。

本研究ではEMSおよび抵抗性運動トレーニングにより交感神経活動に変化はみられなかった。先行研究では、抵抗性運動においても上肢の高強度の抵抗性運動では血中ノルアドレナリン濃度の増加に伴い平均血圧および動脈硬化度も上昇するが、下肢の高強度抵抗性運動では変化しないことが報告されている<sup>19)</sup>。また、健康な成人または若年者を対象とした長期間のレジスタンストレーニングは心拍変動に影響を与えないという報告もある<sup>4, 20)</sup>。本研究はEMSおよび抵抗性運動のどちらも下肢を用いる運動であり、実験の参加者も若年男性であった。そのため交感神経活動にも大きな変化がなかったと考えられる。

本研究では認知機能にトレーニング前後で変化はみられなかった。この結果は、EMSおよび抵抗性運動トレーニングがヒトの認知機能に影響を与えないことを示唆している。しかし、被験者が若年者であったため、トレーニングによる効果がみられなかった可能性も十分に考えられる。また、運動と認知機能の相互関係について検討する際には選択する認知課題は結果に影響を与える要因である。したがって、今後は中年者や高齢者を対象にEMSおよび抵抗性運動トレーニングが幅広い認知機能にもたらす効果について検討する必要があるだろう。

#### 4. まとめ

本研究は近年注目を集める、運動の代替としてのEMSトレーニングの効果を検証した。その結果、EMSトレーニングでも抵抗性運動トレーニングと同様に筋肥大がもたらされるだけでなく、血管内皮機能を向上させる可能性が示唆された。

本研究から得られる成果は、アスリートから有疾患患者まで幅広い人々を対象にEMSによる介入を行う際に、重要な基礎的知見となると考えられる。

## 謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり電気通信大学および日本体育大学の大学院生の皆様に多大なご協力をいただきました。ここに記して、心より感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) Vanderthommen M., Depresseux J.C., Dauchat L., Degueldre C., Croisier J.L., Crielaard J.M., Spatial distribution of blood flow in electrically stimulated human muscle: a positron emission tomography study. *Muscle Nerve.*, **23** (4) : 482-9(2000)
- 2) Miyachi M., Effects of resistance training on arterial stiffness: a meta-analysis. *Br. J. Sports Med.*, **47** (6) : 393-6(2013)
- 3) Silva J., Meneses A.L., Parmenter B.J., Ritti-Dias R.M., Farah B.Q., Effects of resistance training on endothelial function: A systematic review and meta-analysis. *Atherosclerosis.*, **333**:91-9(2021)
- 4) Kingsley J.D., Figueroa A., Acute and training effects of resistance exercise on heart rate variability. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.*, **36** (3) : 179-87(2016)
- 5) Wilke J., Giesche F., Klier K., Vogt L., Herrmann E., Banzer W., Acute Effects of Resistance Exercise on Cognitive Function in Healthy Adults: A Systematic Review with Multilevel Meta-Analysis. *Sports Med.*, **49** (6) : 905-16(2019)
- 6) Ando S., Takagi Y., Watanabe H. et al., Effects of electrical muscle stimulation on cerebral blood flow. *BMC Neurosci.*, **22** (1) : 67(2021)
- 7) Hamada T., Sasaki H., Hayashi T., Moritani T., Nakao K., Enhancement of whole body glucose uptake during and after human skeletal muscle low-frequency electrical stimulation. *J. Appl. Physiol. (1985)*. **94** (6) : 2107-12(2003)
- 8) Neves R.P., Vechin F.C., Teixeira E.L. et al., Effect of different training frequencies on maximal strength performance and muscle hypertrophy in trained individuals-a within-subject design. *PLoS One.*, **17** (10) : e0276154(2022)
- 9) Corretti M.C., Anderson T.J., Benjamin E.J. et al., Guidelines for the ultrasound assessment of endothelial-dependent flow-mediated vasodilation of the brachial artery: a report of the International Brachial Artery Reactivity Task Force. *J. Am. Coll. Cardiol.*, **39** (2) : 257-65(2002)
- 10) Esco M.R., Williford H.N., Flatt A.A., Freeborn T.J., Nakamura F.Y., Ultra-shortened time-domain HRV parameters at rest and following exercise in athletes: an alternative to frequency computation of sympathovagal balance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **118** (1) : 175-84(2018)
- 11) Akagi R., Tonotsuka M., Horie R., Hirata K., Ando S., Effect of acute eye fatigue on cognition for young females: a pilot study. *PeerJ.*, **7**:e7978(2019)
- 12) Saito S., Washio T., Watanabe H., Ando S., Ogo S., Effect of intermittent isometric handgrip exercise protocol with short exercise duration on cognitive performance. *J. Physiol. Sci.*, **71** (1) : 12(2021)
- 13) Green D.J., Maiorana A., O'Driscoll G., Taylor R., Effect of exercise training on endothelium-derived nitric oxide function in humans. *J. Physiol.*, **561** (Pt 1) : 1-25(2004)
- 14) Buchanan C.E., Kadlec A.O., Hoch A.Z., Gutterman D.D., Durand M.J., Hypertension during Weight Lifting Reduces Flow-Mediated Dilatation in Nonathletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **49** (4) : 669-75(2017)
- 15) Nishiyama S.K., Zhao J., Wray D.W., Richardson R.S., Vascular function and endothelin-1: tipping the balance between vasodilation and vasoconstriction. *J. Appl. Physiol. (1985)*. **122** (2) : 354-60(2017)
- 16) Okamoto T., Masuhara M., Ikuta K., Cardiovascular responses induced during high-intensity eccentric and concentric isokinetic muscle contraction in healthy young adults. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.*, **26** (1) : 39-44(2006)
- 17) Okamoto T., Masuhara M., Ikuta K., Relationship between plasma endothelin-1 concentration and cardiovascular responses during high-intensity eccentric and concentric exercise. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.*, **28** (1) : 43-8(2008)
- 18) Bilfinger T.V., Stefano G.B., Human aortocoronary grafts and nitric oxide release: relationship to

- pulsatile pressure. *Ann. Thorac. Surg.*, **69** (2) : 480-5 (2000)
- 19) Okamoto T., Masuhara M., Ikuta K., Upper but not lower limb resistance training increases arterial stiffness in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **107** (2) : 127-34(2009)
- 20) Bhati P., Moiz J.A., Menon G.R., Hussain M.E., Does resistance training modulate cardiac autonomic control? A systematic review and meta-analysis. *Clin. Auton. Res.*, **29** (1) : 75-103(2019)

## 6軸触覚センサ搭載インソールを用いた 走行時の足裏反力計測

慶應義塾大学 高橋 英俊  
(共同研究者) 同 島崎 健一郎

### Measurement of Ground Reaction Forces in Sprint Running Using Insoles With 6-Axis Tactile Sensors.

by

Hidetoshi Takahashi, Kenichiro Shimazaki  
*Keio university*

#### ABSTRACT

This study aimed to measure and analyze ground reaction force (GRF) using MEMS 6-axis force sensors mounted in the insoles. The force sensors were placed on the thenar, hypothenar, and heel and measured vertical ( $F_z$ ), anterior-posterior ( $F_y$ ), and mediolateral ( $F_x$ ) forces with a sampling frequency of 50 Hz. Measurements were taken in four events: walking, jogging, wind sprint, and sprint, and a 60 m run from a crouching start. The subject had 8 years of track and field experience. Running speed was maximal at sprint, and the stride was maximal at wind sprint. The time between the peak heel reaction force and the peak thenar reaction force confirmed that the center of gravity movement speed during ground contact was maximum at the sprint. During the wind sprint and sprint, the vertical reaction force and forward shear force at the thenar increased, while the outward and propulsive forces at the hypothenar increased. The vertical force at the heel was smaller than that of the other sensors due to the forefoot strike form. During the 60 m run, strong propulsive forces were measured from the hypothenar during the acceleration phase, and the values gradually decreased with time.

On the other hand, the sensor on the thenar outputs a braking force, which gradually increases with acceleration. These research results suggest that the measurement of GRF using MEMS sensors is easier and more location-independent than force plates' measurement. In this method, the trajectory of the leg can be inferred from the difference in sensor output between the thenar and the hypothenar, suggesting that the data can be used to improve the sprinter' s running form.

キーワード

短距離走, MEMS センサ, 地面反力, 歩行, 陸上競技

Keyword

Sprint, MEMS sensor, GRF, Walking, Track and field

## 要 旨

本研究は短距離走の足裏反力測定方法として、靴のインソール内に搭載したMEMS六軸触覚センサによる走行時の足裏反力測定を目的とした。触覚センサはインソールの母指球、小指球、かかとの3か所に配置され、鉛直、前後、左右の3軸方向の力を測定することができる。測定は歩行、ジョギング、快調走、全力疾走の4種目と、クラウチングスタートからの60m走について、陸上競技経験8年の被験者が行った。全力疾走時の足裏反力は、母指球では垂直反力や前方へのせん断力が増大し、小指球では外側へのせん断力や後方へのせん断力の増大が見られた。また前足部から接地する走行フォームにより、かかとにおける反力は母指球と小指球の反力より小さくなった。60m走の測定においては、加速局面で小指球のセンサから後方への強いせん断力が測定され、時間とともにその値は徐々に小さくなった。一方母指球のセンサではブレーキ力が出力され、その値は加速とともに徐々に大きくなった。

## 緒言・まえがき

陸上競技の短距離走の力学的な解析のために、

接地時に地面に加わる地面反力の測定が行われている<sup>1-3)</sup>。測定の多くはフォースプレートをを用い、測定環境は地面の下にフォースプレートを埋め込んだ施設に限られている。一方、フォースプレートに代わる方法として近年開発が進むMEMSセンサによる測定がある<sup>4,5)</sup>。後者においては、靴のインソール内に複数の力センサを埋め込むことで、場所に関わらず、足裏の複数の点における地面反力を容易に測定することができる。これまでに同手法を用いて平地や階段、坂道での歩行や、垂直跳び、サッカーのキック時の足裏反力などが計測されている<sup>6-9)</sup>が、短距離走のような足裏に大きな力のかかる動作の測定は行われていない。

そこで本研究では、MEMS六軸触覚センサによる計測システムを用いて、陸上競技の短距離走における地面反力の測定を行う。歩行やジョギング、スプリントなどの複数の動作における測定値との比較からスプリントに関連する特徴量を抽出し、スプリント時の足裏での現象を力学的な観点から解明し、スプリントパフォーマンス向上に役立てることを目的とする。

## 1. 実験

### 1.1 被験者

被験者は陸上短距離種目（100m, 200m）を専門とする短距離選手（年齢23歳，身長170.3cm, 体重68.4kg，陸上競技歴8年）である。なお本研究は慶應義塾大学理工学部・理工学研究科生命倫理委員会の承認を受けて実施した（承認番号：2022-086, 2023-053）。

### 1.2 使用するセンサ

本研究で使用したシューズ（NIKE Zoom Fly4, NIKE）とMEMS六軸触覚センサ搭載インソール（Touchence社）の写真を図1に，インソールに搭



図1 (a) 使用したシューズ (b) MEMS六軸触覚センサ搭載インソール (c) 実験の様子

載されたセンサの位置と軸の定義を図2に示した。インソールには母指球・小指球・かかとの3か所にMEMS六軸触覚センサが，中心部には3軸加速度・ジャイロセンサが配置してある。MEMS六軸触覚センサは鉛直・前後・左右方向のせん断力 ( $F_z, F_y, F_x$ ) 及びモーメントを計測し，出力値は母指球・小指球・かかとの順で1, 2, 3と表記

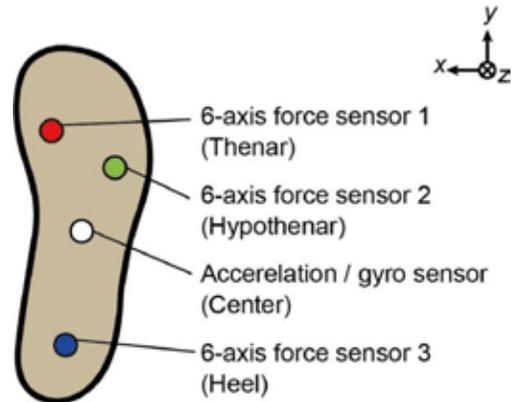


図2 センサ位置と軸方向の定義

する（小指球での鉛直の反力は $F_z2$ ）。なおデータはBluetoothを介して専用アプリをインストールしたAndroid端末に50Hzの周波数で送信される。測定前，靴を履いた状態でのキャリブレーションがアプリ上で行われた。測定時Android端末の通信と走行動作に支障がないように，Android端末は着用したタイトのポケットにしまい実験を行った（図1(c)）。測定後データはサーバにアップロードされ，PCに再度データをダウンロードし，出力データのうち3軸方向の力 ( $F_z, F_y, F_x$ ) について解析を行った。

### 1.3 測定方法

#### 1.3.1 歩行・ジョギング・快調走・全力疾走の測定

十分にウォーミングアップを行った後，センサシューズを履いて上記の4つの項目の動作について測定を行った。快調走は，動作としては短距離走と同様だが，努力度を85%程度に抑えた走行形態で，全力疾走は努力度100%で行った。また歩行以外の3つの走行については30mの助走区間を設け，十分に加速した後の後半30mの走行データを解析対象とした。後半30m間の通過時間計測のため，赤外線によるタイム測定装置（FASTRun-R, yy factory）を用いて計測を行った。また動作を撮

影するために、カメラによる測定全体の撮影と、GoProによる測定区間30mの中心の10m (40-50m地点)の定点撮影を行った。

### 1. 3. 2 スタートブロックからの60m走の測定

スタートブロックからの60m走について計測を行った。被験者はスタート時、右足は後方、左足は前方に準備し、スタート時のブロックを蹴るときを0歩目、次に踏み出す右足を1歩目として解析を行った。タイムの測定、カメラによる撮影も1. 3. 1同様にを行った。

## 2. 実験結果

### 2. 1. 1 歩行・ジョギング・快調走・全力疾走の測定結果

各動作における左右一歩分の $F_z$ ,  $F_y$ ,  $F_x$ の出力値の比較を図3~5に、各動作の平均速度、平均ストライド、その他測定値を表1にまとめた。平均速度は歩行が最小でジョギング、快調走、全力疾走の順で増加している。また平均ストライドは快調走で最大となった。

図3の $F_z$ の変化からは、歩行やジョギングでは前足部の反力に対してかかとの反力が大きく、快調走・全力疾走ではかかとの反力は小さくなっていることが分かる。これはかかとから接地して

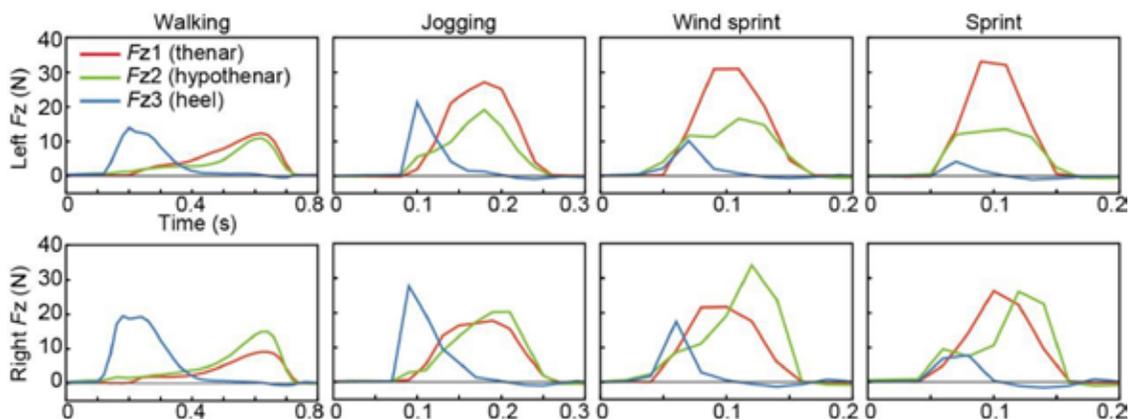


図3 各動作での $F_z$ の出力値の比較

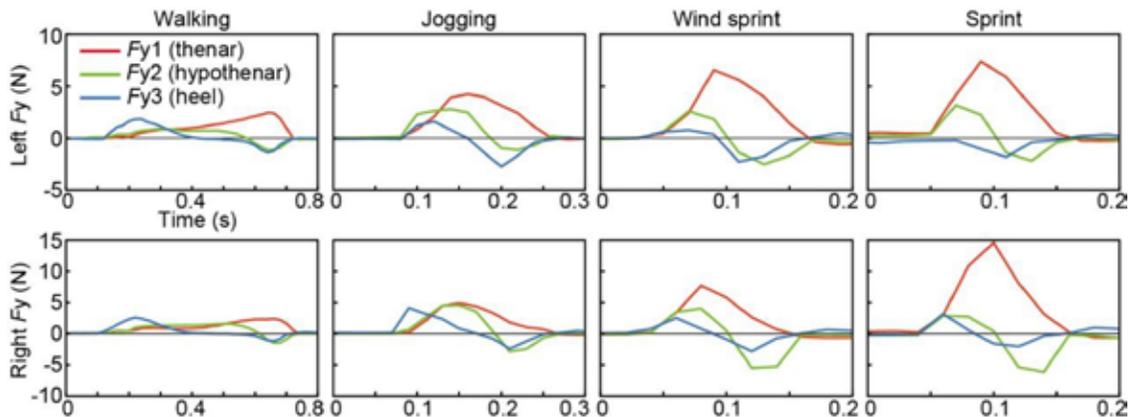


図4 各動作での $F_y$ の出力値の比較

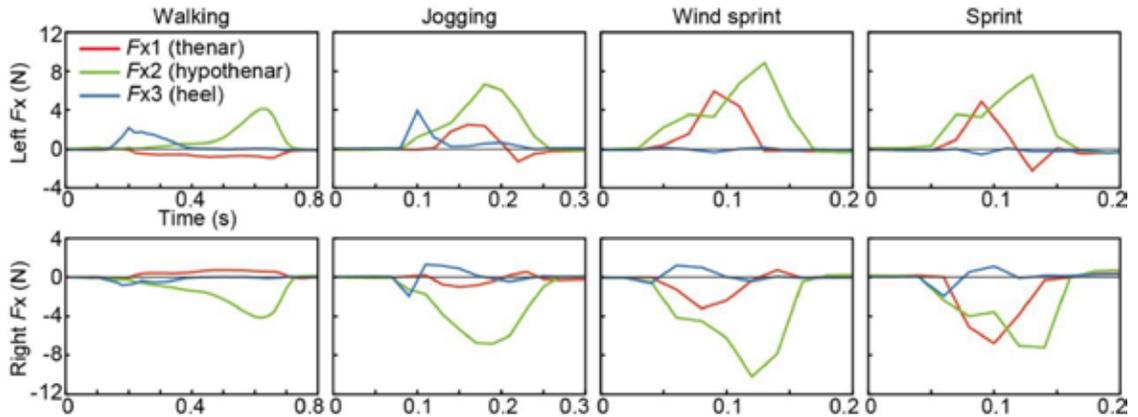


図5 各動作でのFxの出力値の比較

表1 各動作での測定値

	Walking	Jogging	Wind sprint	Sprint
Velocity (m/s)	1.67	5.02	7.64	8.54
Average stride (m)	0.80	1.79	2.14	2.00
Peak to peak (s)				
Left	0.41	0.08	0.038	0.030
Right	0.42	0.085	0.033	0.033
Average max Right Fz1 (N)	9.51	18.51	22.97	23.60
Average max Right Fz3 (N)	18.96	31.08	27.12	12.57
Average max Right Fy1 (N)	2.37	4.27	7.70	11.57
Average min Right Fy2 (N)	-1.35	-2.85	-5.94	-6.55
Average min Right Fx2 (N)	-3.75	-6.36	-10.01	-8.57

前足部へ抜ける歩行動作や、足裏の全面でフラットに接地するジョギング動作では比較のかかとの反力が大きい一方、スプリント動作では前足部で接地する走法に移行するためかかとの反力が減少していると考えられる。また全力疾走ではかかとの反力のピークから前足部のセンサが最大値を示すまでの間隔は短くなっており、速度の増加に伴う走行時の接地時間の短縮や重心移動の速さを示している。さらに快調走・全力疾走において左足は母指球と小指球の反力のピークのタイミングがほぼ同時なのに対し、右足においては母指球がピークに達した0.02-0.04秒後に小指球がピークを迎えている。この左右の波形の差から、走りの左右差（被験者の左足は足裏が左右に傾くことなく接地しているが、右足は母指球から接地し、小指球側で離地しているなど）を観察することができる。表1には左右の足のかかとのFz値がピー

クを示してから母指球のFzがピークを示すまでの時間の平均と、接地時の母指球のFz値の極大値の平均をまとめた。

図4の各センサのFyの変化に着目すると、母指球のセンサからはブレーキ成分のみが、小指球・かかとのセンサからは接地直後に前方へのせん断力（ブレーキ力）、離地直前に後方へのせん断力（推進力）の二峰性の波形が出力されていることがわかる。特に母指球のFy極大値は走速度が上昇するとともに増大し、また小指球の接地後期の極小値の値も減少している（表1）。

図5に示したFxに着目すると、どの動作においても小指球は身体重心から外方向の力を出力しており、その絶対値は歩行動作に比べて他の走行動作で非常に大きくなっている。母指球については、歩行時にはわずかに内側への力が加わっているものの、その他の走行動作においては外方向へ

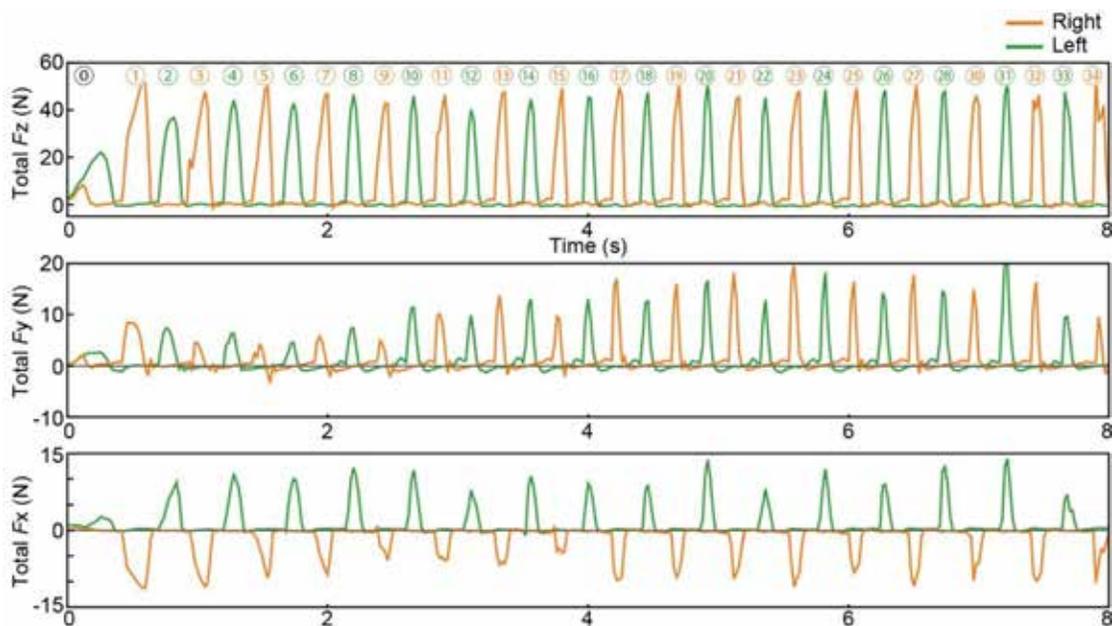


図6 各軸方向のセンサ出力の合計値

表2 前半30mと後半30mの通過タイム

First half 30 m (s)	4.23
Second half 30 m (s)	3.255

力が加えられていた。

2. 1. 2 スタートブロックからの60m走の測定結果

スタートから8秒間の3つのセンサの各軸方向

の出力の合計値を図6に、ビデオとタイムの計測システムから算出した前半30mと後半30mの通過タイムを表2に示した。ブロッククリアランスを0歩目、最初に出る右足を1歩目と定義し、図6内の上部にその歩数を示した。Fzの合計値は1歩目以降、ほぼ一定の値で推移していることが分かる。Fyの合計値はほとんどの時間で正の値(ブレーキ成分)となっており、その値は時間とともに増加し、16歩目以降で安定した値をとって

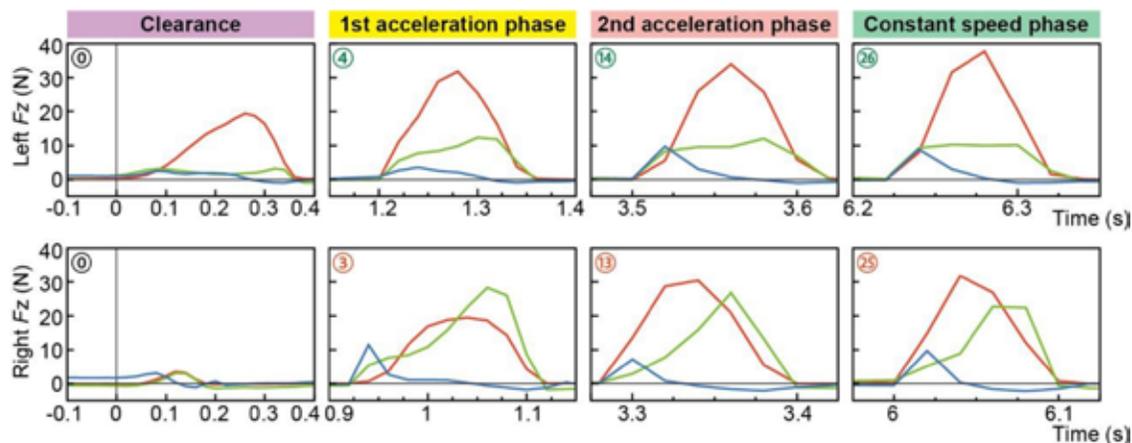


図7 各フェーズにおけるFz

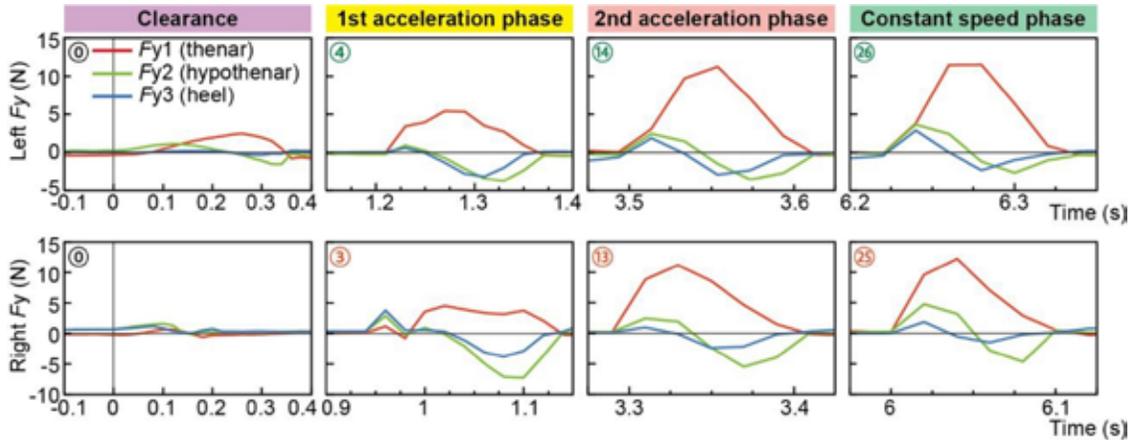


図8 各フェーズにおける  $F_y$

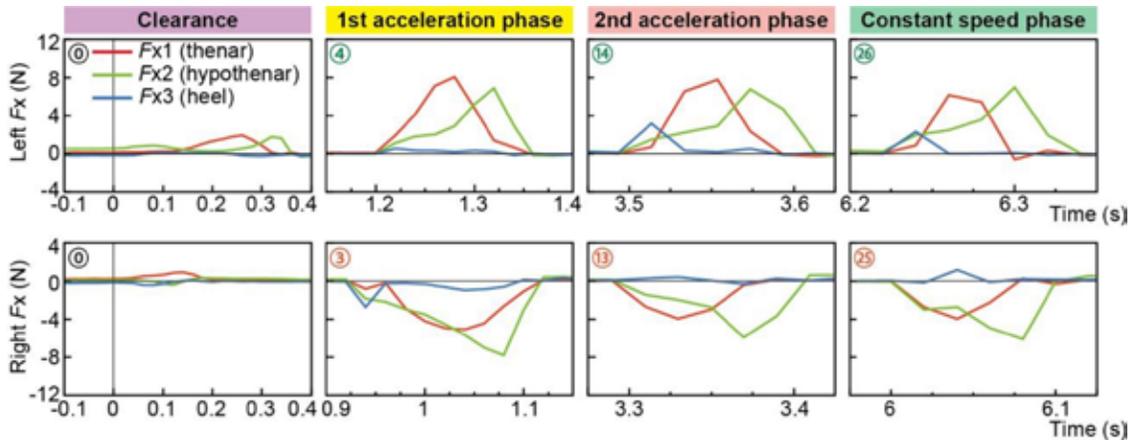


図9 各フェーズにおける  $F_x$

る。  $F_x$  は右足では負の値（右方向）、左足は正の値（左方向）と、外側へ力を加えていたことを示している。

ブロッククリアランス、一次加速、二次加速、中間疾走時のそれぞれにおける各軸方向の1歩分の出力波形を図7～9に示した。なお図左上の数字は歩数を示している。

$F_z$  では、クリアランス時は前足（左足）の母指球での荷重が大きい、その後は図6に示したように大きな変化はなく推移していることが分かる。また左足の接地時間（波形の立ち上がりから立下りまで）は、クリアランス時に0.36秒、4歩

目は0.16秒、14歩目は0.12秒と、加速とともに減少している様子も分かる。さらに、母指球と小指球のそれぞれで反力がピークに達する時間が、右足において大きくずれているのが2. 1. 1同様に観察された。

$F_y$  については、加速段階では小指球の後方へのせん断力が大きく、母指球の前方へのブレーキ力は小さいが、加速とともに小指球の推進力成分は減少、母指球のブレーキ力は増大していることが分かる。また小指球のセンサにおいて、右足の波形が左足に対して大きくなっている。走行時に小指球のみで推進力を生み出していると仮定する

と、この被験者は左足より右足で大きな推進力を得ていることになる。

$F_x$  は、加速局面から疾走局面に至るまで外側への力が出力されており、その大きさは歩数によらずほぼ一定であった。

### 3. 考 察

#### 3. 1 歩行・ジョギング・快調走・全力疾走の測定について

本実験では、走速度・走行フォームの違いによる地面反力の変化を測定した。 $F_z$  に関しては走速度の上昇とともに反力にも増加傾向がみられたが、歩行以外のジョギング、快調走、全力疾走の間での変化量は比較的小さかった。増大する原因としては、走速度の上昇とともに足を高い位置から振り下ろす疾走フォームへと変化していくためだと考えられる。特に疾走フォームに関しては、母指球から接地する選手や、フラットに接地して走る選手など一定ではないため、個人差が現れやすいパラメーターだと考えられる。

$F_y$  においては、小指球・かかとの波形の振幅に変化が見られたが、母指球のセンサからはブレーキ成分のみが検出される結果となった。母指球において推進力の成分が検出されない原因として (1) 足裏とセンサの相対位置、(2) 接地中の股関節の外旋動作などが考えられる。前者はセンサの位置や足の形状に起因するため、今後センサの位置と測定結果の関係について検討が必要である。後者については、接地から離地に至るまでに外旋動作が入り、右足は時計回りに、左足は反時計回りにねじられるために、母指球側では前方へ、小指球側では後方へせん断力が発生している可能性がある。こちらに関しても正面から映像から分かる走行フォームとの比較を行う必要がある。

$F_x$  の値は右足と左足とでほぼ左右対称な波形が出力され、特に走行時に外側へ大きな力が検出された。横方向のせん断力の大きさは、身体重心

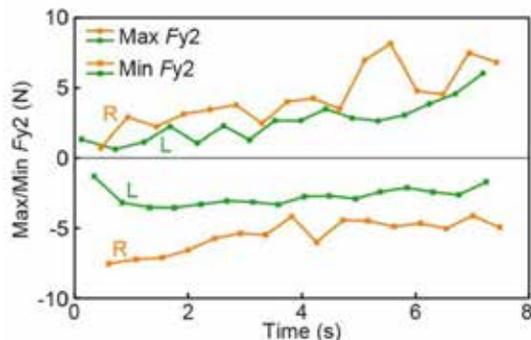


図10 各歩数での $F_y2$ の最大値と最小値

に対する接地位置の左右のずれの大きさに関連があるが<sup>10)</sup>、本実験ではどの動作においても外側への荷重が大きく、身体重心に対して外側に接地していることが示唆された。

#### 3. 2 スタートブロックを用いた60m走の測定結果について

図6の $F_z$ 合計値ではスタートから後半までの有意な変化は見られなかった。一方 $F_y$ においてはスタートから4秒後程度にかけての加速局面でブレーキ力の増加が、左右の足でみられた。図10に全ての歩数での接地時の $F_y2$ の最大値と最小値を示した。各歩数におけるブレーキ力のピーク値は時間とともに上昇し、推進力はスタートから3秒後までは減少し、その後安定した値を取っている。フォースプレートを用いた従来の研究では、スタートから時間とともにGRFの垂直成分は増加し、推進力は減少、ブレーキ力は増加することが知られている<sup>1,2)</sup>。特にスプリントのパフォーマンスには前後方向のせん断力が強く関連し、効率よく後方へ力を加える必要がある<sup>3)</sup>。本実験では、後方への推進力は足裏の小指球で大きく検出される結果となった。3. 1で述べたような外旋動作が母指球のブレーキ力の原因となっている場合、被験者がより大きな推進力を生み出すフォームのためには内旋動作による股関節伸展が

必要になると考えられる。またGRF全体に占める前後方向のせん断力の割合Ratio of force (RF)はz軸とy軸の2軸で評価されることが多いが、本実験ではx軸方向も含めた3軸での評価も可能である。Fxにおいては時間による有意な変化は見られなかったため、重心の近くに接地する走法によりFxの値を抑え、RF値を改善する方法などがパフォーマンス向上の方法として考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では、MEMS六軸触覚センサを用いた短距離走での地面反力の測定を目的とした。結果として、スプリント時には歩行やジョギング動作に比べて母指球での垂直反力やブレーキ力が増大、小指球での推進力が増大し、小指球では外側へのせん断力が大きくなった。クラウチングスタートからの測定では、フォースプレートの測定で観察されるような前後方向のせん断力の変化は主に小指球のセンサに見られた。一方母指球のセンサではブレーキ力のみが検出されたため、出力データは足に対するセンサの相対位置や走行フォームに依存していると考えられた。以上のように、MEMS六軸触覚センサによる地面反力の測定はフォースプレートに比べ場所に依らない容易な測定を実現した。母指球と小指球のセンサ出力の差から脚の軌道を推測し、理想的な走行フォームへの改善に結びつけられることも示唆された。

#### 謝 辞

本研究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深く御礼申し上げます。また実験にあたりセンサの製作・ご提供を頂きましたタッチエンス社の方々に深く感謝いたします。

#### 文 献

- 1) G. Rabita et al., "Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion," *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **25**, no. 5, pp. 583–594, doi: 10.1111/sms.12389 (2015)
- 2) R. Nagahara, H. Kanehisa, and T. Fukunaga, "Ground reaction force across the transition during sprint acceleration," *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **30**, no. 3, pp. 450–461, doi: 10.1111/sms.13596 (2020)
- 3) P. Samozino et al., "A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running," *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **26**, no. 6, pp. 648–658, doi: 10.1111/sms.12490 (2016)
- 4) M. Hori, A. Nakai, and I. Shimoyama, "Three-axis ground reaction force distribution during straight walking," *Sensors (Basel)*, **17**, no. 10, p. 2431, doi: 10.3390/s17102431 (2017)
- 5) A. Nakai, Y. Morishita, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "6-axis force-torque sensor chip composed of 16 piezoresistive beams," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, vol. 2015-, no. February, pp. 730–731, doi: 10.1109/MEMSYS.2015.7051061 (2015)
- 6) 濱田悠嗣 et al., "1P1-F05 サッカーのキックにおける3軸力分布計測," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 1P1-F05\_1-1P1-F05\_4, doi: 10.1299/jsmermd.2015\_1P1-F05\_1 (2015)
- 7) 中井亮仁, 永野顕法, 高橋英俊, 松本潔, and 下山勲, "134 MEMS 3軸力センサを用いた階段昇降時の足裏応力分布計測 (シューズ・サーフェスほか)," シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, pp. 134-1-134-6, doi: 10.1299/jsmeshd.2013\_134-1\_ (2013)
- 8) 中井亮仁 and 下山勲, "C-23 MEMS 3軸センサを用いた歩行・走行時の足裏応力分布計測 (センサ情報によるロコモーション解析)," シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, pp. C-23-1-C-23-5, doi: 10.1299/jsmeshd.2015\_C-23-1\_ (2015)
- 9) 高畑智之, ドゥアシリス, 松本潔, and 下山勲, "垂直跳びの離地時にはたらく力の計測," シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, p. B-27, doi: 10.1299/jsmeshd.2016.B-27 (2016)

10) I. S. McClay and P. R. Cavanagh, "Relationship between foot placement and mediolateral ground reaction forces during running," *Clin. Biomech.*, **9**,

no. 2, pp. 117–123, doi: 10.1016/0268-0033 (94) 90034-5(1994)

# 3D 着装シミュレーションにおける スポーツ衣料の質感の評価基準

信州大学 金 晃 屋  
(共同研究者) 信州大学大学院 石 田 英 衣  
信州大学 高 寺 政 行

## Evaluation Criteria for Texture of Sportswear in 3D Wearing Simulation

by

KyoungOk Kim, Masayuki Takatera  
*Institute for Fiber Engineering (IFES),  
Shinshu University*  
Hana Ishida  
*Graduate School of Science and Technology,  
Shinshu University*

### ABSTRACT

To investigate the evaluation criteria of the surface texture of sports clothing in 3D wearing simulation compared to actual clothing, a comparison was conducted on the similarity and difference between the simulated and the actual clothing images and those impression. We also tracked the eye movements of the evaluators during impression evaluation using a gaze-tracking device to investigate the parts of the garments they paid attention to. We prepared eight sportswear pieces with different materials and colors and created simulated and actual images worn on a mannequin. The evaluators were 20 university students in their twenties. As a result, the evaluators gazed at the garment's chest, hip, and leg curved parts in the simulated and actual image. There were less significant differences in the overall impression of a garment,

such as gaudiness and elegance, between the simulated and the actual images. However, the simulated images of bright-colored or glossy fabrics tended to be evaluated as thicker and heavier than actual ones. The impression of smoothness also tended to differ in both. For dark and mat fabrics, there was no significant difference between the simulated and actual images. When evaluating the texture of sportswear in 3D wearing simulation, the evaluation items that cause differences from the actual image are "thickness," "weight," "smoothness," and "glossiness." Those are considered as the evaluation points of the difference between the simulated and the actual clothing. In electronic commerce, simulation images can convey the overall impression of a garment. Simulation images can be used more effectively as product images considering the evaluation points of this research result.

キーワード

3D 着装シミュレーション, スポーツ衣料, 質感, 電子商取引

Keyword

3D Apparel Simulation, Sportswear, Texture, Electronic Commerce

## 要 旨

スポーツ衣料を対象に、3D 着装シミュレーションの衣服表面質感の実物との比較時の評価基準を調べた。シミュレーション衣服画像と実物衣服画像の類似性と相違性、印象の比較実験を行った。また、視線追跡装置を用いて評価者の印象評価時の衣服の注視部位を計測した。スポーツ衣料 8 着（上衣下衣各 4 着）を用意し、ボディに着用させたシミュレーションと実物の画像を作成した。評価者は 20 代大学生 20 名である。実験の結果、評価者はシミュレーション画像と実物画像において、チェスト、ヒップ、レッグなど、衣服の曲面の部位を注視した。衣服の印象については「派手さ」「上品さ」「シンプルさ」「ゆったりさ」の項目でシミュレーション画像と実物画像の間に有意な差はなかった。しかし、明るい色の生地および光沢のある生地の衣服では、厚さ、重さ、なめらかさ及び光沢感の評価に、有意な差が見られ、色が暗く、マットな（光沢のない）生地の衣服では、

風合いやテクスチャの印象におけるシミュレーション画像と実物画像の間に有意な差は見られなかった。3D 着装シミュレーションにおけるスポーツ衣料の質感を実物と比較する際、差が生じる質感の項目は「厚さ」「重さ」「なめらかさ」及び「光沢」であり、シミュレーション画像の評価ポイントになる。電子商取引において、シミュレーション画像は衣服の印象を伝えることができ、本研究結果の評価ポイントで評価基準を作成し、商品画像を用途に合わせて評価し用いることでより有効な活用が可能だと考えられる。

## 緒 言

近年のアパレル業界の課題の一つに衣服製品の余剰在庫や廃棄による環境負荷の削減が挙げられている。2020 年における国内衣類新規供給量 81.9 万トンに対し、在庫量 5.8 万トン、事業者側での廃棄量 0.2 万トンと全体の 7 パーセント以上を占めたことが報告されている<sup>1)</sup>。また、販売前の製品設計時に製作される試作品も破棄されることが

多く、資源消費を抑制するための方策が求められている。このような背景から、3D着装シミュレーションシステムの活用が解決手段として期待されている。アパレル3D着装シミュレーションシステムは、衣服のパターン設計や縫製指示、着装シミュレーション、修正などの製品設計フェーズをデジタル上で操作できるため、試作品で発生していた資源の消費や廃棄の削減が可能となり、業務の効率化にも繋がる<sup>2)</sup>。一方、電子商取引においても商品画像としてシミュレーション画像を使用することが増えている。これまで撮影に必要なだった実物衣服とそのカラーバリエーションの製作資源とコストの削減および注文生産による在庫削減に活用されている。

3D衣服シミュレーション技術の開発のために、多くの研究者らが研究を行っている<sup>3-6)</sup>。また、アパレル3D着装シミュレーションの有効性についても様々な研究が行われている。3D着装シミュレーションシステムを活用した電子商取引における消費行動に関する研究では、KimとLaBat<sup>7)</sup>が、3D着装シミュレーションシステムを用いた消費者のオンラインショッピング体験に関する調査を行い、消費者は、仮想モデルの再現性において不正確に感じる点はあるが、技術に対し好意的で、将来的に使用する可能性を示唆した。仮想モデルの不正確な再現性は試作でのデザイン採否の判断を誤る可能性がある。また、電子商取引においては、購入者の商品認知に齟齬が生じ、返品につながる可能性がある。Zulkifliら<sup>8)</sup>は、パンツの実物画像およびシミュレーション画像における幾何学的相違点の主観的評価基準について調べ、両者の裾幅における違いがパンツの評価に大きく影響することを明らかにした。石田ら<sup>9)</sup>は風合いやテクスチャなど生地質感における実物とシミュレーションの違いについて、ジャケットおよびスカートの実物画像およびシミュレーション画像を対象に、生地質感に対する印象と消費者の注視部

位について調べた。その結果、シミュレーションされた生地の軽薄さが衣服に安っぽい印象を与え、柄の大小や生地色の明暗が実物との類似度に影響を与えることが明らかになった。しかし、スポーツ衣料については調べられていない。スポーツ衣料は機能性が求められ、使用する生地や形状が日常衣料のジャケットとスカートとは異なり、3D着装シミュレーションにおけるスポーツ衣料の質感の評価基準も異なる可能性がある。

本研究では、スポーツ衣料を対象として、実物衣服に対するシミュレーション衣服の類似性と相違性、印象評価における消費者の評価基準を明らかにするため、実物画像とシミュレーション画像の生地質感の印象評価を行った。また、視線追跡装置を用いて、評価者の印象評価時の実物画像およびシミュレーション画像における衣服の注視部位を計測した。

## 1. 実験

### 1.1 試料スポーツ衣料と評価用画像の作成

シミュレーションした衣料と実物を比較するために、シミュレーションと実物の画像を作成した。市販のスポーツ衣料（上衣の半袖Tシャツ4種類及び下衣のロングパンツ4種類、男性用Mサイズ）を2着ずつ購入した。試料の素材・種類と色柄情報を表1に示す。シミュレーションに必要なパターンを得るために、1着の衣服を分解し、パターンを取得した。また、生地テクスチャデータを得るために、テクスチャデータ作成システムxTex（VIZOO、ドイツ）を用いて、衣服から取得した生地テクスチャマップ（カラーマップ、ラフネスマップ、ノーマルマップ、アルファマップ、ディスプレイメントマップ、スペキュラーマップ）を取得した。取得は、スタイレム瀧定大阪株式会社に依頼した。それぞれの衣服のパターンとテクスチャデータを用いて、アパレル着装シミュレーションソフトCLO（Virtual Fashion LLC., 韓

国)で3D衣服モデルを製作し、正面、側面、背面、左右45度斜め方向を含む全6方向からの画像を取得し、実験での表示画像とした(図1)。3D衣服モデルの背景は実物画像の撮影に用いたものを撮影し、合成した。着用者モデルは、男性平均ダミー(MD-20A, 株式会社七彩, チェスト88cm, ウエスト80cm, ヒップ93cm)とした。シミュレーションでは同ダミーのスカンデータを用いた。実物画像は各スポーツ衣料を同ダミーに着用させ、グレーの背景紙を背景とし、デジタル一眼レフカメラ(D750, レンズAF-S NIKKOR 70-200mm f/2.8E FL ED VR, Nikon, 日本)を用い、5.5m離れた距離から焦点距離82mm, 絞りf8, シャッタースピード1/8秒, ISO感度400, 露

出補正-0.7で撮影した。写真撮影時の照明は、蛍光灯ライト(SYS-484-120U44ft4BANK基本セット(75W×4), KINOFLO, アメリカ)を2台使い、向かって右斜め前と左横上から照らした。シミュレーションでは写真撮影時と同様の方向で照明状態の似ている光源を選択し照らした。写真の色はカラーチャート(COLORCHECKER CLASSIC, Calibrite)を撮影した画像とOpenCV<sup>10)</sup>を用いて補正を行った。作成したシミュレーションと実物の画像を図2に示す。

1. 2 シミュレーションと実物画像の印象評価  
シミュレーションと実物画像, それぞれについて6方向の画像(図1)を1台のモニターに表示し,



図1 表示画像例(シミュレーション)

表1 試料の素材

衣服の種類	試料名	生地素材と種類	色・柄
上衣の半袖Tシャツ	TA	ポリエステル50% 複合繊維(ポリエステル)50%, 編物	青地のプリント柄
	TB	ポリエステル100%, 編物	白地のプリント柄
	TC	ポリエステル51% リサイクルポリエステル49%, 編物	黒
	TD	ポリエステル50% 複合繊維(ポリエステル)50%, 編物	青地のプリント柄
下衣のロングパンツ	BA	綿88% ポリエステル12%, 編物	白地のプリント柄
	BB	綿100%, 編物	黒
	BC	リサイクルポリエステル100%, 織物	黒地のプリント柄
	BD	リサイクルポリエステル100%, 編物	黒



(a) 上衣のシミュレーション画像



(b) 上衣の実物画像



(c) 下衣のシミュレーション画像



(d) 下衣の実物画像

図2 シミュレーション画像と実物画像

生地の風合い、テクスチャ、衣服全体の印象及び類似度に関する評価を行った。評価項目を表2に示す。評価は、7段階セマンティック・ディファレンシャル法（以下SD法）により行った。なお、類似性の評価における、風合いとテクスチャの評

価の要素は表2の項目であることを評価前に評価者に説明した。シミュレーション画像を用いた電子商取引を想定し、最初にシミュレーション画像の評価を行い、その後、実物の写真画像の評価を行った。類似度に関する評価は各試料の両画像の

表2 評価に用いた形容詞対

項目	形容詞対	
風合い	かたい	- やわらかい
	ざらざら	- なめらか
	薄い	- 厚い
	軽い	- 重い
テクスチャ	暗い	- 明るい
	マットな(光沢のない)	- 光沢がある
衣服全体	地味	- 派手
	下品	- 上品
	複雑	- シンプル
	きつい	- ゆったり
	格好悪い	- 格好良い
	嫌い	- 好き
類似度	風合いが似ていない	- 似ている
	テクスチャが似ていない	- 似ている
	シルエットが似ていない	- 似ている
	総合が似ていない	- 似ている

評価終了後に行った。表示にはノートパソコン(HP OMEN by HP 17-cb0065T, 画面サイズ17.3型, 解像度フルHD1920×1080)を用いた。

評価実験には、日本人大学生および大学院生20名(21～25歳, 男女各10名)がボランティアで参加した。実験にあたり、本研究の目的および実験手順について文章と口頭による十分な説明を行い、実験参加の同意を得た。実験は国立大学法人信州大学ヒトを対象とした研究に関する倫理委員会の許可(許可番号第354号)を得て実施した。

各スポーツ衣料のシミュレーション画像と実物画像の印象評価結果を用い、両者の印象における相違を調べるため評価項目ごとにt検定を行った。また、類似度評価の結果について多重比較(Tukey法)を用いて試料間の平均値の差を検定した。シルエットの幾何学的類似度を評価するために、作成した画像の衣服の輪郭を抽出し、評価結果との関係を考察した。

### 1. 3 画像評価時の視線追跡

衣服画像評価時に評価者が注視する部位を調べるために、評価実験時に視線追跡装置(TobiiX2-30, Tobii Technology AB, Sweden)を用いた視線追跡を行った。視線追跡装置をモニター下部中央に取り付け、参加者からモニターま

での距離が64cmとなるように配置した。また、注視部位を分析するため、図3に示すように対象のスポーツ衣料に興味関心領域(Area of interest, 以降AOI)を設定した。各方向の画像のAOIの滞留時間を合計し、平均値を求めた。

## 2. 結果および考察

### 2. 1 生地 の風合いとテクスチャの印象評価

上衣のシミュレーション画像および実物画像における生地 の風合いとテクスチャの印象評価結果を図4に示す。試料TAは、シミュレーション画像が実物画像に比べてなめらかで光沢があると評価された(有意水準5%)。試料TBは「明るい」と「光沢がある」以外のすべての項目でシミュレーション画像と実物画像に有意水準1%または5%で有意な差が見られ、シミュレーション画像が「やわらかく」、「なめらかで」、「厚く」、「重く」評価された。試料TCは上衣で唯一シミュレーション画像と実物画像の間に有意な差が見られなかった。試料TDは、生地 の風合い全項目と光沢感において有意な差が見られ、TBと同様にシミュレーション画像の方が重厚感のある印象と評価された。

下衣のシミュレーション画像および実物画像における生地 の風合いとテクスチャの印象評価結果を図5に示す。試料BAは、「なめらかさ」「厚さ」「明るさ」においてシミュレーション画像と実物画像の間に有意水準5%で有意な差が見られ、実物よりシミュレーションが「ざらざら」で、「厚く」「明るく」評価された。試料BBは生地 の風合い、テクスチャのいずれもシミュレーション画像と実物画像に有意な差は見られなかった。試料BCは、「厚さ」「重さ」「明るさ」「光沢感」において有意水準1%で有意な差が見られ、シミュレーション画像が「厚く」「重く」、「暗く」「マット」に評価された。実物画像の軽量感や光沢感がシミュレーション画像では表現できていなかったためだと考えられる。試料BDは、「重さ」のみ有意水準1%

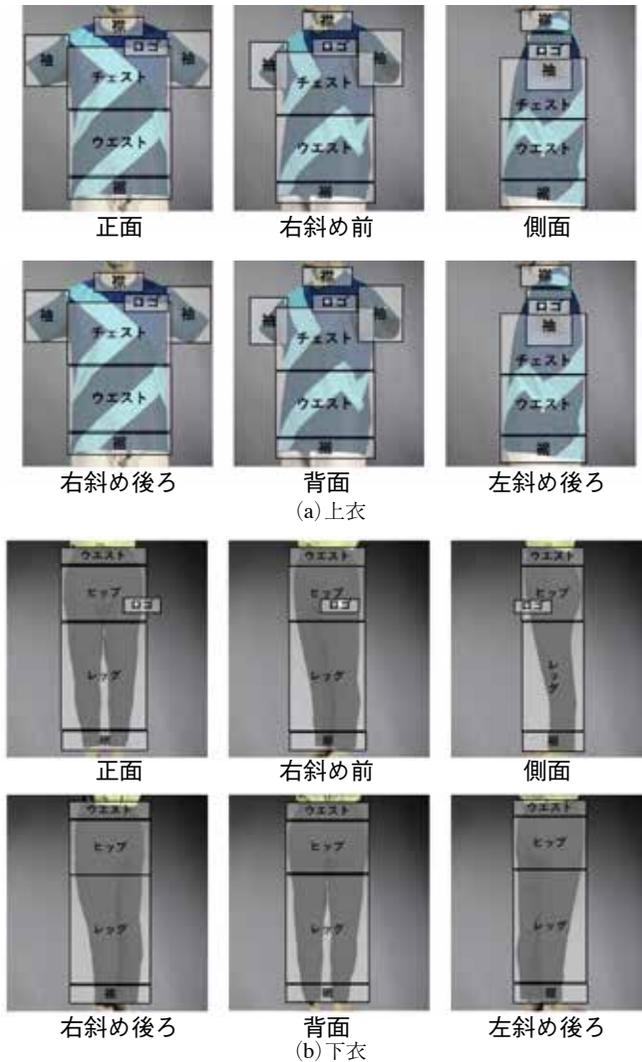


図3 AOIの設定

で有意な差が見られ、実物画像に比べシミュレーション画像が「軽く」評価された。

全体として、試料TBやTD, BA, BCのように明るい色の生地もしくは光沢のある生地の衣服は、シミュレーション画像の方が「厚く」「重く」感じやすく、なめらかさや光沢感の印象にも差が生じやすかった。一方で、試料TCやBB, BDのように色が暗くマットな生地の衣服は風合いやテクスチャの印象におけるシミュレーション画像と実物画像の間に有意な差は見られなかった。

## 2. 2 衣服全体の印象評価

上衣のシミュレーション画像および実物画像における衣服全体の印象評価結果を図6に示す。試料TA, TBではシミュレーション画像と実物画像における衣服全体の印象に有意な差は見られなかった。試料TCはシミュレーション画像の方が実物画像に比べて「きつい」と評価され(有意水準5%), 試料TDはシミュレーション画像の方が実物画像に比べて「地味」(有意水準5%)で「下品」(有意水準1%)と評価された。また、試料TDは実物画像の方がシミュレーション画像よりも「好

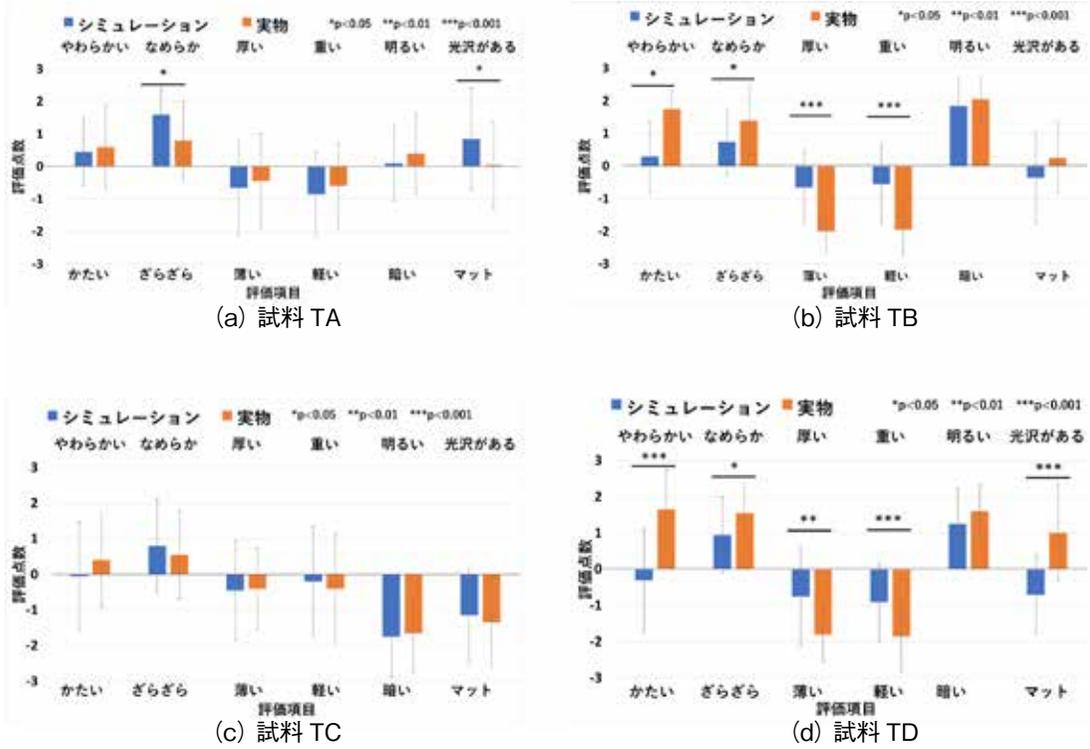


図4 シミュレーション画像および実物画像における生地 の風合いとテクスチャの印象評価結果 (上衣)

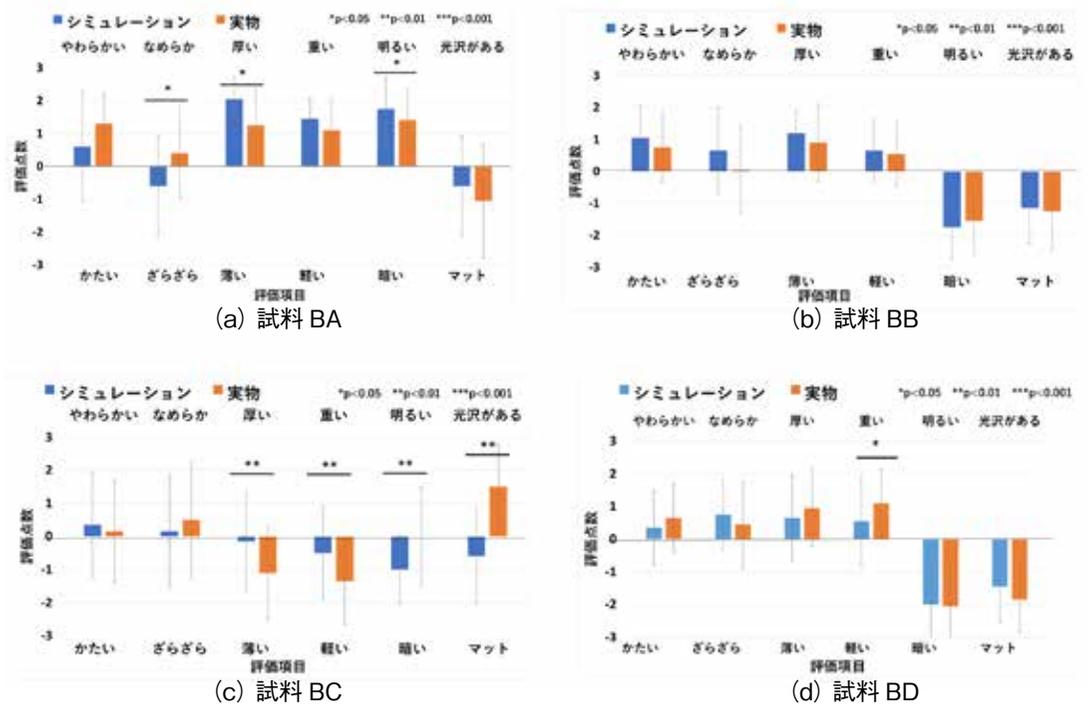


図5 シミュレーション画像および実物画像における生地 の風合いとテクスチャの印象評価結果 (下衣)

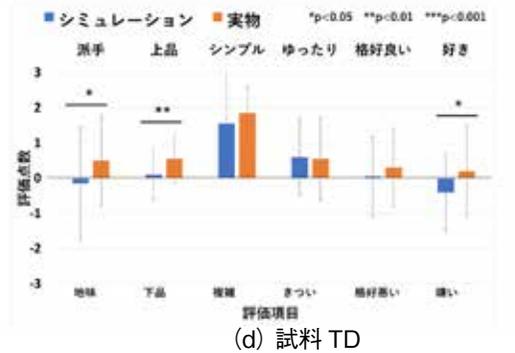
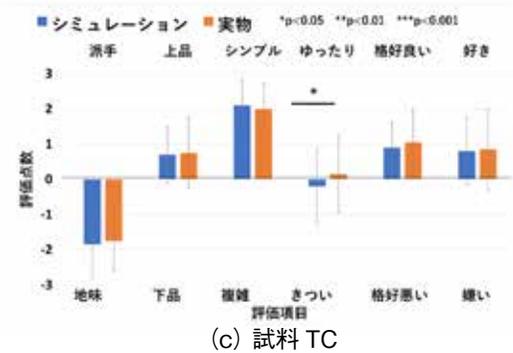
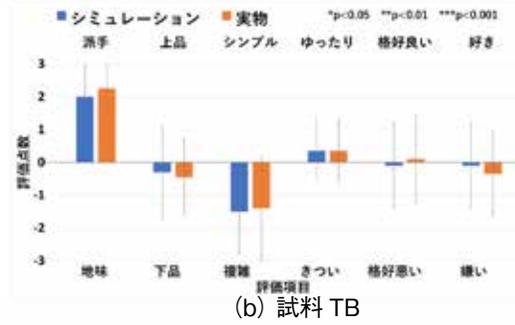
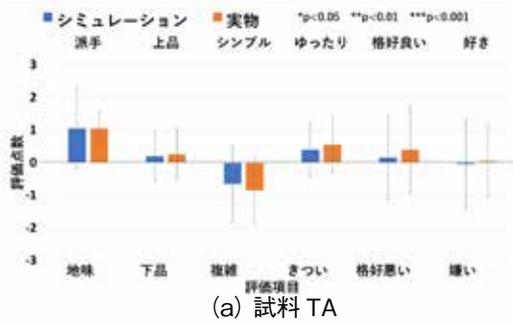


図6 シミュレーション画像および実物画像における衣服全体の印象評価結果 (上衣)

き」と評価された (有意水準5%)。

下衣のシミュレーション画像および実物画像における衣服全体の印象評価結果を図7に示す。試料BAはシミュレーション画像の方が実物画像より「格好良く」(有意水準5%)、試料BBはシミュレーション画像の方が実物画像より「好き」(有意水準5%)と評価されたが、他の評価項目では有意な差が見られなかった。

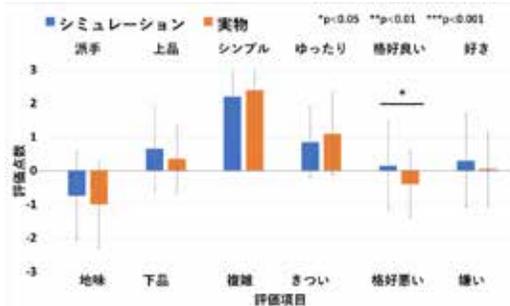
以上のことから、シミュレーション画像と実物画像において、評価者は生地風の合いやテクスチャの印象に差を感じる項目はあるが、衣服全体の印象は両者で大きな差は無かった。生地風の合いやテクスチャの印象の差は衣服全体の印象に影響しないものと考えられる。

### 2.3 類似度評価結果の比較

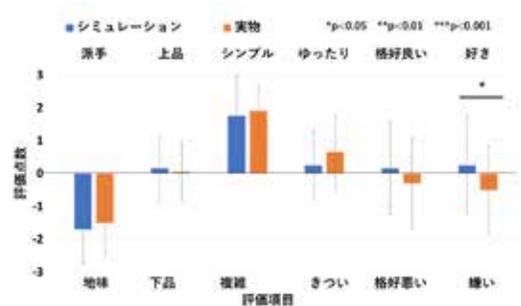
シミュレーション画像と実物画像の類似度評価結果を図8に示す。上衣では試料TDのテクスチャ

以外では平均値で「どちらともいえない」から「やや似ている」(0 ~ +1) と評価された。生地風のテクスチャでは試料TCとその他上衣の試料間で有意な差が見られた。下衣では、試料によって「やや似ていない」から「やや似ている」の範囲で評価され、特に生地風の合いでは、試料BBとBA、BC間で有意な差 (有意水準1%または5%) があり、BCとBDの間にも有意な差 (有意水準1%または5%) が見られた。テクスチャの項目では、試料BBとBCの間に有意な差 (有意水準5%) が見られた。総合ではBBとBA、BCの間に有意水準1%または5%で有意な差が見られた。

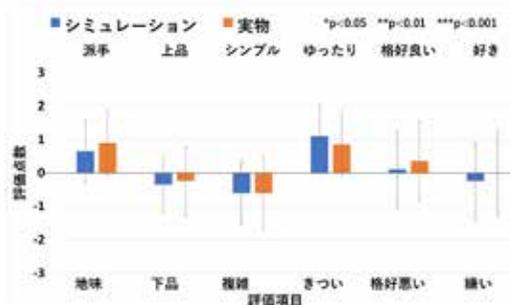
シルエットの類似度合いに試料間での有意な差は見られなく、「どちらともいえない」から「やや似ている」(0 ~ +1) と評価された。最も評価が高かった試料TAおよびBBと、最も評価が低かったTDおよびBAにおけるシミュレーション画像と実物画像のシルエット比較を図9と図10に示



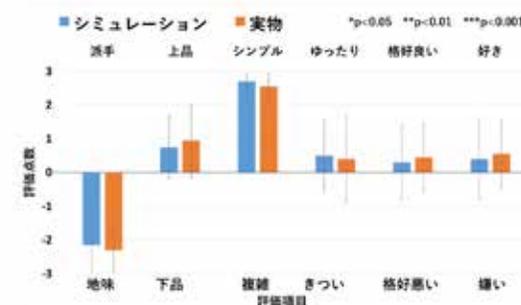
(a) 試料 BA



(b) 試料 BB

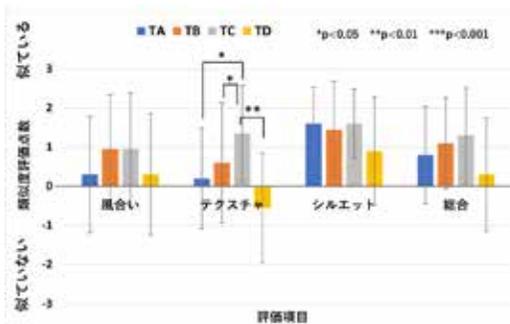


(c) 試料 BC

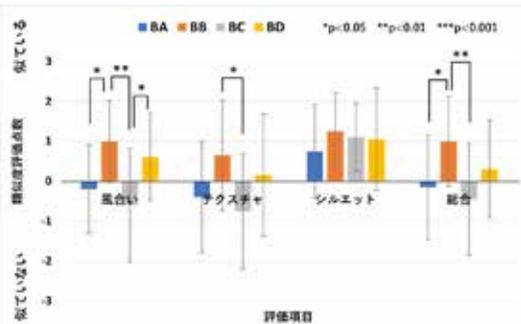


(d) 試料 BD

図7 シミュレーション画像および実物画像における衣服全体の印象評価結果 (下衣)



(a) 上衣



(b) 下衣

図8 各衣服のシミュレーション画像と実物画像の類似度評価結果



(a) TA (高評価)

(b) TD (低評価)

図9 シミュレーション画像と実物画像の輪郭比較 - 上衣

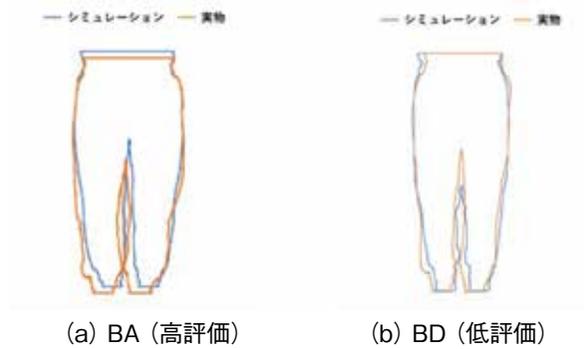


図10 シミュレーション画像と実物画像の輪郭比較-下衣

す。上衣試料TAは概ね輪郭が重なっているが、試料TDはシミュレーション画像の方が袖の広がりが大きく、ウエスト付近もややタイトになっている。評価者によってはこのようなシルエットの差を評価していたと考えられるが、平均的には似ていないとの評価にはならなかった。下衣試料BBは足の部分の膨らんだラインや裾の絞りが一致している一方、試料BAはシミュレーション画像における股下の隙間が狭く、実物画像に比べてふくらはぎから裾にかけての生地たるみが小さかった。しかし、この違いも平均的には似ていないとの評価にはならなかった。シルエットの類似度評価は、試料ごとに多少の差は見られたが、シミュレーションで衣服の印象には影響を与えないと考えられ、シミュレーションのシルエットの再現性には問題がないと考えられる。

総合評価を見ると、上衣はいずれも「どちらともいえない」から「やや似ている」と評価され、シミュレーション画像の活用が期待できる。また、下衣は試料BBの類似度が高く評価された一方で試料BAおよびBCは低い評価であった。試料BAとBCは風合いとテクスチャの類似度が低く、これらが総合類似度の評価に影響したと考えられる。印象評価の結果において、試料BAはシミュレーション画像が実物より「なめらか」「厚い」「明るい」と評価され、試料BCは「厚い」「重い」「明るい」「光沢がない」と評価された。このような差が類似

度の総合評価の差に影響したと考えられる。

#### 2. 4 評価時の視線滞留時間の比較

画像評価時の各興味関心領域 (AOI) における評価者の視線滞留時間の平均値を図11に示す。上衣ではチェスト周りの滞留時間が最も長く、次いで袖、ウエストが長かった。下衣ではレッグ、ヒップが他のAOIに比べて長かった。チェストやウエスト、ヒップは、曲面で、やわらかさなど風合いを判断しやすいことから、印象評価の基準部位として注視していると考えられる。また、下衣のレッグは他のAOIに比べて占める面積が大きいいため、相対的に滞留時間が長くなったと考えられる。

#### 3. 結論

本研究では、スポーツ衣料のシミュレーション画像と実物画像の類似性と相違性および印象に関する比較実験を行った。また、評価時の注視部位も調べた。その結果、評価者はシミュレーション画像と実物画像において、チェスト、ヒップ、レッグなど、衣服の曲面部位を注視した。衣服の印象については「派手さ」「上品さ」「シンプルさ」「ゆったりさ」の項目でシミュレーション画像と実物画像の間で有意な差がなかった。しかし、風合いとテクスチャに関しては生地の種類によって有意な差のある項目があった。実物画像で色が「暗い」

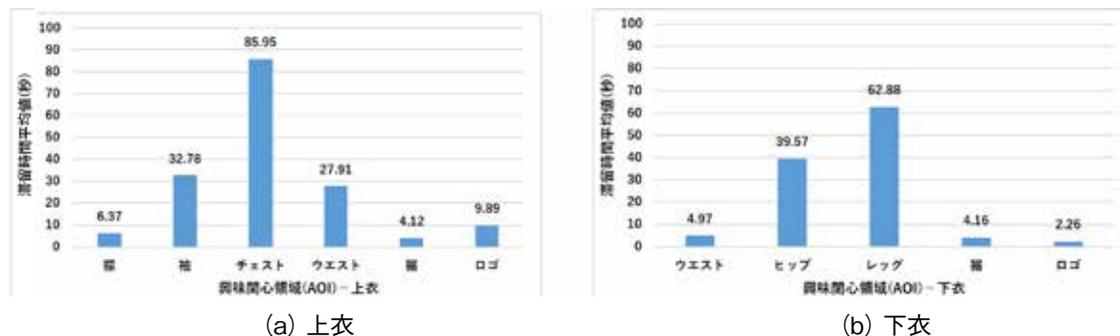


図11 画像評価時の各興味関心領域 (AOI) における評価者の滞留時間平均値

「マット」と評価された生地 of 衣服では、風合いやテクスチャの印象におけるシミュレーション画像と実物画像の間に差は見られなかった。一方で、実物画像で明るい色または光沢があると評価された生地 of 衣服では、実物と比べてシミュレーション画像の方が「厚い」「重い」「なめらか」及び「マット」と評価された。

以上の結果から、3D 着装シミュレーションにおけるスポーツ衣料の質感を実物と比較する際、差が生じる質感の項目は「厚さ」「重さ」「なめらかさ」及び「光沢」であり、シミュレーション画像の評価ポイントになる。電子商取引において、シミュレーション画像は衣服の印象を伝えることができ、本研究で得られた評価ポイントを考慮した評価基準をもとに商品画像を用いることでより有効なシミュレーション画像の活用が可能である。

本研究で光沢が重要な評価ポイントであることが明らかになったが、シミュレーションの光沢表現と実物の布の光沢の定量評価ができておらず、今後の検討課題である。また、色や素材の系統的な調査も行っていないため、今後検討する必要がある。さらに、本研究は条件を統一するために写真との比較を行ったが、実物と光源の影響も調査する必要がある。

## 謝 辞

本研究の遂行に際し、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、また実験に参加いただいた評価者の皆様に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 環境省 令和2年度 ファッションと環境に関する調査業務『ファッションと環境』調査結果, 日本総研, 03, p3, [https://www.env.go.jp/policy/sustainable\\_fashion/goodpractice/case25.pdf](https://www.env.go.jp/policy/sustainable_fashion/goodpractice/case25.pdf) (2023/06/20閲覧) (2021)
- 2) ファッション業界の DX をけん引する三菱商事ファッション, アパレル CG のメリットやその制作フローの概要とは?, CGWORLD.JP, 09/20, <https://cgworld.jp/special-feature/mousecomputer-202209-mcf.html>, (2023/05/05閲覧) (2022)
- 3) Okabe H., Imaoka H., Tomiha T., Niwaya H., "Three dimensional apparel CAD system", SIGGRAPH 92 Proceedings of 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 105-10(1992)
- 4) Choi K.J., Ko H.S., "Research problems in clothing simulation", *Computer-Aided Design*, 37 No. 6, pp. 585-92.(2005)
- 5) Gong D.X., Hinds B.K., McCartney J., "Progress towards effective garment CAD", *International Journal of Clothing Science and Technology*, 13 No. 1, pp. 12-23(2001)
- 6) Magnenat-Thalmann N. (Ed.), *Modeling and*

- Simulating Bodies and Garments, *Springer Science & Business Media*, London (2010)
- 7) Kim D. E., & LaBat K., Consumer experience in using 3D virtual garment simulation technology. *Journal of the Textile Institute*, **104** (8), 819-829 (2013)
  - 8) Zulkifli S.Z.B., Kim K., Takatera, M., "Similarities and differences between virtual and actual pants", *International Journal of Clothing Science and Technology*, **33** (2021)
  - 9) 石田 英衣, 金 晃屋, 高寺 政行, 3D着装シミュレーション画像評価における生地質感の影響, 2C-1-06, 第24回日本感性工学会大会, 09/01 (2022)
  - 10) Open CV Color Correction Model, [https://docs.opencv.org/4.7.0/d1/dc1/tutorial\\_ccm\\_color\\_correction\\_model.html](https://docs.opencv.org/4.7.0/d1/dc1/tutorial_ccm_color_correction_model.html) (2023/05/05閲覧)

# 衣服と皮膚の接触に伴う皮膚振動に関する基礎研究

文化学園大学 佐藤 真理子  
(共同研究者) 同 伊豆 南緒美  
同 松井 有子  
名古屋工業大学 田中 由浩  
稲盛科学研究機構

## Basic Study of The Skin Vibration Caused by The Contact of Clothing with Skin

by

Mariko Sato, Naomi Izu, Yuko Matsui  
*Bunka Gakuen University*  
Yoshihiro Tanaka  
*Nagoya Institute of Technology /*  
*Inamori Research Institute for Science*

### ABSTRACT

In wearing clothes, passive contact between the clothes and the skin occurs accompanied with human movements. In this study, we first examined the contact between clothing and the skin on the trunk during the movement of upper extremity utilizing a pressure measurement film. It was clarified the neck, shoulder tip, and scapula are prominent contact sites. Next, we explored the possibility of skin vibration measurement in the vicinity of the protruding part of the scapula. Investigation of the vibration intensity and median frequency of the skin vibration caused by contact between the skin and clothing revealed that a site about 2 cm away from the contact area was suitable for measurements. In addition, from the skin vibration measurement

in wearing several types of sportswear, it was clarified that the vibration intensity was greater in wearing sportswear than in not wearing it, and we found a certain tendency from the analyses of results of each sample. The relationship between the feeling of wearing and skin vibration is different from the active contact by tracing the clothing materials. In the passive contact between worn clothes and the skin, it was manifest that multiple factors, such as the looseness of the clothes and the characteristics materials, affect the skin vibration in contact.

#### キーワード

皮膚, 衣服, 接触, 皮膚振動, 振動強度

#### Keyword

Skin, Clothing, Contact, Skin vibration, Vibration intensity

#### 要 旨

衣服着用時, ヒトの動作に伴い, 衣服と皮膚の受動的な接触が生じる. 本研究では先ず, 上肢運動時の体幹部における衣服と皮膚の接触について, 圧力測定フィルムにより検討し, 顕著な接触部位として, 頸部, 肩先, 肩甲骨を明らかにした. 次に, 肩甲骨突出部近傍で, 皮膚振動計測の可能性を探り, 皮膚と衣服の接触から生じる皮膚振動の振動強度と周波数中央値の検討により, 接触部から2cmほど離れた部位を, 適する計測部位として見出した. また, 数種のスポーツウェア着用による皮膚振動計測から, 非着用時に比しウェア着用時に振動強度が大となることを明らかにし, 各試料の解析結果から一定の傾向を得た. 着用感と皮膚振動の関係性は, 衣服素材をなぞった際の能動的な接触とは異なるもので, 着用時の衣服と皮膚の受動的な接触においては, 衣服のゆとりや素材特性等, 複合的な要因が, 接触時の皮膚振動に影響する可能性が示された.

#### 緒 言

衣服の着心地の構成要素として, 暑い・寒い・

蒸れなどの温熱的快適性, 動きにくさや締め付けに関わる運動機能性と共に, 肌ざわり・擦れなどの皮膚の快不快が挙げられる. 皮膚と衣服素材の接触には, 快適な触り心地が製品購買意欲を誘起するものから, 不快で皮膚ダメージを生じるレベルまで様々で<sup>1,2)</sup>, 受動的な接触と能動的な接触, 強い圧力や摩擦を伴う接触と, 触れるか触れないかの微細な接触等, 幅広い状態が想定される. 我々はこれまで, Tanakaらが開発した, 皮膚を伝搬する振動を検出するウェアラブルセンサ<sup>3)</sup>を使用し, 自然な触覚を得ながら, 皮膚と対象との間に生じる力学現象を同時に記録することで, 衣服素材と皮膚の接触により生じる皮膚振動と触感の関係について報告した<sup>4-6)</sup>. その際, 手指先で能動的に衣服素材をなぞった際の皮膚振動を計測・解析の対象とした. 本研究では, 衣服着用時, ヒトの動作に伴い, 身体に生じる衣服と皮膚の接触, いわば受動的な接触に伴う皮膚振動に着目した. 上肢運動により, 体幹部のどの部位で衣服との接触が多く生じるか, その際の皮膚振動計測可能な部位について検討し, さらに, 様々なスポーツウェアを着用した際の皮膚振動を計測・解析することで, 着心地研究における皮膚振動データ活用の新

たな展開を試みた。

## 1. 方法

### 1.1 実験A

衣服着用時、ヒトの動きにより、身体のいかなる部位で衣服との接触が生じるか、上肢運動時の体幹部を対象に検討した。

被験者は健康な若年女性4名(年齢 $26.3 \pm 1.0$ 才、身長 $159.5 \pm 5.1$ cm、体重 $48.3 \pm 2.6$ kg)、動作条件は、上肢運動(前挙・側挙・後挙)とした。試料は、身体にフィットする一般的な肌着を想定し、ナイロン89%、ポリウレタン11%の長袖インナーとした。測定には、圧力測定フィルム(プレスケール、富士フィルム株式会社)を用いた。本測定フィルムでは、微細な圧力により発色マイクロカプセルが破壊され、化学反応で発色する。本フィルムを $4.5 \times 4.5$ cmの正方形にカットし、肩と頸部近傍4ヶ所、体幹部11ヶ所の計15ヶ所に貼付した(図1、表1)。被験者は、室温 $25^{\circ}\text{C}$ ・湿度50%RHに設定した人工気候室に入室、安静後、圧力測定フィルムを身体に貼付、試料を着用し、上肢運動を行った。実験後、フィルムをスキャナーで読み取り、フィルム面積の総ピクセル数と発色したピクセル数から、各部位の接触面積率(%)を算出した。得られた結果は、一元配置分散分析を行い、有意差が得られたものについてはBonferroniの多重比較を行った。

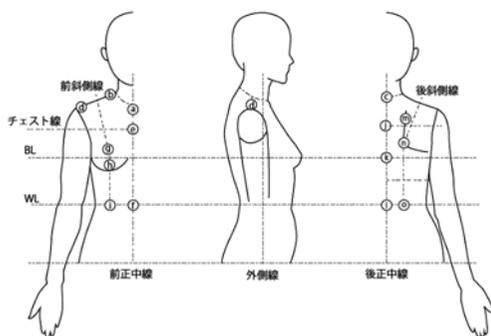


図1 実験A測定部位

表1 実験A測定部位

NO	部位詳細
a	前中心頸付根(頸窩点より下2.25cm)
b	頸側(頸側点より外側2.25cm)
c	後中心頸付根(頸椎点)
d	肩先上(肩先点より内側2.25cm)
e	前中心上(前正中線とチェストラインの交点)
f	腹部中央(前正中線とウエストラインの交点)
g	乳頭上(乳頭点より前斜側線上3cm)
h	乳頭下(乳頭点より垂直下3cm)
i	前斜側WL(前斜側線とウエストラインの交点)
j	後中心上(後中心頸付根と後中心中を結ぶ線上の1/2)
k	後中心中(後正中線とバストラインの交点)
l	腰中心(後正中線とウエストラインの交点)
m	肩甲骨(肩甲骨三角のうち 内側縁上の最内側点より下2.25cm)
n	肩甲骨下(肩甲骨下角点)
o	後斜側WL(後斜側線とウエストラインの交点)

### 1.2 実験B

皮膚振動は、皮膚が対象物に接触することで発生する。ヒトの動作に伴い、皮膚と衣服素材が接触し、皮膚表面には様々な皮膚振動が生じると考えられる。体幹部においては、上肢の動きに伴い、肩甲骨突出部で皮膚と衣服素材の接触が多いことが実験Aで明らかとなった。そこで実験Bでは、肩甲骨突出部位近傍で、接触による皮膚振動を捉えるべく、以下の2種の実験を設定し、衣服着用時の体幹部皮膚振動の測定と解析を行った。

#### 1.2.1 実験B-1

皮膚と衣服素材の接触により生じる皮膚振動が、いかに皮膚上を伝播するかを明らかにし、着用評価として皮膚振動データを用いる際に適する皮膚振動測定位置について検討した。被験者は、皮膚に疾患等のない健康な若年女性6名(年齢 $28.2 \pm 6.5$ 歳、身長 $159.3 \pm 6.3$ cm、体重 $52.8 \pm 7.1$ kg)である。動作条件は、メトロノームに合わせた30拍の腕振り動作とし、動作速度は、ウォーキングを想定した110bpm及びランニングを想定した160bpmの2条件とした。予備実験として、被験者に腕振り動作を行ってもらい、被験者に無理のない速度を設定した。着衣条件はブラジャーのみ(B)、ブラジャー+綿Tシャツ(B+Ct)、プ

ラジャー+ポリエステルTシャツ (B+Pt) の3条件である。Tシャツについては、綿及びポリエステルTシャツ共に、同じパターンから製作し、衣服の皮膚への接触の程度が等しくなるよう配慮した。実験に用いたTシャツのサイズ及び諸元を表2、図2に示す。試料のサイズはMサイズとLサイズを用意し、被験者が普段着用する衣服のサイズを基準に、被験者自身に選択してもらい着用した。皮膚振動の測定には、チャージ振動計 (MODEL-1607, 昭和測器株式会社) 及び加速度センサ (Model-2302B, 昭和測器株式会社) を用いた。先行研究<sup>4-6)</sup>では、皮膚振動検出にPVDFフィルムセンサを用いたが、PVDFフィルムの温度依存性と、運動による衣服内温度環境の変化に配慮し、本研究では、温度変化の影響を受けにくく、また量的な評価を行いやすい、加速度センサ



図2 実験着の寸法

を選択した。加速度センサの貼付位置は、図3に示す①~③の3部位である。背部において最も突出している肩甲骨突出部位を衣服と皮膚の接触部と定め (①), 接触部より水平上で正中線寄りに2cmの位置を部位1 (①), さらに2cm正中寄りを部位2 (②), 正中線との交点を部位3 (③) とした。測定データはA/D変換器 (National Instruments, US) を介してパソコンへ取り込み、10拍分の腕振り動作による皮膚振動について、数値解析ソフトウェアMATLAB (MathWorks, US) を用いて、FFT解析を行った。皮膚振動の評価指標は、先行研究<sup>4-6)</sup>と同じく、FFT解析によって得られるパワースペクトル密度 (以下、PSD) より、100-500HzのPSDの総和を振動強度として算出した。また10-500Hzの周波数帯域において、低周波側および高周波側からのPSDの総和が等しくなる周波数を、振動の質を示す周波数中央値として検討に用いた。

実験は、室温25℃・湿度50%RHに設定した人工気候室内にて実施した。被験者には実験内容を説明した後、皮膚振動センサ貼付位置に印を付け、各動作条件の動作の練習を行い、動作を習熟させた後に皮膚振動の測定を実施した。測定は順序効果を考慮し、ランダムとした。

### 1. 2. 2 実験B-2

数種のスポーツウェアを対象に、実験B-1と同じ被験者6名において、衣服着用時に腕振り動作を行った際の背部における皮膚振動の測定・解析

表2 実験B-1の試料一覧

		実験着	
組成		綿Tシャツ	ポリエステルTシャツ
サイズ [cm]	①	綿 100%	ポリエステル 100%
	②		(M)43.0/(L)44.0
	③		(M)35.0/(L)36.0
厚さ [mm]		0.51	0.70
剛軟度*1 [mm](たて/よこ)		26.0/22.0	16.3/15.0
摩擦特性*2(たて/よこ)	MIU	0.169/0.154	0.183/0.280
	MMD	0.0055/0.0062	0.0112/0.0194

\*1 JIS L1096 A法, \*2 KES-SE

表3 実験B-2の試料一覧

組成	スポーツウェア			
	サッカー	野球	剣道	一般スポーツ
サイズ	ポリエステル100%	ポリエステル100%	綿100%	綿100%
(M/L) [cm]	① 49.0/51.0	45.0/47.0	55.0	52.0/53.0
	② 42.0/44.0	37.0/39.0	56.0	47.0/49.0
	③ 21.0/21.0	22.0/23.0	29.5	18.0/19.0
厚さ [mm]	0.53	0.41	1.19	0.57
剛軟度 <sup>*1</sup> [mm] (たて/よこ)	27.0/27.3	15.0/14.0	78.7/46.0	36.3/11.7
摩擦特性 <sup>*2</sup> (たて/よこ)	MIU 0.268/0.225	0.185/0.273	0.229/0.207	0.222/0.216
	MMD 0.0103/0.0087	0.0065/0.0194	0.0295/0.0277	0.0069/0.0075

<sup>\*1</sup> JIS L1096 A法, <sup>\*2</sup> KES-SE

を行った。また、着用感について官能評価を実施した。

実験に用いた着衣は、サッカー・野球・剣道・一般スポーツのスポーツウェア上衣4種である(表3)。サイズ展開のない剣道着を除き、それぞれM・Lサイズの2種用意し、各被験者が普段着用する衣服のサイズを実験着として用いた。動作条件は実験B-1同様、メトロノームに合わせた30拍の腕振り動作とし、動作速度は110bpm及び160bpmとした。皮膚振動の測定には、実験B-1と同様のチャージ振動計及び加速度センサを使用した。皮膚振動測定部位であるセンサ貼付位置は、実験B-1の結果を踏まえ、実験B-1におけるセンサ貼付位置の部位1(図3・①、皮膚と衣服素材の接触部より水平上で正中線寄りに2cmの位置)とした。実験により得られた振動データは、実験B-1と同じく、振動強度と周波数中央値を評

価指標として用いた。実験着用時の着用感評価は、皮膚振動と触感に関する先行研究を踏まえ<sup>5)</sup>、ざらざらした-なめらかな、かたい-やわらかい、べたつく-べたつかない、しっとりした-さらっとする、あたたかい-つめたい、総合的に不快-総合的に快適、嫌い-好きの7項目の形容詞対とし、SD法による官能評価を実施した。

実験環境は、室温25℃・湿度50%RHに設定した人工気候室内とし、実験B-1と同様の手順にて、ランダムに皮膚振動の測定を行い、その際の着用感を回答させた。

### 1. 2. 3 統計処理

実験Bにより得られた結果は、統計処理を施し、比較検討を行った。本実験では、皮膚振動の測定データに正規性が得られなかったため、皮膚振動、官能評価ともにノンパラメトリック検定を採用した。部位間比較(実験B-1)および着用条件間の比較には、フリードマン検定を用い、有意差が得られた場合、各条件間の比較にBonferroni-Holm補正によるウィルコクソンの符号付き順位検定を行った。また動作間比較には、ウィルコクソンの符号付き順位検定を用いた。

### 1. 3 倫理的配慮

実験実施にあたり、ヘルシンキ宣言に則り、被験者に本研究の趣旨、研究協力への任意性等を十分に説明し、同意を得て実施した。なお本研究は、所属大学研究倫理委員会の承認を得て行った。

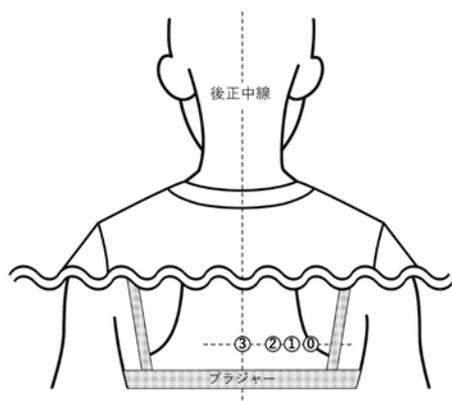


図3 皮膚振動センサ貼付位置

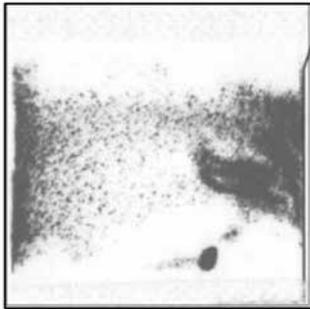


図4 接触後の圧力測定フィルム結果例(肩先点)

## 2. 結果

### 2. 1 実験A

実験により得られたフィルムの例を図4に示す。上肢運動により衣服との接触後、フィルムに発色部分が生じた。スキャンしたフィルム面積の総ピクセル数と発色したピクセル数から、各部位の接触面積率(%)を算出した(図5)。得られた接触面積率は0.4~28%程度で、値の大きかった

部位は、b頸側、c後中心頸付根、d肩先上、m肩甲骨の4部位、小さかった部位は、f腹部中央、i前斜側WL、k後中心中、l腰中心の5部位であった。d肩先上、m肩甲骨の2部位において、他部位との有意差が示された。

### 2. 2 実験B

#### 2. 2. 1 実験B-1

実験B-1で得られた、皮膚振動波形並びにそのパワースペクトル密度(PSD)の結果例を表4に示す。皮膚と衣服の接触部位として選択した肩甲骨突出部位に最も近い部位が部位1、最も離れた部位が部位3であるが、接触部位から離れるほど振動波形の振幅が小さくなり、皮膚振動が減衰する様子が観察された。またPSDでは、接触部位から離れるほど、100Hz以下の低周波数帯の成分が大きく減少する様子が見られた。被験者や着衣条件により得られる振動波形は異なるものの、部位比較した際、接触部位から離れた際の振動減衰や、周波数成分の変化は似た傾向を示した。

解析により得られた、振動強度及び周波数中

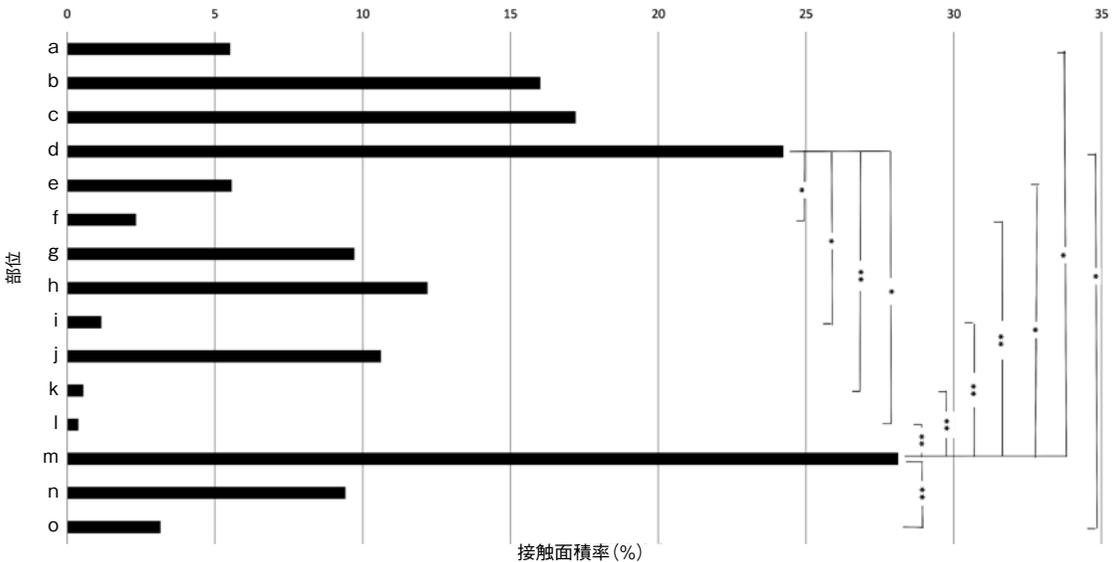
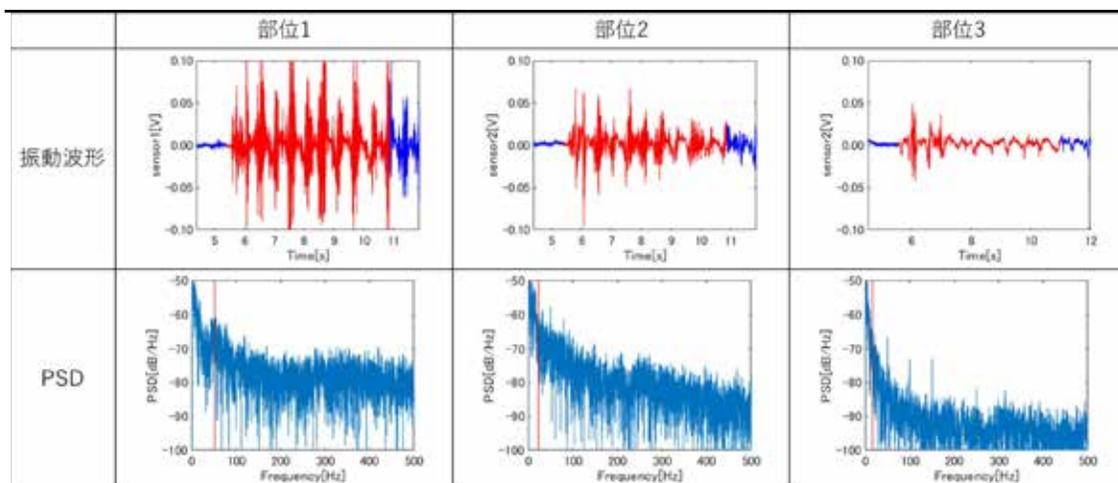


図5 上肢運動後の各部位の接触面積率(%)

表4 各部位における振動波形とパワースペクトル密度(PSD)の例



中央値の動作比較を図6, 7に示す. 振動強度は, 160bpmで腕振り動作をした際に有意に大きく(図6), 周波数中央値は動作速度が異なっても変化しない様子が示された(図7). 図8, 9に, 振動強度及び周波数中央値の, 部位別着衣比較を示す. 振動強度では, 部位1の振動強度が部位3に比し有意に大きく, また着衣比較では, 部位1・部位2において, すべての着衣条件間で有意

差が得られ, Tシャツ着用時(B+Ct及びB+Pt)の振動強度が大, 特にポリエステルTシャツ着用時(B+Pt)に振動強度の大きくなる様子が示された. これに対し, 最も振動強度の小さい部位3では, 着衣間の有意な差は得られなかった(図8). 周波数中央値では, 皮膚と衣服素材の接触部位から最も近い部位1で周波数中央値が低く, 中でもブラジャーのみ(B)の値が有意に小, 衣服非着用時の周波数中央値の低くなる様子が示された. 部位

\*\* : P<0.01

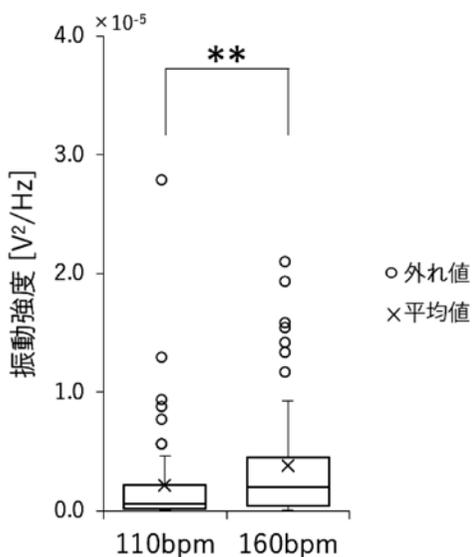


図6 振動強度の動作比較

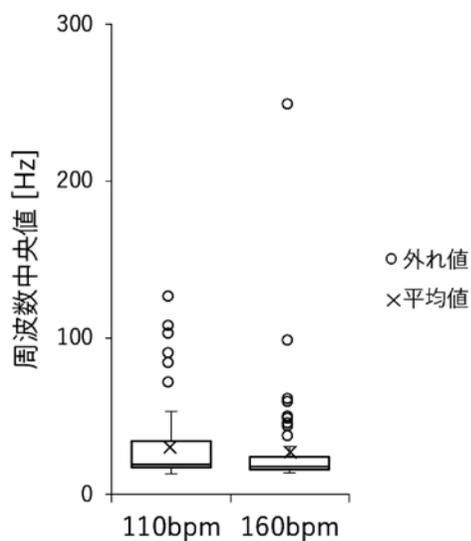


図7 周波数中央値の動作比較

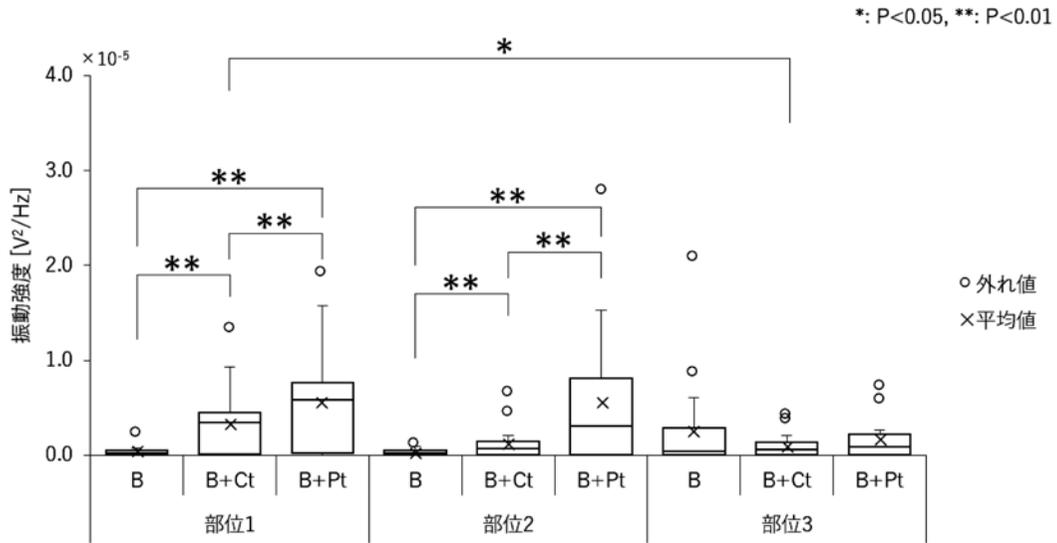


図8 振動強度の部位別着用条件比較

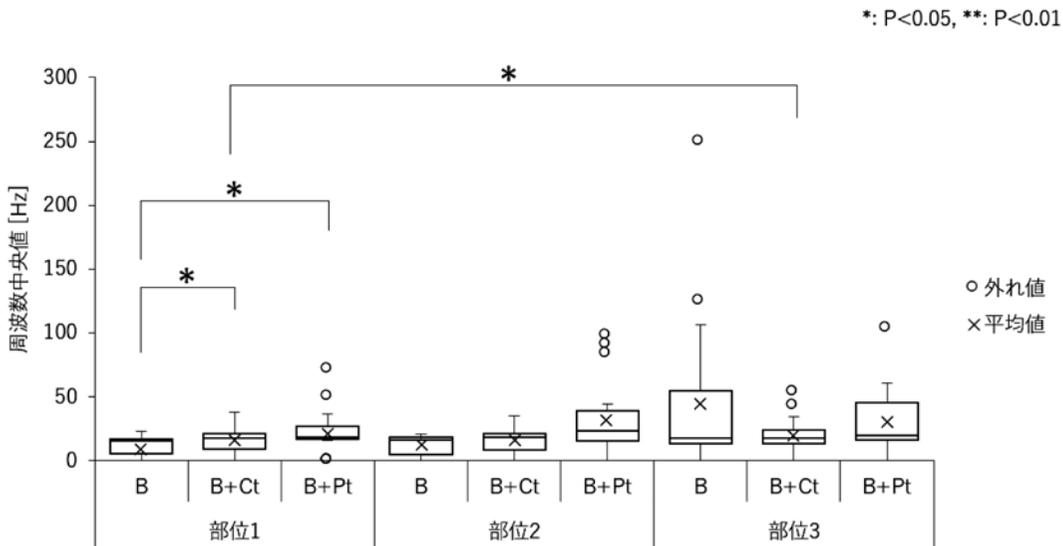


図9 周波数中央値の部位別着用条件比較

2)においても、着用間比較は部位1と類似した傾向が示されたものの、有意差は得られず、また部位3の周波数中央値は、部位1・部位2より有意に高く、着用条件間においても異なる傾向が示された(図9)。

### 2. 2. 2 実験B-2

実験B-2で得られた皮膚振動の結果を図10、11に示す。振動強度の着衣比較では、野球の振

動強度が最も小さく、サッカーと野球、野球と一般スポーツ間で有意差を得た(図10)。周波数中央値では、サッカー及び野球の値が小、剣道及び一般スポーツの値が大の傾向にあり、サッカーと剣道、野球と一般スポーツ間で有意差を得た(図11)。着用感(官能評価)の結果を図12に示す。着用間比較では、粗さ感・硬軟感・温冷感・快適感・嗜好感において1%水準で有意差を得、剣道がざ

な衣服設計に資する皮膚振動研究の展開に向けた基礎データの収集を試みた。

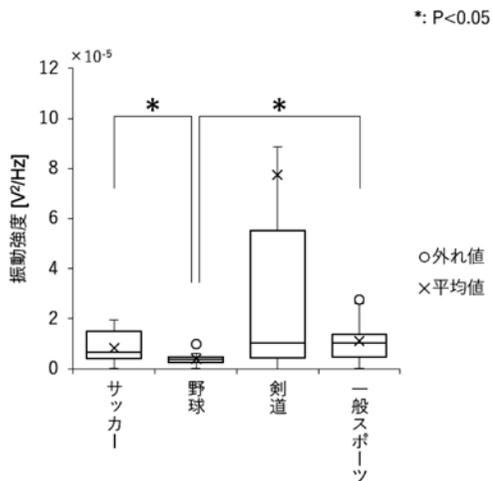


図10 振動強度の着衣比較

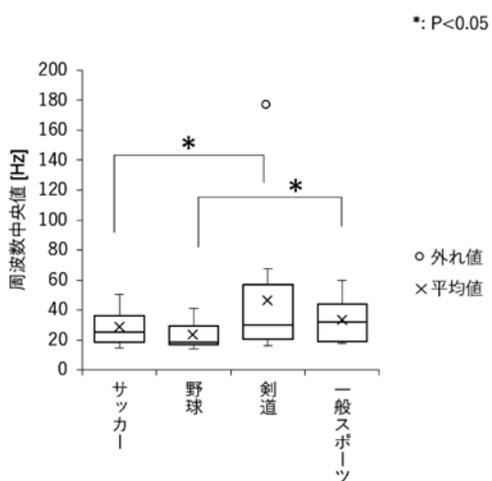


図11 周波数中央値の着衣比較

らざらでかたく、あたたかく、不快で嫌い、一般スポーツで快適かつ好きと評価する傾向が示された。

### 3. 考察

本研究では、体幹部における衣服と皮膚の接触の様子を明らかにし、接触に伴う皮膚振動の伝播を観察、皮膚振動測定に適する部位の検討を行った。さらに、数種のスポーツウェア着用による皮膚振動の実態を明らかにし、着用感も併せ、快適

### 3. 1 実験A

近年、高伸縮性のストレッチ性衣料が広く浸透し、衣服が絶えず皮膚に接触、摩擦し続ける状態が、現代の衣生活では日常的なものとなっている。衣服と皮膚の接触に関し、従来の着心地研究では、衣服圧計測による検討が主になされてきた。衣服圧計測手法として報告例の多いエアパック式衣服圧測定では、30kPa<sup>7)</sup>にも至る強い圧力までも含む、法線方向の負荷を評価できる。本研究では、衣服と皮膚の法線方向と接線方向、合わせての微細な接触を捉えるため、エアパック式ではなく、圧力測定フィルムを用いての検討を行った。上肢運動時における体幹部の接触部位として、肩甲骨と肩先上での接触面積が有意に大であった。肩部周囲及び上肢帯である肩甲骨は、身体形状として凸であり、また多軸関節である肩関節の可動域の大きさから、衣服との接触が大であったと考えられる。接触面積が小さい部位、前正中線や後正中線近傍は、身体の凹凸における凹部ゆえ、衣服が皮膚に接触せず、値が小さかったと考えられる。以上より、体幹部においては、上肢の動きに伴い、特に肩甲骨突出部で皮膚と衣服素材の接触が多い様子が明らかとなった。

### 3. 2 実験B

#### 3. 2. 1 実験B-1

実験B-1で得られた、皮膚振動波形及びそのPSDの結果より、皮膚と衣服素材の接触部位から離れるほど、振動波形の振幅は小さく、またPSDでは、低周波数帯の成分が大きく減少するといった周波数特性が示された(表4)。

皮膚振動の動作間比較では、160bpmで腕振り動作をした際の振動強度が有意に大きくなることが明らかとなった。衣服が皮膚に接触・衝突

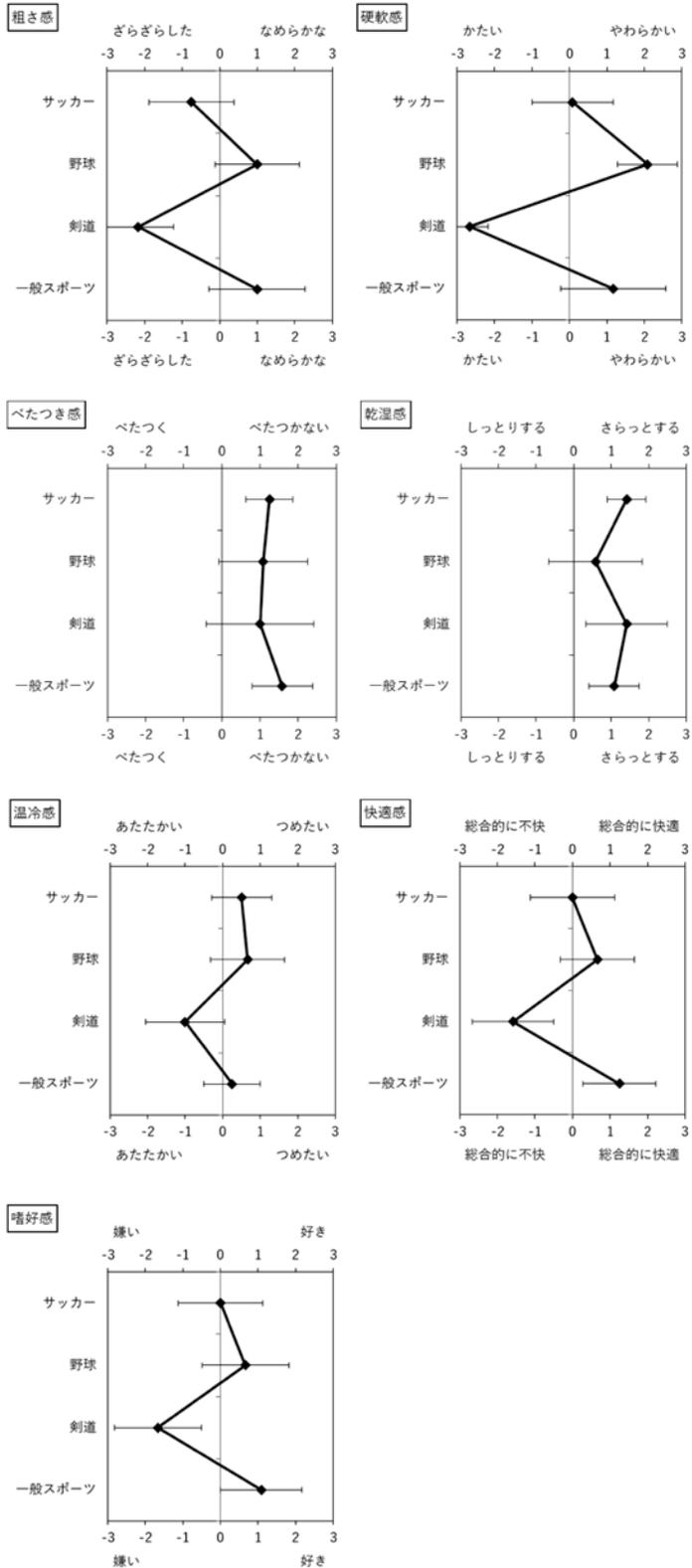


図12 着用感評価結果

する際、その速度が速いほどエネルギーが強く、110bpmより160bpmで腕振り動作をした際、振動強度が大きくなったと考えられる(図6)。周波数中央値で有意差が認められなかったのは、本実験で得られた皮膚振動が、衣服と皮膚の接触・衝突に依存した振動であることに起因すると考えられる(図7)。

振動強度の部位比較では、皮膚と衣服素材の接触部位から最も近い部位1の値が有意に大きく、着衣比較では、部位1・部位2において、Tシャツ着用時の振動強度が大であることが明らかとなった(図8)。また、綿TシャツとポリエステルTシャツでは、綿Tシャツ着用時(B+Ct)の振動強度が小さくなる様子が示された。表4において、距離減衰による振動の減衰が示されたように、振動の減衰によって、接触部位から離れるほど、強度も小さくなったと考えられる<sup>8)</sup>。Tシャツ着用で振動強度が大きくなるのは、皮膚と衣服の接触による振動が増えたためと考えられる。さらに、綿TシャツとポリエステルTシャツで、綿Tシャツ着用の振動強度が小さいのは、素材の厚さと表面特性のいずれか、またはいずれもが影響した可能性が考えられる。即ち、綿Tシャツの布の厚さはポリエステルTシャツのそれより薄く、素材の表面特性である摩擦係数は、MMDの値がポリエステルの約半分、綿ですべりやすくざらつきの小さい傾向を示したため(表2)、皮膚への布の当たり、接触が、綿Tシャツでソフトであり、振動強度に反映したと考えられる。

周波数中央値の部位別着用条件比較では(図9)、皮膚と衣服素材の接触部位から最も近い部位1において、Tシャツを着用した際に周波数中央値が有意に高くなる傾向が示された。部位2でも同様の傾向を示し( $B < B+Ct < B+Pt$ )、衣服素材の接触により、皮膚振動に高周波成分が付加されることを示すと考えられる。また、部位3の周波数中央値は全く異なる傾向、すなわち、部位

1より有意に高い値を示し、着衣間比較で差は得られなかった。これは、皮膚振動の低周波成分が部位3まで伝播していない可能性が考えられる。皮膚振動データにセンサの電氣的ノイズが含まれることは測定上やむを得ず、部位3で周波数中央値が有意に高く、着衣差が得られなかったのは、信号強度に対し電氣的ノイズが多くを占め、部位1・部位2のような試料間の傾向もみられなかったと考えられる。

以上、皮膚振動の伝播特性と振動測定上の電氣的性質から、体幹部(背部)における衣服接触による皮膚振動測定では、皮膚と衣服素材の接触部位から最も近い、部位1が最適な測定部位と考えられる。

### 3. 2. 2 実験B-2

実験B-1より、部位1が体幹部における皮膚振動測定に適する部位であることから、部位1を測定部位として、スポーツウェア着用時の皮膚振動について検討を行った。サッカー・野球・剣道・一般スポーツの4種のスポーツウェアを着用し、腕振り動作をした際の振動強度は、野球が有意に小さく、剣道が大の傾向、サッカーと一般スポーツが同程度である様子が示された(図10)。実験B-2で使用した試料一覧(表3)のサイズより、野球の身幅(①)は最も細く、次いでサッカーの順、一般スポーツと剣道は身幅にゆとりのあるデザインであった。野球は、身幅の最も広い剣道より8~10cmほど細身のデザインである。また、素材の剛軟度は野球で最も小さく、サッカー、一般スポーツ、剣道の順に大きくなり、摩擦特性は、MMDの値が剣道で突出して大きい傾向を示した(表3)。皮膚振動は、皮膚と衣服が接触・衝突した際に生じるため、細身で皮膚と衣服の間の空間が狭く、柔らかい素材の野球は、皮膚と衣服の強い衝突が生じにくく、振動強度が小さかったと考えられる。剣道の振動強度が大であったことについては、剣道の身幅が広く、皮膚と衣服の間にゆ

とりがあり、さらに厚みのある、かたいざらつく素材であるため、皮膚に素材が接触・衝突した際の振動が大きかったと考えられる。サッカーは野球に次いで細身のデザインであるが、野球より厚くかたい素材であり、野球より振動強度が大になったと推察される。一般スポーツについては、剣道に次いでゆとりのある身幅であるが、素材の厚さ、剛軟度共に、剣道の半分以下で、MMDの値はたてよこ共に小、ざらつきが小さな素材であり、皮膚への衝突がやわらかく、振動強度が小さくなったと考えられる。

周波数中央値については、振動強度の試料間順位とほぼ同様であった。素材との強い接触・衝突で振動が大きくなり、また周波数も高くなるため、振動強度と似た傾向を示したと考えられる。

着用感評価では、着衣間比較において、粗さ感・硬軟感・温冷感・快適感・嗜好感で有意差を得た。有意差の得られなかったべたつき感・乾湿感については、汗をかくほどの運動・環境ではなかったため、着用差が得られなかったと考えられる。

快適感及び嗜好感で、一般スポーツが4種のウェア中、最も快適かつ好きと評価がなされた。先行研究において、振動強度と快適・嗜好感に有意な相関が得られ、振動強度が小さいほど快適かつ好きと評価される傾向にあった<sup>5,9)</sup>。しかし、本研究結果で最も振動強度の低い野球は、一般スポーツより快適・嗜好の評価が低かった。本研究における官能評価は、衣服着用時のいわば受動的な接触に対する、総合的な着用感評価であるのに対し、先行研究は能動的なぞり動作で、指先のみ限定的な接触部位に対する評価であり、そのまま当てはめることはできない。今後、衣服着用時の不快における、皮膚振動の要素を検討するにあたり、本研究により明らかになった点、すなわち、衣服の皮膚への接触・衝突の強弱に、衣服のゆとりや素材特性等の複合的な要因が関与する点を考慮する必要がある。それらに配慮しての実験条

件設定、モデル実験と組み合わせての検討により、新しい着心地研究への展開が可能と考える。

#### 4. 結 語

本研究ではまず、衣服着用時の体幹部皮膚と衣服の接触について検討し、顕著な接触部位として、肩先と肩甲骨が示された。次に、接触部位の一つ、肩甲骨突出部に焦点を当て、その近傍で、皮膚振動計測の可能性を探った。皮膚と衣服素材の接触から生じる皮膚振動について、振動強度と周波数中央値の検討から、接触部から2cmほど離れた部位を、測定に適する部位として見出した。さらに数種のスポーツウェア着用時における皮膚振動データを解析し、非着用時に比しウェア着用時に振動強度が大となることを明らかにすると共に、試料ごとに一定の傾向を得た。着用感と皮膚振動の関係性については、先行研究での能動的な衣服素材への接触と、本研究での受動的な接触では異なる様子が示された。着用時の衣服と皮膚の接触は、衣服素材の接触・衝突による受動的な圧力刺激によるもので、衣服のサイズやゆとり、生地の厚さや素材の特性等、複合的な要因が、接触時の皮膚振動に影響する可能性が示された。

#### 謝 辞

本研究に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財団に深謝いたします。実験に多大なるご協力を賜りました劉夢君さんに御礼申し上げます。被験者としてご協力いただきました皆様、研究を温かく見守っていただきました文化学園大学の皆様に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 佐藤真理子, 田村照子, スポーツウェアのトライボロジー, トライボロジスト, 58 (1), 10-16, (2013)
- 2) 徐賢敏, 佐藤真理子, 田村照子, 松井有子ほか, スポーツウェアによる皮膚摩擦の実態と摩擦条

- 件が皮膚表面微細三次元構造に及ぼす影響, 日本繊維製品消費学会誌, **58** (10), 53-61, (2017)
- 3) Y. Tanaka et al., *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, 146-151, (2015)
  - 4) 佐藤真理子, 伊豆南緒美, 松井有子, 田中由浩, スポーツウェアにおける触覚と皮膚振動に関する基礎研究, *デサントスポーツ科学*, **41**, 10-24, (2020)
  - 5) 伊豆南緒美, 田中由浩, 佐藤真理子, 皮膚振動・摩擦と衣素材の触感に関する研究, *Journal of Fiber Science and Technology*, **77** (9), 239-249, (2021)
  - 6) 伊豆南緒美, 田中由浩, 佐藤真理子, 布に触れた際の皮膚振動および摩擦の加齢変化, *繊維製品消費科学*, **63** (7), 459-468, (2022)
  - 7) 横井亮子, 吉田美奈子, 笹川栄子, 平田耕造, ガードルの圧迫が身体に及ぼす影響について, *日本繊維製品消費学会誌*, **47** (9), 537-547, (2006)
  - 8) 前田節男, 久米靖文, 劉仲庸, 指先・手腕系の振動伝達特性, *日本経営工学会誌*, **33** (4), 308-313, (1982)
  - 9) Klöcker A., Wiertelowski M., Théate V., Hayward V., Thonnard J.L., *Physical factors influencing pleasant touch during tactile exploration.*, *PLoS One.*, **8** (11), e79085. (2013)

# 発汗による機能性スポーツ用インナーの パフォーマンスへの影響

大妻女子大学 水谷 千代美  
(共同研究者) (一財)カケンテストセンター 倉本 幹也  
同 奥 貴憲  
日本化学繊維協会 海野 稔貴

## **Influence of Perspiration on Performance of Functional Sports Innerwear**

by

Chiyomi Mizutani  
*Otsuma Women's University*  
Kanya Kuramoto, Takanori Oku  
*Kaken Test Center*  
Toshitaka Unno  
*Japan Chemical Fibers Association*

### ABSTRACT

The moisture-absorbing and heat-generating fibers are used in innerwear for winter sports. The moisture-absorbing and heat-generating fibers generate wet heat through reaction between insensible perspiration from the skin and the functional groups of the fibers. In this study, the parameters of thermal properties such as  $\Delta T_{max}$  and heat retention index were measured using a device made according to the JIS method to measure the thermal properties of hygroscopic heat-generating fibers with different functional groups. It was found that these parameters of thermal properties depend on the types of functional groups, and that acrylate fibers had higher  $\Delta T_{max}$  and heat

retention index. The subjects were asked to wear inners made of moisture-absorbing heat-generating fibers, and evaluated the comfort of the inners with regard to the feeling of warmth and moisture during the time course of a series of rest and motion activities by monitoring the micro-climate between inner and skin. A correlation was observed between the temperature within the clothing and  $\Delta T_{max}$ , heat retention index.

#### キーワード

吸湿発熱繊維, 不感蒸泄, 最大吸湿発熱温度, 熱保持指数, 保湿性

#### Keyword

moisture-absorbing and heat-generating fiber, insensible perspiration, maximum temperature of moisture-absorbing and heat-generating, heat retention index thermal insulation property

## 要 旨

冬季スポーツ用インナーには、吸湿発熱繊維を用いられている。近年、さまざまな吸湿発熱繊維が市場に現れ、吸湿発熱特性が着目されている。吸湿発熱繊維は、皮膚から出る不感蒸泄と繊維の官能基の反応により湿潤熱が発生する。本研究は、官能基の異なる吸湿発熱繊維の熱特性をJIS法に準じた装置によって $\Delta T_{max}$ や熱保持指数などの熱特性値を測定した。官能基の種類によって、これらの熱特性値が異なり、アクリレート系繊維は $\Delta T_{max}$ や熱保持指数が高いことが分かった。さらに、被験者に吸湿発熱繊維でできたウェアを着用してもらい、安静と運動を繰り返すプロトコルで、温冷感や湿潤感などの着用感、衣服内温湿度を測定し、熱特性値との関係を検討した。その結果、衣服内温度と $\Delta T_{max}$ や熱保持指数は相関が認められ、湿潤熱を抱き込む空気層がある吸湿発熱繊維がその効果保持に有効であることが分かった。しかし、綿製のインナーは吸湿発熱効果が他のインナーと同等以上あるにもかかわらず、衣服内温度が最も低く、有効性が認められなかった。

## 緒 言

スポーツの種類によってウェアに求められる機能が異なり、それぞれの分野で動きやすさと同時に快適さが追求され、ウェアによるパフォーマンスの向上効果が期待されている。近年、冬季のスポーツ用インナーとして吸湿発熱繊維が使用されている。吸湿発熱繊維は、皮膚から放出される不感蒸泄とインナー中の親水性繊維が相互作用し、水和エネルギーが熱(湿潤熱)として放出されて、衣服内温度が上昇することにより保湿性が向上する。本来、羊毛が水にぬれると湿潤熱が発生することはよく知れており、スポーツ用インナーとしての吸湿発熱繊維は、天然繊維の他に、レーヨンやキュプラのような再生繊維やアクリレート系繊維が使われている。我々は、これまでにセルロース系繊維の発熱特性に着目し、湿潤熱を測定する熱量計を作り、セルロース系繊維の水分率、結晶構造、結晶化度と発熱量との関係を検討してきた<sup>1)</sup>。また、吸湿発熱繊維の官能基の種類を変えて熱量計による発熱特性を測定し、官能基の種類によって発熱量が異なることを指摘し、繊維の水分率と発熱量は比例関係になることが分かった<sup>3)</sup>。

吸湿発熱繊維は、繊維の吸湿が飽和状態になると発熱が終わり、吸湿された水分が蒸発するとその部分はふたたび水分を吸着して発熱する。しかし、水分が蒸発する際には吸熱するために温度は下がり、皮膚から出る水分である不感蒸泄と発汗などの人間の生理反応が影響する。運動中の発汗による吸着発熱やその蒸発吸熱を制御すれば衣服内温湿度を快適な範囲に制御できると考えられ、吸湿発熱繊維をインナーウェアにした時の保温性、温冷感や湿潤感などの快適性が着目されている。

一方、さまざまな吸湿発熱繊維が市場に現れており、実際に人が吸湿発熱繊維を着用した時の吸湿発熱特性を調べる必要がある。近年、吸湿発熱繊維の最大吸湿発熱温度や熱保持指数などの吸湿発熱特性を調べるパラメーターとして標準化がなされ、吸湿発熱繊維の機能を定量的に評価する試みがJISL1952として設定された。本研究は、さまざまな吸湿発熱繊維の発熱特性を吸湿発熱温度や熱保持指数などのパラメーターを用いて評価して吸湿発熱繊維の発熱特性を明らかにし、それらのパラメーターと実際の着用感や衣服内温湿度との関係から繊維素材や構造が発熱機構に与える影響を調べることを目的とする。また、温感や皮膚と接触する布帛面の刺激と捉え、その皮膚感覚と脳活動との関係を定量化し、吸湿発熱で得られた温感と脳活動との関係を明らかにすることにより運動パフォーマンスへの影響を評価する。

## 1. 方法

### 1. 1 吸湿発熱繊維の特性評価

#### 1. 1. 1 試料布

吸湿発熱繊維である試料A、試料B、試料Cおよび試料Dの4種類を試料布として供試した。試料布の組成、目付、厚さを表1に示す。

#### 1. 1. 2 試料布の水分率

試料布は恒温恒湿室(20℃, 65% RH)に24時間放置して重量(W<sub>1</sub>)を測定し、絶乾時の試料重量(W<sub>0</sub>)から次式により試料布の水分率を算出した。

$$\text{水分率(\%)} = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100$$

#### 1. 1. 3 試料布の形態学的観察

試料布の形態は電子顕微鏡(日立卓上顕微鏡Miniscope TM4000/TM4000 Plus)を用いて試料断面の観察を行った

#### 1. 1. 4 試料布の吸湿発熱特性

JISL1952-1に基づき、試料布を境に供給面と測定面の2つのチャンバーをもつ装置を用いた。試験布の片面(測定面)に空気(20℃, 40% RH)を供給し続け、測定面の温度を一定にし、この時の温度を初期温度とした。次に、空気(20℃, 約90% RH)を供給し続け、測定面の温度を継続して測定し、最大吸熱発熱温度および熱保持指数などの吸熱発熱特性を算出した<sup>6,7)</sup>。

表1 試料布と熱特性

試料名	組成	目付 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	水分率 (%)	ΔTmax (℃)	熱保持指数	半減期 (s)
試料A	ポリエステル 38% アクリル 30% レーヨン 20% ポリウレタン 12%	147.1	0.56	3.2	2.5	377	209
試料B	アクリル 41% ポリエステル 37% レーヨン 18% ポリウレタン 4%	296.1	1.56	3.0	2.9	538	258
試料C	ポリエステル 85% アクリレート系繊維 15%	228.5	1.34	5.5	3.4	1003	408
試料D	綿 100%	164.6	0.85	7.9	3.3	618	258

## 1. 2 サーマルマネキンによる吸湿発熱繊維を用いたウェアの熱特性評価

サーマルマネキンは、全身女性型立位座位共用17分割THM-217S京都電子製を用い、人工気候室内(15°C, 65% RH)に設置して、4種類(試料A, B, C, D)の試料インナー上衣または試料インナーに綿製のスエット上衣を重ね着させた。サーマルマネキンの平均皮膚温33°C ± 0.5°Cに設定し、供給熱量から熱抵抗値(1a)を算出した。

$$1a = \sum f_i \left[ \frac{(T_{si} - T_a) \times a_i}{H_{ci}} \right]$$

$$f_i = \frac{a_i}{A}$$

$a_i$ : マネキンの部位iの表面積 (m<sup>2</sup>)

$A$ : マネキン全体の表面積 (m<sup>2</sup>)

$T_{si}$ : マネキンの部位iの表面温度 (°C)

$T_a$ : 環境温度 (°C)

$H_{ci}$ : マネキン部位iへの供給電力量 (W)

## 1. 3 吸湿発熱繊維を用いたウェアの着用実験

健康な20～22歳の女性3名を被験者とし、一人あたり4種類の試料をそれぞれ2回着用し、着用感、衣服内温湿度および発汗量を測定した。吸湿発熱繊維を用いた4種類(試料A, B, C, D)の長袖丸首型デザインのインナーと、その上に綿製のスエット上下を着用し、試料ウェアとした。試料ウェアは着用実験前に50°Cで3時間真空乾燥した後に、人工気候室(15°C, 60% RH)内に一晚調湿し、実験に供試した。被験者は、人工気候室(15°C, 60% RH)内で試料ウェアを着用し、安静5分、エアロバイク運動10分、安静5分、エアロバイク運動10分、安静15分の一連の運動を行った。エアロバイク運動は、エアロバイクEZ101(combi製)を用いて負荷レベル3に設定し、回転数約45rpm、運動10分間での消費カロリー5.8kcal、走行距離約5.6kmとした。実験の間、被験者の前

デサントスポーツ科学 Vol. 45

胸と背中上部に発汗計((株)スキノス製)を装着し、不感蒸泄量を測定した。また、衣服内温湿度の測定には、コードレスの小型温湿度センサー((有)シスコム製(SHTDL-3C))を用いた。試料ウェアの裏地側の前胸と背中上部に小型温湿度センサーが入る大きさのポリエステルメッシュ製ポケットを作成し、その中に温湿度センサーを入れて皮膚とインナーの間、インナーとスエットの間の衣服内温湿度を継続的に測定した。着用時の温冷感や湿潤感などの着用感はSD法により評価した。この着用実験は、被験者の性周期や日リズムを考慮して、着用実験時刻を決めて被験者が一日に一着試料ウェアを着用することとした。

## 2. 結果および考察

### 2. 1 吸湿発熱繊維の発熱特性

吸湿発熱繊維は親水性繊維を用い、官能基の種類によって水分率が異なる。繊維の水分率と発熱量とは相関関係があり、水分率が高いほど発熱量が多いことが分かっている<sup>2,4)</sup>。試料A, B, C, Dの水分率を表1に示す。試料A, B, Dを構成する素材は、主にレーヨン、キュプラ、綿というセルロース系繊維で水酸基と水分子との反応である。試料Cはアクリレート系繊維で、単量体がアクリル酸、アクリル酸ナトリウム及びアクリルアミド架橋共重合体から構成された長鎖状合成高分子からなる繊維で、標準状態で20～30%の水分率を示し、架橋した高分子の中に大量の水分子を吸着することができるために<sup>5)</sup>、試料Cは本実験で用いた試料のなかで比較的高い水分率を示す。

次に、試料布の吸湿発熱特性を比較した。JIS法に基づいたチャンバーを用いて、試料布の最大吸湿発熱温度(ΔTmax)と熱保持指数および半減期の吸湿発熱特性を調べた。試験布の片面(測定面)に空気(20°C, 40% RH)を供給し続けて測定面の温度を一定にした後に、高湿度の空気(20°C, 約90% RH)を連続供給した時の測定面の温度変

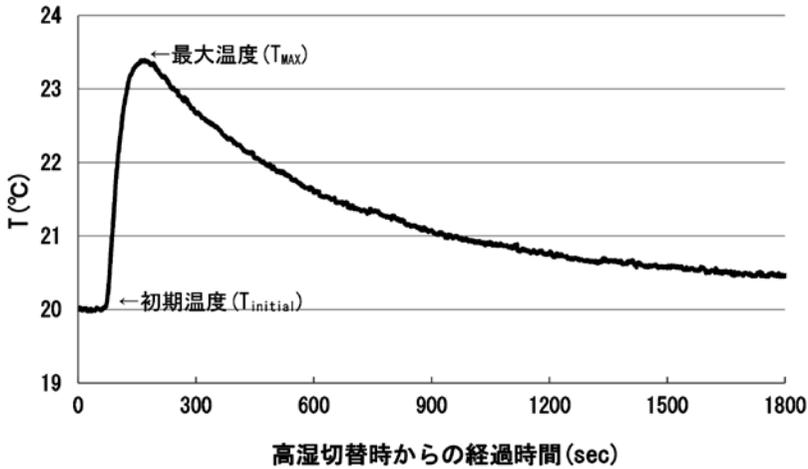


図1 試料布Dの測定面の温度変化

化を図1に示す。最大吸湿発熱温度 ( $\Delta T_{max}$ ) は、高湿度供給時の測定面の最大温度 ( $T_{max}$ ) から初期温度 ( $T_{initial}$ ) を引いた値である。

図1の吸湿発熱温度曲線をもとに熱保持指数を算出した。最大吸湿発熱温度 ( $\Delta T_{max}$ ) の時点が減衰経過時間 ( $S_{rd}$ ) 0秒とし、温度減衰時における各時間の吸湿発熱温度 ( $\Delta T_{ave}$ ) を算出した。吸湿発熱温度平均値 ( $\Delta T_{ave}$ ) および減衰経過時間 ( $S_{rd}$ ) から回帰曲線を求め、半減期を算出した。

図2のように半減期と回帰曲線で囲まれた面積から熱保持指数を算出した。試料布の  $\Delta T_{max}$ 、半減期および熱保持指数を表1に示す。試料布の  $\Delta T_{max}$  は、試料C、試料D、試料B、試料Aの順で高いことがわかった。試料Aと試料Bはレーヨンとアクリルが同程度含まれており、水分率も同程度の値を示す。 $\Delta T_{max}$  は試料Bの方が若干高い値を示した。試料Cはアクリレート系繊維が用いられており、この繊維は上述のように水分子の吸

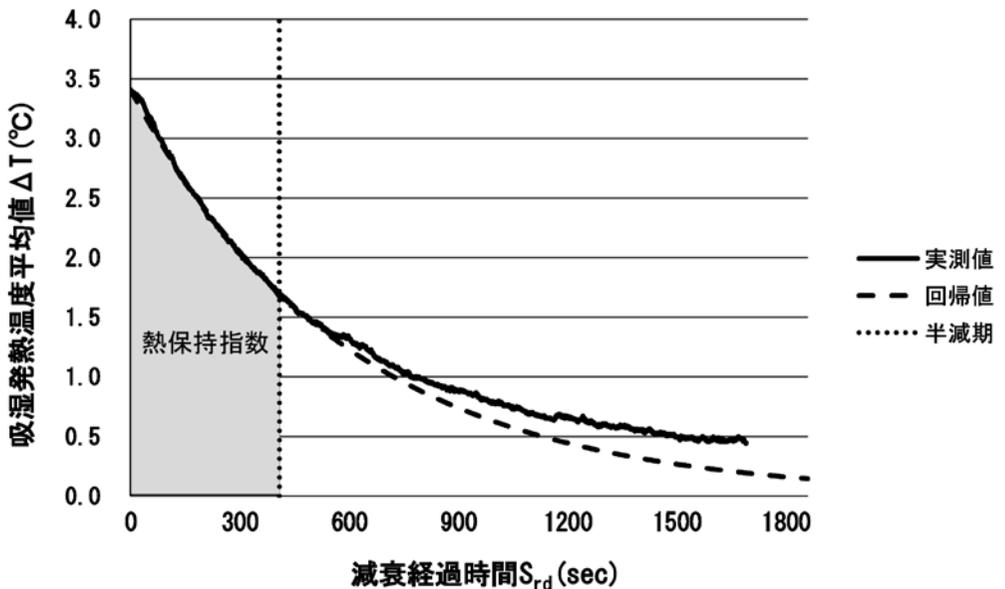


図2 試料布Dの減衰経過時間と測定面の温度変化

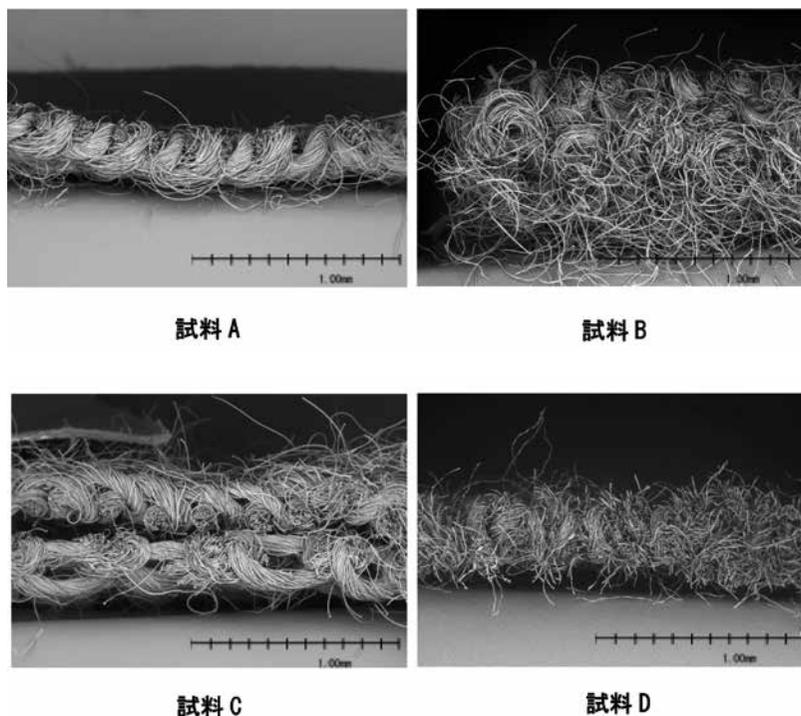


図3 電子顕微鏡による試料布の断面観察

着能力が高いため試料A, Bに比べて水分率および $\Delta T_{max}$ が高い値を示した。

さらに、熱保持指数を試料ごとに比較すると、試料C、試料D、試料B、試料Aの順で高くなっている。発生した熱の保持は空気層が大きく関係する。試料布の断面構造を図3に示す。図3のように、試料Bと試料Cは試料布が厚く、多くの孔や空間層が認められた。試料Aと試料Bは同じ組成であるが、試料Bは試料Aよりも厚く、空気層が多いため、試料Bは試料Aよりも熱保持指数が高い。繊維中の官能基と水分子の相互作用で湿潤熱が発生し、その熱を抱き込む空気層の量によって熱保持指数が影響すると考えられる。また、半減期は試料中の官能基の放熱速度を示しており、試料Cは半減期が高い値を示していることからアクリレート繊維の放熱速度が遅いことを示しており、換言するとアクリレート繊維は吸熱しやすく放熱しにくく、吸湿発熱保持特性に優れることを

意味している。一方、試料Dは綿100%で、水分率、 $\Delta T_{max}$ および熱保持指数が高い値を示した。

## 2. 2 吸湿発熱繊維を用いたウェアの熱特性評価と被験者による着用実験

吸湿発熱繊維は、周知のように不感蒸泄が発生しなければ発熱しない。そこで、試料インナー上衣および試料ウェア上衣の熱抵抗値を算出し、その結果を表2に示す。試料A～Dの試料インナー

表2 試料ウェアの熱抵抗値

試料名	熱抵抗値
試料A	0.135
試料B	0.141
試料C	0.143
試料D	0.133
試料A・スエット	0.195
試料B・スエット	0.205
試料C・スエット	0.208
試料D・スエット	0.193

は、試料布の厚さが厚い試料Bと試料Cは、試料Aと試料Dと比較して熱抵抗値が少し高いが大きな違いが認められなかった。また、試料インナーとスエットを組み合わせると、さらに熱抵抗値が高くなった。サーマルマネキンは発汗しないために、吸湿発熱繊維の種類による熱抵抗値の違いは認められなかった。

健康成人は、常温安静時1日に約900ml（皮膚

から約600ml、呼気による喪失分が約300ml）不感蒸泄として発散させている<sup>8)</sup>。実際に被験者が4種類の試料を着用して人工気候室内で運動し、発汗量、温冷感や湿潤感などの着用感、衣服内温湿度を測定した。被験者の皮膚から発散した不感蒸泄が試料中の官能基に吸着し湿潤熱が発生すると衣服内温度は上昇する。代表的な被験者の前胸部分の衣服内温度を図4に示した。本実験は、安静

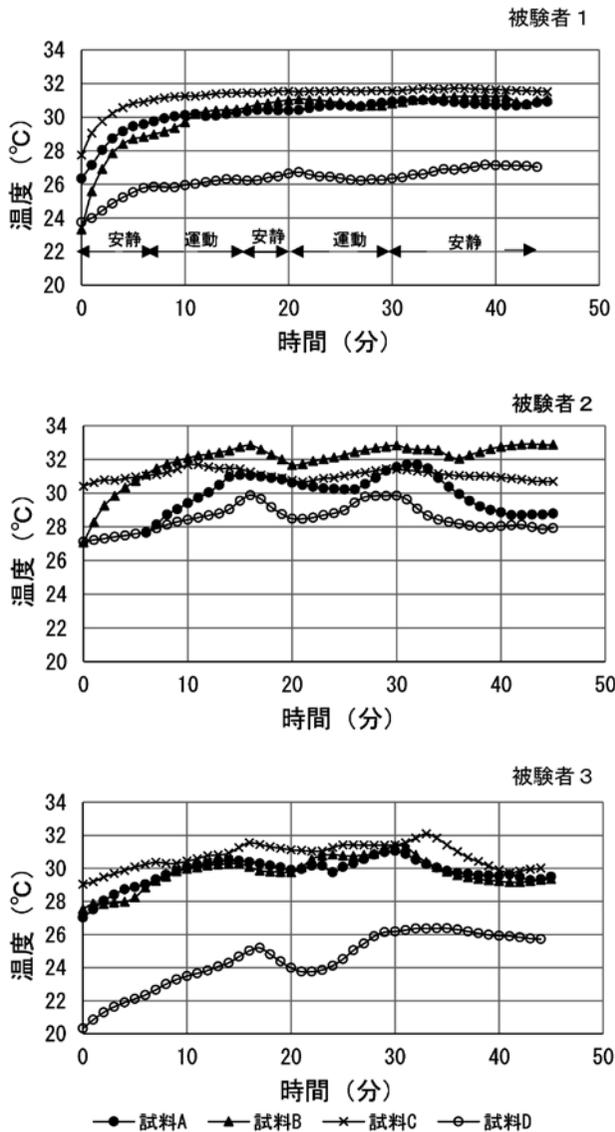


図4 被験者3名が試料ウェア着用時の衣服内温度(前胸部分)

5分、運動10分、安静5分、運動10分、安静15分のプロトコルで、被験者3名がこのプロトコルを2回繰り返した。最初の安静時は、試料Cを被験者が着用時に最も暖かいと感じ、衣服内温度の高い人が多かった。運動時は、試料Cまたは試料Bを着用時に衣服内温度が最も高いことがわかった。一方、試料Dは被験者3人ともに、安静、運動のいずれの段階において衣服内温度が最も低いことがわかった。試料Dは不感蒸泄によって吸湿発熱した湿潤熱を保持できるために、 $\Delta T_{max}$ および熱保持指数が高いことを示している。しかし、試料Dは着用実験でいずれの段階においても試料布の中でもっとも低い衣服内温度を示した。この理由として、 $\Delta T_{max}$ および熱保持指数などは、2つのチャンバーを用いて、試料を垂直に設置して水平方向から高温の空気を流しており、一定方向からの空気の流れでしか測定しない方法による可能性が考えられる。他方向から計測する必要があり、熱特性値は異なることが予想できる。また、電子顕微鏡観察でもわかるようにその他の試料に比べて試料Dは皮膚から接触する面積が大きい。試料Dは綿100%で水分率は高く、吸湿した不感蒸泄が綿の水酸基と反応して湿潤熱が発生するが、15℃という外気温により徐々に発生する不感蒸泄が冷却されて衣服内温度が最も低い値を示したと考えられる。

本実験では、試料ウェアを着用時の皮膚とインナーとの間およびインナーとスエットの間の空気層の温湿度を測定したが、サーマルマネキンの熱抵抗値と同様に試料ウェアの種類による温冷感や湿潤感の違いは、皮膚とインナーとの間に空気層の温湿度が大きく影響し、インナーとスエットの間の空気層の温湿度は影響しなかった。

### 3. 結論

本実験は、吸湿発熱繊維の $\Delta T_{max}$ や熱保持指数などの熱特性値と着用感や衣服内温度との関係

を検討した。これらのパラメーターと実際の着用時の衣服内温度と違いが認められ、検討すべき項目が明らかとなった。また、吸湿発熱繊維が皮膚に与える温感は皮膚と接触する布帛面の刺激としてとらえることができる。人は脳内で情報を処理して伝達し、活動神経近傍の限られた領域では血管が拡張して血流量が増加する。これに従って酸素化ヘモグロビン濃度(oxy-Hb)が増加するため、近赤外線の光を利用してoxy-Hbの変化量に注目することで脳の活動状態を知ることができる。しかし、本実験ではその皮膚感覚と脳活動との関係は、まだ予備実験の範囲であり、明確な答えが得られていないために、詳細を検討する必要がある。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成金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を申し上げます。本研究は、大妻女子大学研究倫理委員会(受付番号2019-011)の承認を受けて行いました。また、実験にご協力いただきました大妻女子大学の学生に深く感謝申し上げます。

### 文献

- 1) 水谷千代美, 辻井敬亘, 福田猛, デサントスポーツ科学, 17, p.77-86 (1996)
- 2) Chiyomi Mizutani, Yoshinobu Tsujii, Noelle Bertoniere, *Textile Research Journal*, 69 (8), p.559-564 (1999)
- 3) 水谷千代美, 辻井敬亘, 宮本武明, デサントスポーツ科学, 21, p.95-102 (2000)
- 4) 松本喜代一, 呉鶯, 泉由美子, 植嶋宏元, 繊維機械学会誌, 52 (7) p.T105-T112 (1999)
- 5) 團野哲也, 衣服の百科事典, 日本家政学会, 丸善出版, p.26-29 (2015)
- 6) 生地吸湿発熱性試験方法 - 第1部: 最大吸湿発熱温度測定法, JISL1952-1 (2021)
- 7) 生地吸湿発熱性試験方法 - 第2部: 熱保持指数測定法, JISL1952-2 (2021)

- 8) 日本緊急医学会医学用語解説集 <https://www.jaam.jp/dictionary/dictionary/word/0515.html>, 閲覧日

2023年5月19日

# 野球投手の血行障害予防に向けた クールダウン手法の開発

筑波大学 小崎 恵生  
(共同研究者) 同 森 翔也  
同 吉岡 将輝  
同 川村 卓  
早稲田大学 前田 清司

## Development of Cooling-Down Methods for the Prevention of Circulatory Disorders in Baseball Pitchers

by

Keisei Kosakai, Takashi Kawamura  
*Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*  
Shoya Mori, Masaki Yoshioka  
*Graduate School of Comprehensive Human Sciences,  
University of Tsukuba*  
Seiji Maeda  
*Faculty of Sport Sciences, Waseda University*

### ABSTRACT

Among sports injuries caused by pitching motion, preventive measures for circulatory disorders have not been sufficiently established. Therefore, this study aimed to clarify the acute effects of icing performed after pitching on brachial hemodynamics in baseball pitchers. A pitching task consisting of 98 pitches was conducted with twelve university baseball pitchers, and two conditions were set: a control condition without

icing treatment after pitching and an intervention condition with icing treatment. Subjective fatigue, shoulder external/internal rotation muscle strength, and brachial hemodynamic parameters were evaluated before and after pitching. The reactive hyperemia index (RHI) score, an indicator of endothelial function, was calculated to assess one of the brachial hemodynamics. No significant interaction between time and condition was observed for subjective fatigue and shoulder muscle strength. However, a significant interaction was found between the temporal changes in RHI scores and the presence or absence of icing treatment, with lower RHI scores on the following day observed in the condition with icing after pitching. The results of this study suggest the potential impact of icing after pitching on endothelial function. These findings are considered important fundamental insights for investigating cooling-down methods for preventing circulatory disorders in baseball pitchers.

#### キーワード

野球投手, ピッチング, 血管内皮機能, 上腕血行動態, アイシング

#### Keyword

Baseball Pitcher, Pitching, Endothelial function, Brachial hemodynamics, Icing

#### 要 旨

投球動作に起因するスポーツ障害の中でも、血行障害の予防策は十分に確立されていない。そこで本研究では、野球投手においてピッチング後に行うアイシングが上腕血行動態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。大学野球投手12名を対象に98球のピッチング課題を実施し、ピッチング後にアイシングを行わない対照条件とアイシングを行う介入条件の2条件を設定した。ピッチングの前後において主観的疲労感、肩関節外旋・内旋筋力、上腕血行動態を評価した。なお、上腕血行動態の評価では、血管内皮機能の指標であるRHI (reactive hyperemia index) スコアを算出した。主観的疲労感と肩関節筋力には、時間と条件の有意な交互作用は認められなかった。一方で、RHIスコアの経時変化とアイシングの有無には有意な交互作用が確認され、ピッチング後にアイシングを行う条件では翌日のRHIスコアが低下し

ていた。本研究で得られた結果より、ピッチング後におけるアイシングの有無が血管内皮機能に影響を及ぼす可能性が示された。この結果は、野球投手の血行障害予防に向けたクールダウン手法を検討する上で重要な基礎的知見であると考えられる。

#### 緒 言

わが国において、野球は幅広い年齢層で親しまれている国民的なスポーツであり、その競技人口は約384万人(20歳以上)と推計されている。その一方で、野球は怪我の発生率が高いスポーツでもあり、特に投球動作に起因するスポーツ障害は、野球に関連する怪我のうち、多くの割合を占めることが報告されている<sup>1)</sup>。投球動作に起因するスポーツ障害の代表例として、野球肘などの関節障害や持続的なしびれと鋭い痛みを伴う血行障害などが挙げられる。このうち、血行障害については、主観的な症状を軽減する対症療法および保存

療法に頼っているのが現状であり、血行障害の予防に有効な対策法は十分に確立されていない。したがって、野球投手における血行障害を予防する対策法として投球動作（ピッチング）後の適切なクールダウン手法を検討することは重要な課題であると考えられる。

これまでに、ピッチング後に生じる肩関節可動域の低下については、肩関節へのアイシングと軽い肩関節の運動を組み合わせたクールダウンによって抑制されることが明らかにされている<sup>2)</sup>。さらに、最近の研究では、肩関節と肘関節におけるアイシングを長時間行うことによってピッチング後に生じる肩関節内旋筋力の低下が有意に抑制されることも報告されている<sup>3)</sup>。これら一連の研究結果は、ピッチング後のアイシングが肩関節の障害予防や筋力低下の抑制に対しては、一定の効果を有する可能性を示している。

一方、循環生理学的な観点からはアイシングを行うと交感神経系が活性化し、末梢血管抵抗の上昇や血管内皮機能の低下が惹起されることが明らかにされている<sup>4)</sup>。末梢血管抵抗の上昇および血管内皮機能の低下は、血行障害の進行に寄与する可能性があることから、ピッチング後におけるアイシングは野球投手の血行障害を予防する上では必ずしも有効ではない可能性が考えられる。しかしながら、ピッチング後における投球腕の上腕血行動態の変化に対して一過性のアイシングが及ぼす急性的な影響については全く明らかにされていない。したがって、ピッチング後のアイシングが血行障害を予防する対策法として適切なクールダウン手法であるか否かは不明である。

そこで本研究では、野球投手におけるピッチングに起因する上腕血行動態の変化を経時的かつ客観的に評価し、ピッチング後に行うアイシングが上腕血行動態（特に血管内皮機能）の変化に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。本研究は、野球投手の血行障害予防に向けた新たなクー

デサントスポーツ科学 Vol. 45

ルダウン手法の開発に必要な基礎的知見の構築に貢献すると考えられる。

## 1. 研究方法

### 1. 1 研究対象者

研究対象者は、大学男子野球投手12名（20 ± 1歳）とし、筑波大学硬式野球部員から機縁法を用いて募集した。研究対象者の適格基準は、現在顕著な投球障害がない者、心血管疾患の既往歴がない者、学生教育研究災害傷害保険に加入している者とした。除外基準は、測定の前に水以外の飲食を行った者、実験を完遂できなかった者とした。全ての研究対象者に対して、研究内容に関する説明を行い、研究への参加に同意を得た後に実験を実施した。本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て行われた（課題番号：体021 - 91号）。

### 1. 2 実験プロトコル

研究対象者には、実験当日の激しい運動と測定前約3時間は水以外の飲食を控えるように指示した。実験はピッチング後にアイシングを行わない対照条件とアイシングを行う介入条件の2条件とし、それぞれの条件をランダムに1週間以上の間隔をあけて実施した（ランダム化クロスオーバー試験）（図1）。アイシングを行う介入条件では、ピッチング後に氷水を入れた氷嚢を用いて肩関節および肘関節周囲のアイシングを20分間介入した。各測定は、ピッチング前（早朝安静時）、ピッチング1日後（早朝安静時）、ピッチング2日後（早朝安静時）にそれぞれ実施した。

### 1. 3 ピッチング課題

本研究におけるピッチングの球数は98球（14球 × 7セット）とし、セット間の休憩は6分間、各セット開始前の投球練習は5球とした。したがって、本研究におけるピッチング課題は、合計128

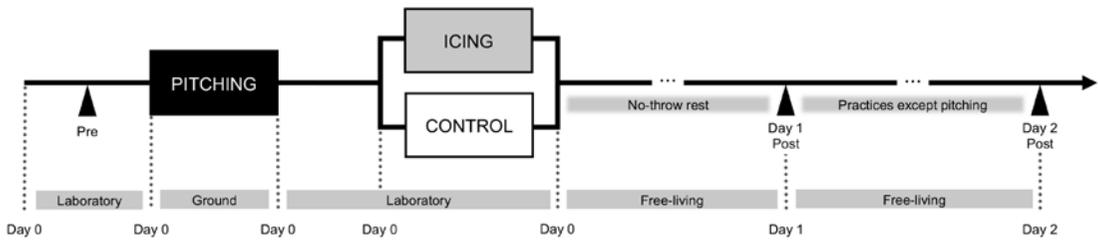


図1 実験プロトコル

球の投球動作で構成された。ピッチングにおける球種はストレートのみで統一し、各セット間におけるキャッチボールは控えるよう指示した。

#### 1. 4 アイシング

本研究におけるアイシングには、氷水を入れた布製の氷嚢（ザムスト社製）を用いた。氷嚢が直接肌にあたる形で肩関節の前後と肘関節の尺骨側の3か所を冷却した。冷却時の姿勢と時間は座位安静で20分間とした。なお、予備検討において、同様の方法で20分間アイシングを実施すると、冷却部の皮膚温が $12.6 \pm 1.2^\circ\text{C}$ 低下することを確認している。

#### 1. 5 測定項目

##### 1. 5. 1 血管内皮機能

本研究では、反応性充血の原理を活用して非侵襲的に血管内皮機能を評価した。測定には、専用の血管内皮機能測定装置（Endo-PAT2000；Itamar Medical Ltd, Caesarea, Israel）を使用した。仰臥位にて測定された血管内皮機能は、反応性充血指数（RHI：reactive hyperemia index）としてスコア化した。なお、同様の測定装置を用いて算出されたRHIスコアの個体内変動の変動係数は、2時間間隔では $22.6 \pm 3.9\%$ 、1時間間隔で $16.1 \pm 7.8\%$ 、30分間隔で $15.3 \pm 5.3\%$ であることが報告されている<sup>5)</sup>。

##### 1. 5. 2 上腕血行動態

超音波画像診断装置（Vivid E95；GE Healthcare

Japan, Tokyo, Japan）を用いて、投球腕の上腕動脈の血管径、血流速度、血流量をそれぞれ評価した。測定の際、研究対象者には椅子に座ってもらい、高さの調節が可能な台に投球腕をリラックスさせた状態でのせてもらった。台の高さは肩と同程度になるように調節した。研究対象者間および測定条件間で超音波画像診断装置の探索子を当てる位置が異ならないように、ピッチング前測定時に上腕の遠位1/3の部分に油性マーカーで印をつけ、ピッチング後の測定時には、その印の円周範囲内に探索子を当てた。超音波画像診断装置に内蔵された解析機能を使用し、Bモード法にて取得した上腕動脈の長軸像の上腕動脈近位壁内膜から遠位壁内膜までの距離を測定して上腕動脈の血管径とした。その後、長軸像を映した状態でカラードプラ法を用いて上腕動脈における平均血流速度を測定した。超音波入射補正角度は一律 $60^\circ$ とし、上腕動脈の長軸像を水平に映した上で、関心領域が動脈の中心に位置するように計測した。カラードプラ法による平均血流速度の測定は連続60秒以上行い、時間平均された値を統計解析で用いた。上腕動脈血流量は、血管径と平均血流速度のデータをもとに以下の式を用いて算出した<sup>6)</sup>。

上腕動脈血流量 (ml/分)

$$= (\text{上腕動脈血管径 (cm)} \div 2) \times \text{円周率} \times \text{平均血流速度 (ml/秒)} \times 60$$

##### 1. 5. 3 血圧および心拍数

血圧脈波検査装置（SphygmoCor XCEL TM-2805V；A&D Medical, Japan）を用いて、心拍数お

よび上腕の収縮期および拡張期血圧を測定した。研究対象者の上腕に専用のカフを装着して測定を行った。投球腕は高さの調節が可能な台にリラックスした状態でのせ、台の高さはカフが心臓の高さと同程度になるように調整した。測定は座位安静状態で2回以上行い、その平均値を統計解析で用いた。

#### 1. 5. 4 主観的疲労感

VAS (Visual Analogue Scale) を用いて、研究対象者の投球腕全体の主観的疲労感をスコア化した。10 cmの直線の左端に「全く疲労のない状態」、右端に「想定できる範囲の最大の疲労状態」と書いた測定用紙を用意し、現在の疲労感を10 cmの直線上に×印で記入するよう指示した。記入済みの検査用紙の×印の位置は定規で計測して0.1cm単位で記録した。

#### 1. 5. 5 肩関節筋力

肩関節筋力の測定にはハンドヘルドダイナモメーター ( $\mu$  Tas; Anima, Tokyo, Japan) を使用した。先行研究3で実施されている手技を参考に、肩関節外旋筋力と肩関節内旋筋力を測定した (n = 11)。測定はそれぞれ2回ずつ実施し、得られた値の最大値を統計解析で用いた。

### 1. 6 統計処理

研究対象者の特性は、平均値±標準偏差で示した。主観的疲労感、肩関節筋力、上腕血流量およびRHIスコアの測定データは平均値±標準誤差で示した。すべての測定項目は、繰り返しのある2元配置分散分析を用いて解析を行った。その際、時間およびアイシングの主効果と2要因の交互作用の効果について有意確率を算出した。統計学的有意水準は5%未満とした。すべての統計解析において、多重比較の際には有意確率をBonferroni法によって調整した。すべての統計解析にはSPSS version 28 (IBM, Tokyo, Japan) を用いた。

## 2. 研究結果

図2にピッチング前後における投球腕の主観的疲労感 (VASスコア) の変化量を示した。対照条件および介入条件ともにピッチングの1日後には主観的疲労感が有意に上昇し、ピッチング2日後には低下することが確認された。繰り返しのある2元配置分散分析の結果、時間の主効果は有意であったが、条件の主効果および時間と条件の交互作用は有意ではなかった。

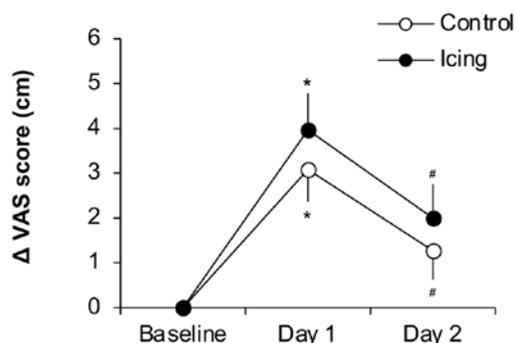


図2 ピッチング前後の主観的疲労感の変化  
主効果 (時間): P<0.001, 主効果 (条件): P=0.348, 交互作用 (時間×条件): P=0.469. \*P<0.05 (vs. Baseline), #P<0.05 (vs. Day1)

図3にピッチング前後の肩関節筋力の変化率を示した。全体の平均値を確認すると、肩関節外旋筋力 (図3A) および内旋筋力 (図3B) とともにアイシング条件ではピッチング翌日に低下する傾向を示した。一方、対照条件ではピッチング前後で横ばいの推移を示した。しかし、繰り返しのある2元配置分散分析の結果では、時間および条件の主効果および交互作用はいずれも有意ではなかった。

図4に上腕動脈径と血流速度から推定した上腕動脈血流量のピッチング前後における変化率を示した。全体の平均値を確認すると、対照条件ではピッチング翌日に約20%増加した一方で、アイシング条件は横ばいの推移を示した。しかしなが

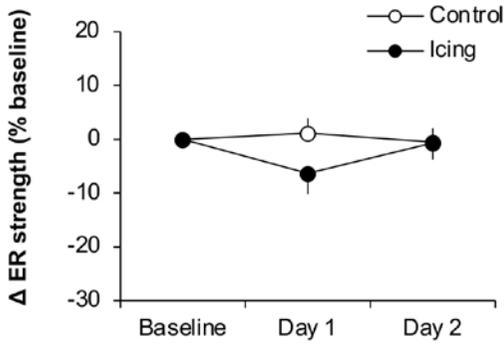


図3A ピッチング前後の肩関節外旋筋力 (ER strength) の変化  
主効果 (時間) : P=0.321, 主効果 (条件) : P=0.427, 交互作用 (時間 × 条件) : P=0.275

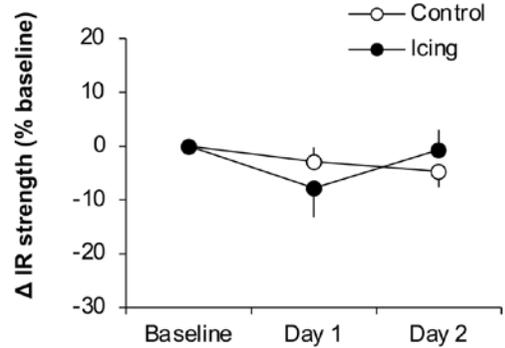


図3B ピッチング前後の肩関節内旋筋力 (IR strength) の変化  
主効果 (時間) : P=0.478, 主効果 (条件) : P=0.277, 交互作用 (時間 × 条件) : P=0.607

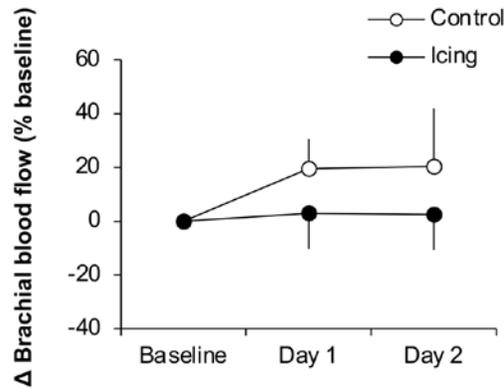


図4 ピッチング前後の上腕血流量の変化  
主効果 (時間) : P=0.478, 主効果 (条件) : P=0.277, 交互作用 (時間 × 条件) : P=0.607

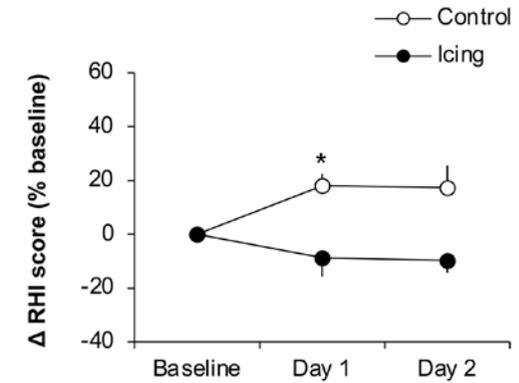


図5 ピッチング前後のRHIスコアの変化  
主効果 (時間) : P=0.419, 主効果 (条件) : P=0.016, 交互作用 (時間 × 条件) : P=0.035. \*P<0.05 (vs. Baseline)

ら、繰り返しのある2元配置分散分析の結果では、時間および条件の主効果、交互作用のいずれも有意水準には達しなかった。

図5に血管内皮機能の指標であるRHIスコアの変化を示した。全体の平均値を確認すると、対照条件ではピッチング翌日に $18.0 \pm 4.4\%$ 増加した一方で、アイシング条件では $8.8 \pm 6.9\%$ 低下していた。繰り返しのある2元配置分散分析の結果、時間の主効果は確認されなかった一方で、条件の主効果が確認され、対照条件では有意にRHIスコアの変化率が大きいことが認められた。さらに、時間と条件の交互作用も有意であり、ピッチング前後のRHIスコアの変化とアイシングの有無には交互作用があることが

確認された。事後検定の結果、ピッチング前とピッチング1日後のRHIスコアの変化率に有意な差が確認され ( $P = 0.012$ )、ピッチング2日後にもその差は有意傾向であった ( $P = 0.052$ )。

表1にピッチング前後の心拍数、平均血圧、上腕収縮期・拡張期血圧・脈圧、上腕動脈径および上腕動脈血流速度を示した。繰り返しのある2元配置分散分析の結果、全ての指標において時間と条件の主効果および交互作用のいずれも有意ではなかった。

表1 ピッチング前後における血行動態の変化

	対照条件			介入条件			有意確率		
	ピッチング 前	ピッチング 1日後	ピッチング 2日後	ピッチング 前	ピッチング 1日後	ピッチング 2日後	時間	条件	時間× 条件
心拍数, bpm	63±9	60±7	61±6	63±8	63±8	61±5	0.30	0.54	0.62
平均血圧, mmHg	87±6	85±8	86±7	87±7	85±6	85±8	0.07	0.75	0.77
上腕収縮期血圧, mmHg	123±7	123±8	123±8	122±8	122±9	119±7	0.25	0.27	0.50
上腕拡張期血圧, mmHg	69±7	66±8	68±7	70±7	67±7	68±9	0.09	0.66	0.95
上腕脈圧, mmHg	54±8	57±6	55±7	52±6	55±11	51±6	0.19	0.24	0.68
上腕動脈径, mm	4.0±0.3	4.0±0.3	4.0±0.3	3.9±0.4	4.0±0.4	4.0±0.3	0.27	0.45	0.52
上腕動脈血流速度, cm/秒	17±7	19±6	19±9	18±8	17±8	16±5	0.87	0.46	0.53
平均値±標準偏差									

### 3. 考 察

本研究では、大学男子野球投手を対象に、ピッチング後におけるアイシングによるクールダウンがピッチング1日後および2日後の主観的疲労感、肩関節筋力、上腕血行動態（血管内皮機能）に及ぼす影響を検討した。本研究では、先発投手を想定し、98球のピッチング課題を実施した後に、肩関節前後と肘関節の3か所を布製の氷嚢を用いて冷却した。その結果、アイシングの有無に関わらず、主観的疲労感はピッチング翌日に最大値を示し、2日後には低下傾向を示した。一方で、肩関節外旋および内旋筋力の変化率は、アイシングの有無に関わらず有意な差を示さなかった。さらに、上腕動脈の血流量もまた、アイシングの有無による有意な交互作用は確認されなかった。しかしながら、血管内皮機能の指標であるRHIスコアの変化率とアイシングの有無には交互作用があることが確認された。本研究で得られた一連の結果より、ピッチング後におけるアイシングは、主観的疲労感および肩関節筋力の経時変化には影響を及ぼさない一方で、投球腕の血管内皮機能の経時変化には何らかの影響を及ぼす可能性が示された。

Phase Change Materialを応用し、90球程度のピッチング課題後にアイシングを実施した先行研究では、アイシングを行った翌日において、肩関節内旋筋力の低下が有意に抑制されることが

報告されている<sup>3)</sup>。本研究で得られた結果は先行研究の結果とは異なるが、その要因には、1) 冷却時間の違い、2) 冷却温度の違い、3) ピッチング課題のプロトコルの違いが挙げられる。Phase Change Materialによるアイシングは長時間の局部冷却が可能であり、先行研究ではピッチング後に3時間連続で肩関節前後と肘関節のアイシングを行っている。一方で、本研究では氷嚢を用いて同部位を20分間冷却した。氷嚢を用いたアイシングは低コストかつ特別な機材を必要としないため、スポーツ現場で容易に実施できるクールダウン手法の1つであるが、Phase Change Materialを応用したクールダウン手法と比較すると、数時間にわたる長期間の冷却や冷却温度の微調整が難しいと考えられる。我々の実施した予備検討では、氷水を入れた氷嚢による20分間のアイシングにより冷却部の皮膚温度が13℃程度低下することを確認している。Phase Change Materialを用いた先行研究では、皮膚温度の変化を示していないが、冷却開始時のPhase Change Materialの温度設定が15℃であることから、氷嚢に氷水を入れて冷却した本研究よりも冷却温度が高いと考えられる。以上のことから、冷却の温度や時間などの要素によって、アイシングの効果が異なった可能性が考えられる。

一方、本研究および先行研究ともに、ピッチング課題の運動強度を客観的な指標により評価していないことから、単純に研究結果を比較すること

は困難であると考えられる。球速やアームスピードなどのピッチング課題に関連するデータやピッチング時の心拍数を評価することで客観的にピッチング課題の運動強度が評価可能である<sup>7)</sup>。客観的にピッチング課題の運動強度を評価することで、他の研究結果との比較検討やピッチング以外の運動との比較検討を可能にし、研究結果のより詳細な解釈が可能になると考えられる。

一般的に、寒冷地では循環器疾患の発症リスクが上昇することが明らかにされており<sup>8)</sup>、その生理学的な背景には、慢性的な末梢血管の収縮による動脈圧上昇および慢性的な動脈圧上昇に伴う血管内皮機能の低下が寄与していると推察されている<sup>9)</sup>。この推察の一部は、観察研究や実験的研究によっても実証されており<sup>4)</sup>、これらのエビデンスから着想を得て、血管内皮機能の観点から野球投手のクールダウン手法の是非を検討した点が本研究の新規的な部分である。本研究では、上腕動脈血流量には有意な変化が認められていない一方で、血管内皮機能の指標であるRHIスコアは、アイシングの翌日に低下することが確認された。この結果は、ピッチング後におけるアイシングが血管内皮機能の一過的な低下に寄与すること示唆するものである。

慢性的な血流量低下による指先の冷えが血行障害の主訴の1つであることに加えて、野球投手の競技特性を踏まえると、特に投球腕の血管内皮機能は投球パフォーマンス維持の観点から重要であると考えられる。その点で、ピッチング後におけるアイシングが血管内皮機能の一過的な低下に寄与している場合、アイシングによるクールダウンは血行障害予防の観点からは、推奨できない可能性が考えられる。しかしながら、本研究で得られたRHIスコアの変化率(-8.8±6.9%)は、先行研究で報告されているRHIスコアの変動係数(16.1~22.6%)<sup>5)</sup>の範囲内であった。したがって、本研究で確認されたRHIスコアの低下は、測定誤

差や生理的な変動によって引き起こされた可能性を否定できない。以上のことを踏まえると、本研究から得られた結果のみでは、アイシングによるクールダウン手法の是非について結論づけることは難しいと考えられる。本研究で得られた知見を基盤にした追加実験が必要であり、それらの研究結果が蓄積されることで、血行障害予防の上で最適な野球投手のクールダウン手法が確立されることを期待する。

#### 4. 結 論

大学男子野球投手を対象にした本研究では、ピッチング後に20分間のアイシングを実施することで、翌日における投球腕の血管内皮機能が低下する可能性が示された。しかし、ピッチング後の血管内皮機能の変化は測定誤差や生理的変動の範囲内であった。そのため、ピッチング後のアイシングが血管内皮機能に悪影響を及ぼすか否かを明らかにするためにはさらなる実験が必要である。

#### 謝 辞

本研究は磯村頌吾氏・田邊歩陸氏(筑波大学体育専門学群)をはじめ、多くの筑波大学硬式野球部員の協力を得て行われた。加えて、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44回(2022年度)研究助成金に支援された。ここで深く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) Posner M., Cameron K.L., Wolf J.M., Belmont P.J., Jr. Owens B.D., Epidemiology of Major League Baseball injuries., *Am. J. Sports Med.*, **39**, 1676-1680, doi:10.1177/0363546511411700 (2011)
- 2) Yanagisawa O. et al., The effects of various therapeutic measures on shoulder range of motion and cross-sectional areas of rotator cuff muscles after baseball pitching., *J. Sports Med. Phys. Fitness*, **43**, 356-366 (2003)

- 3) Mullaney M.J. et al., Accelerated Muscle Recovery in Baseball Pitchers Using Phase Change Material Cooling., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **53**, 228-235, doi:10.1249/MSS.0000000000002447 (2021)
- 4) Dyson K.S., Shoemaker J.K. Hughson R.L., Effect of acute sympathetic nervous system activation on flow-mediated dilation of brachial artery., *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology.*, **290**, H1446-1453, doi:10.1152/ajpheart.00771.2005 (2006)
- 5) Liu J., Wang J., Jin Y., Roethig H.J., Unverdorben M., Variability of peripheral arterial tonometry in the measurement of endothelial function in healthy men., *Clin. Cardiol.*, **32**, 700-704, doi:10.1002/clc.20668 (2009)
- 6) Mori S. et al., Acute influences of tennis services on cardiac output and brachial hemodynamics in young male tennis players., *J. Sci. Med. Sport*, doi:10.1016/j.jsams.2022.10.009 (2022)
- 7) Cornell D.J. et al., In-Game Heart Rate Responses Among Professional Baseball Starting Pitchers., *J. Strength Cond. Res.*, **31**, 24-29, doi:10.1519/jsc.0000000000001465 (2017)
- 8) Alahmad B. et al., Associations Between Extreme Temperatures and Cardiovascular Cause-Specific Mortality: Results From 27 Countries., *Circulation*, **147**, 35-46, doi:10.1161/circulationaha.122.061832 (2023)
- 9) Sun Z., Cardiovascular responses to cold exposure., *Front Biosci (Elite Ed)* **2**, 495-503, doi:10.2741/e108 (2010)

## Foot wear 装着下での足部運動解析手法の確立

森ノ宮医療大学 工藤 慎太郎  
(共同研究者) 同 山口 功  
同 堤 真大

### Development for Foot Motion Analysis System with Footwear

by

Shintarou Kudo, Masahiro Tsutsumi  
*Inclusive medical sciences research institute,  
Morinomiya university of medical sciences*  
Isao Yamaguchi  
*Department of Radiological Sciences,  
Morinomiya university of medical sciences*

#### ABSTRACT

The motion of the talonavicular joint in shoes is important for understanding the mechanism of sports injury, but there is no method for analysis under normal shoe stiffness. We examined the motion of the talonavicular joint using the stretch strain sensor (STR) that can measure the motion of the talonavicular joint with shoes on. Fourteen feet of 14 healthy adult males were included in the study. The talonavicular coverage angle (TNCA) was assessed in the sitting and standing positions using X-rays, and the arch strain (AS) was measured in the same postures using an STR. The AS was measured by four attachment methods and the correlation between the AS and changes in TNCA was analysed. The method with the highest correlation was used to examine the changes in the AS waveform of running motion in barefoot and shoe

conditions. The AS condition with a line connecting the medial malleus and navicular, and an inclination of 50 degrees downwards to the floor correlated significantly with changes in TNCA ( $r = 0.60$ ,  $p = 0.02$ ). There was no significant difference in AS during running between with the shoe and without shoe conditions. Therefore, AS measurement by STR might be able to assess the motion of the talonavicular joint during running.

#### キーワード

伸縮性ひずみセンサー, 距舟関節, ランニング, 靴, 足

#### Keyword

Stretch strain sensor, Talonavicular joint, running, shoe, foot

## 要 旨

靴の中での距舟関節の運動はスポーツ障害の発生機序の解明に重要であるが、通常の靴の強度を保った状態での解析手法がない。そこで靴を装着下で計測可能な伸縮性ひずみセンサー (STR) を用いて、距舟関節の運動解析を試みた。健康成人男性14名14足を対象に、X線による距舟関節被覆角 (TNCA) を坐位と立位で計測し、同様の姿勢でSTRを用いてアーチに加わるひずみをアーチストレイン (AS) として計測した。なお、ASの計測は4つの貼付法とTNCAの変化との相関を分析した。最も相関の高い方法で裸足条件と靴条件でのランニング動作のAS波形の変化を検証した。内果と舟状骨を結ぶ線かつ床面に対して50度下方に傾斜をつけて貼付した条件がTNCAの変化と相関が高かった ( $r=0.60, p=0.02$ )。ランニング中のASは靴条件と靴なし条件間に有意差を認めなかった。すなわちSTRによるAS計測によりランニング中、靴を装着した状態でも距舟関節の運動を評価できる可能性がある。

## 緒 言

足部は7つの足根骨と5本の中足骨、14の指節

骨から構成され、複雑な運動を行う。この足部のアライメントや運動に異常が生じると種々のスポーツ障害を惹起すると考えられている<sup>1,2)</sup>。中でも近年の足部運動の解析により足部の中でも特に距舟関節の運動が注目されている<sup>3)</sup>。つまり足部のスポーツ障害の発生と足部運動の関係を検討するためには、距舟関節の運動を解析する必要がある。

足部の運動解析は足部に多数の反射マーカを貼付した multi-segment foot model がよく用いられる<sup>4)</sup>。一方、この手法は足部に反射マーカを貼付する必要があるため、靴を履いた状態では難しい。また反射マーカ貼付部の靴をくり抜くことで反射マーカを貼付した研究もみられる<sup>5,6)</sup>。しかし、靴の剛性が低下するため、実際に靴の中での足部挙動を反映しているかは疑問である。つまり通常の靴の強度を保った状態での距舟関節の運動を解析する手法がない。

我々は伸縮性ひずみセンサー (Stretch strain sensor, C-stretch バンドー化学, 兵庫, 日本) (以下STRとする) を足部に貼付することで、後足部に対する前足部の背屈、外がえし運動を反映することを明らかにし、足部のサポーター装着時の足部挙動の調査を行った<sup>7,8)</sup>。すなわち、STRを

用いることで、靴の中での距舟関節の運動を解析できれば、より距舟関節の運動を制御できるFootwearの開発や運動療法の開発に発展する可能性がある。

本研究の目的は靴を装着した状態で計測可能なSTRを用いて、距舟関節の運動の解析手法を開発することとした。上記目的を達成するために以下の2つの実験を行った。実験1は距舟関節の内転運動を反映するSTRの貼付方法を検証する。実験2では実験1で検証した方法を用いて、靴を履いた条件と裸足条件での走行中のSTRを比較し、靴を装着した条件でも計測可能なことを示す。

## 1. 実験

### 1.1 実験1 距舟関節の内外転運動を反映するSTRの貼付方法の検証

#### 1.1.1 方法

対象は健康成人男性14名14足(年齢 $44.6 \pm 8.0$ 歳,身長 $1.72 \pm 0.06$  m,体重 $73.4 \pm 13.4$  kg)とした。除外基準は現在、足部・足関節に疼痛を有するもの、過去に足部・足関節に対する手術の既往のあるものとした。本研究は森ノ宮医療大学学術研究委員会倫理審査部会の承認を得て実施した(承認番号2021-081)。なお、対象者には本研究の趣旨を説明し同意を得た。

4か所の足部ストレインの計測には、STRを用いた。非荷重位で足部内側に4つのパターンでSTRを貼付した(図1)。Pattern1は舟状骨と載距突起を結ぶ線上に貼付する。Pattern2は内側楔状骨と載距突起を結ぶ線上に貼付する。Pattern3は舟状骨と内果を結ぶ線上、Pattern4は内側楔状骨と内果を結ぶ線上に貼付した。またPattern1と2は距舟関節の運動軸に平行になるように床面に対して約40度上方に傾斜をつけ、Pattern3と4は運動軸に直交するように床面に対して約50度下方に傾斜をつけて貼付した。

STRを貼付した状態で足底面を床面に接地した

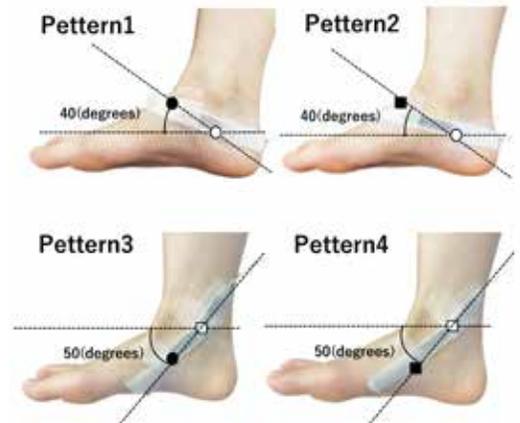


図1 STR貼付方法

4つのSTRの貼付方法を示す

●: 舟状骨, ○: 載距突起, ■: 内側楔状骨, □: 内果

坐位に対する立位の足部ストレインを立位アーチストレインと定義した。

1名の診療放射線技師により距舟関節の水平面上のアライメント(骨配列)をX線撮影装置(キャノンメディカルシステムズ社製のMRAD-A325)を用いて撮像した。撮像肢位は足底を床に触れた端坐位(膝関節90°屈曲位,足関節底背屈中間位)と安静立位の2条件とした。入射角を背側へ20°傾斜させたAnterior- Posterior像(AP像)を撮影した。撮影条件は管電圧を50kV,管電流を100mA, mAs値は0.025,撮影距離は150cmとした<sup>9)</sup>。撮影した画像をもとに、距骨頭の内外側関節縁を結ぶ線と舟状骨関節の内外側縁を結んだ線が成すTalonavicular coverage angle (TNCA)をImage J (version 1.52; National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA)を用いて計測した(図2)。また、非荷重位から荷重に伴うTNCAの変化量をTalonavicular coverage angle Excursion (TNCA-E)と定義した。

Pattern1~4の立位アーチストレインはフリードマン検定を用い、事後検定にはボンフェローニ法を用いた。またTNCA-EとPattern1~4の立位アーチストレインの関係をスピアマンの順位相関係数を用いて比較検討した。統計解析にはすべ



図2 Talonavicular coverage angle  
右足を背側から見たX線写真を示す  
各写真の右上に撮像肢位を示す

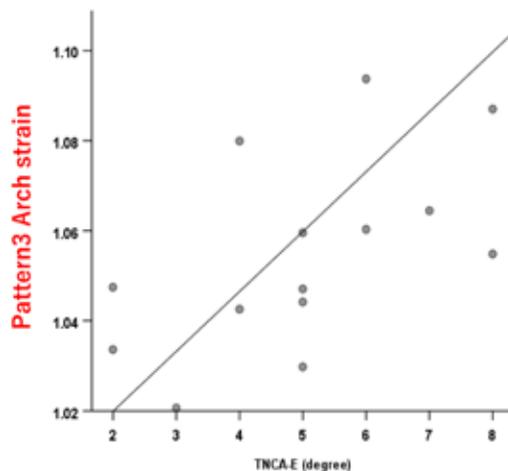


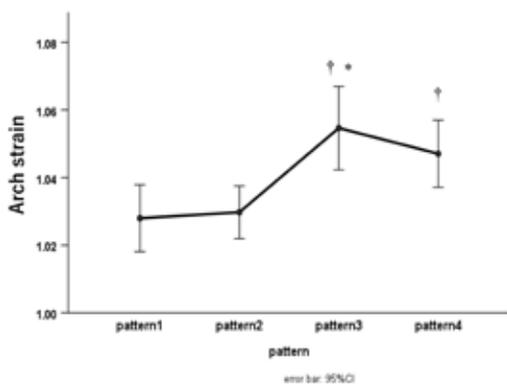
図4 TNCA-Eとpattern3の関係

てIBM SPSS Statistics version 21 (IBM, Armonk, NY, USA) を使用した。

1. 1. 2 結果

1. 1. 2. 1 STR貼付方法による立位アーチストレインの違い

Pattern1の立位アーチストレインは中央値1.03 (25%-75% : 1.01-1.06), Pattern2 は 1.03 (1.01-1.04), Pattern3は1.05 (;1.04-1.07), Pattern4は1.05 (1.03-1.06) でパターン1はその他3Patternと比較して有意差を認めた(図3)。



† :difference with pattern1 \* :difference with pattern2

図3 STR貼付パターンによるアーチストレインの違い

1. 1. 2. 2 立位アーチストレインとX線評価との相関関係

Pattern3の立位アーチストレインはTNCA-Eと有意な正の相関関係を認めた ( $r=0.60, p=0.02$ ,

power=0.73) (図4)。一方、その他の条件はTNCA-Eと有意な相関関係を認めなかった。(pattern1: $r=0.07, p=0.80$ , pattern2: $r=0.13, p=0.65$ , pattern4: $r=0.35, p=0.22$ )

1. 2 実験2 靴を履いた条件と裸足条件での走行中のアーチストレインの検討

1. 2. 1 方法

対象は健康成人男性8名8足(年齢 $21.9 \pm 1.6$ 歳, 身長 $1.69 \pm 0.06$  m, 体重 $61.3 \pm 6.7$  kg)とした。除外基準は現在、足部・足関節に疼痛を有するもの、過去に足部・足関節に対する手術の既往のあるものとした。本研究は森ノ宮医療大学学術研究委員会倫理審査部会の承認を得て実施した(承認番号2021-081)。なお、対象者には本研究の趣旨を説明し同意を得た。

走行中のアーチストレインの計測には、STRを用い実験1のPattern3の方法で貼付した。また測定側の踵部に同期した圧力センサーを貼付し、踵接地を同定した。

各種センサーを貼付した状態で、裸足条件と靴下と靴を装着した条件で、トレッドミル上にて、時速8kmのランニング動作を記録した。記録周波数は100Hzとして、得られた波形は7区間の移動

平均を算出し平滑化した。静止立位の足部ストレインにより標準化し、10ランニングサイクル中のアーチストレインを加算平均し、走行中のアーチストレインとして算出した。

また靴の有無による走行中のアーチストレインの時系列における変化を検討するため、対応のあるt検定のstatistical parametric mapping (SPM)を実施した。SPMはMatlab (R2020a; MathWorks Inc)を用い、オープンソースとして公開されているSPM code (www.spm1d.org)を利用した。統計学的有意水準は95%とした。

### 1. 2. 2 結果 走行中のアーチストレインと靴の影響

走行中のアーチストレインは立脚期に上昇し、遊脚期に減少する単峰性を示した。ピークはランニングサイクルの30~40%付近であった。靴条件と裸足条件のアーチストレインを図5に示す。どちらも裸足条件と同様の波形パターンを示し、靴条件が靴なし条件と比べ高値を示していた。しかしSPM解析の結果、いずれのタイミングにおいても条件間に有意差を認めなかった。

## 2. 考 察

本研究の仮説はSTRにより靴を装着した状態でも距舟関節の挙動を計測できるであった。本研究の結果、Pattern3の貼付方法が、立ち上がり時の距舟関節の外転運動を反映した。その手法によりランニング中の立脚期にSTRが伸長されること、さらに靴を履いた状態でも同様の計測ができることが明らかになった。つまり、本研究はSTRにより、靴を装着した状態でもランニング中の距舟関節の運動を評価できることを示した。

距舟関節の内外転運動の運動軸は足底面に対して約40度の背側に傾きをもつと報告されている<sup>10)</sup>。本研究でのPattern3の貼付方法は内果から舟状骨に向かって、運動軸に直交するように貼付している。そのためPattern3の貼付方法が最も立ち上がり動作中の距舟関節の外転運動を反映したと考えられた。

本研究のランニング中のSTRでの解析においては、ランニングサイクルの40%付近でピークを迎えた可能性がある(図5)。ランニング中の距舟関節の運動を評価した研究は少ない。Arndtら

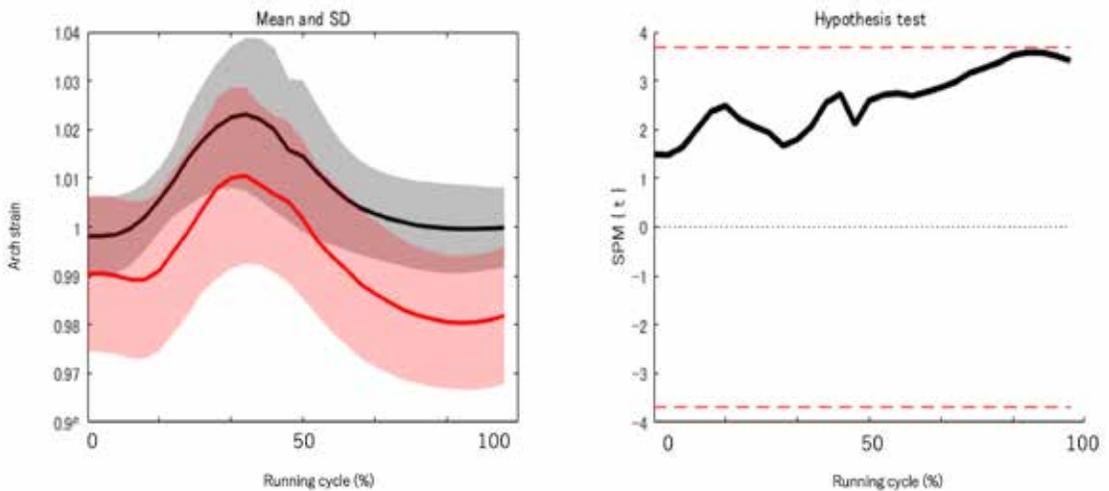


図5 ランニング中のアーチストレインの靴の有無による違い

左:縦軸はアーチストレイン、横軸はランニングサイクルを示す。黒実線は靴条件、赤実線は靴なし条件のアーチストレインを示す。灰色の領域と赤の領域はそれぞれ、標準偏差の2倍を示す。  
右:縦軸はSPM値、横軸はランニングサイクルを示す。黒実線が赤点線の範囲内は有意差なし、赤点線の範囲外は有意差有と判定する。今回は黒実線が赤点線の範囲を超えることがないため、いずれのタイミングにおいても有意差はなかった。

の骨ピンマーカを足根骨に刺すことで足根骨間の運動を解析した研究では、距舟関節は前額面上での運動が大きく、次いで水平面上の運動が大きいことを示し、多くの被験者において立脚期の20～50%で外がえし運動が増加し40～60%で外転運動がピークを迎えることを報告している<sup>11)</sup>。アーチストレインは距舟関節の外転のほかに、外がえし、背屈の運動を反映する可能性がある。一方、従来の三次元動作解析の手法では足部内のセグメント間の三次元運動を3つの運動軸の回転運動に変換して表現している。そのため先行研究におけるランニングサイクル中の外転運動のピークと一致しない結果になったと考えた。

走行中のアーチストレインは靴の装着の有無で優位さを認めなかった。靴を履いた状態での変化についてCampbellら<sup>12)</sup>は歩行中の足関節の運動では靴を履くことで踵接地後の背屈角度を減少させること、ピークの外がえし角度を減少させると報告している。一方、McHenryら<sup>13)</sup>は靴を履くと歩行中の踵接地時の距腿関節の背屈角度の増加と距骨下関節の底屈角度の増加などの歩行中の運動学の変化と歩行速度とストライド長の増加を報告している。またランニングにおいては、靴を履くと立脚期の50%付近では第1MTP関節の伸展角度が増加し、90～100%付近では減少し、靴はMTP関節の運動を制限するとの報告もある<sup>14)</sup>。さらにSuら<sup>15)</sup>はランニングの立脚期の20～60%で踵骨に対する中足骨の外がえし運動が減少するとしている。いずれも、底背屈方向や外がえし/内がえし方向の運動が変化することは示しているが、水平面上の内/外転運動について、変化を示した報告はない。そのため、距舟関節の水平面上の運動をより反映する走行中のアーチストレインは、靴を履いた条件と裸足条件で有意差を認めなかったと考えた。

距骨には反射マーカを貼付できないため、距舟関節の運動を三次元動作解析で計測することは難

しい。近年では2D-3D レジストレーション法により、歩行中の距舟関節の運動を評価した研究がある<sup>16)</sup>が、ランニング中の解析は時間分解能の問題からほとんど行われていない。また、骨ピンマーカやFluoroscopyを用いた研究は被験者への侵襲が大きいことを考えると本研究で用いたSTRは足部運動を非侵襲性に計測する手法として有用なツールと考えられる。

本研究の限界は2つある。走行時の距舟関節の挙動は十分に明らかではない。そのため、走行中のアーチストレインが距舟関節の挙動を示しているかを検討するためには、走行時のアーチストレインとMulti-segment foot modelとの比較も含めて、妥当性を検証したい。2つ目に対象者が健康者に限られており、病的な足部を有する人の走行データを検証できていない。今後、異常な足部のデータを追加することで、ストレッチセンサーの有用性を検証していく必要がある。

### 3. 総 括

靴を装着した状態で距舟関節の運動をSTRにより計測する手法を開発した。Pattern3での貼付方法による立位アーチストレインは立ち上がり動作での距舟関節の挙動を反映することが明らかになった。一方、走行中のアーチストレインは靴を装着した条件と同様のパターンになった。しかし走行中のアーチストレインは立脚期に増加するものの、距舟関節の運動を反映しているかは十分に明らかにできなかった。今後、Multi-segment foot modelとの比較を行い、検証を深める必要がある。

### 謝 辞

本研究は公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成を受けて実施しました。研究を助成していただいた同財団に深謝いたします。また研究を実施するにあたり、多大な協力を頂きました医療法人アレックス尾山台整形外

科の平川佳祐氏のご協力に深謝いたします。

## 文 献

- 1) Bennett J.E. et al., Factors contributing to the development of medial tibial stress syndrome in high school runners., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, **31** (9), 504-10(2001)
- 2) Williams D.S., 3rd, I.S. McClay, J. Hamill, Arch structure and injury patterns in runners., *Clin. Biomech. (Bristol, Avon.)*, **16** (4), 341-7 (2001)
- 3) Kido M., et al., Load response of the medial longitudinal arch in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study., *Clin. Biomech. (Bristol, Avon.)*, **28** (5), 568-73(2013)
- 4) Leardini A., et al., Multi-segment foot models and their use in clinical populations., *Gait. Posture.*, **69**, 50-59(2019)
- 5) Balsdon M.E.R., C.E. Dombroski, Reliability of a multi-segment foot model in a neutral cushioning shoe during treadmill walking., *J. Foot Ankle Res.*, **11**, 60(2018)
- 6) Halstead J., et al., The feasibility of a modified shoe for multi-segment foot motion analysis: a preliminary study., *J. Foot Ankle Res.*, **9**, 7(2016)
- 7) Kudo S. K. Sakamoto, Influence of a novel elastic foot orthosis in foot motion during locomotion in adults with mild flatfoot., *Gait. Posture.*, **93**, 59-63 (2022)
- 8) Sakamoto K., et al., Validity and reproducibility of foot motion analysis using a stretch strain sensor., *Gait. Posture.*, **86**, 180-185(2021)
- 9) Arunakul M., et al., Tripod index: a new radiographic parameter assessing foot alignment., *Foot Ankle Int.*, **34** (10), 1411-20(2013)
- 10) Nester C.J., A. Findlow, P. Bowker, Scientific approach to the axis of rotation at the midtarsal joint., *J. Am. Podiatr. Med. Assoc.*, **91** (2), 68-73 (2001)
- 11) Arndt A., et al., Intrinsic foot kinematics measured in vivo during the stance phase of slow running., *J. Biomech.*, **40** (12), 2672-8(2007)
- 12) Campbell K.J., et al., Normative rearfoot motion during barefoot and shod walking using biplane fluoroscopy., *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, **24** (4), 1402-8(2016)
- 13) McHenry B.D., et al., Sagittal subtalar and talocrural joint assessment between barefoot and shod walking: A fluoroscopic study., *Gait. Posture.*, **72**, 57-61(2019)
- 14) Zhang F., et al., Influence of Shod and Barefoot Running on the In Vivo Kinematics of the First Metatarsophalangeal Joint., *Front Bioeng. Biotechnol.*, **10**, 892760(2022)
- 15) Su W., et al., Effects of Barefoot and Shod on the In Vivo Kinematics of Medial Longitudinal Arch During Running Based on a High-Speed Dual Fluoroscopic Imaging System., *Front Bioeng. Biotechnol.*, **10**, 917675(2022)
- 16) Chen Wang M.D., et al., In vivo kinematic study of the tarsal joints complex based on fluoroscopic 3D-2D registration technique., *Gait. Posture.*, **49**, 54-60(2016)

# 全方位二軸変形試験法から導かれた ひずみエネルギー密度関数を用いた 衣服圧の CAE シミュレーション

福井大学 山下 義裕  
(共同研究者) IDAJ株式会社 石川 覚志

## Study on CAE Simulation of Garment Pressure Using Strain Energy Density Function Derived from Biaxial Deformation Test Method

by

Yoshihiro Yamashita  
*University of Fukui,*  
*Research Center for Fibers and Materials*  
Satoshi Ishikawa  
*IDAJ*

### ABSTRACT

To predict garment pressure accurately, it is essential to model the biaxial deformation behavior of textiles by considering yarn properties and weave structure. Yarn's mechanical properties are nonlinear, and assuming a Poisson's ratio of 0.5, we can employ a hyperelastic model to simulate large deformation behavior. In this study, we approximate the mechanical properties of spun yarn using an equivalent model of a homogeneous monofilament. We use CAE software, Abaqus, to simulate the biaxial tensile behavior of a plain weave. We estimate the stress-strain relationship by fitting the strain energy density function to the Mooney-Rivlin approximation, which is based on biaxial deformation in the course direction. This direction closely resembles the deformation experienced when wearing a garment. We also utilize CAD data for

a general-purpose mannequin and a shirt. When we compared the results with the measured garment pressure of a T-shirt worn on a mannequin, we found that they were in good agreement with the measured garment pressure.

#### キーワード

衣服圧, CAEシミュレーション, ひずみエネルギー, ニット, 編物, 二軸変形

#### Keyword

Garment pressure, CAE Simulation, Strain energy, Knit, Knitted fabric, Biaxial deformation

## 要 旨

着衣の衣服圧を予測する方法の一つとして、糸の特性から織構造をモデル化することで織物の二軸変形挙動を予測することは重要である。糸の力学特性は非線形である。糸のポアソン比を0.5と仮定すれば超弾性体モデルを用いて大変形挙動をシミュレーションが可能である。本研究では紡績糸の力学特性を均質なモノフィラメントの等価モデルで置き換えて近似し、平織物の二軸引張挙動をCAEソフトのAbaqusを持ちいてシミュレーションした。またニットの編構造からなるTシャツの全方位二軸試験を行い着衣時の変形に一番近いと判断したcourse方向への二軸変形からひずみエネルギー密度関数をMooney - Rivlinの近似式にあてはめて応力-ひずみ関係を推測し、汎用のマネキンとシャツのCADデータをもとにCAEによる衣服圧シミュレーションを行い、一方でマネキンにTシャツを着用させた時の実測の衣服圧と比較したところ良い一致を得た。

## 緒 言

近年はアパレルCADの進歩によりマネキンの3次元人体モデルから平面の型紙を作り出すことが一般的になっている。衣服圧について金井ら<sup>1)</sup>は人体とソフトマネキンを用いてズボン着用時の衣服圧と主観評価の間に良い相関がみられたこと、

ソフトマネキンで計測された衣服圧は人体よりも2~3倍大きな値であることを示した。小澤ら<sup>2)</sup>はDressingSim - Clothを用いて衣服圧を実測と比較しchest部で実測値が4.2hPaであったのに対して計算値は3.5hPaと良い一致を示したことを報告した。加藤ら<sup>3)</sup>はコンプレッションタイトの衣服圧が10~30hPaでありそのニット素材の力学特性と走行時の生理的影響との関係を調査した。Gongら<sup>4)</sup>は衣服生地 of 伸長による応力-ひずみ曲線と衣服圧-ひずみが比例関係にあることを示した。村崎ら<sup>5)</sup>はブラジャーのバックパネル部の衣服圧が中央部で4.6hPa, エッジ部で23~25hPa (20歳代) と報告している。Songら<sup>6)</sup>は着圧ストッキングの衣服圧が弱タイプで10~25hPa, 強タイプが10~35hPaと報告している。Xuら<sup>7)</sup>はストッキング, パンツ, ジーンズの衣服圧を測定していずれも11.6hPa以下であると報告している。一方Horibaら<sup>8)</sup>はガードル素材の応力-ひずみ曲線から得られた弾性率とポアソン比を用いてLS - DYNAによるガードルのCAEシミュレーションと実測の衣服圧を測定してよい一致が得られたことを報告している。

実際の着衣は糸を織機や編機を用いて2次元の布を作製してそれを縫製により仕上げられる。そのため糸と織物や編物の構造をCADでモデル化し、そこに力学特性を与えてあげることで出来上がる布の力学特性が推定できる。しかし織物や編

物の応力-ひずみ曲線の非線形性と着衣の衣服圧の関係はまだ不明確な点が多い。1本の糸の力学特性を用いて織物や編物をまずシミュレーションし、それを着衣に展開するのが理想である。これまで織物は複合材料の補強材としてのCAE解析の報告は多いが、織物<sup>11-14)</sup>や編物<sup>15)</sup>の単体での報告は少ない。一方で着衣の糸はモノフィラメントだけでなく短繊維撚糸からなる紡績糸が主流で、さらに織られたり編まれたりする工程で糸の特性が大きく変化するため、今回はモノフィラメントで織られた平織の均等二軸変形をシミュレーションし、糸や織物の解析結果が着衣の実用的なCAEデータとして利用可能かも検討した。糸や織物や編物からなる材料の力学特性は非線形であるためCAE解析に卓越した世界中で広く用いられている汎用ソフトであり利用者も多いAbaqusを用いた。その後に着衣の力学特性をニットのwale/course方向(0°方向)とそれらの45°方向(せん断方向)に切り出した素材の二軸試験を行い

CAE解析が活用できるかどうかとも検証した。

## 1. 実験

### 1.1 二軸測定

二軸測定はカトーテック(株)BX5450で行った(図1)。ひずみを計算する初期長としての有効試料幅はX,Y方向それぞれ50mmである。二軸測定はX方向とY方向に同じ量のひずみを加える均等二軸変形(equal biaxial)、XもしくはY方向のいずれかの変形を固定した一軸拘束二軸変形(pure shear)、Y方向を固定せず自由にした一軸変形(uniaxial)などがある。ひずみ速度は200%/minである。

### 1.2 平織物

モノフィラメント糸(直径10 $\mu$ m)からなり経緯方向に45本/cmの糸密度で構成された平織物(図2a)を参考にモデル化(図2b)した。

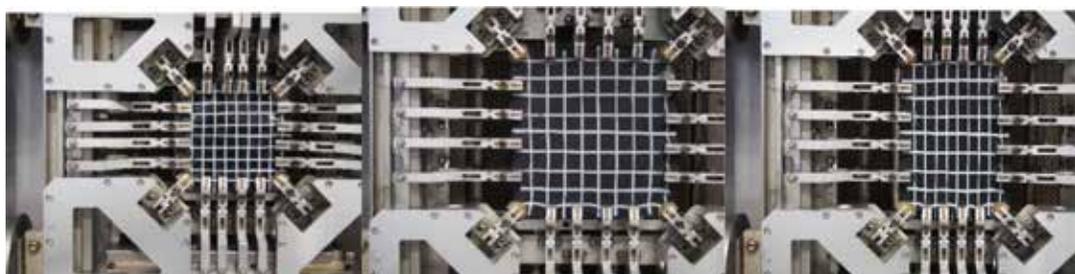


図1 二軸試験装置(左)未変形,(中)均等二軸変形,(右)一軸拘束二軸変形

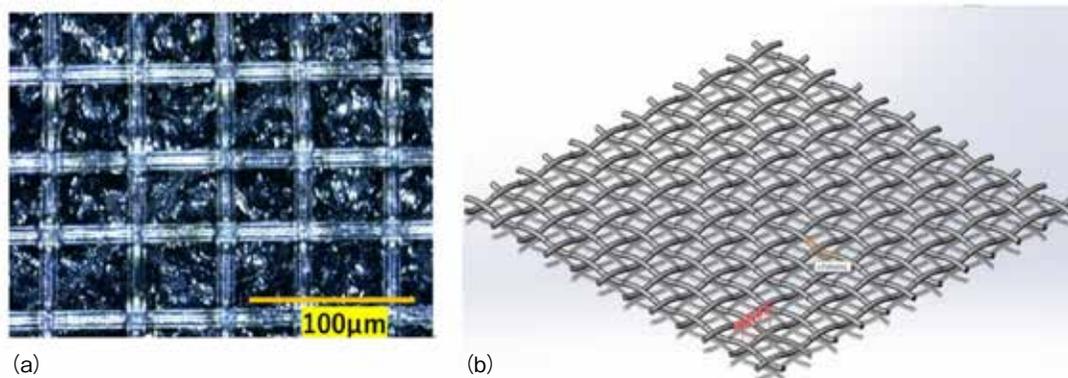


図2 モノフィラメント糸からなる平織物(a)とCAE解析のためのモデル(b)

### 1. 3 着衣

用いた着衣のTシャツは平編ニット（天竺編み）からなり胸囲84cm（サイズS），生地が目付重量167g/m<sup>2</sup>，厚み0.5mm，33Guage/inchである。布の引張試験では通常はチャック部の布の単位幅あたりの力で表示されることが多い。しかしCAE解析では応力で表す必要があるため，二軸測定のを布のチャック間幅50mmにTシャツは厚み0.5mmをかけてつかみ部の布の断面積25mm<sup>2</sup>で力を割ることで応力を算出した。応力はSI単位に換算して計算に用いた。

### 1. 4 衣服圧

衣服圧の測定は(株)エイエムアイ・テクノ製AMI3037-SB-hP（測定圧力範囲0～200hPa）でエアバックは直径20mmを用いて着衣を着せたメンズマネキンの胸部と腹部ならびに肩，腰の着衣との隙間にエアバックセンサーを挟み測定した。マネキンは紳士（M）で本体高さ166cm，肩幅45cm，胸囲90cm，胴囲76cm，腰囲90cmである。

### 1. 5 ひずみエネルギー密度関数の算出

糸の力学特性はモノフィラメント織物から取り出して測定し，ポアソン比0.5の非圧縮材料と仮定して糸の一軸伸長の応力ひずみ曲線から(1)式の係数を求めた。糸のポアソン比は0.5以上

の場合もありうるし，ウレタン繊維を含む糸の場合は0.5より小さい場合もありうる。糸のポアソン比の測定の報告はほとんどなく鮑ら<sup>11)</sup>はいくつかの織物のポアソン比を測定しニットに近いものは0.49～0.57であると報告している。Horibaら<sup>8)</sup>はニットのポアソン比として0.49を用いている。

ゴム材料を仮定すればその力学挙動は(1)式に示すひずみエネルギー  $W$  で定義することが可能である。

$$W = \sum_{i,j} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^{N_1} D_i (J - 1)^{2i} \quad (1)$$

$W$ : Mooney-Rivlin 近似によるひずみエネルギー  
 $C_{ij}, D_i$ : 定数

$I_1, I_2$ : ひずみの不変量

$W$  はエネルギーであるのでこれをひずみで微分することで常に任意のひずみでの応力を得ることができる。今回は体積圧縮にかかわる  $D$  項は無視した。

### 1. 6 CAE解析

図3はCAE解析の流れを示す。紡績糸の場合もモノフィラメントと見立てて，一軸伸長の応力-ひずみ曲線から(1)式の係数を得る。次に糸が経糸と緯糸からなる織物のモデルを作製してその織

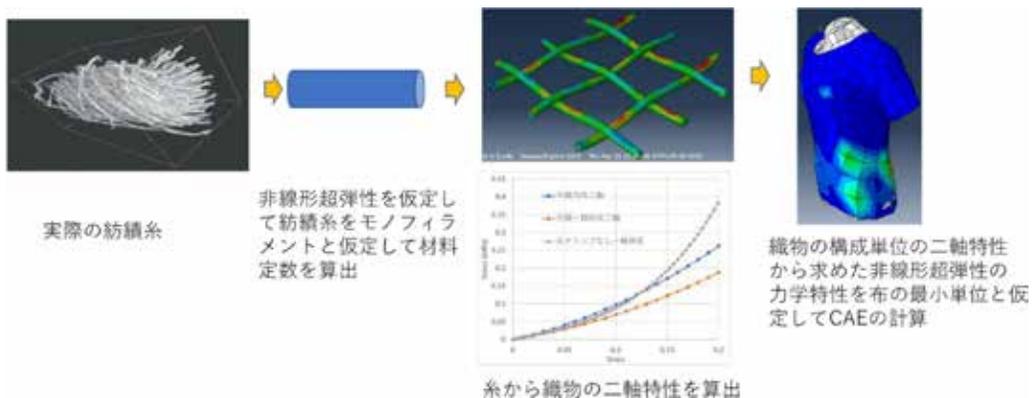


図3 糸の力学特性から着衣の力学特性を算出するCAE解析の流れ

物に均等二軸変形と一軸拘束二軸変形を与えて応力-ひずみ曲線を得てこれを織物の力学特性と仮定して再度 (1) 式から係数を得る. この時糸の交差部の摩擦係数は0~10の間で変化させて実際の変形状態に近い値を採用する. 最後に得られた織物の係数を着衣の力学特性と仮定して着衣をマネキンに着用させ, さらにCAE解析を行う. 実際の織物布では経糸と緯糸と45度方向では異方性が生じるが今回は織物布は等方性と仮定した.

CAE解析はAbaqus2020ならびにAbaqus6.14 (ダッソー・システムズ) を用いてモノフィラメントからなる平織物の解析には陽解法を着衣の解析は陰解法で行った. 着衣解析の手順の詳細を以下に示す. マネキンとシャツのCADデータはFree3D CAD<sup>9)</sup> のstepファイルを用いた. まず実測用マネキンの胸囲93.5cmに人体モデルマネキ

ンCADの胸囲が一致するサイズにCADモデルを修正する (図4). 次にシャツCADは胸囲93.5cmにした剛体人体モデルマネキンCAD (M) よりも一回り小さいサイズ (S) にする (図5 (左)). 初期状態では接触を無視してシャツは人体の内側に一部がもぐりこんだ状態になる. シャツの材料特性に非線形ひずみエネルギー密度関数の係数を設定後, シャツを人体モデルマネキンと接触しないまでに膨らませる. 最後にシャツに加えた内圧を取り除いて人体モデルマネキンにシャツが接触するまで縮める (図5 (右)).

## 2. 結果と考察

### 2.1 モノフィラメントからなる平織物のCAE解析

平織物の二軸伸長実測結果とモノフィラメント

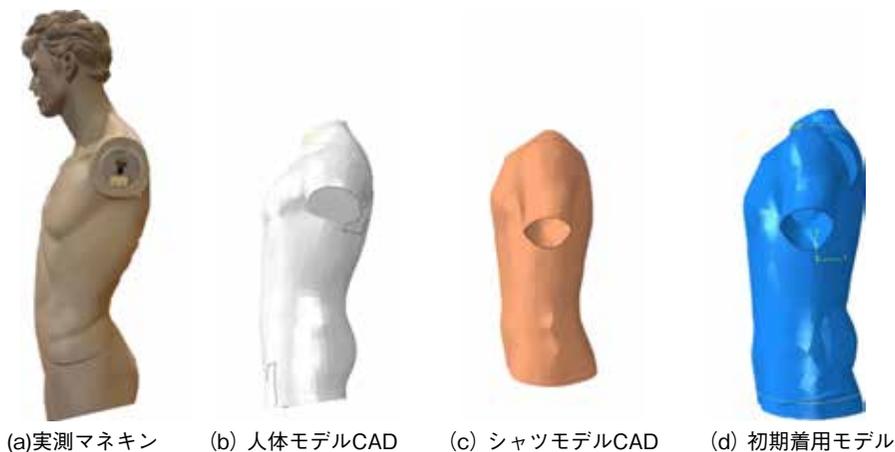


図4 衣服圧測定に用いたマネキン (a) と解析に用いたCADモデルの外観

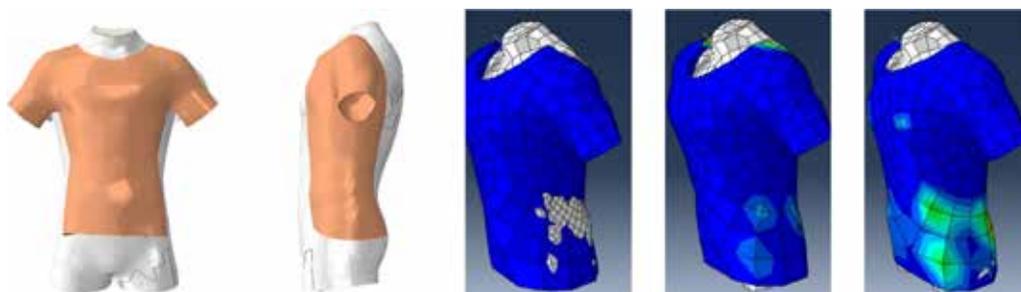


図5 シャツをマネキンに対して一回り小さいサイズ (左) にして伸長させてから着用 (右)

糸がゴム弾性体であると仮定し(1)式から求めた解析値との比較を図6に示す。図7は糸同志の摩擦係数が1.0の場合のCAE解析による未変形の状態(グレー)と均等二軸伸長ひずみ変形状態を比較した結果である。図8は二軸均等伸長における経糸と緯糸の交差部の変形状態を示す。実測織物では初期に糸のクリンプから生じるたわみの引き伸ばすための力は小さくほとんど応力-ひずみ曲線は線形変形を示し、その後伸長と共に上に凸のカーブを描きながら応力が増大する。一方、CAE解析では糸のクリンプを引き伸ばすことで生じる力のために初期の応力-ひずみ曲線のわずかな立ち上がりが見られ、その後はほぼ線形的に変化し

た後ひずみが6%を超えるとややカーブは上に凸になる。経糸と緯糸が交差部で接触するまではほぼ均質に糸は伸長されていること、接触後は交差部で糸同士が拘束されて、交差間部分間の糸がより伸ばされることで応力-ひずみ曲線の立ち上がりが生じていることがわかった。また図8からは交差部に接触圧縮の大きな力が発生していることがわかった。しかし次のような課題があることも分かった。

図9に示すようにCAE解析では糸同志の摩擦係数が0, 1.0, 10.0の場合を比べると摩擦係数が1.0以上の時の変形挙動の方が明らかに実測に近いことが分かった。ここで用いている摩擦係数

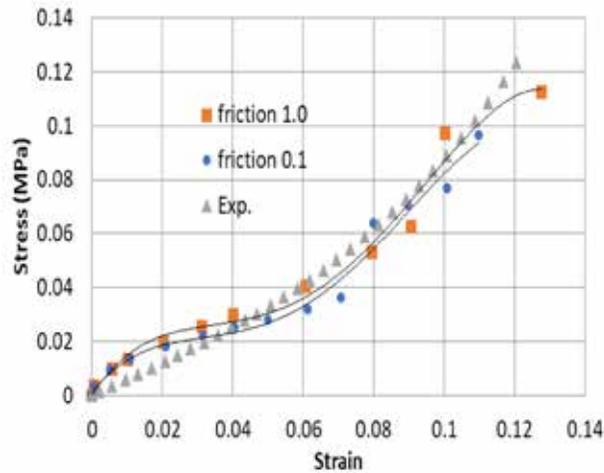
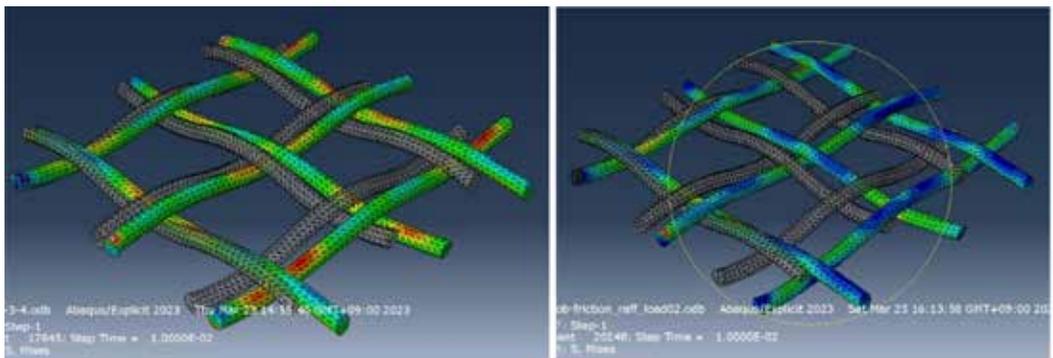


図6 モノフィラメント平織物の均等二軸変形の実測とCAE解析(Cal.)の比較



(a) ひずみ10%

(b) ひずみ20%

図7 CAE解析による変形前(グレー)と変形後の変形状態の比較(摩擦係数1.0)

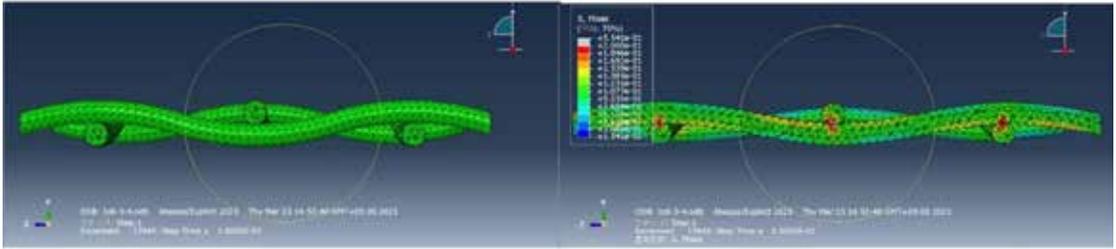


図8 (a) 変形前(左)と10%ひずみ後(右)の経糸と緯糸の交差部の断面全体

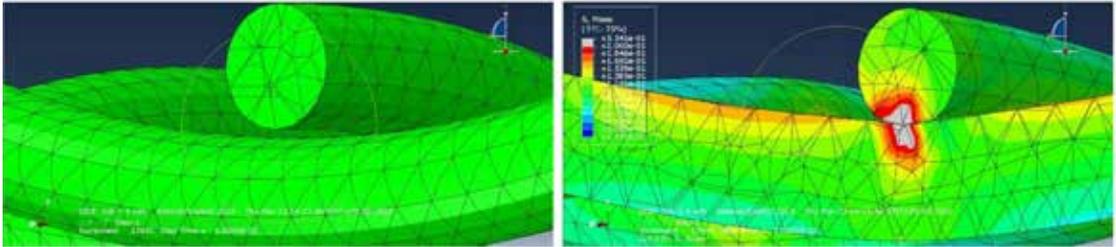
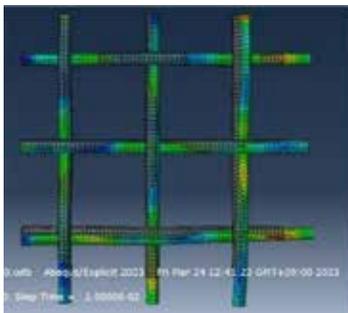
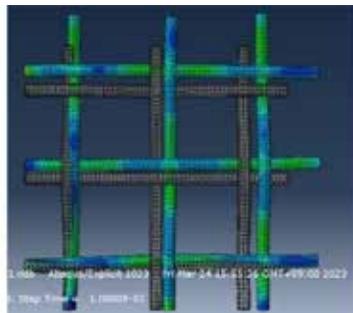


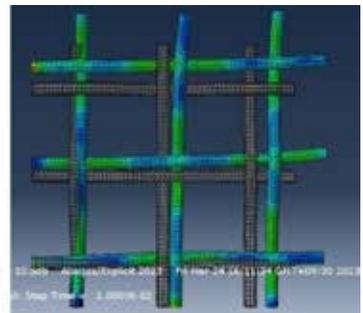
図8 (b) 変形前(左)とひずみ10%後(右)の交差部の拡大(摩擦係数1.0)



(a) 摩擦係数0



(b) 摩擦係数1.0



(c) 摩擦係数 10.0

図9 摩擦係数の違いによる糸の滑りの比較(ひずみ10%)

はKESで測定されるMIUとは直接関連しないので、実際の変形に近い状態の摩擦係数を与えることになる。しかし、糸同志の摩擦係数はフィラメント糸では推測が可能であるが、紡績糸は撚りの程度で大きく異なる。この摩擦係数の推定は糸からだけでは難しい。さらにモノフィラメント糸からなる織物のクリンプはある程度実測可能であることからCADモデルを作ることが可能であったが、紡績糸は糸の太さムラもあり、CADモデルを正確に作製することも必要である。さらに多く

の Apparel 用着衣は紡績糸の編物からなるものも多いため、今後は紡績糸の力学特性、紡績糸の交差による摩擦係数の測定、ループを持つ紡績糸編物のCADモデル化などがさらに必要となることが分かった。図10に示すいくつかの織物や編物のCADデータなどを上手に活用することも有用である。

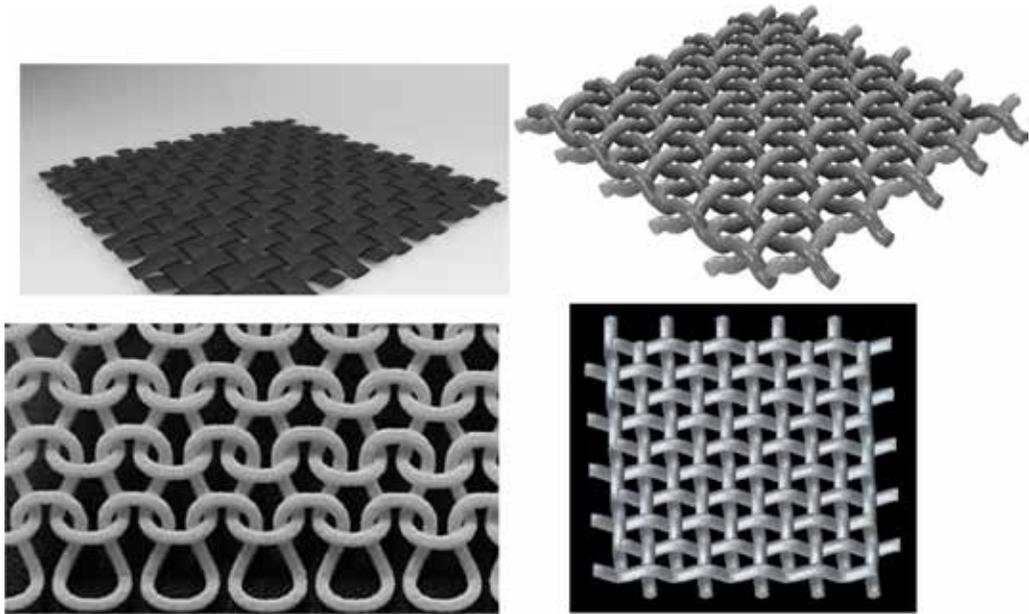


図10 織物や編物のCADモデル<sup>16)</sup>

## 2. 2 着衣の衣服圧とシミュレーションの適合性評価

Tシャツの二軸試験の結果を図11に示す。Tシャツはwale方向が身長方向、course方向が胴体周り方向である。wale/courseが $0^\circ/90^\circ$ になるように切り出した生地ではwale方向はcourse方向よりも引張応力が高いことがわかる。wale/courseに対して $45^\circ/45^\circ$ になるように切り出した生地(図11(b)と(c))からはせん断方向の力学特性の異方向性が小さいことがわかる。ところで実際の着用では一番よく伸びている胸部の前と後ろはcourse方向のひずみが平均して12.0%、wale方向が8.0%であったが、それ以外の部分では伸びはcourse方向が支配的であったので、多くの場合course方向に伸びた状態で着用していると思われる。そこで図11(b)のcourse方向に伸長した場合の均等二軸、一軸拘束二軸、一軸の応力-ひずみ曲線をひずみエネルギー密度関数をシミュレーションに使用した。

それぞれの変形におけるひずみエネルギー密度関数の係数は一軸拘束二軸に一番フィットするよ

うに算出したものである。その特徴としてはwale方向に硬く、course方向は柔らかいことが図11の応力-ひずみ曲線からわかる。この硬さは特に図11(a)の $C_{02}$ の値が他と比べて非常に大きいことに反映される。本研究では係数自体を比較することはまだ不十分であり、今後さらに正確に解析を進めるためにはそれぞれのMooney-Rivlin係数と編構造を関係づけて考察することが必要になる。

図12(a)はマネキンにTシャツを着用させた状態で衣服圧を測定した個所を、図12(b)はそのシミュレーション結果を示す。表1はTシャツの衣服圧の実測とシミュレーションを比較した結果を示す。

実測マネキンと測定した実際のTシャツはCAD-マネキンやCAD-Tシャツではそれぞれサイズが幾分異なるにもかかわらず実測とシミュレーションの誤差は $\pm 15\%$ 程度であり衣服圧が小さいことからこの誤差はある程度実測と解析が一致していると考えられ、Abaqusの非線形解析を用いて編物からなる着衣の衣服圧を推定するこ

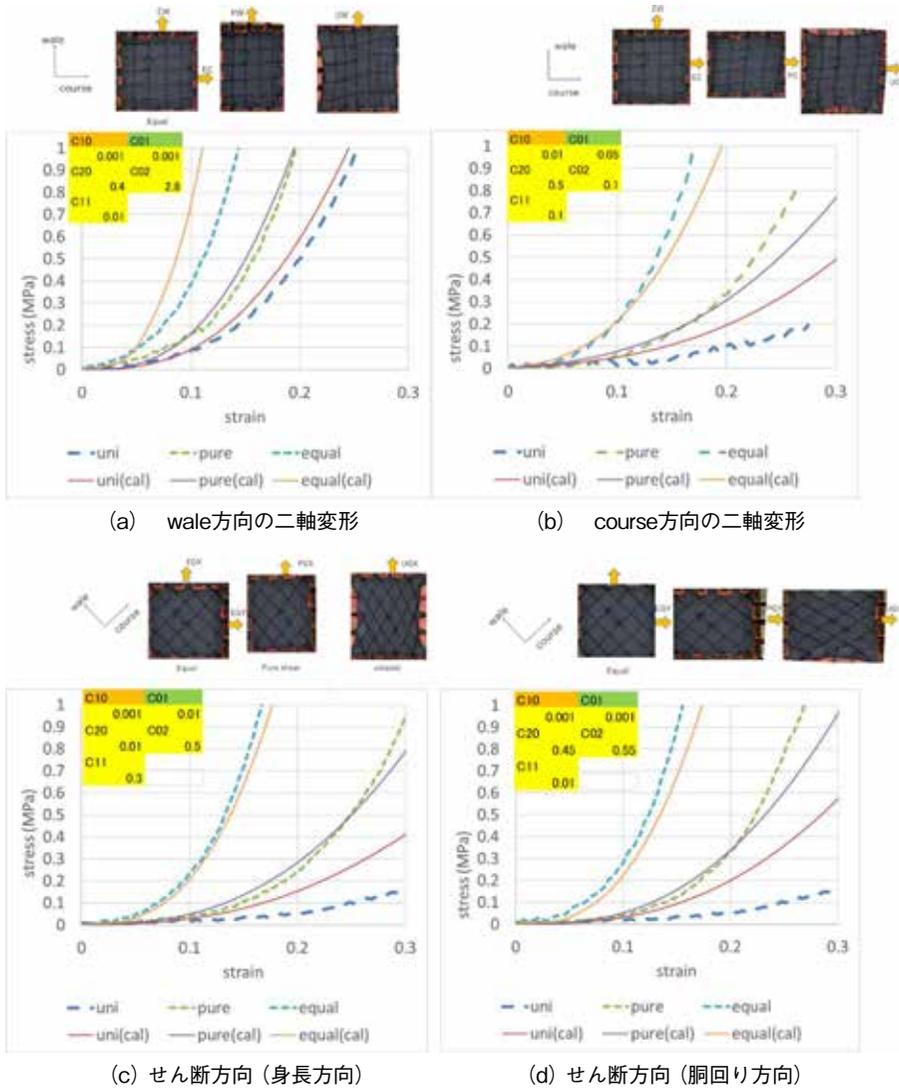


図11 二軸変形の応力-ひずみ曲線とひずみエネルギー密度関数の(1)式の係数



図12 (a) マネキンにTシャツを着用時の衣服圧測定位置 (b) 衣服圧シミュレーション

表1 図12 (a) 位置における衣服圧の実測 (exp) とCAEシミュレーション (cal) の比較

	unit: kPa			unit: kPa	
	cal	exp		cal	exp
①	8.3	10.0	④	2.3	4.0
②	0.0	3.0	⑤	0.0	3.0
③	12.2	8.0	⑥	5.1	6.0

とは可能であると考えられる。一方今後さらに複数の着衣によるシミュレーションを行う必要がある。

### 3. まとめ

ニットのような全等方性に近い素材はゴム材料の解析で確立されたひずみエネルギー密度関数を用いた非線形解析をすることにより、ニット製品の体との密着性、衣服圧の関係を推定する手法としての活用の可能性を示唆することができた。今後は二軸測定から得られたひずみエネルギー密度関数を用いAbaqusなど非線形CAE解析に優れたシミュレーションを行うことで着用時の衣服圧を正確に推定できることが期待される。

### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、多大なご援助をいただいた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く感謝申し上げます。またこれまでアパレルのCAE解析に実績のあるメカニカルデザインの小林卓哉氏から貴重な助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

### 文 献

- 1) Kanai Hiroyuki, Ogawa Kentaro, Sasagawa Tetsu, Shibata Kiyohiro, Kawauchi Kei, Development of Kinematic Soft Dummy and Application on Clothing Pressure Measurement of Men's Suit Pants, *Journal of Fiber Science and Technology*, 77 No.11 Page.274-288 (2021)
- 2) 小澤明裕, 草野拳, 角奈那子, 田川武弘, 衣服シミュレーションを用いたスポーツウェアの伸長変形解析, *Journal of Textile Engineering*, 66 No.4 Page.55-61 (2020)

- 3) 加藤礼菜, 坂下理穂, 諸岡晴美, LIN Shih-ping, SHEN Pei-te, コンプレッション型ランニングタイトの圧力が走行時の筋電図, 心電図および呼吸機能に及ぼす影響, *繊維製品消費科学*, 61 No.5 Page.381-390 (2020)
- 4) Gong Yun-Qi, Mei Shun-Qi, Stretch elasticity and garment pressure of shaping-underwear fabric, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 684 No.1 Page.012010 (6pp) (2019)
- 5) 村崎夕緋, 諸岡晴美, 渡邊敬子, 審美性評価のための三次元計測装置を用いたブラジャー着用時の背部シルエットの定量化, *繊維製品消費科学*, 60 No.3 Page.248-254 (2019)  
加藤礼菜, 坂下理穂, 諸岡晴美, 渡邊敬子, 生体負荷軽減効果からみたコンプレッション型ランニングタイトの設計—筋電図および心電図測定を中心に—, *繊維製品消費科学*, 62 No.2 Page.122-130 (2021)
- 6) SONG Jing, 田村照子, 就寝用着圧ストッキングのむくみ解消効果並びに足先血流に及ぼす影響, *日本衣服学会誌*, 60 No.2 Page.67-73 (2017)
- 7) XU Xianmin, 田村照子, 佐藤真理子, ストレッチ性下衣の静的衣服圧分布・動的衣服圧変動—着衣断面形状, 皮膚伸縮特性及び素材の強伸度特性からの考察—, *繊維製品消費科学*, 58 No.10 Page.823-832 (2017)
- 8) Horiba Yosuke, Amano Takumi, Inui Shigeru, Yamada Takato, Proposal of Method for Estimating Clothing Pressure of Tight-Fitting Garment Made from Highly Elastic Materials: Hybrid Method Using Apparel CAD and Finite Element Analysis Software, *Journal of Fiber Science and Technology*, 77 No.2 Page.76-87 (2021)
- 9) <https://free3d.com/ja/3d-models/> タイトル Free 3D model 閲覧日 2023年7月4日
- 10) 鮑力民, 高寺 政行, 篠原 昭, 一軸伸張による織物の見掛けのポアソン比測定における誤差の評価, *繊維学会誌*, 53, No.1.pp20-26 (1997) <https://doi.org/10.2115/fiber.53.20>
- 11) Sun Yiwan, Sun Yiwan, Cai Lihai, Shao Weiguang,

- Liu Wenyan,” Finite element analysis of biaxial tensile mechanical properties and burst properties of woven fabric for layflat hose, *Polymer Composites*, 43 No.11 Page.8060-8071 (2022) doi: 10.1002/pc.26947
- 12) Stolyarov O., Ershov S.,” Experimental study and finite element analysis of mechanical behavior of plain weave fabric during deformation through a cross-section observation”, *Materials Today Communications*, 31 Page.Null doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103367 (2022)
- Liu Dani, Shakibajahromi Bahareh, Dion Genevieve, Dion Genevieve, Breen David, Breen
- 13) Thompson Adam J., El Said Bassam, Ivanov Dmitry, Belnoue Jonathan P-H., Hallett Stephen R.,” High fidelity modelling of the compression behaviour of 2D woven fabrics”, *International Journal of Solids and Structures*, 154 Page.104-113 (2018) doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.06.027
- 14) David, Kontsos Antonios, “A Computational Approach to Model Interfacial Effects on the Mechanical Behavior of Knitted Textiles”, *Journal of Applied Mechanics*, 85 No.4 Page.Null (2018) doi: 10.1115/1.4039046
- 15) <https://grabcad.com/library/fabric-weave-mesh-1>, HPタイトル GrabCAD Library, 閲覧日 2023.7.14

# スポーツ脳震盪の診断と競技復帰に関わる 唾液中のバイオマーカー探索研究

大阪大学大学院 中 村 洋 平  
(共同研究者) 同 松 本 寿 健  
同 戸 上 由 貴  
大 阪 大 学 奥 崎 大 介  
大阪大学大学院 織 田 順

## Study of Biomarkers in Saliva as Indicators for Diagnosis of Sports Related Concussion and Return to Play

by

Youhei Nakamura, Hisatake Matsumoto,  
Yuki Togami, Jun Oda

*Department of Traumatology and Acute Critical Medicine  
Osaka University Graduate School of Medicine*

Daisuke Okuzaki

*Laboratory of Human Immunology (Single Cell Genomics),  
WPI Immunology Frontier Research Center,  
Osaka University, Osaka, Japan*

### ABSTRACT

Biomarkers as indicators for the diagnosis of sports related concussion have not been established. The purpose of this study was to analyze saliva samples from student American football players for microRNA and protein expression before and after concussion injury and during recovery, and to identify biomarkers in saliva as indicators of concussion diagnosis and recovery.

Six samples were analyzed before concussion (Pre), nine samples during concussion (Post), and three samples during concussion recovery (Rec). MicroRNA extraction and protein mass spectrometry were performed on these samples to analyze and identify biomarkers whose expression changed at each phase. The results showed that the expression of SPRR1A (small proline-rich repeat protein1A) protein, which is considered to be related to nerve regeneration, increased significantly from Pre to Post and decreased from Post to Rec, suggesting that it may be a biomarker in saliva in sports related concussion.

#### キーワード

スポーツ脳震盪, 唾液, 競技復帰, バイオマーカー, プロテオーム解析

#### Keyword

Sport related concussion, Saliva, Return to play, Biomarker, Proteome analysis

## 要 旨

スポーツ脳震盪の診断の指標となるバイオマーカーは確立されていない。本研究の目的は、学生アメリカンフットボール部の選手を対象に、侵襲無く採取可能な唾液検体を用いて、脳震盪受傷前後および脳震盪からの回復時のmicroRNAおよび蛋白発現を解析し、脳震盪の診断および回復の指標となる唾液中のバイオマーカーを探索することである。

解析対象となったのは、脳震盪受傷前(Pre)の6検体、脳震盪受傷後(Post)の9検体、脳震盪回復後(Rec)の3検体であった。これらの検体からmicroRNAの抽出および蛋白質量分析により、Pre→Post→Recの各段階で発現の変化するバイオマーカーを解析し同定した。解析の結果、神経再生に関係するとされるSPRR1A (Small proline-rich repeat protein1A) 蛋白が、Pre→Postで有意に発現が増加し、Post→Recで発現が低下する傾向にあり、スポーツ脳震盪における唾液中のバイオマーカーになる可能性が示唆された。

## 緒 言

スポーツに関連する脳震盪 (Sports Related Concussion: SRC) は、セカンドインパクト症候群や慢性外傷性脳症といった重篤な後遺症を引き起こす可能性があり、サッカーやラグビー、アメリカンフットボールといったコンタクトスポーツ分野で特に注目されている。しかし、SRCを正確に診断することは難しく、頭部CTやMRI検査でも異常所見を認めないため、自覚症状や他覚的な神経所見、認知機能の評価に依存している。実際、スポーツの現場では「国際スポーツ脳震盪会議」が提供している、SCAT (Sports Concussion Assessment Tool) やCRT (Concussion Recognition Tool) といった脳震盪評価のツールや、Cog Sport, ImPACTといったコンピューターによる認知機能測定検査を行い総合的に診断されている<sup>1-4)</sup>。

一方で、血液や尿、唾液などの生体材料から得られるバイオマーカーによる診断手法は確立されておらず、このようなバイオマーカー検査の確立はスポーツ頭部外傷領域での重要な課題である。

また、SRCでは脳震盪から回復し、競技復帰が可能と判断するための指標についても課題がある。現状では、各競技団体やチーム毎に段階的競技復帰プロトコル (Graduated Return to Play : GRTP) を作成し、選手の自覚症状を基に競技へ復帰しているため、脳震盪状態から改善しないままプレーに復帰してしまうリスクを伴う。脳震盪からの回復していることを正確に評価出来るバイオマーカー検査の確立も、脳震盪の診断と同様に重要である。

大阪大学大学院医学系研究科救急医学教室では高度救命救急センターへ搬送される重症患者の血液や尿中の蛋白やRNAの網羅的解析を行い、バイオマーカーの探索を行ってきた (急性期ゲノムプロジェクト <http://www.osaka-u-tacc.com/occonomix/index.html>)。本研究は、スポーツのフィールドにおいて簡便かつ無侵襲に採取可能である唾液検体に注目し、脳震盪に関連するバイオマーカーを、我々が持つ網羅的蛋白、RNA解析の手法を用いて探索するものである。

## 1. 研究方法

研究対象は関西学生アメリカンフットボール

連盟Division1に所属する関西学院大学アメリカンフットボール部ファイターズ (以下ファイターズ) の選手の中で、研究の参加に同意を得た選手である。唾液検体の採取方法について、図1に示す。2022年4月のシーズン開幕前に、脳震盪発症前検体 (コントロール検体) を採取した。さらに、2022年4月-2023年5月の間に脳震盪を生じた選手の唾液を、脳震盪と判断後24時間以内と脳震盪から回復したと判断された時点において各々採取した。唾液検体は保存液であるRNA later1mlに唾液1mlの採取量とし、唾液採取用の専用キットを用いて採取を行なった。RNA laterはRNAの解析およびタンパク質量分析にも対応した保存液であり、常温では1週間まで保存可能で、液化窒素中のsnap-freezingと同等とされる<sup>5,6)</sup>。採取した唾液検体は永久保存可能な-30℃の冷凍庫内で保存した。

### 1. 1 網羅的miRNA分析

唾液検体からのRNA抽出については、exoRNeasy Midi kitおよびQIAzol Lysis Reagent (いずれもQiagen社,オランダ) を用いて抽出し、バイオアナライザー 2100での質的評価を行なっ



図1 唾液検体の採取方法

1mlの保存液 (RNA later) に対して1mlの唾液を採取した。採取は関西学院大学アメリカンフットボール部ファイターズのチームスタッフにより行われた。採取後は速やかに-30℃で冷凍保存を行った。

た。

### 1. 2 網羅的蛋白質質量分析

RNA later Bufferで保存した唾液検体から蛋白質質量分析を行った。蛋白質の同定には、Swiss Prot\_all species, humanのデータベースでMascot検索を行った。

### 1. 3 質量分析結果の解析

脳震盪受傷前 (Pre), 受傷後 (Post), 脳震盪から回復後 (Rec) の3群の測定結果を解析対象とした。解析はRを用いて行なった。

発現量の少ない蛋白質は除外し、少なくとも7つのサンプルでcounts-per-millionが0.5以上の蛋白質のみを解析対象とした。limma-voom法によりデータの正規化を行い、Fold Changeの絶対値が2以上で、p値が0.05以下のものを有意に変動した蛋白質と定義した。

PreとPostおよび、PostとRecの比較を行なった。2群間での蛋白質発現解析の結果から、脳震盪後に発現がup-regulationし、脳震盪から回復時には再度発現がdown-regulationするような蛋白質の候補を検索した。

### 1. 4 脳震盪の判断と診断, 脳震盪からの回復の判断

脳震盪の判断については、国際スポーツ脳震盪会議の共同声明<sup>1,7)</sup>によるCRT5 (Concussion Recognition Tool 5)<sup>8)</sup> および SCAT5 (Sports Concussion Assessment Tool 5)<sup>9)</sup> に基づいて脳震盪の判断を下し、医療機関により脳震盪の診断が行われた (図2)。

脳震盪からの回復の判断については、公益社団法人日本アメリカンフットボール協会の段階的競技復帰 (GRTP) プログラムに基づいて行われた (図3)

ファイターズでは、シーズン開幕前にSCAT5のベースラインデータを測定することで、より正確な脳震盪の判断を行っている。

## 2. 研究結果

### 2. 1 採取検体

脳震盪前の唾液検体 (コントロール検体) を採取できた選手数は計104選手、104検

体であった。脳震盪を生じた選手からの採取できた唾液検体は8選手から合計9検体 (Post1-9) であった。この9検体の中で、脳震盪前のコント

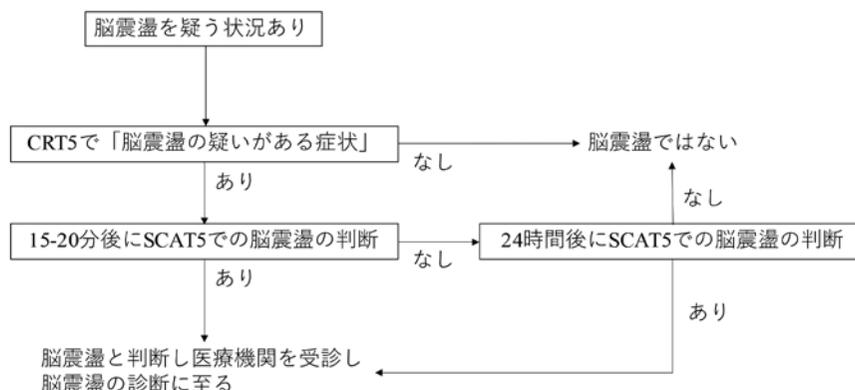


図2 脳震盪の判断と診断

脳震盪の判断はトレーナーやディレクター、メディカルスタッフがCRT5およびSCAT5を使用して行った。脳震盪と判断されれば速やかに競技から離脱し、医療機関を受診し最終的な脳震盪の診断に至る。

ステップ	許可される運動	例	条件
<b>受 傷 日</b>			
1	一般的な日常生活動作	通常の日常生活動作による症状の有無を確認 (例:ウォーキングなど)	最低24時間以上 無症状
2a	軽度の有酸素運動	ウォーキング・バイク・トレッドミル・水泳など (最大心拍数*55%未満)	最低24時間以上 無症状
2b	中等度の有酸素運動	ウォーキング・バイク・トレッドミル・水泳など (最大心拍数*70%未満)	最低24時間以上 無症状
3	アメリカンフットボールに関連した個人で出来る運動	個人練習:アジリティドリル/ステップドリル/スローイングドリル/キャッチドリルなど	最低24時間以上 無症状
<b>ステップ4に入る前に医師によるメディカルチェックを推奨</b>			
4	接触プレーのない練習	ユニット練習:ハンドオフドリル/パススケルトン/バシュートドリルなど	最低24時間以上 無症状
5	接触プレーを含む練習	接触プレー:ブロックやタックルドリル/スクリメージなど(※複数回目的の脳振盪では、特にキッキングゲームへの参加は回避することを検討)	最低24時間以上 無症状
6	競技復帰	試合復帰	-

\* 最大心拍数=208 - 0.7 × 年齢 (例) 20歳の選手の場合: 208 - 0.7 × 20=194

図3 公益社団法人日本アメリカンフットボール協会の段階的競技復帰 (GRTP) プロトコール  
各ステージの間は24時間以上の期間を確保し、症状の再発が無いことを確認する。

ロール検体が採取できていたのは6検体 (Pre1-6) であった。また、脳震盪から回復した選手の唾液検体を3選手、3検体 (Rec1-3) 採取した。

## 2. 2 microRNA 分析

脳震盪発症前の5検体と脳震盪発症後の5検体のRNAの抽出結果について、バイオアナライザー2100によるRNAの評価結果を図4に示す。抽出されたRNAの評価の指数であるRNA integrity number equivalent (RINe) はPost1の1検体のみ5.3と評価されたが、その他の検体は抽出されたRNA量が少なく測定範囲外であった。このため、今回採取した唾液検体からのmicroRNA測定は不可能であった。

## 2. 3 網羅的蛋白質質量分析

抽出された蛋白質は595であった。この中で、発現量の少ない蛋白質は除外し472の蛋白質を解析対象とした。Pre, Post, Recの3群におけるTotal read countsは均一であり、Multidimensional Scaling (MDS) においては、いずれの3群もク

ラスターは形成せず、分布は散在しており、特徴的な蛋白発現の傾向は認めなかった (図5,6)。Pre-Post間およびPost-Rec間での発現遺伝子解析 (Differential Expressed Genes:DEGs) の結果についてのvolcano plotを図7,8に示す。脳震盪後 (Post) の唾液検体では脳震盪前 (Pre) の唾液検体に比べ、12の蛋白発現がup-regulationし、2つの蛋白発現がdown-regulationしていた。脳震盪回復後 (Rec) の唾液検体では脳震盪後 (Post) の唾液検体に比べ、2つの蛋白発現がdown-regulationしていた。さらに、脳震盪後にup-regulationし、脳震盪回復時にdown-regulationしている蛋白発現を解析したところ、SPRR1A (Small proline-rich repeat protein1A) 蛋白が候補蛋白であった (図9)。SPRR1A蛋白はPreからPostにおいては有意に発現がup-regulationしており、PostからRecにおいて、有意ではないがdown-regulationの傾向を認めた (図8,9)。

## 3. 考 察

2022年10月にアムステルダムで開催された

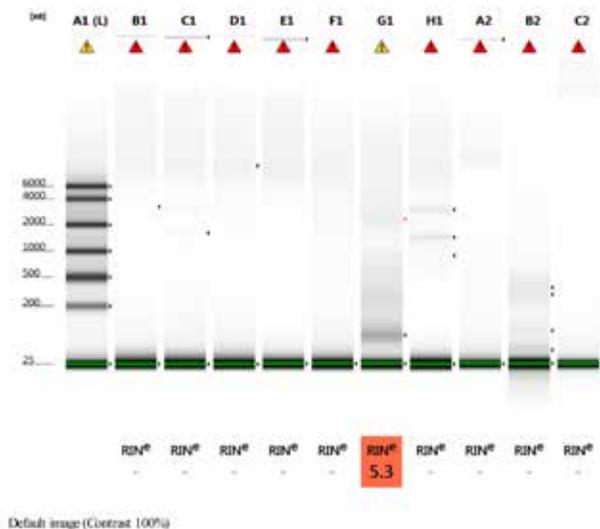


図4 バイオアナライザー2100でのmicroRNAの質の評価

RINは1検体で5.3, それ以外は測定範囲外であり, microRNAの解析は困難であった. 一般的に, RNA抽出の質を担保するためには, RINは6以上が必要とされる.

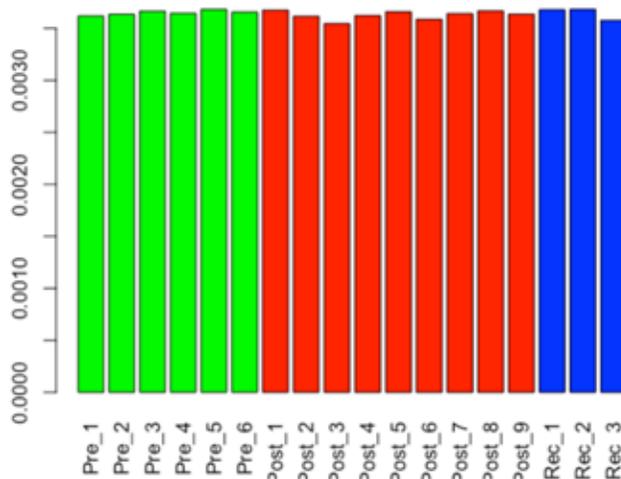


図5 Total read counts

Tota read countsは転写産物の断片数を表す. 各群でのリード数に大きな差は認めなかった.

第6回国際スポーツ脳震盪会議による consensus statement では, 体液を用いたバイオマーカーや遺伝子検査はまだ研究段階であり, 臨床現場での使用には適さないという位置付けである<sup>10)</sup>.

本研究では, スポーツ脳震盪を生じた学生アメリカンフットボール選手を対象に, 脳震盪発症前後の唾液中のバイオマーカーの探索を網羅的に行なった. ターゲットとしたバイオマーカーは miRNA とタンパク質であった. 脳震盪を含む軽

症頭部外傷におけるバイオマーカー研究の対象として唾液は近年注目されてきた<sup>11)</sup>. Di pietro らは, ラグビー選手を対象に, 脳震盪を起こした選手と起こさなかった選手の唾液検体を解析し, 5つの microRNA が脳震盪を起こした選手において up-regulate されていることを報告した<sup>12)</sup>. さらに, 同グループは, microRNA を含む14の唾液中の small non-coding RNA の組み合わせが, 英国のラグビーのプロ選手に生じる脳震盪の診断に有用

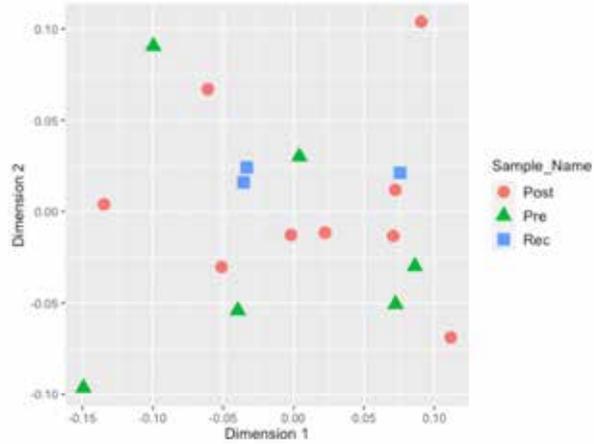


図6 Multidimensional scaling

Pre,Post,Recの各群の発現蛋白の分布は散在しており、特定のクラスターを形成するなどの特徴は認めなかった。

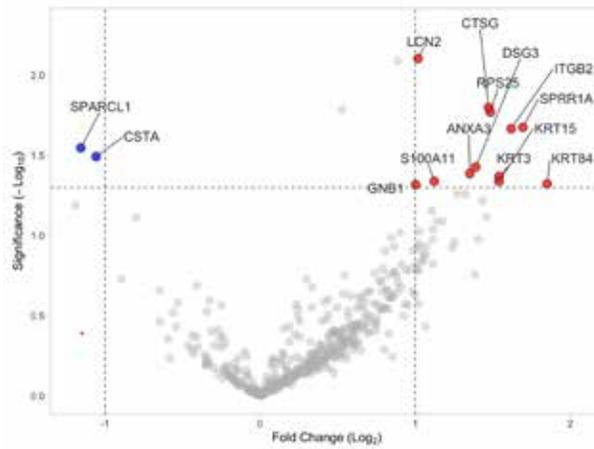


図7 Volcano plot (Pre vs Post)

脳震盪後 (Post) の唾液検体では脳震盪前 (Pre) の唾液検体に比べ、12の蛋白発現 (赤丸) がup-regulationし、2つの蛋白発現 (青丸) がdown-regulationしていた。

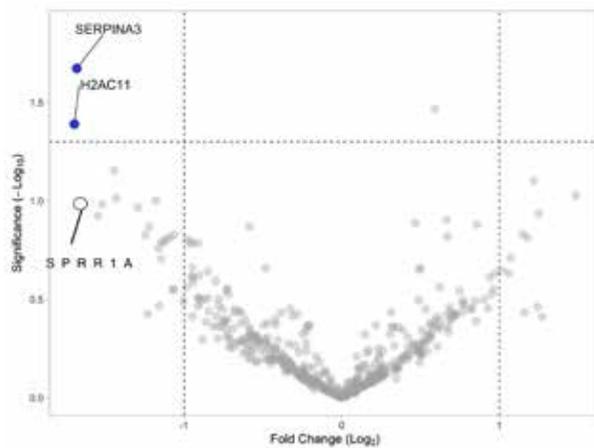


図8 Volcano plot (Post vs Rec)

脳震盪回復後 (Rec) の唾液検体では脳震盪後 (Post) の唾液検体に比べ、2つの蛋白発現 (青丸) がdown-regulationしていた。SPRR1Aに関して有意差はないが、down-regulationの傾向にあった。

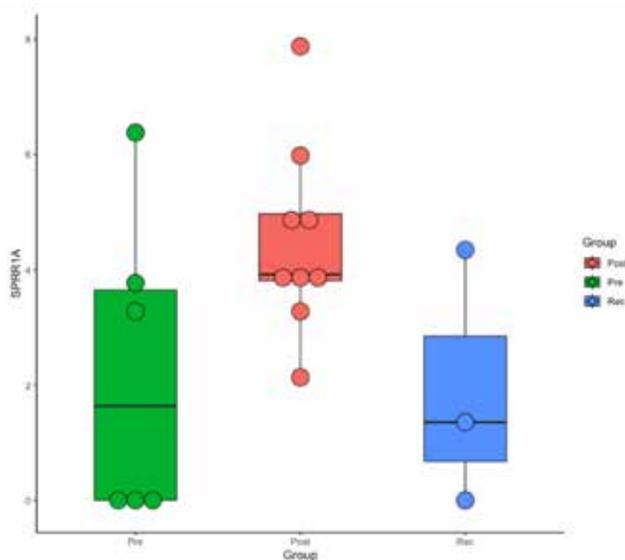


図9 Pre,Post,RecでのSPRR1A蛋白発現  
SPRR1A蛋白発現はPre→Postで有意に増大し, Recでは発現の低下傾向が認められた.

であることを, 前向き研究によって報告している<sup>13)</sup>. 一方, 頭部外傷領域において, 蛋白発現の解析は血液や尿を中心に行われてきた<sup>14-17)</sup>. 例えば脳震盪や軽症頭部外傷患者の血液中で上昇することが知られている蛋白として, 細胞内カルシウム濃度調整機能に関わる S100B 蛋白や中枢神経の軸索における構造蛋白である NFL 蛋白があるが, 唾液検体における有用性は示されていない<sup>18)</sup>. これらの先行研究はいずれも欧米からの報告が主であり, 国内からの報告はない. 人種や性差, 年齢などが影響する遺伝子発現解析において, 国内の学生スポーツ選手を対象とした検討は意義が高いと考え, 本研究を行うに至った.

検体の採取に関しては, 関西学院大学アメリカンフットボール部の選手ならびにスタッフの協力のもとに, プロトコール通りの採取が可能であった. 解析の第一段階として, microRNA の抽出と解析を行ったが, 図4のように RINe が低く, 解析が困難であった. 抽出された RNA の評価の指数である RINe は, 1-10 段階で抽出された RNA の質を評価し, 6 以上が必要である. 今回の唾液検体では, 含まれる RNA 量が少なかったことが

RINe 低値の原因と考えられた. 次に述べる蛋白解析では, 蛋白の抽出が充分可能であったことを鑑みると, 唾液検体の用量不足ではなく, 保存中に microRNA の分解が進んだことが主な原因と考えられる.

今回, 唾液検体の保存に使用した RNAlater™ は, 常温 (25℃) で 7 日間, -20℃ で無期限の唾液検体保存が可能である. 唾液の保存については採取後 1 週間以内に -30℃ の冷凍庫への保管としていたが, 常温期間での保存期間中に RNA の分解が進んだ可能性がある. 今後, 唾液の保存については, より厳密・迅速に冷凍保存を行う必要がある.

解析の第二段階として, 網羅的な蛋白発現の解析を行った. Post 検体において発現が上昇し, Rec 検体において発現が再度低下するような蛋白質が, 脳震盪診断および回復の判断におけるバイオマーカー候補になりうると思った. 候補となった SPRR1A 蛋白は, 上皮分化に関わる遺伝子群の 1 つであり, 通常の神経細胞では検出されないが, 軸索切断時の神経細胞において発現することが報告されており<sup>19)</sup>, 損傷を受けた神経細胞の再生

に関わるバイオマーカーとして、頭部外傷動物モデルにおいて大脳皮質や海馬で重要な役割を担っている可能性がある<sup>20,21)</sup>。

本研究においても、SPRR1Aは脳震盪発症後に有意に上昇し、脳震盪回復時には減少する傾向が認められており、今後ELISA法での再現性の検証にて脳震盪のバイオマーカーとしての有用性を評価することが重要であると考えられる。

#### 4. 結 語

学生アメリカンフットボール選手を対象として、脳震盪の診断および回復の指標となる唾液中のバイオマーカー探索を行った。候補となったバイオマーカーは神経損傷時の神経細胞に再生に関わるとされるSPRR1A蛋白であった。今後、検証コホートやELISA法による解析を追加することで、スポーツ脳震盪におけるバイオマーカーとしての有用性を確認することが必要である。

#### 謝 辞

本研究を行うに際し、唾液検体の採取に協力頂き、スポーツ脳震盪の現場における諸問題について多くの助言を頂きました関西学院大学アメリカンフットボール部ファイターズの部員と保護者の皆様、メディカルスタッフの皆様、トレーナーの小山智士先生、ディレクターの小野宏先生に感謝を申し上げます。

microRNAの抽出については、大阪大学免疫学フロンティア研究センターの石川昌和先生に協力頂きました。蛋白質量分析については、大阪大学微生物研究所の二宮彰紀先生にご協力頂きました。深く感謝申し上げます。

解析に協力頂いた吉村恂平先生、大西伸也先生、小倉裕司先生をはじめとする大阪大学救急医学教室の皆様にも感謝申し上げます。

最後に、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

科学振興財団および関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) McCrory P., Meeuwisse W., Dvorak J., et al., Consensus statement on concussion in sport-the 5 (th) international conference on concussion in sport held in Berlin, October, *Br. J. Sports Med.*, 2017;51:838-847(2016)
- 2) Goodwin G.J., John S.E., Donohue B., et al., Changes in ImpACT Cognitive Subtest Networks Following Sport-Related Concussion. *Brain Sci.*, 13 (2023)
- 3) Schatz P., Long-term test-retest reliability of baseline cognitive assessments using ImpACT. *Am. J. Sports Med.*, 38:47-53(2010)
- 4) Makdissi M., Collie A., Maruff P., et al., Computerised cognitive assessment of concussed Australian Rules footballers. *Br. J. Sports Med.*, 35:354-360(2001)
- 5) Kohl C., Wegener M., Nitsche A., Kurth A., Use of RNALater ((R)) Preservation for Virome Sequencing in Outbreak Settings. *Front Microbiol.*, 8:1888(2017)
- 6) Mutter G.L., Zahrieh D., Liu C., et al., Comparison of frozen and RNALater solid tissue storage methods for use in RNA expression microarrays. *BMC Genomics*, 5:88(2004)
- 7) Meeuwisse W.H., Schneider K.J., Dvorak J., et al., The Berlin 2016 process: a summary of methodology for the 5th International Consensus Conference on Concussion in Sport. *Br. J. Sports Med.*, 51:873-876(2017)
- 8) Echemendia R.J., Meeuwisse W., McCrory P., et al., The Concussion Recognition Tool 5th Edition (CRT5) : Background and rationale. *Br. J. Sports Med.*, 51:870-871(2017)
- 9) Echemendia R.J., Meeuwisse W., McCrory P., et al., The Sport Concussion Assessment Tool 5th Edition (SCAT5) : Background and rationale. *Br. J. Sports Med.*, 51:848-850(2017)
- 10) Patricios J.S., Schneider K.J., Dvorak J., et al., Consensus statement on concussion in sport: the 6th International Conference on Concussion in Sport-Amsterdam, October 2022. *Br. J. Sports Med.*, 57:695-711(2023)

- 11) Hicks S.D., Johnson J., Carney M.C., et al., Overlapping MicroRNA Expression in Saliva and Cerebrospinal Fluid Accurately Identifies Pediatric Traumatic Brain Injury. *J. Neurotrauma*, 35:64-72 (2018)
- 12) Di Pietro V., Porto E., Ragusa M., et al., Salivary MicroRNAs: Diagnostic Markers of Mild Traumatic Brain Injury in Contact-Sport. *Front Mol. Neurosci.*, 11:290 (2018)
- 13) Di Pietro V., O'Halloran P., Watson C.N., et al., Unique diagnostic signatures of concussion in the saliva of male athletes: the Study of Concussion in Rugby Union through MicroRNAs (SCRUM) . *Br. J. Sports Med.*, 55:1395-1404 (2021)
- 14) Daisy C.C., Varinos S., Howell D.R., et al., Proteomic Discovery of Noninvasive Biomarkers Associated With Sport-Related Concussions. *Neurology*, 98:e186-e198 (2022)
- 15) Vorn R., Mithani S., Devoto C., et al., Proteomic Profiling of Plasma Biomarkers Associated With Return to Sport Following Concussion: Findings From the NCAA and Department of Defense CARE Consortium. *Front Neurol*, 13:901238 (2022)
- 16) Anto-Ocrah M., Jones C.M.C., Diacovo D., Bazarian J.J., Blood-Based Biomarkers for the Identification of Sports-Related Concussion. *Neurol. Clin.*, 35:473-485 (2017)
- 17) Papa L., Ramia M.M., Edwards D., Johnson B.D., Slobounov S.M., Systematic review of clinical studies examining biomarkers of brain injury in athletes after sports-related concussion. *J. Neurotrauma*, 32:661-673 (2015)
- 18) Monroe D.C., Thomas E.A., Cecchi N.J., Granger D.A., Hicks J.W., Small S.L., Salivary S100 calcium-binding protein beta (S100B) and neurofilament light (NfL) after acute exposure to repeated head impacts in collegiate water polo players. *Sci. Rep.*, 12:3439 (2022)
- 19) Bonilla I.E., Tanabe K., Strittmatter S.M., Small proline-rich repeat protein 1A is expressed by axotomized neurons and promotes axonal outgrowth. *J. Neurosci.*, 22:1303-1315 (2002)
- 20) Marklund N., Fulp C.T., Shimizu S., et al., Selective temporal and regional alterations of Nogo-A and small proline-rich repeat protein 1A (SPRR1A) but not Nogo-66 receptor (NgR) occur following traumatic brain injury in the rat. *Exp. Neurol.*, 197:70-83 (2006)
- 21) Starkey M.L., Davies M., Yip P.K., et al., Expression of the regeneration-associated protein SPRR1A in primary sensory neurons and spinal cord of the adult mouse following peripheral and central injury. *J. Comp. Neurol.*, 513:51-68 (2009)

# 膝関節伸展位固定を用いた運動連鎖の遮断による 慢性足関節不安定症の新たな評価手法の開発

新潟医療福祉大学 菊 元 孝 則  
(共同研究者) 同 高 林 知 也  
同 久 保 雅 義

## Development of a New Evaluation Method for Chronic Ankle Instability by Blocking the Kinetic Chain Using Knee-Extension Immobilization

by

Takanori Kikumoto, Tomoya Takabayashi, Masayoshi Kubo  
*Niigata University of Health and Welfare,  
Institute for Human Movement and Medical Sciences*

### ABSTRACT

The purpose of this study was to observe the postural control strategy during the single-leg standing posture with knee joint extension fixation and clarify the pathogenesis of chronic ankle instability (CAI) specific to the ankle joint, which is obscured by the postural control governed by the hip joint. The subjects consisted of male basketball players, including 15 healthy individuals with no history of ankle sprain and 15 subjects with CAI. They maintained a double-leg standing posture for 10 seconds, followed by a single-leg standing posture for 20 seconds. In addition to comparing the healthy group and the CAI group, comparisons were made between the two groups with and without knee bracing to immobilize the knee joint in the extended position. The CAI group exhibited significantly higher center of pressure acceleration during the transition from bipedal to single-leg standing due to knee joint immobilization, suggesting a substantial contribution of the hip and ankle joint kinetic

chain to the CAI group's ability to maintain the single-leg standing posture. The results revealed ankle dysfunction masked by the hip strategy, which could not be confirmed through previous examination of CAI pathology.

#### キーワード

慢性足関節不安定症, 足圧中心, 姿勢制御能力, 足関節戦略, 関節機能障害

#### Keyword

Chronic ankle instability, Center of pressure, postural control ability, joint strategy, joint dysfunction

## 要 旨

本研究は、膝関節の伸展位固定における片脚立位の姿勢制御戦略を観察し、股関節からコントロールされる姿勢制御にマスクされている、足関節に特化した慢性足関節不安定症 (CAI) の病態を明らかにすることを目的とした。対象は男性バスケットボール選手で、足関節捻挫の既往歴を有さない健常群15名、CAIを発症した15名とした。対象者は両脚立位姿勢保持を10秒間、その後片脚立位姿勢保持を20秒間行い、健常群とCAI群の比較検証に加え、膝装具の着用による膝関節伸展位固定の有無による条件間の比較検証を行った。CAI群では膝関節の伸展位固定により、両脚立位から片脚立位への移乗時において足圧中心加速度が有意に高値を示した。CAI群は片脚立位での姿勢を維持するため、股関節と足関節の運動連鎖の寄与が大きかった可能性が高い。これまでのCAIの病理学的検査では確認が不可能であった、股関節戦略によってマスクされた足関節の機能障害が明らかになった。

## 緒 言

足関節内反捻挫は、スポーツ活動中に頻回する損傷であり<sup>1)</sup>、多額の医療費<sup>2)</sup>と長期的な影響<sup>3)</sup>をもたらす。足関節内反捻挫を繰り返してしまう

ことで、慢性足関節不安定症 (CAI) を発症する<sup>4)</sup>。CAIは足関節の機能的不安定性や自覚的不安定感を有し、足関節捻挫の再発歴があることと、IAC (International Ankle Consortium) が定義付けている<sup>5)</sup>。CAIは、足関節底屈筋力の低下や動的バランス能力の低下などの機能障害を引き起こし<sup>6)</sup>、その結果、競技パフォーマンスにも影響を及ぼす可能性が高い。上記の機能障害の中でも足関節内反捻挫後の姿勢制御能力の低下は、繰り返しの足関節内反捻挫を誘発するCAIへのパスウェイとなり得る。CAIを発症する前段階で足関節捻挫の再発リスクが高い人を特定し、適切なりハビリテーションを処方するための姿勢制御能力の評価を行うことが重要である。

姿勢制御能力とは、あらゆる直立姿勢でバランス状態を維持、達成、回復する能力として定義される<sup>7)</sup>。先行研究では、立位姿勢制御の不安定性の変化が、CAIのような足関節内反捻挫再発のリスクが高い人を特定する手がかりになる可能性が示唆されている。例えば、足関節捻挫のリスクが高い人は、立位での足圧中心 (COP) 変位が高値を示すことが報告されており<sup>8)</sup>、繰り返す足関節捻挫はCAIの要因となる。さらに、CAI群では健常群に比して、片脚立位課題での姿勢制御能力の低下が報告されている<sup>9)</sup>。しかしながら、COP変数の変化のみでは、片脚立位姿勢制御に対する足

関節不安定性の関与を選択的に捉えることは困難である。その理由として、片脚姿勢制御におけるCOPの変数は、複数の関節戦略の結果として変化することが考えられるからである。健常若年成人は足関節戦略を主に姿勢制御を行うとの報告がある<sup>9,10)</sup>が、CAI群では股関節戦略を主に行っていることが報告されている<sup>9)</sup>。以上の点からも、姿勢制御時のCOPの変数を、各関節での運動戦略の変化と共に評価を行う必要がある<sup>11)</sup>。そこで本研究は、下肢関節での姿勢制御能力を評価するのではなく、足関節単独の評価手法を開発することを目的とする。

一般的な姿勢制御能力の評価に用いられる片脚立位は、股関節と足関節の戦略があると考えられており、どちらか一方のみの戦略ではなく協働して姿勢制御が行われている。つまり、膝関節を屈曲させた片脚立位姿勢保持における足関節の姿勢制御能力は、股関節との運動連鎖によってマスクされるため、観察が困難であることが示唆される<sup>12)</sup>。この問題を克服するため、膝関節伸展位で固定した片脚立位での姿勢制御能力を評価する必要がある。この評価方法においては、股関節との運動連鎖により隠された足関節の不安定性が、より顕著に捉えられることが想像され、再受傷リスクの高い人を特定するためのスクリーニング指標となると考えられる。本評価により、足関節の不安定性に対する効果的なりハビリテーションプログラムを開発するための貴重な知見を提供すると共に、CAIの病態生理をより深く理解することで、足関節捻挫による再受傷のリスクが高い人を特定するために必要である効果的な評価方法を開発することが可能となる。

## 1. 研究方法

### 1.1 対象

関節弛緩性や月経周期などの影響を考慮し、下肢に手術歴を有さない、新潟県バスケットボール

協会に所属する男子選手を対象とした。足関節内反捻挫の既往を有さない15名(年齢 $19.8 \pm 1.6$ 歳、身長 $176.3 \pm 5.3$ cm、体重 $72.9 \pm 9.4$ kg)を健常群とし、IACの選定基準により選定されたCAIを発症した15名(年齢 $20.1 \pm 1.8$ 歳、身長 $178.8 \pm 9.3$ cm、体重 $74.8 \pm 10.9$ kg)をCAI群とした。IACの選定基準とは、少なくとも1回以上の足関節捻挫歴を有し、足関節の機能的不安定性や捻挫の再発、不安定性の既往を有することである。また、IACが推奨する足関節不安定性に関するアンケート調査法のうち2種類を使用し、両アンケート調査の包含基準に含まれた足関節を、不安定性が有する足関節と定義した。アンケート調査法と包含基準は、Cumberland Ankle Instability Toolでは24点以下、Identification of Functional Ankle Instabilityでは11点以上の選手とした。対象者には事前に口頭及び書面にて研究内容に関する十分な説明を行い、同意を得た上で実施した。なお、本研究は所属機関の倫理審査委員会の承認を得たうえで実施した。

### 1.2 実験手順

Footscan7足底圧計測システム(rs scan社)上での片脚立位を課題試技とした。閉眼による10秒間の両脚立位姿勢の保持直後、CAI群はCAI側、健常群は左側による20秒間の片脚立位姿勢の保持(図1)を行い、姿勢制御時のCOPの移動距離を前後方向と左右方向で算出した(図2)。加えて、両脚立位から片脚立位への移乗時におけるCOPの加速度の算出も行った。計測開始前に5分程度の練習を行い、その際、片脚立位時の再現性を高めるため、片脚立ち保持時の股関節屈曲角度を30度、膝関節屈曲角度を45~50度に統一するため、ゴニオメーターで計測し、対象者へのフィードバックを行った。Balance Error Scoring Systemの基準を採用し、腰部を保持していた手が離れた等のエラーが認められた場合は失敗試技とした。ま

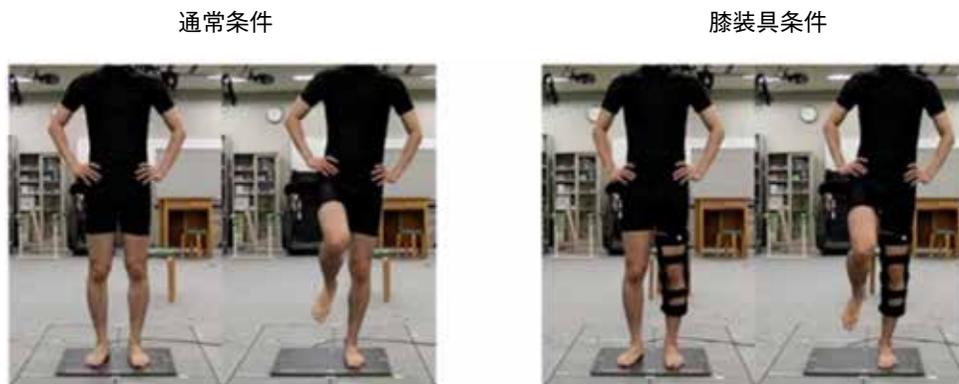


図1 実験試技

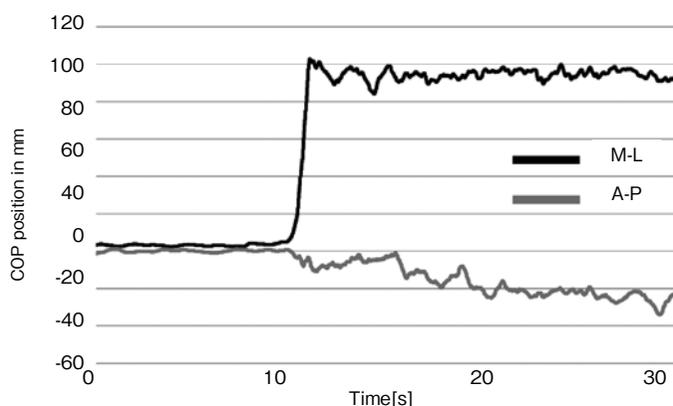


図2 COPデータ

た片脚立位への移乗時，対象者の運動特性による遊脚側の動作の相違を排除するため，骨格モデルによる三次元動作解析システムであるOpenCap<sup>®</sup> (opencap.ai) を用い，各対象者における課題動作の統一を図った。通常時と膝装具 (SecuTec Genu, Bauerfeind 社) による膝関節完全伸展位に強制した際の立位姿勢をランダムに計測した。通常条件と膝装具条件を各3回ずつの計測を1セットとし，計3セット，2条件での合計18回の計測を行い，計測結果の平均値を代表値として算出した。

### 1. 3 データ解析

両脚立位から片脚立位へのCOP遷移の解析には，COPの移動距離と加速度の解析に加え，ターデサントスポーツ科学 Vol. 45

ゲットまでの距離とその大きさの関数を予測するFittsモデルを用いた。Fittsモデルの仮定によると，移行時に姿勢安定性を高めるためには，COPを初期位置から足幅(W)に等しい距離(D)に位置する目標点まで，可能な限り迅速に移動させる必要がある<sup>13)</sup>。COPを両脚立位から片脚立位への目標位置まで迅速に移動させるのに必要な時間は，初期位置から目標点までの距離(D)と目標領域の幅(W)の比に影響されると予測される。この比の対数を用いて，両脚立位から片脚立位への移行の移動困難度指数(ID)を算出した(式1)。目標位置におけるCOP変位の振幅の増大は，神経筋制御におけるノイズ(N)の一種とみなされ，結果としてID値が高値となる<sup>14)</sup>と仮説を立てた。

$$ID = \log_2 \left( \frac{2D}{W - N} \right)$$

(式1 移動困難度指数 (ID))

### 1. 4 統計解析

姿勢制御時の足圧中心 (COP) の移動距離を内外側と前後方向で算出し、加えて、両脚立位から片脚立位への移乗時におけるCOPの加速度を算出した。算出したCOP値の正規性の検定はKolmogorov-Smirnov検定を用い、群間比較(CAI群 vs 健常群)と、条件間比較(膝装具あり vs 膝装具なし)を行い、統計的に有意な差を特定するため反復測定分散分析(ANOVA)を用いた。なお、有意水準は5%とし、解析および統計処理は、プログラミングソフトRを用いて行った。

### 2. 研究結果

健常群の足長平均は27.9 ± 8.4cm、足幅平均は109.55 ± 7.1mmであり、CAI群の足長平均は26.8 ± 10.4cm、足幅平均は111.55 ± 9.2mmであった。表1に足関節不安定感に関するアンケート結果と、最後に受傷した足関節捻挫からの期間を示す。アンケート結果において、CAI群が健常群に比して有意に主観的不安定感を認めた(p<0.01)。また、足関節捻挫を受傷してからの期間に関しても、CAI群が健常群に比して有意に短い期間であった(p<0.01)。

図3にCOPの移動距離を、両脚立位から片脚立位への移動距離と片脚立位時における内外側の移動距離、前後方向の移動距離を示す。両脚立位から片脚立位への移動距離は、健常群に比して

CAI群で有意に高値となったが(p<0.05)、膝関節完全伸展位の強制による影響は認められなかった(p=0.42)。また、片脚立位時の内外側の移動距離に関して、健常群に比してCAI群で有意に高値となったが(p<0.05)、膝関節完全伸展位の強制による影響は認められなかった(p=0.35)。一方で、片脚立位時の前後方向の移動距離に関して、健常群に比してCAI群で有意に低値となったが(p<0.05)、内外側と同様に膝関節完全伸展位の強制による影響は認められなかった(p=0.64)。

図4に両脚立位から片脚立位への移乗時における、COPの加速度を示す。膝装具を使用した膝関節完全伸展位の強制により、CAI群では移乗時のCOPの加速度が膝装具を使用していない試技に比して高値を示した(p<0.05)。一方、健常群では膝装具の着用有無による有意差は認められなかった(p=0.35)。

表2に移動困難度指数(ID)の結果を示す。健常群に比して、CAI群で有意に高値となったが(p<0.05)、膝関節完全伸展位の強制による影響は認められなかった(p=0.29)。

### 3. 考察

本研究の目的は、膝装具の着用による膝関節伸展位固定を用いた運動連鎖の遮断により、慢性足関節不安定症の新たな評価手法の開発することである。足関節における動的運動制御能力をより顕著に評価するため、片脚立位課題を膝関節伸展位固定と非固定の2つの条件下で実施した。膝装具を用いて運動連鎖を遮断し、CAI群の足関節機能のみを評価することで、再受傷の可能性が高い人を特定できる指標を検証した。さらに、この検証

表1 足関節不安定感のアンケート結果と最後に受傷した足関節捻挫からの期間

	健常足(mean(SD))	CAI足(mean(SD))	p-Value
Cumberland Ankle Instability Tool	28.4 (1.6)	21.6 (1.5)	<0.01 *
Identification of Functional Ankle Instability	7.8 (1.9)	15.8 (3.6)	<0.01 *
Time since last ankle sprain (month)	21.0 ± 7.5	2.1 ± 1.5	<0.01 *

Note. \*: p<0.01 (有意差あり)

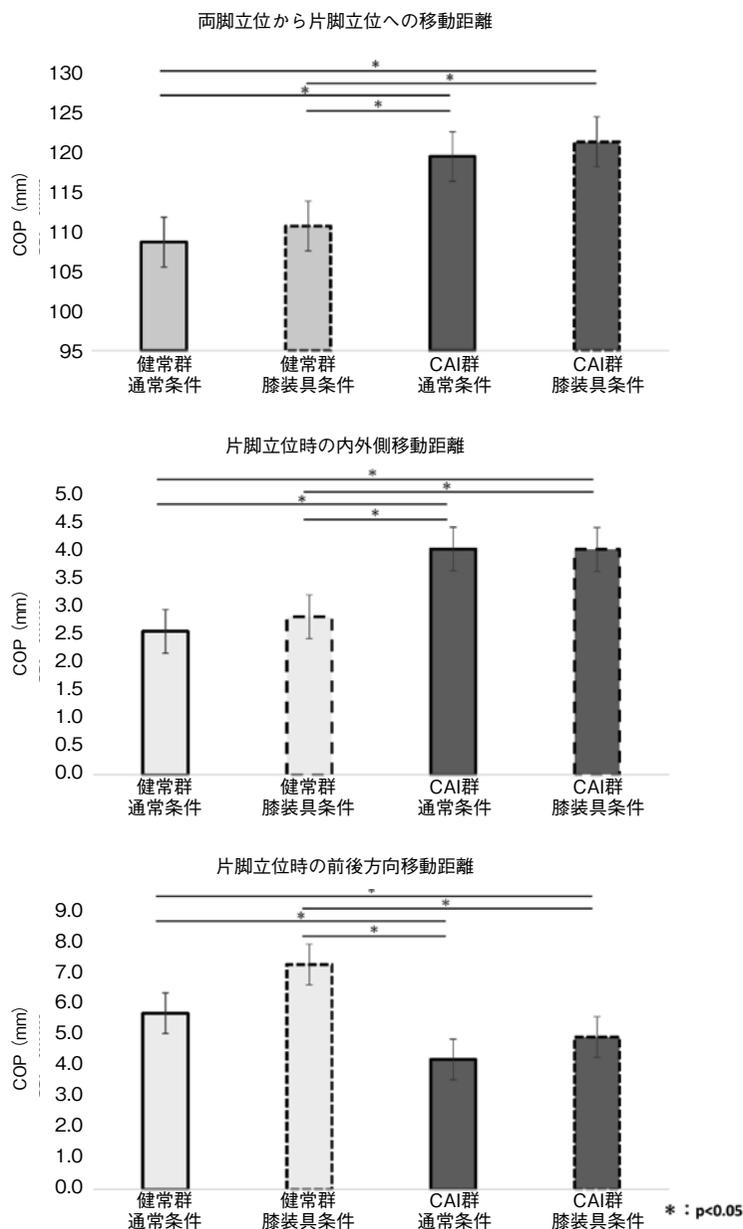


図3 COP移動距離

プロセスにより、CAIの病態生理が包括的に理解され、CAI発症後のリハビリテーションの開発の一助になると考えられる。

立位姿勢制御における膝関節運動の寄与を考慮すると、片脚立位課題における膝関節固定は姿勢制御の自由度を低下させ<sup>15)</sup>、バランス課題の難易度を高めると考えられる。この変化は、複数の

関節運動に関する情報を含むCOPの変化によって捉えられる。本研究結果からも、膝関節を伸展位固定することで下肢関節間の運動連鎖が遮断され、姿勢制御戦略にも変化をもたらした。特に、膝関節伸展位固定によるCAI群で観察された姿勢移乗時の加速度の増加は、CAIによる足関節の関節位置覚の低下<sup>16)</sup>や下腿の筋反応時間の延長<sup>17)</sup>

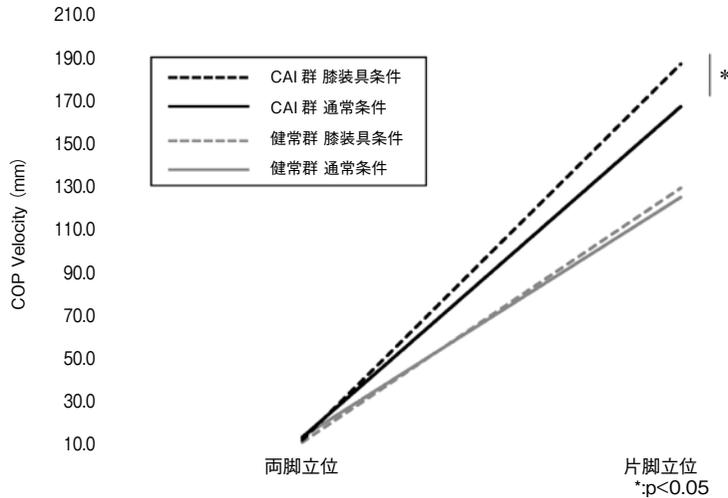


図4 移乗時のCOP加速度

表2 移動困難度指数(ID)

	移動困難度指数(ID)
健常群 通常条件	1.120
健常群 膝装具条件	1.155
CAI群 通常条件	1.294
CAI群 膝装具条件	1.307

などを示す先行研究の結果からも、より股関節の動きを利用するバランス戦略への移行を示唆した<sup>18)</sup>。足関節戦略が姿勢制御の初期段階において主要な役割を果たすことは、先行研究でも述べられている<sup>19)</sup>。足関節の機能低下が考えられるCAI群では、COPの内外側移動距離が高値になり、その要因もあり加速度も高値となったと考えられる。一方で、健常群ではCOPの前後方向の変数が増加したことから、片脚立位課題における膝関節の伸展位固定が前後方向のバランス維持にも影響していることが示唆された。つまり、本研究で行われた内外側移動動作は、CAI群では十分な安定性が得られず、前後方向への戦略の導入に繋がらなかったと考えられる。この機能障害は、内外側方向の動的安定性に寄与する組織への負荷を増大させていることも予想できる。

CAI群は健常群に比して、片脚立位での姿勢制御時にCOPの内外側移動を有意に使用した結果、移動困難度指数(ID)も高値を示した。この結果

は、CAIの発症による足関節の機能障害によるものであると考えられ、CAIの発症に伴う関節位置感覚の異常<sup>16)</sup>や運動制御能力の低下<sup>20)</sup>が影響している可能性が高い。加えて、CAI群における腓骨筋の反応時間の遅延<sup>17)</sup>を示した報告もあり、これらの機能障害が本研究の結果に繋がったと考えられる。加えて、CAI群で膝関節を伸展位固定した試技では、片脚立位に移行する際のCOPの加速度は、膝関節を固定しなかった場合に比して有意に高値を示した。これにより、より詳細な足関節の機能障害が明らかになり、CAI群は他の関節戦略を用いている<sup>21)</sup>という先行研究を支持するものであった。様々な足関節の機能不全によるバランス能力低下<sup>22)</sup>が認められるCAI群は、片脚立位での姿勢を維持するため、股関節戦略に大きく依存した姿勢戦略を行った可能性が高い。この股関節が担う姿勢戦略が、膝関節の伸展位固定による足関節と股関節の運動連鎖の遮断により阻害され、その結果として足関節に特化した機能障害が明らかになった。

また、片脚立位時におけるCOPの前後方向の姿勢制御戦略において、健常群に比してCAI群が有意に高値を示した。CAI群は、片脚立位時の内外側戦略に費やす時間が長く、前後方向の戦略へ

の依存度が低下していたことが考えられる。前後方向の姿勢制御戦略は、足部の形態から鑑みて、足関節機能に依存していることが先行研究で述べられている<sup>23)</sup>。CAI群では姿勢制御の際、股関節戦略に大きく依存している可能性が高く、着地やカッティング動作に遅れが生じ、再受傷に繋がると考えられる。従って、姿勢制御能力の改善には足関節戦略に特化したリハビリテーションが必要であり、CAI群における姿勢制御戦略を理解することの重要性が明らかとなった。今後は、姿勢制御能力の改善を目的とした足関節に特化した姿勢制御戦略をターゲットとしたリハビリテーションプログラムを開発する必要がある。

本研究にはいくつかの限界があり、第一に用いたサンプルサイズが小さいことが、結果の統計的解釈の妥当性に影響を与えた可能性がある。対象者の選定はバスケットボール選手に限定されたこともあり、今後はより大規模な研究を実施し、より多くの対象者の検証が必要である。次に、本研究は横断的研究であり、CAI群が健常群よりも再受傷率が高いか否かは明らかにできない。前向き研究を含む更なる検証を行うことで、上記の点に基づく足関節捻挫の高リスク群の特定にも役立つ可能性がある。第三に、この研究は男性のみを対象としており、女性は含まれていないことにも注意が必要である。月経周期が足関節の靭帯弛緩を変調させることが知られており、これらの要因を排除するため、本研究では男性のみを対象とした。最後に、評価指標は対象者の足部形態や膝関節のアライメントを考慮されておらず、これが結果に影響を与えた可能性がある。扁平足や内反膝の影響を排除できないため予備的な検証を行ったが、対象者の確保が困難であったため、これらの変数を研究に組み込むことは不可能であった。今後の研究では、より正確な検証結果を得るためにも、足部形態と膝関節のアライメントを詳細に評価することも必要である。上記の様な変数を含めるこ

デサントスポーツ科学 Vol. 45

とで、CAIと姿勢制御能力との関係をより包括的に理解することができる可能性が高い。

#### 4. まとめ

本研究は、膝装具による膝関節伸展位固定と非固定が、CAIの姿勢制御能力に及ぼす影響を検証することを目的とした。その結果、股関節戦略にマスクされている可能性がある足関節の機能障害が、膝関節伸展位固定条件下で明らかになった。CAI群では、両脚立位から片脚立位の移乗時にCOP加速度が増加したことから、健常群とは異なる関節戦略を用い、足関節捻挫を誘発するリスクが高い可能性が示唆された。CAI群では姿勢制御を股関節戦略に依存している可能性があり、競技動作時の姿勢制御に遅れが生じ、足関節捻挫の再受傷リスクが高まっている可能性が推察された。

#### 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を申し上げます。また、本研究の対象者の選定のためご尽力をいただいた、一般財団法人新潟県バスケットボール協会様に心から御礼を申し上げます。さらに、研究デザインや研究結果に対して有意義なご助言を下さった所属機関の所員の皆様には感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) Hootman J.M., Dick R., Agel J., Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: Summary and recommendations for injury prevention initiatives., *J. Athl. Train.*, 42(2) : 311-319(2007)
- 2) Knowles S.B., Marshall S.W., Miller T., Spicer R., Bowling J.M., Loomis D., Millikan R.W., Yang J., Mueller F.O., Cost of injuries from a prospective cohort study of North Carolina high school athletes., *Inj. Prev.*, 13(6) : 416-421(2007)
- 3) Hubbard-Turner T., Turner M.J., Physical activity levels in college students with chronic ankle

- instability., *J. Athl. Train.*, **50**(7) : 742–747 (2015)
- 4) Doherty C., Bleakley C., Hertel J., Caulfield B., Ryan J., Delahunt E., Recovery from a first-time lateral ankle sprain and the predictors of chronic ankle instability: A prospective cohort analysis., *Am. J. Sports Med.*, **44**(4) : 995–1003 (2016)
  - 5) Gribble P.A., Delahunt E., Bleakley C., Caulfield B., Docherty C.L., Fourchet F., Fong D., Hertel J., Hiller C., Kaminski T.W., Selection criteria for patients with chronic ankle instability in controlled research: A position statement of the International Ankle Consortium., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, **43**(8) :585–591 (2013)
  - 6) Thompson C., Schabrun S., Romero R., Bialocerkowski A., van Dieen J., Marshall P., Factors contributing to chronic ankle instability: A systematic review and meta-analysis of systematic reviews., *Sports Med.*, **48**(1) : 189–205 (2018)
  - 7) Evans T., Hertel J., Sebastianelli W., Bilateral deficits in postural control following lateral ankle sprain., *Foot Ankle Int.*, **25**(11) : 833–839 (2014)
  - 8) Wang H.K., Chen C.H., Shiang T.Y., Jan M.H., Lin K.H., Risk-factor analysis of high school basketball-player ankle injuries: A prospective controlled cohort study evaluating postural sway, ankle strength, and flexibility., *Arch Phys Med Rehabil.*, **87**(6) : 821–825 (2006)
  - 9) Tropp H., Odenrick P., Postural control in single-limb stance., *J. Orthop. Res.*, **6**(6) : 833–839 (1988)
  - 10) Abe Y., Sugaya T., Sakamoto M., Postural control characteristics during single leg standing of individuals with a history of ankle sprain: Measurements obtained using a gravicorder and head and foot accelerometry., *J. Phys. Ther. Sci.*, **26**(3) : 447–450 (2014)
  - 11) Manchester D., Woollacott M., Zederbauer-Hylton N., Marin O., Visual, vestibular and somatosensory contributions to balance control in the older adult., *J. Gerontol.*, **44**(4) : M118–M127 (1989)
  - 12) Tansu Birinci., Sule Badilli Demirbas., Relationship between the mobility of medial longitudinal arch and postural control., *Acta. Orthop. Traumatol. Turc.*, May; **51**(3) : 233-237 (2017)
  - 13) Blaszczyk J.W., Fredyk A., Blaszczyk P.M., Ashtiani M., Step response of human motor system as a measure of postural stability in children., *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.*, **28**(4) : 895–903 (2020)
  - 14) Sternad D., Abe M.O., Hu X., Muller H., Neuromotor noise, error tolerance and velocity-dependent costs in skilled performance., *PLoS Comput. Biol.*, Sep 7 (9) : e1002159 (2011)
  - 15) Yamamoto A., Sasagawa S., Oba N., Nakazawa K., Behavioral effect of knee joint motion on body' s center of mass during human quiet standing., *Gait. Posture.*, **41**(1) : 291–294 (2015)
  - 16) McKeon J.M.M., McKeon P.O., Evaluation of joint position recognition measurement variables associated with chronic ankle instability: a meta-analysis., *J. Athl. Train.*, **47**(4) :444-56 (2012)
  - 17) Hoch M.C., McKeon P.O., Peroneal reaction time after ankle sprain: a systematic review and meta-analysis., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **46**(3) :546-556 (2014)
  - 18) Abe Y., Sakamoto M., Nakazawa R., Shirakura K., Relationship between joint motion and acceleration during single-leg standing in healthy male adults., *J. Phys. Ther. Sci.*, **27**(4) :1251–1256 (2015)
  - 19) Qian Q.L., Darwin G., Alpha A.G., Postural Control and Adaptation Strategy of Young Adults on Unstable Surface., *Motor Control.*, **10**;27(2) :179–193 (2022)
  - 20) Wright C.J., Arnold B.L., Fatigue' s effect on eversion force sense in individuals with and without functional ankle instability., *J. Sport Rehabil.*, **21**(2) : 127–136 (2012)
  - 21) Hoch M.C., Mullineaux D.R., Andreatta R.D., English R.A., Medina-McKeon J.M., Mattacola C.G., McKeon P.O., Effect of a 2-week joint mobilization intervention on single-limb balance and ankle arthrokinematics in those with chronic ankle instability., *J. Sport Rehabil.*, **23**(1) : 18–26 (2013)
  - 22) Wikstrom E.A., Naik S., Lodha N., Cauraugh J.H., Bilateral balance impairments after lateral ankle trauma: a systematic review and meta-analysis., *Gait. Posture.*, **31**(4) :407-14 (2010)
  - 23) Tropp H., Ekstrand J., Gillquist J., Stabilometry in functional instability of the ankle and its value in predicting injury., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **16**(1) : 64–66 (1984)

# 血流制限を併用したレジスタンス運動の効果： 低負荷×長時間と高負荷×短時間の比較

北 翔 大 学 沖 田 孝 一

## Effect of Blood Flow Restriction Exercises: Light and Long vs Hard and Short Protocol

by

Koichi Okita

*Department of Sport Education,  
Hokusho University*

### ABSTRACT

Resistance exercise with blood flow restriction (BFR) is a new training method providing significant training effects despite the use of low-intensity mechanical loads. It was previously demonstrated that BFR remarkably enhances muscular metabolic stress in resistance exercise and that the metabolic stress was effectively enhanced by increasing mechanical intensity but not BFR pressure. However, because of blocking the metabolic recovery by BFR, it is possible that even with low intensity, metabolic stress might gradually increase with respect to increased repetitions and reach sufficient level.

Therefore, in this study, the muscular metabolic stress during resistance exercise with BFR between light-long and hard-short protocols, adjusted by totally the same work volume (load × repetitions) were compared.

Twelve male university students were recruited and performed unilateral plantar-flexion at 30 repetitions/min in a whole body magnetic resonance system. The BFR exercise protocols were as follows: exercise with 10% of one repetition maximum

(1-RM) for 360 sec (180 repetitions) , 15% 1-RM for 240 sec (120 repetitions) , 40% 1-RM for 90 sec (45 repetitions) . All protocols were same in total work volume (load  $\times$  repetitions=1800) . In addition, a standard high-intensity protocol of 65% 1-RM without BFR (60 sec, 30 repetitions) was also performed for comparison. Muscular metabolic stress in the calf muscle, defined as phosphocreatine and intramuscular pH decrease were evaluated by using  $^{31}\text{P}$ -magnetic resonance spectroscopy.

Phosphocreatine depletion and intramuscular pH decrease at the end of each exercise were statistically similar and equal to or greater than that in 65% 1-RM without BFR. In conclusion, if the total exercise volume calculated as a product of mechanical load multiplied by repetitions were equal, metabolic stress in exercising muscle might achieve the similar level at the end of exercise with BFR and could provide similar successful training effects.

#### キーワード

血流制限, 代謝的ストレス, 虚血, トレーニング, 筋肥大

#### Keyword

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

#### 要 旨

レジスタンス運動に血流制限を併用すると、筋収縮に利用された高エネルギーリン酸が再合成されずに代謝産物が蓄積し、通常では定常状態となるような低強度負荷を用いても、時間経過と共に代謝ストレスが漸増する。ゆえに本研究では、血流制限下の運動では、代謝ストレスは負荷強度に関係なく、総負荷量に依存するという仮説を立てた。本研究では、負荷強度が異なり、総負荷量が同等となる低強度 $\times$ 多い繰り返し回数、高強度 $\times$ 少ない繰り返し回数の条件を用いた血流制限下低強度レジスタンス運動を施行し、骨格筋内代謝ストレスを比較検討した。その結果、各プロトコル終了時の筋内クレアチンリン酸とpHの低下は、統計的に差はなく、血流制限を併用しない高強度負荷を用いた運動と同等かそれ以上であった。血流制限を併用した運動では、負荷強度と繰り返し

回数の積として計算される総負荷量が等しい場合、用いた強度にかかわらず同様なトレーニング効果をもたらす可能性が示された。

#### 緒 言

レジスタンス運動により、筋量・筋力の増加を得るためには、高強度の重量負荷が必要であり<sup>1)</sup>、筋・関節への負担や心血管系への負荷が大きいことから高齢者や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刺激が増強し、低強度負荷を用い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<sup>2)</sup>、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行った研究から、トレーニング効果の大きさが血流制限により増強する骨格筋内の代謝ストレス(クレアチンリン酸とpH低下および無機リン酸蓄積)に依存することを明らかにし<sup>3)</sup>、その知

見のもとで個体差や疾患を考慮した至適プロトコールを考案することができた<sup>4,6)</sup>。さらに我々は、実地者の血流制限による苦痛を考慮し、間欠的に(特に非運動時)血流制限を施行する方法の有効性を検証し、同強度では継続的血流制限には及ばないものの強度を増加することで、同等な効果が得られる可能性を示すことができた<sup>7)</sup>。この研究も含めて、これまでの一連の研究結果は、血流制限を併用しても、その効果は負荷強度に依存することを示唆しているが、一方、加圧ウォーキングのような歩行運動においても筋肥大および筋力増加が得られることが示されている<sup>8)</sup>。本研究では、血流制限によりエネルギー代謝の回復が妨げられることに着目し、超低強度の負荷を用いても、繰り返し回数を増やし総負荷量を増加させることで、高強度負荷に匹敵する効果が得られると仮説を立て、総負荷量が同等となる低強度×多い繰り返し回数および高強度×少ない繰り返し回数の条件を用いた血流制限下レジスタンス運動を施行し、骨格筋内代謝ストレスを比較した。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

対象は健常男子大学生12名とした。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 (図1)

被験者は、全身用MR機器内にて非磁性体で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MR機器内で使用するものと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 (360秒, 180回), ②15% 1-RM + 血流制限 (240秒, 120回), ③40% 1-RM + 血流制限 (90秒, 45回), コントロールとして④65% 1-RM + 血流制限なし (60秒, 30回)。血流制限を用いたプロトコールは、「強度×繰り返し = 1800」に統

プロトコール (秒)	繰り返し回数 (回)		
	45	120	180
10% 1-RM + BFR (360)	→		
15% 1-RM with BFR (240)	→		
40% 1-RM with BFR (90)	→		
65% 1-RM (60)	30	→	

図1 運動プロトコール

2秒で1回の下腿三頭筋底屈運動を行った。血流制限を施行した10%1-RMでは、180回・360秒、15%1-RMでは、120回・240秒、40%1-RMでは、45回・90秒施行した。対照として行った一般的な高強度である65%1-RMでは、30回・60秒とした。BFR, blood flow restriction; RM, repetition maximum.

一した。

各プロトコ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 pneumatic rapid inflator (E-20 rapid cuff inflator, Hokanson, USA) を用いて<sup>3-7)</sup>、被験者の安静時収縮期血圧の1.3倍の圧で施行した。血流制限圧は pneumatic rapid inflator 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。

主観的運動強度 (rating of perceived exertion, RPE) は10-point Borg scale で評価し、最も低い rating は0.5 point とした。RPE は各運動期終了直後に聞き取った。

### 1. 3 骨格筋内エネルギー代謝の測定

被験者は全身用MR機器 (55 cm-bore, 1.5 Tesla, Magnetom H15, 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<sup>3-7)</sup>。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<sup>9)</sup>。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<sup>3-7, 10)</sup>。

### 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) と平均±標準偏差 (RPE) で表示した。運動条件間の運動終了時における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、RPEについてはKruskal-Wallis検定を用いた。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 28 (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。

表1 被験者の基本情報

項目	平均 ± 標準偏差
被験者数	12
年齢, 才	22.1 ± 0.9
身長, cm	170.7 ± 5.8
体重, kg	62.7 ± 7.0
体格指数, kg/m <sup>2</sup>	21.5 ± 2.1
収縮期血圧, mmHg	110 ± 8.7
血流制限圧, mmHg	143 ± 11.3
最大挙上重量, kg	52.3 ± 7.4

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。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するが、総負荷量が同等となる運動終点では同等のレベルに至っていた (図2)。さらに、血流制限を併用したすべてのプロトコルは、対照としていた標準的な高強度である65%1-RMを用いた運動より強い代謝ストレスを生じさせていた。

一方、運動終点のRPEには各プロトコル間の統計学的有意差は認められなかった (図3)。

### 2. 考察

本研究の結果は、超低強度負荷を用いても繰り返

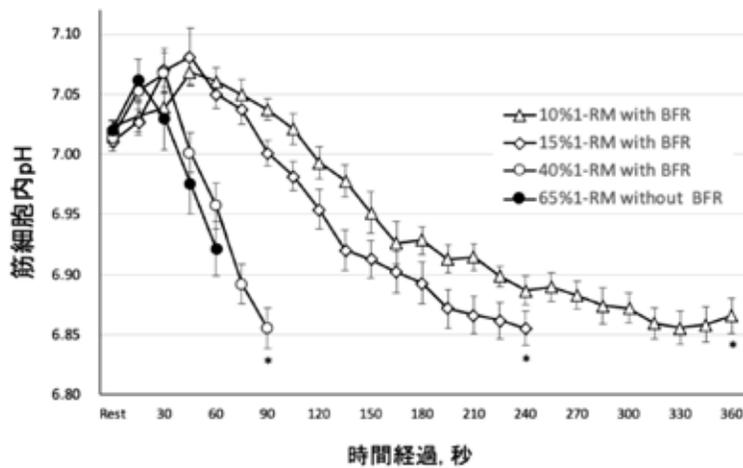
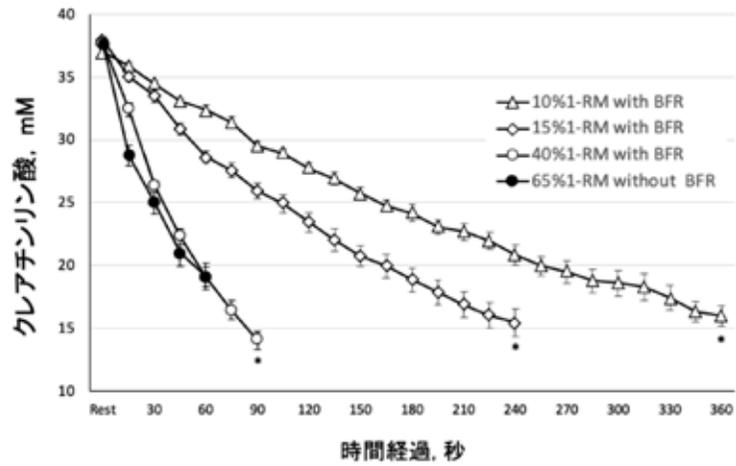


図2 運動中の筋内クレアチン酸とpHの経時変化  
2秒で1回の下腿三頭筋底屈運動を行った。エラーバー, 標準誤差。\* $p < 0.05$ , vs 65%1-RM)。

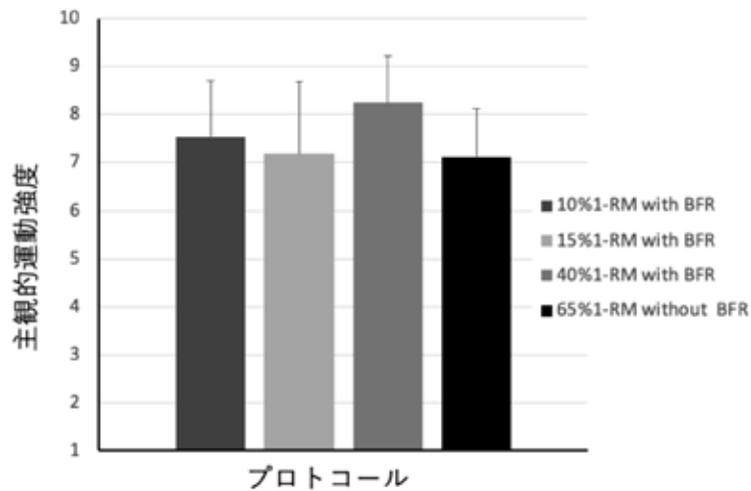


図3 運動終了における主観的運動強度  
エラーバー, 標準偏差。

返し回数を増やし、総負荷量 (total work volume) を等しくすれば、高強度負荷を用いた運動と同等の効果をもたらす可能性を示した。すなわち、血流制限を併用した運動では、負荷強度 (重量) ではなく、総負荷量が筋への代謝ストレスを決定することが明らかになった。ゆえに機械的負荷と繰り返し回数積として計算される総負荷量が等しい場合、運動筋内の代謝ストレスは、運動終了時には同等のレベルに達し、同様のトレーニング効果をもたらすと推測された。この結果は、ウォーキングなどの非常に低強度の運動でも、血流制限を併用し適切な繰り返しを行うことで、筋肥大と筋力増加が得られることを報告した先行研究<sup>8, 11)</sup>を支持するものであった。

現在、筋骨格系疾患や神経疾患に対する低強度負荷と血流制限を組み合わせたリハビリテーションが普及しているが<sup>12-14)</sup>、本研究の結果は、そのプロトコルの適切な方向性を示しているように思われる。さらに、通常のフィットネス現場において自転車運動、トレッドミル、クロストレーナー、さらにはエアロビクスを行う場合でも、血流制限を組み合わせることで、筋力増強・筋肥大効果が得られる可能性を示唆している。

### 3. 結 論

血流制限下のレジスタンス運動においては、超低強度など、一般的には筋力トレーニングに適さない負荷強度を用いても、繰り返し回数を増加し、総負荷量を十分に増やせば、運動終点の骨格筋代謝ストレスは高強度負荷運動と同レベルに至り、同様のトレーニング効果が得られる可能性が示唆された。

### 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) Kraemer W.J., Ratamess N.A.: Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **36**:674-688, (2004)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) Abe T., Kearns C.F., Sato Y.: Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training., *J. Appl. Physiol.*, **100**:1460-6, (2006)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) Abe T., Sakamaki M., Fujita S., et al.: Effects of low-intensity walk training with restricted leg blood flow on muscle strength and aerobic capacity in older adults., *J. Geriatr. Phys. Ther.*, **33**:34–40, (2010)
  - 12) Saraf A., Goyal M., Goyal K.: Blood Flow Restriction Training- An Overview and Implication in New Generation Physical Therapy: A Narrative Review., *J. Lifestyle Med.*, **31**:12:63-68,(2022)
  - 13) 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)
  - 14) 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)

## トレーニングがもたらす骨格筋の腎保護作用

東京大学医学部附属病院 西 裕 志  
(共同研究者) 同 南 学 正 臣  
同 東 原 崇 明  
同 小田原 幹

### **Training and Exercise Effect on The Kidney Diseases**

by

Hiroshi Nishi, Masaomi Nangaku,  
Takaaki Higashihara, Miki Odawara  
*Division of Nephrology and Endocrinology*  
*The University of Tokyo Hospital*

#### ABSTRACT

Chronic kidney disease is a serious health problem, and the effectiveness of exercise and training as prevention and treatment has not been fully verified particularly in terms of basic molecular biology and physiology. In this study, we employed a mouse model in which albuminuria induced by a high-fat diet is reduced by treadmill exercise as previously reported. We performed RNA sequencing combined with cluster enrichment analysis of mouse renal tissue with different diets and training programs, and found a group of genes related to inflammatory responses and stress responses that were upregulated by a high-fat diet and then downregulated by exercise. These genes include *Cxcl2*, which encodes chemoattractive chemokines which mainly affect neutrophils in inflammatory response. Therefore, we focus on their physiological effects and then performed immunohistological evaluation of neutrophil infiltration in kidney tissues

obtained from mice with high fat diet and/or exercise. However, unfortunately, no changes in cellular infiltration were observed in response to a high-fat diet or exercise. This does not deny other biological of the chemokine effect than we anticipated. Indeed, in chronic inflammation, the role of neutrophils is less well understood and has been described as either beneficial or detrimental, causing tissue damage and enhancing the immune response. Based on the results of this comprehensive study, we intend to further elucidate the renal receptor mechanisms associated with exercise and aim to provide basic scientific insights into the effects of training and exercise in chronic kidney disease.

#### キーワード

腎臓, 慢性腎臓病, 運動, マイオカイン

#### Keyword

kidney, chronic kidney disease, exercise, myokine

#### 要 旨

慢性腎臓病は深刻な健康課題であり、運動やトレーニングがその予防や治療として有効であるかの検証が十分に進んでいない。そこで今回、高脂肪食によって生じるアルブミン尿がトレッドミル運動によって減少するマウスモデルも用いて、腎組織のRNAシーケンスを行い、高脂肪食によって発現が亢進、運動をすることで逆に減少する遺伝子群として炎症反応やストレス応答に関連する遺伝子群を見出した。これにはケモカインをコードする*Cxcl2*も含まれており、その生理作用に着目して、腎臓組織内の好中球浸潤を免疫組織学的な評価を行った。しかし、高脂肪食や運動に伴う細胞浸潤の変化は認めなかった。今後さらに本研究の結果に基づいて、運動に伴う腎臓における受容機構を解明し、慢性腎臓病におけるトレーニング・運動の作用について基礎科学的な示唆を付与することを目指す。

#### 緒 言

慢性腎臓病は最終的に人工透析や腎移植を必要とする深刻な健康課題であり、医学的には一定期間続く血清クレアチニン値の上昇や尿検査の異常によって定義される。種々の薬物治療が実践される一方、近年では腎臓リハビリテーション（令和4年度診療報酬改定「透析時運動指導等加算」の新設、学会ガイドラインの制定、腎リハ指導士資格認定試験の開始）が進むなど、運動との関連が注目されている。

我々は第41回（2019年度）財団助成金の採択課題「トレーニングが慢性腎臓病の進行に与える影響の解析」において、肥満マウスによって生じるアルブミン尿（慢性腎臓病の代表的な病勢指標である）が習慣的なトレッドミル運動によって減少することを見出した。一方、免疫学的な腎炎モデルでは運動によるアルブミン尿の有意な変化は見られなかった。運動（骨格筋収縮）によって腎臓に変化が生じたメカニズムとしては、骨格筋から腎臓へのマイオカインなどによる直接的な作用、運動に伴う例えば脂肪減少や神経活動変化を介した腎臓への間接的な作用、の二つが主に考えられ

る。既報ではirisin<sup>1,2)</sup>, FGF-21<sup>3,4)</sup>, myonectin<sup>5)</sup>, FABP2<sup>6)</sup>等の報告が相次ぐが、例えばヒトでのirisinの作用については見解の決着を見ていない<sup>7-9)</sup>。近年のこうした研究動向からは依然として未知のマイオカイン分子が存在する可能性が示唆される。また、その発見・同定には既報のあるマイオカインのみに捉われずに、例えば近年発展を遂げている次世代シーケンスによるアン・バイアストな網羅的解析が大きな武器となりえる。

今回我々は運動によってマウス腎臓に生じている遺伝子発現変動を網羅的に解析することによって、運動がもたらす腎臓への効果の解明に挑んだ。

## 1. 方法

### 1.1 実験動物<sup>10)</sup>

6-8週齢雌性DBA/2Jclマウス (Japan CLEA, 東京, 日本) を使用した。マウスは空調設備及び12/12時間で空間内照明オン/オフが制御された環境で飼育した。飼料及び飲料水には自由摂取できるad libitumの状態にした。本研究において使用した全ての動物は東京大学大学院医学系研究科の実験動物規則に従い飼育、使用した。また、本研究は同動物実験委員会の審査、承認を受けて行った。

### 1.2 マウス運動負荷<sup>10)</sup>

マウス・ラット用トレッドミルシステムTMS-8B (Melquest, 富山, 日本) を使用した。走行傾斜角度0度, 電気刺激強度0.3mA, 走行速度0m/minで開始, 5分間で徐々に走行速度12m/minまで上昇して12m/minの固定速度で合計1時間走行後に自動終了するプログラムを設定した。これは76% VO<sub>2max</sub>に相当しヒト高強度負荷に相当する。ただし、虚血症状が出現するVO<sub>2max</sub> 80%を超えない。上記運動負荷を週5日, 各実験のプロトコールに応じた期間だけ与えた。

### 1.3 高脂肪食投与マウスモデル<sup>10)</sup>

上記の運動負荷を与え始めると同時に60 kcal%脂肪含有・ラード使用高脂肪食 (Research Diet, New Brunswick, NJ, USA) を8週間与えた。週2回すべての飼料を交換した<sup>10)</sup>。

### 1.4 RNAシーケンス

RNAの完全性はRNA 6000 Nano Kit (Agilent, Santa Clara, CA, USA) を用いてBioanalyzer (Agilent) で評価した。このRNAを用いて、NEBNext Ultra II RNA Library Prep Kit for Illumina およびNEBNext Poly (A) mRNA Magnetic Isolation Module (New England Biolabs, Ipswich, MA, USA) を用いて、mRNAシーケンス用のライブラリーをメーカーの指示に従って作成した。次に、バイオアナライザーDNA 7500キット (Agilent) を用いて、ライブラリーの濃度とサイズ分布を測定した。すべてのサンプルは次世代シーケンス装置での解析に使用した。ライブラリーをプールし、濃度を10 nMに調整した。プールされたライブラリーは変性と中和を行い、さらに希釈した。その後、ライブラリーを1.7 pMに希釈し、NextSeq500/550 v2.5 (75 Cycles) キット (Illumina, San Diego, CA, USA) を用いて、NextSeq 500システム (Illumina) での次世代シーケンス解析に適用した。シーケンシングは36塩基ずつのペアエンドリードで行った。シーケンス後、FASTQファイルをエクスポートし、CLC Genomics Workbench 21.0.3ソフトウェア (QIAGEN, Venlo, Netherlands) で品質管理として、次世代シーケンス解析データの基本情報をチェックした。

### 1.5 定量PCR

RNAシーケンスに用いたマウス腎検体について、RNAiso Plus (TaKaRa, 滋賀, 日本) を用いて、製造元のプロトコールに従って全RNAを抽

出した。cDNAはPrime Script RTマスターミックス (TaKaRa) を用いて合成した。Cxcl2の定量的リアルタイムRT-PCR解析は、CFX96システム (Bio-Rad, Hercules, CA, USA) を用い、THUNDERBIRD SYBR QPS-201 (Toyobo, 大阪, 日本) を用いて行った。各遺伝子増幅の閾値サイクル値は、Gapdhについて計算したCt値を差し引くことにより正規化した。

## 1. 6 免疫染色<sup>11)</sup>

各マウスを吸入麻酔薬イソフルラン過剰吸入後の頸椎脱臼にて安楽死させ、両側腎臓を摘出した。摘出組織は中性ホルマリン固定液にて12時間浸漬固定後に70%エタノールで置換した。その後、パラフィン包埋し、厚さ4  $\mu$ mの連続切片を作製した。プロテイナーゼKで抗原賦活化した後、切片をブロックし、抗NIMP-R14抗体(1:100, Abcam, Cambridge, UK)と4°Cで一晩インキュベートしてビオチン化抗ラットIgG抗体(1:200, Vector Laboratories, Newark, CA, USA)と室温で40分間インキュベートした。ビオチン沈着はアビジン-ビオチン化ペルオキシダーゼ複合体Vectastain ABC reagent (Vector Laboratories)とジアミノベンジジンで検出した。切片はヘマトキシリンで対比染色した。

## 1. 7 統計解析

特記されていない限り、データはドットプロット及び平均 $\pm$ 標準誤差で表記した。P値 $<0.05$ を統計学的に有意とみなす水準とした。

## 2. 結果

今回のマウスモデルでは(高脂肪食+非運動)群は(通常食+非運動)群と比較して、8週間後までに体重とアルブミン尿は増加することと、さらに(高脂肪食+運動)群は(高脂肪食+非運動)群と比較して摂餌量に大きな変化は見られないもの

デサントスポーツ科学 Vol. 45

の、体重増加が緩やかとなり、アルブミン尿は減少することは以前に報告した<sup>10)</sup>。

これらのマウスについて安楽死の上で腎臓を採材してRNAを抽出し、RNAの分解が進んでいないことを確認した。RNAシーケンシングを行って(通常食+非運動)群から(高脂肪食+非運動)群で発現が上昇し、(高脂肪食+非運動)群から(高脂肪食+運動)群で発現が低下している遺伝子群の有無を探索した。その結果、非常に多岐にわたる複数の遺伝子が候補として同定されたため、エンリッチメント解析を行うことによって、発現遺伝子がコードする蛋白の既知の生理作用について解析を行った。そうしたところ、「炎症反応」「ストレス応答」「防御反応」に伴う遺伝子群が上位にヒットすることが明らかとなった。

次に、特に上位に登場した遺伝子のうち生理作用がよく知られるケモカインchemokine (C-X-C motif) ligand 2 (CXCL2) をコードするCxcl2遺伝子に着目して定量PCRを行い、データの検証を行った。すると、(通常食+非運動)群から(高脂肪食+非運動)群での発現上昇 ( $p = 0.12$ ,  $n = 3$  each) や、(高脂肪食+非運動)群から(高脂肪食+運動)群での発現低下 ( $p = 0.07$ ,  $n = 3$  each) について、統計学的有意差には至らなかったもののその傾向が認められた(図1)。

CXCL2はケモカインとして白血球、特に好中球の走化性亢進や血管外浸潤を誘導する。一方、好中球は炎症の急性期に作動する免疫細胞の代表であり、炎症反応が生じていない平常状態のマウス腎臓では好中球浸潤は想定されない。このことから(通常食+非運動)群と比較して(高脂肪食+非運動)群では好中球が腎組織に分布しており、かつ、(高脂肪食+運動)群ではその好中球数が減少しているのではないかと仮説立てた。そこで、好中球病面分子であるNIMP-R14を標的とした免疫組織学的な評価を行ったところ、陽性コントロールであり腎臓の虚血障害モデルでは腎間

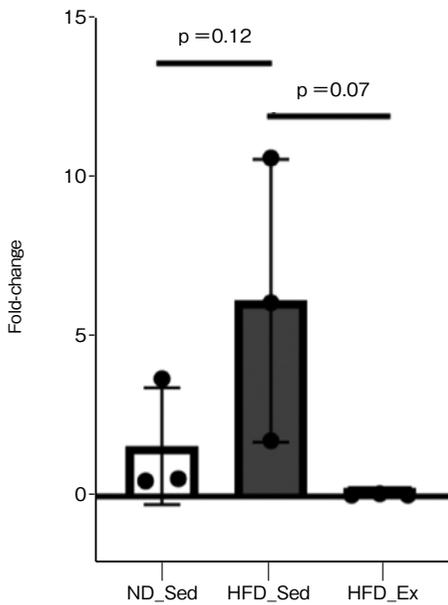


図1 マウス腎におけるCXCL2の遺伝子発現

質に好中球が染色されていることが確認できた。しかしながら、*Cxcl2* 遺伝子発現が亢進している（高脂肪食+非運動）群において、腎間質領域に好中球の浸潤を認めることはできなかった（図2）。

### 3. 考 察

運動によって高脂肪食マウスのアルブミン尿が減少するメカニズムを探求するうえで、腎臓にお

ける遺伝子発現変化を網羅的に探索したところ、高脂肪食によって炎症反応やストレス応答の遺伝子群の発現が亢進し、さらに運動をすることでそれらが逆に減少することが明らかとなった。発現変化の著しかった遺伝子の一つとして*Cxcl2*が挙げられ、その古典的生理作用に着目して腎臓組織内の好中球遊走に着目して免疫組織学的な評価を行ったが、高脂肪食や運動に伴う明らかな細胞浸潤の変化は認めなかった。

本研究では（通常食+非運動）群、（高脂肪食+非運動）群、（高脂肪食+運動）群の各マウスから摘出された腎臓を用いた。運動が直接的、間接的であれ、効果器として腎臓にどのような分子レベルでの影響を与えているのか解析することは重要である。高脂肪食で腎臓における炎症・ストレス応答が上昇することは、登場する遺伝子や蛋白こそ違えどこれまでも多く報告されている<sup>12,13)</sup>。しかし、特に白血球走化因子に着目して解析した研究は少なく、その多くは単球・マクドファージ系である<sup>12,14,15)</sup>。

*Cxcl2* 遺伝子がコードする蛋白CXCL2はMip2-alpha (macrophage inflammatory protein 2-alpha: マクドファージ炎症性タンパク質2-a)としても知られる。CXCL2は主にマクドファージ、内皮細胞、上皮細胞、腫瘍細胞によって主に産生される<sup>16,17)</sup>。CXCL2は特に中枢神経系の炎症におい



腎虚血障害



高脂肪食+非運動

図2 マウス腎の病理組織学的な変化（好中球の浸潤）

て、ミクログリアおよびアストロサイトから産生され循環好中球の浸潤を誘導する<sup>18, 19)</sup>。このことから我々も高脂肪食負荷されたマウスの腎臓では炎症反応が亢進しており、好中球の組織評価を行ったが細胞浸潤に変化は見られなかった。

一般に好中球というと炎症の急性期に作用する炎症細胞と考えられているが、例えば一部の慢性的に持続する膠原病の基本病態に好中球が関与すること<sup>20)</sup>や、急性炎症の遷延や瘢痕化に好中球の necroptosis や netosis 等の新しい細胞死が好中球プロテアーゼによる炎症性サイトカインの分解を修飾すること<sup>21, 22)</sup>が指摘され始めている。従って、今回、好中球浸潤が目立たなかったことが必ずしも運動によって腎臓 CXCL2 の作用を全て検証できたわけではない。

今後、本研究における網羅解析の結果を利用して、腎臓におけるどのような受容体分子がこれらのシグナル応答を誘導するのかを解析していく。このためには同一モデルの骨格筋や血液サンプルの解析も必要であるし、また、肥満や脂質・糖代謝にかかわる一般的な変数の解析も必須である。今後の研究展開によって、腎臓病患者におけるトレーニングの重要性と科学的妥当性を供与すること目指していく。

#### 4. 結 語

高脂肪食によって誘導される腎臓の障害（アルブミン尿）が習慣的運動によって減少する過程において、腎臓組織内での遺伝子発現にどのような変化が生じているのか、その一端が明らかとなった。今後も本研究を延伸させ得られた知見を公開・共有することで、国内に1,300万人以上いるとされる慢性腎臓病に対する実践的なアプローチとして社会整備が進むトレーニング・運動に対して基礎科学的な示唆を付与することを目指していく。

#### 謝 辞

本研究は公益財団法人デサントスポーツ科学振興財団の助成を受けて実施されました。RNAシーケンス及びその解析は筑波大学医学医療系・菅澤威仁先生にご尽力ご指導をいただきました。ご支援ご協力をいただいた皆様に深謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) Peng H., Wang Q., Lou T., Qin J., Jung S., Shetty V., Li F., Wang Y., Feng X.H., Mitch W.E., Graham B.H., Hu Z., Myokine mediated muscle-kidney crosstalk suppresses metabolic reprogramming and fibrosis in damaged kidneys., *Nat. Commun.*, **8** (1) :1493(2017)
- 2) Qiongyue Z., Xin Y., Meng P., Sulin M., Yanlin W., Xinyi L., Xuemin S., Post-treatment With Irisin Attenuates Acute Kidney Injury in Sepsis Mice Through Anti-Ferroptosis via the SIRT1/Nrf2 Pathway., *Front Pharmacol.*, **13**:857067(2022)
- 3) Geng L., Lam K.S.L., Xu A., The therapeutic potential of FGF21 in metabolic diseases: from bench to clinic., *Nat. Rev. Endocrinol.*, **16** (11) :654-67(2020)
- 4) Fisher F.M., Maratos-Flier E., Understanding the Physiology of FGF21., *Annu. Rev. Physiol.*, **78**:223-41(2016)
- 5) Little H.C., Rodriguez S., Lei X., Tan S.Y., Stewart A.N., Sahagun A., Sarver D.C., Wong G.W., Myonectin deletion promotes adipose fat storage and reduces liver steatosis., *FASEB J.*, **33** (7) :8666-87(2019)
- 6) Zhuang L., Mao Y., Liu Z., Li C., Jin Q., Lu L., Tao R., Yan X., Chen K., FABP3 Deficiency Exacerbates Metabolic Derangement in Cardiac Hypertrophy and Heart Failure via PPARalpha Pathway., *Front Cardiovasc. Med.*, **8**:722908(2021)
- 7) Timmons J.A., Baar K., Davidsen P.K., Atherton P.J., Is irisin a human exercise gene? *Nature*. **488** (7413) :E9-10; discussion E-1(2012)
- 8) Albrecht E., Norheim F., Thiede B., Holen T., Ohashi T., Schering L., Lee S., Brenmoehl J., Thomas S., Drevon C.A., Erickson H.P., Maak S., Irisin - a myth rather than an exercise-inducible myokine., *Sci. Rep.*, **5**:8889(2015)

- 9) Arhire L.I., Mihalache L., Covasa M., Irisin: A Hope in Understanding and Managing Obesity and Metabolic Syndrome., *Front Endocrinol. (Lausanne)*, **10**:524(2019)
- 10) 西裕志, 東原崇明, 竹村浩至, 南学正臣 . トレーニングが慢性腎臓病の進行に与える影響の解析 . *デサントスポーツ科学*. **41** :126-34(2020)
- 11) Inoue R., Nishi H., Osaka M., Yoshida M., Nangaku M., Neutrophil Protein Kinase R Mediates Endothelial Adhesion and Migration by the Promotion of Neutrophil Actin Polymerization., *J Immunol.*, **208** (9) :2173-83(2022)
- 12) Szeto H.H., Liu S., Soong Y., Alam N., Prusky G.T., Seshan S.V., Protection of mitochondria prevents high-fat diet-induced glomerulopathy and proximal tubular injury., *Kidney Int.*, **90** (5) :997-1011(2016)
- 13) Yamamoto T., Takabatake Y., Takahashi A., Kimura T., Namba T., Matsuda J., Minami S., Kaimori J.Y., Matsui I., Matsusaka T., Niimura F., Yanagita M., Isaka Y., High-Fat Diet-Induced Lysosomal Dysfunction and Impaired Autophagic Flux Contribute to Lipotoxicity in the Kidney., *J. Am. Soc. Nephrol.*, **28** (5) :1534-51(2017)
- 14) Wang X.H., Mitch W.E., Mechanisms of muscle wasting in chronic kidney disease., *Nat. Rev. Nephrol.*, **10** (9) :504-16(2014)
- 15) Yu S., Cheng Y., Zhang L., Yin Y., Xue J., Li B., Gong Z., Gao J., Mu Y., Treatment with adipose tissue-derived mesenchymal stem cells exerts anti-diabetic effects, improves long-term complications, and attenuates inflammation in type 2 diabetic rats., *Stem. Cell Res. Ther.*, **10** (1) :333(2019)
- 16) Sokol C.L., Luster A.D., The chemokine system in innate immunity., *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.*, **7** (5) (2015)
- 17) Zlotnik A., Yoshie O., The chemokine superfamily revisited., *Immunity.*, **36** (5) :705-16(2012)
- 18) Wu F., Zhao Y., Jiao T., Shi D., Zhu X., Zhang M., Shi M., Zhou H., CXCR2 is essential for cerebral endothelial activation and leukocyte recruitment during neuroinflammation., *J. Neuroinflammation.*, **12**:98(2015)
- 19) Yang T., Liu Y.W., Zhao L., Wang H., Yang N., Dai S.S., He F., Metabotropic glutamate receptor 5 deficiency inhibits neutrophil infiltration after traumatic brain injury in mice., *Sci. Rep.*, **7** (1) :9998(2017)
- 20) Nishi H., Mayadas T.N., Neutrophils in lupus nephritis., *Curr. Opin. Rheumatol.*, **31** (2) :193-200(2019)
- 21) Brostjan C., Oehler R., The role of neutrophil death in chronic inflammation and cancer., *Cell Death Discov.*, **6**:26(2020)
- 22) Perez-Figueroa E., Alvarez-Carrasco P., Ortega E., Maldonado-Bernal C., Neutrophils: Many Ways to Die., *Front Immunol.*, **12**:631821(2021)

# 運動後の筋痛は筋損傷の指標となるか？ —非侵襲的な筋損傷の測定手法の開発と応用—

新潟大学	国正陽子
(共同研究者) エクス=マルセイユ大学	マッキ ロビン
ボローニャ大学	ロッシ フランチェスカ
エクス=マルセイユ大学	ベンダン デイビット
同	ニコル キャロリーン

## **Does Delayed-Onset Muscle Soreness Indicate Muscle Damage? Non-Invasive Methods for Measuring Muscle Damage : Developments and Applications**

by

Yoko Kunimasa

*Niigata University*

Robin Macchi, David Bendahan, Caroline Nicol

*Aix-Marseille University*

Francesca Rossi

*Bologna University*

### ABSTRACT

Muscle soreness is subjective muscle pain that occurs after high-intensity exercise, and the disappearance of muscle soreness is often used as an indicator of recovery from muscle damage. However, due to methodological limitations, it has not been clear whether muscle soreness reflects structural damage of muscles. The purpose of the present study was to clarify changes in muscle damage/inflammation and muscle soreness after endurance running using the magnetic resonance imaging (diffusion

tensor imaging), and to examine whether muscle soreness is an indicator of recovery from muscle damage. We measured subjective delayed onset muscle soreness (DOMS), T2 relaxation time and diffusion parameters for each of 12 muscles of the lower limb using MR before and after a 20 km race including up-hill and down-hill in 16 male and female recreational runners. The results showed that the peaks of the DOMS and T2 relaxation time were on 1-2 days after the race, and recovered 3-4 days after the race. On the other hand, the mean diffusivity (MD) of some of the thigh muscles increased until 3-4 days after the race. In conclusion, even after the recovery of muscle soreness after the 20 km race, it is likely that muscle structural changes due to muscle damage or inflammatory reactions are still occurring, and it is not appropriate to use muscle soreness as an index for resume of exercise.

キーワード

運動誘発性筋損傷, 遅発性筋痛, 拡散テンソルイメージング, MR I, 走運動

Keyword

Muscle damage, DOMS, diffusion tensor imaging, MRI, running

## 要 旨

筋痛は高強度の運動後に生じる筋の主観的な痛みであり、スポーツ現場では運動再開の指標として筋痛が用いられケースが多い。しかし、方法論上の限界から、筋痛が筋の構造的損傷を反映しているのかは明らかになっていなかった。そこで本研究は、磁気共鳴画像法(拡散テンソル画像)を用いることで、走運動後の筋損傷と筋痛の変化を明らかにし、筋痛が筋損傷の回復指標となるのかを検討することを目的とした。レクリエーションランナー16名を対象に20-km走レース前後の主観的な遅発性筋痛(DOMS)、下肢12筋それぞれのT2緩和時間、拡散パラメータを測定した。その結果、レース1-2日後に下肢筋群でDOMSとT2緩和時間が最大となり、その後、レース3-4日後には回復した。一方で、大腿筋の一部の平均拡散性(MD)はレース3-4日後まで増加傾向を示した。以上のことから、20-km走後に、筋痛が回復していても、筋損傷・炎症反応による筋の構造変

化が残っている可能性があり、筋痛を運動の再開指標にするのは適切でないと考える。

## 緒 言

遅発性筋痛(delayed onset muscle soreness: DOMS)、いわゆる筋肉痛は動作中や触診中の主観的な筋の痛みであり<sup>1,2)</sup>、不慣れた運動や高強度運動後に引き起こされる筋の組織学的損傷とそれに伴う筋の炎症反応が原因と考えられている<sup>1,3)</sup>。一方、DOMSは代表的な筋損傷の間接指標であるクレアチンキナーゼ値や磁気共鳴画像法(MRI)によるT2緩和時間よりも先に回復することから<sup>4,5,6,7)</sup>、運動再開の指標にすることには疑問が残る。しかし、未だDOMSがどの程度、筋損傷を反映しているのかは明らかになっていない。

筋損傷を直接測定できる唯一の方法である筋生検法を用いて、高強度運動<sup>5,8,9)</sup>や下り坂走<sup>10)</sup>、マラソン<sup>11)</sup>後にサルコメアやZ膜の構造的損傷が可視化されてきた。しかしながら、筋生検法で

は、ニードルを直接皮膚上から筋に挿入し、筋の一部を採取するため、その方法自体が筋を損傷させることになり、同一部位の筋サンプルで運動後の損傷の程度を比較することができない。また、摘出される筋は筋全体からするとごく一部であり、同一筋内における筋損傷や炎症の部位差の可能性<sup>12,13,14)</sup>を考慮することができない。

MRIの一部である拡散テンソル画像法は、筋組織内の水分子の拡散の異方性を可視化できることから、非侵襲的に筋の構造変化を測定できる方法として、筋損傷評価指標として応用が期待されている<sup>15)</sup>。動物実験においては、エキセントリック運動後の筋組織化学的变化とMRによる拡散パラメータの変化が関連することが報告されている<sup>16,17)</sup>。Lyu et al.<sup>16)</sup>では、運動24時間後、浮腫によって筋細胞が肥大した状態と同時に、拡散テンソル画像によって得られたFractional anisotropy (FA)の減少とApparent diffusion coefficientの増加が確認されている。これらの動物実験の結果から、拡散テンソル画像を用いることによって、従来の方法では得ることができなかった運動後の筋の構造的変化を複数の筋群において、筋全体レベルで捉えることができる可能性がある。そこで、本研究では、走運動後に引き起こされるDOMSとMR測定によって得られるT2緩和時間、拡散テンソルパラメータの回復過程を明らかにし、DOMSが筋損傷回復の指標となり得るのか検討した。

## 1. 方法

### 1. 1 対象者

本研究の対象者は、2021年、2022年に開催されたMarseille-Cassis International 20-km レース(+382mと-294mの上り・下り坂走)に参加したレクリエーションランナー16名(男性8名、女性8名)であった。対象者の年齢は $29.2 \pm 8.8$ 歳、身長 $170.2 \pm 9.2$ cm、体質量 $66.7 \pm 9.7$ kgであった。対象者の選定条件は20-45歳までの過去6か月に既往歴のないレクリエーションレベルのランナーで、少なくとも毎週ランニングのトレーニングを実施している者とした。実験に先立ち、対象者に対して本研究の目的、方法および測定に伴う危険性を十分に説明し、実験参加に対する同意を得た。なお、本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、French Research Ethics Committee (CPP IDF VII, Ethics Committee Agreement # 2021-A00355-36)の承認を得て行われた。

### 1. 2 実験デザイン

実験デザインの概要を図1に示す。対象者は、レース前測定1回、レース後測定2回(1日目と3日目、または2日目と4日目)を実施するため、計3回来研した。なお、MR装置へのアクセス制限の関係上、対象者をグループ1と2(各男性4名、女性4名)に分けた。

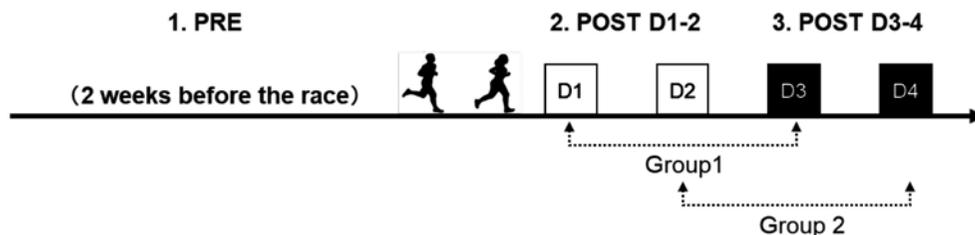


図1 Experimental design

### 1. 3 測定項目

対象者の軸足下肢筋群（大腿四頭筋群，ハムストリングス筋群，下腿三頭筋群）の筋痛を評価するため，対象者には50 cm台を用いて昇降運動を行ってもらった．その際，対象者が感じた筋痛をvisual analog scale（VAS）法により測定した．この測定は，10 cm線上の左端を無痛とし，右端を最大の痛みとして，対象者の測定時の状態をその線上に記す方法であった．

MRIによる筋損傷・炎症間接指標の測定は3-T MRI装置（Vida, software version XA20A, Siemens Healthineers, Erlangen, Germany）に6-channel flex receive coilsを組み合わせて，対象者の安静仰臥位姿勢，股関節・膝関節完全伸展，足関節底屈15-20度保持姿勢で大腿部と下腿部を対象に行った．MRI装置の操作は，操作に習熟した3名の放射線技師が実施した．MR測定では，まず下肢全体のT1強調画像を撮像し，対象脚の大腿骨・脛骨上の骨ランドマーカーを指標に撮像開始位置を決定し，全3回のMR画像取得において，同じ位置で撮像できるようにした．次に，水平面のT2強調画像（12スライス，スライス厚10 mm，10-mm slice gap），拡散強調画像（40スライス，スライス厚5 mmスライスギャップなし）を撮像した．

### 1. 4 分析項目

MRIデータの後処理について，画像はまずdcm2nixパッケージ（<https://github.com/rordenlab/dcm2nix>）を用いてNIFTIフォーマットに変換された．筋のT2マッピングにはmono-component modeを用いた．spin-echo train全体の刺激エコー効果とRF送信野（B1+）の不均一性を補正するために，EPG（Extended Phase Graph）形式<sup>18</sup>）を採用し，sequence chronogram<sup>19</sup>）に適合させた．すべてのボクセルについて一定のT1 = 1400msの値を考慮し，T2，signal scaling factor S0，apparent B1+を推定した．自作のアルゴリズムによるこ

れらの解析はMATLAB（Mathworks, Inc., Natick, MA, USA）を用いて実行された．拡散強調画像およびb0画像は，まずGibbs-ringing artefacts<sup>20</sup>）を補正し，MRtrix3パッケージ<sup>21</sup>）に実装されているMP-PCA routine<sup>22</sup>）を用いてノイズ除去した．拡散強調画像の渦電流歪み補正は，FMRIB Software Library（FSL; version 6.0.6）のeddyツールを用いて行った<sup>23</sup>）．残りのB0関連EPI歪みは，FSLに実装されたfugue機能を使用して，B0 field mapからのすべての画像で補正された．最後に，組織内の水分子の拡散の異方性を表すFractional anisotropy（FA）と拡散方向とは無関係に拡散の大きさそのものを表すmean diffusivity（MD）<sup>24</sup>）のマッピングのためにボクセルごとの拡散テンソルを推定した．下肢全12筋（大腿直筋，外側広筋，内側広筋，中間広筋，大腿二頭筋長頭，大腿二頭筋短頭，半腱様筋，半膜様筋，内側腓腹筋，外側腓腹筋，ヒラメ筋，前脛骨筋）のFA，MDとT2緩和時間の平均値を各筋，筋全体レベルで算出した．

### 1. 5 統計処理

統計処理は統計ソフト（SPSS version.27, IBM, Japan）を用いて行った．各測定項目のセッション間（レース前，レース後1-2日目，レース後3-4日目）の平均値の比較には対応のある一要因の分散分析を用いた．分散分析の結果，主効果が見られた場合には，Bonferroniの多重比較検定を実施した．各項目の測定結果は，平均値±標準偏差で示した．すべての統計処理の有意水準は5%とした．

## 2. 結果

対象者の20-km走レースタイムは男性ランナーで1時間40分19秒±6分37秒，女性ランナーで2時間1分56秒±15分45秒であった．

20-kmレース後のDOMSは大腿四頭筋群とハムストリングス筋群でのみ有意な変化が認められた

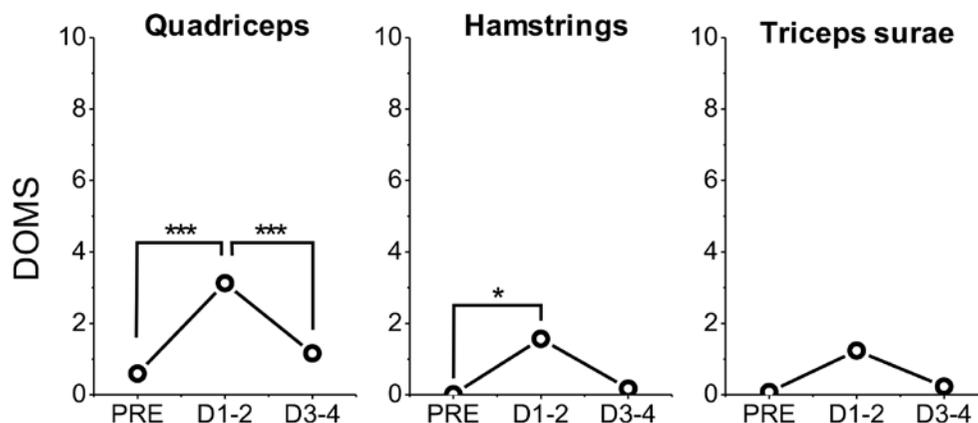


図2 Delayed onset muscle soreness (DOMS) after the running race  
 \*\*\* and \* indicate significant change between two-time points ( $p < 0.001$  and  $p < 0.05$ , respectively)

表1 T2 values changes

T2 values (ms)	Mean $\pm$ SD			Change (%)		
	PRE	D1-2	D3-4	PRE to D1-2	D1-2 to D3-4	PRE to D3-4
BFsh	39.0 $\pm$ 1.8	39.7 $\pm$ 1.6	38.9 $\pm$ 1.4	1.9%	-2.1%	-0.2%
BFlh	39.2 $\pm$ 1.4	39.9 $\pm$ 1.3	39.0 $\pm$ 1.4	1.8%	-2.1% *	-0.4%
ST	38.0 $\pm$ 1.1	38.5 $\pm$ 1.1	37.9 $\pm$ 1.0	1.2%	-1.5% *	-0.3%
SM	38.3 $\pm$ 1.1	39.0 $\pm$ 1.2	38.6 $\pm$ 1.1	1.7%	-1.0%	0.6%
RF	37.4 $\pm$ 1.0	37.9 $\pm$ 1.0	37.3 $\pm$ 0.9	1.3%	-1.5% *	-0.3%
VL	40.3 $\pm$ 1.4	40.7 $\pm$ 1.2	40.3 $\pm$ 1.2	1.0%	-1.0%	0.0%
VI	40.7 $\pm$ 1.5	41.3 $\pm$ 1.1	40.9 $\pm$ 0.8	1.7%	-1.2%	0.5%
VM	39.5 $\pm$ 1.5	39.9 $\pm$ 1.3	39.5 $\pm$ 1.1	1.0%	-1.2%	-0.2%
MG	38.7 $\pm$ 1.2	39.4 $\pm$ 1.0	38.7 $\pm$ 1.1	1.9%	-1.9% *	0.0%
LG	38.8 $\pm$ 1.2	39.8 $\pm$ 1.2	38.5 $\pm$ 1.1	2.6% **	-3.1% ***	-0.6%
SOL	40.1 $\pm$ 1.2	40.2 $\pm$ 1.2	39.9 $\pm$ 1.2	0.2%	-0.8%	-0.5%
TA	37.6 $\pm$ 1.0	37.8 $\pm$ 1.1	37.5 $\pm$ 1.2	0.5%	-0.6%	-0.1%

BFsh: biceps femoris short head, BFlh: biceps femoris long head, ST: semitendinosus, SM: semimembranosus, RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis, VI: vastus intermedius, MG: gastrocnemius medialis, LG: gastrocnemius lateralis, SOL: soleus, TA: tibialis anterior. \*\*\*, \*\*, and \*; significant change between two-time points ( $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$  and  $p < 0.05$ , respectively).

(図2)。大腿四頭筋群では、レース前と比較して、D1-2で有意にDOMSは増加し、その後、D3-4にかけて有意に減少した。ハムストリングス筋群においては、レース前と比較してD1-2で有意に増加し、その後、D3-4にかけて有意な減少は認められなかったものの減少傾向を示した。下腿三頭筋群に関しては、D1-2で増加傾向を示したものの、有意な変化は認められなかった。

T2緩和時間については、外側腓腹筋のみで、レース前と比較し、D1-2で有意な増加を示したが、他の下枝筋群でもD1-2で増加傾向を示すも

の、有意な変化は認められなかった(表1)。一方、D1-2からD3-4にかけてのT2緩和時間は、大腿二頭筋長頭、半腱様筋、大腿直筋、内側腓腹筋、外側腓腹筋で有意に減少した。

拡散パラメータについて、FAの結果を表2に、MDの結果を表3に示す。FAについては、レース前後で解析した全12筋に有意な変化は認められなかった。一方、MDにおいては、半腱様筋と外側広筋でレース前と比べてD3-4で有意に増加した。

表 2 Fractional anisotropy changes

Fractional anisotropy	Mean $\pm$ SD			Change (%)		
	PRE	D1-2	D3-4	PRE to D1-2	D1-2 to D3-4	PRE to D3-4
BFsh	0.26 $\pm$ 0.03	0.26 $\pm$ 0.03	0.26 $\pm$ 0.02	-1.6%	1.7%	0.1%
BFlh	0.21 $\pm$ 0.01	0.20 $\pm$ 0.02	0.21 $\pm$ 0.02	-4.1%	2.2%	-2.1%
ST	0.22 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	-4.0%	1.1%	-2.9%
SM	0.19 $\pm$ 0.02	0.19 $\pm$ 0.01	0.19 $\pm$ 0.01	1.1%	-0.4%	0.7%
RF	0.19 $\pm$ 0.03	0.19 $\pm$ 0.02	0.20 $\pm$ 0.03	-0.1%	5.0%	4.9%
VL	0.20 $\pm$ 0.03	0.20 $\pm$ 0.02	0.20 $\pm$ 0.02	-0.6%	1.2%	0.6%
VI	0.19 $\pm$ 0.02	0.19 $\pm$ 0.01	0.19 $\pm$ 0.01	0.0%	0.2%	0.2%
VM	0.17 $\pm$ 0.01	0.17 $\pm$ 0.01	0.17 $\pm$ 0.01	-2.4%	0.1%	-2.3%
MG	0.20 $\pm$ 0.02	0.21 $\pm$ 0.02	0.21 $\pm$ 0.02	0.6%	1.4%	2.0%
LG	0.22 $\pm$ 0.03	0.22 $\pm$ 0.03	0.23 $\pm$ 0.03	-1.3%	4.2%	2.9%
SOL	0.18 $\pm$ 0.01	0.18 $\pm$ 0.02	0.18 $\pm$ 0.01	-0.9%	2.1%	1.2%
TA	0.22 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	0.4%	-0.1%	0.4%

BFsh: biceps femoris short head, BFlh: biceps femoris long head, ST: semitendinosus, SM: semimembranosus, RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis, VI: vastus intermedius, MG: gastrocnemius medialis, LG: gastrocnemius lateralis, SOL: soleus, TA: tibialis anterior.

表 3 Mean diffusivity changes

Mean diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	Mean $\pm$ SD			Change (%)		
	PRE	D1-2	D3-4	PRE to D1-2	D1-2 to D3-4	PRE to D3-4
BFsh	1.83 $\pm$ 0.06	1.88 $\pm$ 0.10	1.87 $\pm$ 0.08	2.9%	-0.6%	2.4%
BFlh	1.75 $\pm$ 0.08	1.78 $\pm$ 0.06	1.80 $\pm$ 0.07	1.6%	0.7%	2.3%
ST	1.72 $\pm$ 0.06	1.75 $\pm$ 0.04	1.77 $\pm$ 0.06	2.2%	0.7%	3.0%**
SM	1.71 $\pm$ 0.06	1.75 $\pm$ 0.05	1.76 $\pm$ 0.06	1.9%	0.7%	2.7%
RF	1.58 $\pm$ 0.11	1.58 $\pm$ 0.09	1.60 $\pm$ 0.12	0.2%	1.2%	1.4%
VL	1.71 $\pm$ 0.05	1.74 $\pm$ 0.06	1.76 $\pm$ 0.08	2.3%	0.9%	3.2%**
VI	1.77 $\pm$ 0.05	1.79 $\pm$ 0.05	1.80 $\pm$ 0.07	1.2%	0.8%	2.0%
VM	1.72 $\pm$ 0.04	1.73 $\pm$ 0.04	1.74 $\pm$ 0.05	0.4%	0.8%	1.2%
MG	1.67 $\pm$ 0.07	1.69 $\pm$ 0.05	1.68 $\pm$ 0.05	0.9%	-0.6%	0.3%
LG	1.72 $\pm$ 0.10	1.73 $\pm$ 0.05	1.73 $\pm$ 0.08	0.6%	0.0%	0.6%
SOL	1.74 $\pm$ 0.06	1.74 $\pm$ 0.04	1.75 $\pm$ 0.04	0.3%	0.5%	0.8%
TA	1.66 $\pm$ 0.06	1.67 $\pm$ 0.04	1.67 $\pm$ 0.06	0.8%	-0.1%	0.7%

BFsh: biceps femoris short head, BFlh: biceps femoris long head, ST: semitendinosus, SM: semimembranosus, RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis, VI: vastus intermedius, MG: gastrocnemius medialis, LG: gastrocnemius lateralis, SOL: soleus, TA: tibialis anterior. \*\*Significant change between two-time points (p<0.01).

### 3. 考 察

本研究では、走運動後に引き起こされる DOMS と従来の筋損傷の間接指標である MR 測定による T2 緩和時間に加え、拡散テンソルパラメータの変化を明らかにし、DOMS が筋損傷の指標となり得るのか検討することであった。本研究では、起伏のある 20-km 走レースに参加したレクリエーションランナーにおいて、レース 1-2 日後に大腿四頭筋群、ハムストリングス筋群において筋痛が誘発され、これらは 3-4 日後には消失した。これらの回復過程は、一部の筋群の T2 緩和時間の変

化とは一致したが、拡散テンソル画像から算出された一部の筋の MD についてはレース 3-4 日後まで増加し一致しなかった。

本研究では、従来の研究と同様に VAS 法を用いて、大腿四頭筋群、ハムストリングス筋群、下腿三頭筋群の DOMS を評価した。運動誘発性筋損傷の研究で頻繁に用いられるエキセントリックな筋力トレーニング運動介入後の DOMS 最大値は、上肢筋群で > 3<sup>25, 26, 27, 28)</sup>、下肢筋群で > 2 と報告されている<sup>26, 29, 30, 31)</sup>。一方で本研究では、DOMS が最大値を示したレース後 D1-2 時点の平均値が大腿四頭筋で 1.2、ハムストリングス 1.6、

下腿三頭筋1.2と先行研究の高強度運動と比較すると低い値を示した。これらは、先行研究（多くは触診中）と本研究（50cm踏み台昇降運動中）のDOMS評価法の違いはあるものの、不慣れな高強度運動と比較すると、本研究で用いた20-kmの起伏の激しい走レースにおいては、誘発される筋痛が小さいことが考えられる。

T2緩和時間は運動後の筋損傷間接指標としてこれまで多く用いられてきた<sup>5)</sup>。T2緩和時間の増加は筋内水分量の増加を示しており、これらは筋損傷による筋細胞内の浮腫が原因と考えられている<sup>5,32)</sup>。これまで、エキセントリック筋力トレーニング運動介入1-2日後のT2緩和時間は、上肢筋群で約10ms<sup>33, 34, 35)</sup>、下肢筋群で約1-2ms<sup>13, 36)</sup>増加したことが報告されている。それに対し本研究も、レース1-2日後、下肢筋群で最大1ms (3.1%)増加した。走運動を対象とした先行研究では、45分の下り坂走1-2日後に大腿四頭筋群のT2緩和時間が約1-2ms増加<sup>12)</sup>、マラソンレース1-3日後にハムストリングスのT2緩和時間が約1-2ms増加<sup>14)</sup>したと報告されている。以上のことから、T2緩和時間の算出方法に先行研究と違いがあるものの（本研究ではExtended phase graph methodを採用）、下肢筋群のエキセントリック筋力トレーニングと同程度の負荷がかかっていたと考えられる。

本研究では、走運動後のDOMSの変化と同時にT2緩和時間、拡散パラメータの測定を行った。その結果、これまでのエキセントリック運動介入研究とは異なり<sup>4, 5, 6, 7)</sup>、運動後DOMSとT2はD1-2で増加し、その後D3-4で減少した。一方、筋内の水分子の拡散の大きさを示すMDに関しては、半腱様筋と外側広筋でD3-4まで増加傾向を示した。T2緩和時間とMDの増加の違いは、前者は組織内の水分量の増加を表しているのに対し、後者は組織内の水分子拡散の大きさの増加を示していることである。つまり、筋内の水分量が

回復したとしても、筋内の構造的な変化は一部の筋において回復していなかったことが考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では、レクリエーションランナーを対象に起伏のある20-km走レース後のDOMSとMRを用いた筋損傷間接指標の変化を明らかにし、筋痛が筋損傷の回復指標となるのかを検討した。その結果、T2緩和時間は筋痛と同様の回復過程を示したが、MDに関しては一部の筋でDOMSやT2緩和時間が回復してもなお、増加する傾向を示した。以上のことから、20-km走レース後については、筋痛が回復しても、筋損傷や炎症反応による筋の構造変化が起こっている可能性が高く、筋痛を運動の再開指標にするのは適切でないと考えられる。

#### 謝 辞

本研究に助成頂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御礼を申し上げます。

#### 文 献

- 1) Armstrong R. B., Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Medicine and science in sports and exercise*, **16** (6), 529-538 (1984)
- 2) Miles M. P., Clarkson P. M., Exercise-induced muscle pain, soreness, and cramps. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, **34** (3), 203-216 (1994)
- 3) Lieber R. L., Fridén J., Morphologic and mechanical basis of delayed-onset muscle soreness. *JAAOS-Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **10** (1), 67-73 (2002)
- 4) Evans W. J., Cannon J. G., The metabolic effects of exercise-induced muscle damage. *Exercise and sport sciences reviews*, **19** (1), 99-126 (1991)
- 5) Clarkson P. M., Hubal M. J., Exercise-induced muscle damage in humans. *American journal of*

- physical medicine & rehabilitation*, **81** (11), S52-S69 (2002)
- 6) Nosaka K., Newton M., Sacco P., Delayed-onset muscle soreness does not reflect the magnitude of eccentric exercise-induced muscle damage. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, **12** (6), 337-346 (2002)
  - 7) Damas F., Nosaka K., Libardi C. A., Chen T. C., Ugrinowitsch C., Susceptibility to exercise-induced muscle damage: a cluster analysis with a large sample. *International journal of sports medicine*, 633-640 (2016)
  - 8) Fridén J., Sjöström M., Ekblom B., Myofibrillar damage following intense eccentric exercise in man. *International journal of sports medicine* **4**, 170-176 (1983)
  - 9) Newham D.J., McPhail G., Mills K.R., Edwards, R.H., Ultrastructural changes after concentric and eccentric contractions of human muscle. *Journal of the Neurological Sciences* **61**, 109-122 (1983)
  - 10) Nurenberg P., Giddings C. J., Stray-Gundersen J., Fleckenstein J. L., Gonyea W. J., Peshock R. M., MR imaging-guided muscle biopsy for correlation of increased signal intensity with ultrastructural change and delayed-onset muscle soreness after exercise. *Radiology*, **184** (3), 865-869 (1992)
  - 11) Hikida R. S., Staron R. S., Hagerman F. C., Sherman W. M., Costill D. L., Muscle fiber necrosis associated with human marathon runners. *Journal of the Neurological Sciences*, **59** (2), 185-203 (1983)
  - 12) Maeo S., Ando Y., Kanehisa H., Kawakami, Y., Localization of damage in the human leg muscles induced by downhill running. *Scientific reports*, **7** (1), 5769 (2017)
  - 13) Maeo S., Saito A., Otsuka S., Shan X., Kanehisa H., Kawakami Y., Localization of muscle damage within the quadriceps femoris induced by different types of eccentric exercises. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, **28** (1), 95-106 (2018)
  - 14) Higashihara A., Nakagawa K., Inami T., Fukano M., Iizuka S., Maemichi T., Hashizume S., Narita T., Hirose N., Regional differences in hamstring muscle damage after a marathon. *PLoS one*, **15** (6), e0234401 (2020)
  - 15) Froeling M., Oudeman J., Strijkers G. J., Maas M., Drost M. R., Nicolay K., Nederveen A. J., Muscle changes detected with diffusion-tensor imaging after long-distance running. *Radiology*, **274** (2), 548-562 (2015)
  - 16) Lyu X., Gao Y., Liu Q., Zhao H., Zhou H., Pan, S., Exercise-induced muscle damage: multi-parametric MRI quantitative assessment. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **22**, 1-13 (2021)
  - 17) McMillan A. B., Shi D., Pratt S. J., Lovering R. M., Diffusion tensor MRI to assess damage in healthy and dystrophic skeletal muscle after lengthening contractions. *BioMed Research International*, 2011 (2011)
  - 18) Weigel M., Extended phase graphs: dephasing, RF pulses, and echoes- pure and simple. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **41** (2), 266-295. doi.org/10.1002/jmri.24619 (2015)
  - 19) Marty B., Baudin P. Y., Reyngoudt H., Azzabou N., Araujo E. C., Carlier P. G., de Sousa, P., L. Simultaneous muscle water T2 and fat fraction mapping using transverse relaxometry with stimulated echo compensation. *NMR in biomedicine*, **29** (4), 431-443 (2016)
  - 20) Kellner E., Dhital B., Kiselev V.G., Reiser M., Gibbs-ringing artifact removal based on local subvoxel-shifts. *Magn. Reson. Med.*, Nov;76 (5) :1574-1581. doi: 10.1002/mrm.26054. Epub 2015 Nov 24. PMID: 26745823 (2016)
  - 21) Cordero-Grande L., Christiaens D., Hutter J., Price A.N., Hajnal J.V., Complex diffusion-weighted image estimation via matrix recovery under general noise models. *Neuroimage*, Oct 15;200:391-404 (2019)
  - 22) Tournier J. D., Smith R., Raffelt D., Tabbara R., Dhollander T., Pietsch M., Christiaens D., Jeurissen B., Yeh C. H., Connelly A., MRtrix3: A fast, flexible and open software framework for medical image processing and visualisation. *NeuroImage*, **202**, 116137 (2019)
  - 23) Jenkinson M., Beckmann C.F., Behrens T.E., Woolrich M.W., Smith S.M., FSL. *NeuroImage*, Aug 15;62 (2) :782-90 (2012)
  - 24) Damon B. M., Froeling M., Buck A. K., Oudeman J., Ding Z., Nederveen A. J., Strijkers G. J., Skeletal muscle diffusion tensor- MRI fiber tracking: rationale, data acquisition and analysis methods, applications and future directions. *NMR in biomedicine*, **30** (3), e3563 (2017)
  - 25) Nosaka K., Sakamoto K. E. I., Effect of elbow joint

- angle on the magnitude of muscle damage to the elbow flexors. *Medicine and science in sports and exercise*, **33** (1), 22-29 (2001)
- 26) Chen T. C., Lin K. Y., Chen H. L., Lin M. J., Nosaka K., Comparison in eccentric exercise-induced muscle damage among four limb muscles. *European journal of applied physiology*, **111**, 211-223 (2011)
- 27) Lau W. Y., Muthalib M., Nosaka K., Visual analog scale and pressure pain threshold for delayed onset muscle soreness assessment. *Journal of Musculoskeletal Pain*, **21** (4), 320-326 (2013)
- 28) Lau W. Y., Blazevich A. J., Newton M. J., Wu S. S. X., Nosaka, K., Assessment of muscle pain induced by elbow-flexor eccentric exercise. *Journal of Athletic Training*, **50** (11), 1140-1148 (2015)
- 29) Philippou A., Maridaki M., Bogdanis G., Halapas A., Koutsilieris M., Changes in the mechanical properties of human quadriceps muscle after eccentric exercise. *in vivo*, **23** (5), 859-865 (2009)
- 30) Paulsen G., Cramer R., Benestad H.B., Fjeld J.G., Mørkrid L., Hallén J., Raastad, T., Time course of leukocyte accumulation in human muscle after eccentric exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **42** (1), 75-85 (2010)
- 31) Şenışık S. Ç., Akova B., Şekir U., Gür H., Effects of muscle architecture on eccentric exercise induced muscle damage responses. *Journal of Sports Science & Medicine*, **20** (4), 655 (2021)
- 32) Ploutz- Snyder L. L., Nyren S., Cooper T. G., Potchen E. J., Meyer, R. A., Different effects of exercise and edema on T2 relaxation in skeletal muscle. *Magnetic resonance in medicine*, **37** (5), 676-682 (1997)
- 33) Nosaka K., Clarkson P. M., Changes in indicators of inflammation after eccentric exercise of the elbow flexors. *Medicine and science in sports and exercise*, **28** (8), 953-961 (1996)
- 34) Foley J. M., Jayaraman R. C., Prior B. M., Pivarnik J. M., Meyer, R. A., MR measurements of muscle damage and adaptation after eccentric exercise. *Journal of applied physiology*, **87** (6), 2311-2318 (1999)
- 35) Ochi E., Tsuchiya Y., Nosaka K., Differences in post-exercise T2 relaxation time changes between eccentric and concentric contractions of the elbow flexors. *European Journal of applied physiology*, **116** (11), 2145-2154 (2016)
- 36) Fulford J., Eston R. G., Rowlands A. V., Davies R. C., Assessment of magnetic resonance techniques to measure muscle damage 24 h after eccentric exercise. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, **25** (1), e28-e39 (2015)

# 運動イメージが感覚運動統合能力に及ぼす影響の検討 —効果的な運動イメージトレーニングの開発を目指して—

大阪大学大学院 佐々木 睦  
(共同研究者) 同 中小司 健 人  
東京大学大学院 金子 直 嗣  
大阪大学大学院 Milosevic Matija

## **The Influence of Motor Imagery on Sensorimotor Integration: Implications for Effective Motor Imagery Training Development**

by

Atsushi Sasaki, Kento Nakashoji,  
Matija Milosevic  
*Osaka University, Graduate School of Engineering Science*  
Naotsugu Kaneko  
*The University of Tokyo, Graduate School of Arts and Sciences*

### ABSTRACT

Motor imagery is a cognitive process that involves the mental simulation of motor actions without actual physical movements, and it is widely used as a training technique to enhance sports performance. Although previous studies have reported the positive effect of motor imagery training on motor function and motor learning, the underlying neurophysiological mechanisms of motor imagery have yet to be fully elucidated. Therefore, the purpose of our study was to investigate the effect of pinch motor imagery on sensorimotor integration, specifically assessed using the short-latency afferent inhibition (SAI) paradigm. Thirteen able-bodied male participants were recruited in this study. The assessments were conducted under two distinct conditions:

Control and Motor imagery conditions. In the Control condition, participants were instructed to relax without engaging in any motor imagery, whereas in the Motor imagery condition, they performed maximum pinch imagery while observing a pinch image displayed on the monitor. During each condition, fifteen SAI responses were measured, which represent the inhibition of motor-evoked potentials elicited through transcranial magnetic stimulation following median nerve electrical stimulation. SAI responses were measured from the first dorsal interosseous muscle. The results showed that there was no significant difference in the magnitude of SAI between the Control and Motor imagery conditions, suggesting that motor imagery has no effect on sensorimotor integration assessed by SAI.

キーワード

運動イメージ, 経頭蓋磁気刺激, 末梢神経刺激, 短潜時求心性抑制, 感覚運動統合

Keyword

motor imagery, transcranial magnetic stimulation, peripheral nerve stimulation, short-latency afferent inhibition, sensorimotor integration

## 要 旨

運動イメージはスポーツパフォーマンスを向上させるためのトレーニングとして広く活用されている。運動イメージトレーニングにより運動パフォーマンスが向上する背景には脳や脊髄を含む運動制御機構の適応があるが、その神経生理学的メカニズムの全容は未解明である。そこで本研究では運動イメージが感覚運動統合機能に及ぼす影響を調べることを目的とした。健康成人男性13名を対象に、手指ピンチ動作のイメージ行う条件（運動イメージ条件）と、イメージをせず安静を維持する条件（コントロール条件）で感覚運動統合機能を評価した。感覚運動統合は経頭蓋磁気刺激と末梢神経刺激のペア刺激によって誘発される短潜時求心性抑制（short-latency afferent inhibition: SAI）によって評価した。その結果、コントロール条件、運動イメージ条件においてSAIの程度に差は認められなかった。これらの結果は、運動イメージはSAIで評価される感覚運動統合機

能に対して影響を及ぼさないことを示唆した。

## 緒 言

運動イメージは実際の運動は伴わず、心的に動作を想起することであり、スポーツパフォーマンスを向上させるためのトレーニングとして広く活用されている<sup>1)</sup>。実際に運動イメージトレーニングは、筋出力などの単純な運動機能や、認知的な要素を含む運動学習に対しても効果的であることが明らかにされている<sup>2-4)</sup>。運動イメージトレーニングにより運動パフォーマンスが向上する背景には脳や脊髄を含む運動制御機構の適応があることが推察される<sup>4)</sup>。しかしながらその神経生理学的メカニズムの全容は未だ解明されていない。運動イメージが中枢神経系に及ぼす影響が詳細に解明されれば、生理学的観点から見て、より有効な運動イメージトレーニングの提案につながると考えられる。また、運動イメージ能力の評価には、これまで質問紙などの主観的な指標が多く用いられてきたが<sup>5)</sup>、運動イメージ中の神経活動が明ら

かになることで、生理学的指標による客観的な評価が可能となる。

運動イメージの神経生理学的効果を調べたこれまでの研究の多くは、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging : 以下 fMRI) などを用いて運動イメージに関わる脳部位を明らかにした<sup>6)</sup>。また、非侵襲的に大脳皮質を刺激する手法である経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation : 以下 TMS) を用いた研究では、運動イメージにより、大脳皮質から筋への主要な運動指令経路である皮質脊髄路の興奮性が増大することも報告されている<sup>7-9)</sup>。

実際の運動では脳内で企画された運動が適切に筋にまで伝わり、生じた運動の結果が感覚入力として脳にフィードバックされ、それがまた次の運動につながるという感覚運動統合が重要になる<sup>10, 11)</sup>。一次運動野に対して単発 TMS を行うと末梢の筋の筋電図で運動誘発電位 (motor evoked potential : 以下 MEP) が導出される<sup>12)</sup>。TMS に約 20ms 先行して末梢神経を刺激するペア刺激により誘発される MEP は、単発 TMS により誘発される MEP に比較して減衰することが知られており、これは短潜時求心性抑制 (short-latency afferent inhibition : 以下 SAI) と呼ばれている<sup>13, 14)</sup>。SAI は感覚入力による一次運動野興奮性の調節を示しており、感覚運動統合を評価するための手法として用いられている<sup>13, 15)</sup>。すなわち、運動イメージ中の SAI の変動を計測することで、運動イメージが感覚運動統合に与える影響を調べることができる。

以上を踏まえ、本研究では運動イメージ中の SAI を調べることにより運動イメージが感覚運動統合機能に与える影響を検討することを目的とした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 被験者

被験者は、中枢神経疾患の既往歴を持たない健康成人男性 13 名 (平均 ± 標準偏差, 年齢: 23.0 ± 1.0 歳, 身長: 170.4 ± 4.4 cm, 体重: 61.2 ± 5.5 kg) であった。本研究は大阪大学大学院基礎工学研究科倫理審査委員会の承認のもと、全ての被験者からインフォームドコンセントを得た上で実施された。

### 1. 2 表面筋電図

利き腕の第一背側骨間筋 (first dorsal interosseous muscle: 以下 FDI) から表面筋電図を記録した。電極はディスプレイ電極 (Vitrode F-150s, 日本光電社製, 日本) を用いた。筋電図信号は増幅機 (MEG-6108, ミユキ技研社製, 日本) により 5Hz-1000Hz の帯域通過フィルタ処理を通して 1000 倍に増幅された。増幅された筋電図信号は AD 変換器 (Powerlab 16/35, ADInstruments 社製, オーストラリア) を用いてコンピュータのハードディスクに記録した。その際のサンプリング周波数は 4000Hz とした。

### 1. 3 実験プロトコル

実験中、被験者は椅子に腰をかけた座位姿勢をとり、両上肢は肘掛けの上に置き安静を維持するよう指示された。本研究では一人称視点からのピンチ (つまみ) 動作の運動イメージを行うこととし、被験者には「実際の運動の感覚や筋収縮のイメージをして下さい」という指示が与えられた。被験者が運動イメージを行う際、前方に設置されたモニター画面上に一人称視点での利き腕のピンチ動作の画像が提示され (図 1A), それを見ながら (運動観察), 運動イメージを行うことを指示した。実験に先立ち、被験者は実験手順に関する十分な説明を受け、実際の測定時と同様の手順で運動イメージの練習を十分に行なった。運動イ

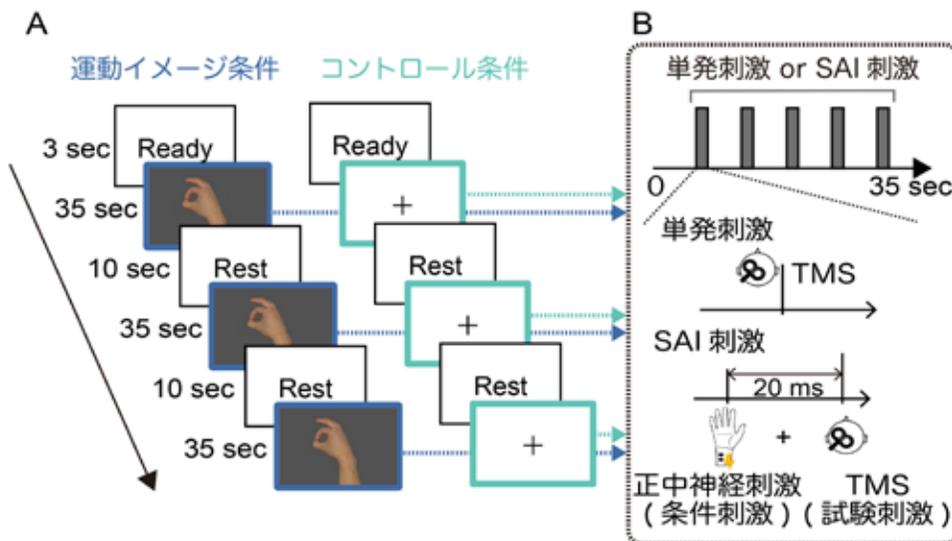


図1A 実験プロトコル

3秒間の「Ready」キューの後、35秒間のピンチ運動画像（運動イメージ条件）、または「+」（コントロール条件）が提示され、その後10秒間の「Rest」キューが提示される。一連の流れは3セット繰り返される。

図1B 刺激プロトコル

35秒間の画像提示または「+」提示時に5回の単発刺激またはSAI刺激が与えられた。単発刺激ではTMSのみの刺激を行うのに対して、SAI刺激では条件刺激である正中神経刺激と試験刺激であるTMSが20 msの刺激間隔で与えられた。

メージは利き腕のピンチ動作で行なった。

測定は運動イメージ条件とコントロール条件の2条件で行ない、それぞれの条件を行う順序は被験者間でランダム化された。運動イメージ条件では3秒間の「Ready」キューの提示後にピンチ動作の画像が35秒間提示された（図1A）。35秒間のピンチ動作画像は10秒間の「Rest」キューを挟み3回提示された（図1A）。「Ready」または「Rest」のキューが提示されている間、被験者は安静を維持するよう指示された。ピンチ動作の画像が提示されている間、被験者は全力のピンチ動作の運動イメージを行った。コントロール条件では35秒間の運動イメージ画像の代わりに「+」が提示され、その間被験者は運動イメージを行わず十字を注視しながら安静を維持することを指示された（図1A）。それぞれの条件において、35秒間の運動イメージまたは十字を見ている際に、感覚運動統合機能を評価するための単発刺激またはSAI刺激がランダムな間隔で5回与えられた（図1B）。

35秒間の運動イメージまたは十字注視は3セットずつ行われたため、計15回の単発刺激およびSAIの刺激が与えられた。全実験を通して、計60回の刺激が与えられた [15回×2刺激法（単発刺激、SAI刺激）×2条件（運動イメージ条件、コントロール条件）]。

#### 1. 4 短潜時求心性抑制 (short-latency afferent inhibition: SAI)

SAIはヒト生体において非侵襲的に感覚運動統合機能を評価するための手法として知られており<sup>13,15</sup>、本研究においてもこれを用いた。SAIを計測するために、単発TMS刺激により誘発されるMEPと、条件刺激（正中神経電気刺激）と試験刺激（TMS）のペア刺激（SAI刺激）により誘発されるMEPを計測した。単発刺激時のMEPに対する、SAI刺激時のMEPの減衰の程度をSAIとする<sup>14</sup>。SAI刺激では試験刺激に20ms先行して条件刺激を与えた（図1B）<sup>16</sup>。TMSおよび正中神経刺激

の刺激パラメータに関しては以下に示す。

#### 1. 4. 1 経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation: TMS)

TMSは非侵襲的な脳刺激手法であり、単発TMSにより誘発されるMEPは大脳皮質から筋までの主要な運動指令伝達経路である皮質脊髄路の興奮性を反映することが知られている。本研究にはおいては、TMSは末梢神経刺激と組み合わせることで、SAIを計測するために用いられた。TMSには経頭蓋磁気刺激装置 (Magstim 200, Magstim社製, イギリス) および8の字コイル (D7 Remote Coil, Magstim社製, イギリス) を使用した。利き腕とは対側の半球の一次運動野へTMSを行い、FDIで計測されるMEPの振幅値が最も大きい場所 (hotspot) を刺激位置とした。刺激強度はTMSを10回行い、50%の確率 (5回) でFDIから記録されたMEPの振幅値が0.5 mVを超える最小の強度とした<sup>17, 18)</sup>。刺激強度はコントロール条件および運動イメージ条件のそれぞれで決められた。コントロール条件では安静状態で、運動イメージ条件では運動イメージをしている際に上記手順で刺激強度をそれぞれ決めた。

#### 1. 4. 2 正中神経電気刺激

正中神経電気刺激には電気刺激装置 (DS7R, Digitimer社製, イギリス) を使用し、パルス幅が200  $\mu$  sの矩形波電流刺激を用いた<sup>17)</sup>。刺激部位は利き腕手首付近の正中神経とし、陰極が近位となるよう3cmほどの電極間距離で表面電極 (Vitrode F-150s, 日本光電社製, 日本) を貼付した。刺激強度は感覚閾値の3倍とした<sup>17)</sup>。感覚閾値は被験者が知覚することのできる最小の電気刺激強度とした。

#### 1. 5 データ解析

単発刺激またはSAI刺激により誘発されたMEPの振幅値を算出した。各刺激法 (単発刺激, SAI刺激) におけるMEP振幅値の平均値から、各

実験条件 (コントロール条件, 運動イメージ条件) におけるSAIを下式の通り算出した。

$$SAI = \frac{MEP_{SAI\ stim}}{MEP_{single\ stim}} \times 100$$

MEP single stimは単発刺激時のMEP振幅値、MEP SAI stimはSAI刺激時のMEP振幅値を示している。

#### 1. 6 統計処理

統計解析には、統計計算用言語 (R version 4.2.1) を用いた。単発刺激時のMEP (ベースライン: 100%)、コントロール条件でのSAI刺激時のMEP、運動イメージ条件でのSAI刺激時のMEPを比較するため、Friedman検定および、下位検定としてWilcoxon符号順位検定を行なった。検定の多重性に伴うp値の補正にはBonferroni法を用いた。有意水準は5%未満とした。

#### 2. 結果

図2Aに各条件における各刺激法によって誘発されたMEPの典型波形を示す。Friedman検定の結果、ベースライン、コントロール条件、運動イメージ条件のMEPの間に有意な差があることが示された [ $\chi^2(2) = 15.57, p < 0.001$ ]。Wilcoxon符号順位検定により、コントロール条件でのSAI刺激時のMEPは、ベースラインのMEP (= 100%) と比較して有意に小さいことが示された (図2B,  $p < 0.01$ )。同様に、運動イメージ条件でのSAI刺激時のMEPは、ベースラインのMEPと比較して有意に小さいことが示された (図2B,  $p < 0.01$ )。一方でコントロール条件と運動イメージのSAI刺激時のMEPには有意な差は確認されなかった (図2B,  $p = 1.00$ )。

#### 3. 考察

本研究ではSAIパラダイムを用いて、運動イ

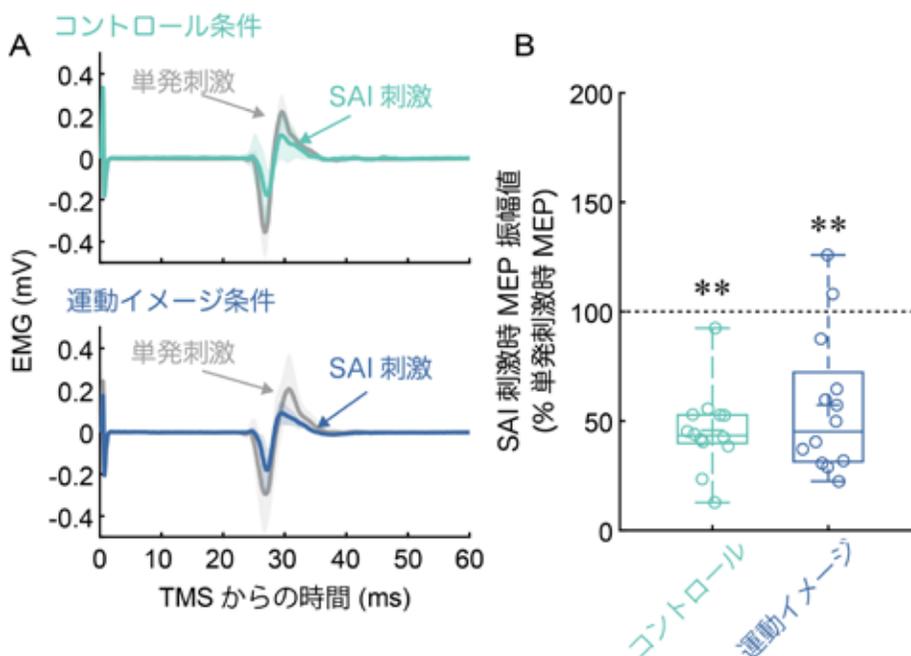


図2A コントロール条件 運動イメージ条件における単発刺激時, SAI刺激時の典型MEP波形(n = 1). 太線が15回の平均波形で, 影がその標準偏差を示す. コントロール条件, 運動イメージ条件ともに, SAI刺激時のMEPが単発刺激時のMEPよりも減衰していることがわかる.

図2B 各条件におけるMEPの減衰の程度(SAI)

単発刺激時のMEPを100%として正規化したMEPを示す. 箱ひげ図では, 箱中の横線が中央値, 十字が平均値, 箱の下端が第一四分位(25%), 箱の上端が第三四分位(75%), ひげの両端が最大値および最小値を示す. 各点は各被験者のデータを示す. \*は100%(ベースライン)との有意差を示す(\*\* $p < 0.01$ ).

イメージが感覚運動統合に与える影響について調べた. コントロール条件, 運動イメージ条件, ともにMEPの減衰 (SAI) が観察されたが, 両条件間においてSAIの程度に差は認められなかった. これらの結果は, 運動イメージはSAIで評価される感覚運動統合機能に対して影響を及ぼさないことを示唆した. 運動イメージ中の感覚運動統合について検討した知見は少なく, 本研究は運動イメージの神経生理学的効果について, 感覚運動統合という観点から新たな示唆を与えるものとなると考えられる.

これまでに, 運動イメージは実際の運動と共通する脳活動を惹起することが明らかとされている. 例えば, fMRIを用いた研究では, 手や足などの身体部位の運動イメージは, それらを実際に動かした際に活動する運動野の一部を動員するこ

とが報告されている<sup>6)</sup>. さらに, 脳波を用いた近年の研究では, 歩行の運動イメージは実際の歩行と類似する脳活動パターンが惹起されることも報告されている<sup>19)</sup>. 運動イメージは実際の運動と類似した神経活動を惹起することに加え, 実際の運動時にはSAIが減少(脱抑制)すること<sup>20)</sup>を鑑みると, 運動イメージによってもSAIが変調する可能性が考えられた. しかしながら, 本研究では運動イメージによってSAIの変調は認められなかった. すなわち, SAIで評価される感覚運動統合に関連する神経回路では, 運動イメージと実際の運動では異なる神経活動が惹起されている(あるいはSAI回路では実際の運動のような神経活動は生じない)ことが考えられた. これらの結果は, 実際の運動と運動イメージでそれぞれ惹起される神経活動は, 完全には同様ではなく, 一部共

通する箇所があるというこれまでの見解と一致する<sup>21)</sup>。例えばfMRIを用いた研究においては、運動イメージに特有の脳活動を明らかにしている<sup>21)</sup>。また、運動を準備することは準備の内容(運動)が意識化されることであり、運動イメージは運動実行よりも、むしろこの運動準備過程と類似することも指摘されている<sup>22)</sup>。すなわち、こうした実際の運動と運動イメージによって惹起される神経活動の違いが本研究の結果にも反映されている可能性が考えられた。近年の研究により、実際に運動が実行される際や<sup>20)</sup>、上肢-下肢の協調運動<sup>23)</sup>に対してSAIの減少(脱抑制)が寄与する可能性が報告されている。本研究における運動イメージは実際の運動より運動準備過程に類似するため、これらのSAIの変化は生じなかったと考えられる。

SAIは体性感覚入力による一次運動野興奮性の調節(感覚運動統合)を反映することが知られている<sup>14)</sup>。本研究の結果から、感覚フィードバック(体性感覚入力)を伴わない運動イメージではこれらの神経回路を賦活させるのに十分でなかった可能性が考えられた。すなわち、感覚運動統合をより促進するような効果を得るためには、触覚などの体性感覚入力を付加するような運動イメージトレーニング<sup>24)</sup>などが有効である可能性が考えられた。

#### 4. 結 論

本研究ではSAIパラダイムを用いて運動イメージが感覚運動統合に及ぼす影響について調べた。その結果、コントロール条件、運動イメージ条件ともに有意なSAIが見られたが、両条件間でSAIの程度は同様であった。これは、運動イメージがSAIで評価される感覚運動統合機能に影響を及ぼさないことを示した。本研究で明らかとなった知見は、運動イメージの神経生理学的効果に対する理解を進めるもので、より効果的な運動イメージ

トレーニング開発の一助となる。

#### 謝 辞

本研究に助成いただいた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり大阪大学の野村泰伸教授から多大なご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) S.M. Murphy, Imagery interventions in sport, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **26**. [https://journals.lww.com/acsm-mssse/Fulltext/1994/04000/Imagery\\_interventions\\_in\\_sport.14.aspx](https://journals.lww.com/acsm-mssse/Fulltext/1994/04000/Imagery_interventions_in_sport.14.aspx). (1994)
- 2) C.-J. Olsson, B. Jonsson, L. Nyberg, Internal imagery training in active high jumpers, *Scand. J. Psychol.*, **49**, 133-140. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.2008.00625.x>. (2008)
- 3) I. Zijdwind, S.T. Toering, B. Bessem, O. Van Der Laan, R.L. Diercks, Effects of imagery motor training on torque production of ankle plantar flexor muscles, *Muscle Nerve.*, **28**, 168-173. <https://doi.org/10.1002/mus.10406>. (2003)
- 4) A. Pascual-Leone, D. Nguyet, L.G. Cohen, J.P. Brasil-Neto, A. Cammarota, M. Hallett, Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills, *J. Neurophysiol.*, **74**, 1037-1045. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.74.3.1037>. (1995)
- 5) L.P. McAvinue, I.H. Robertson, Measuring motor imagery ability: A review, *Eur. J. Cogn. Psychol.*, **20**, 232-251. <https://doi.org/10.1080/09541440701394624>. (2008)
- 6) H.H. Ehrsson, S. Geyer, E. Naito, Imagery of Voluntary Movement of Fingers, Toes, and Tongue Activates Corresponding Body-Part-Specific Motor Representations, *J. Neurophysiol.*, **90**, 3304-3316. <https://doi.org/10.1152/jn.01113.2002>. (2003)
- 7) P.M. Rossini, Corticospinal Excitability Modulation to Hand Muscles During Movement Imagery, *Cereb. Cortex.*, **9**, 161-167. <https://doi.org/10.1093/cercor/9.2.161>. (1999)
- 8) L. Fadiga, G. Buccino, L. Craighero, L. Fogassi, V. Gallese, G. Pavesi, Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery] a

- magnetic stimulation study, *Neuropsychologia*, **37**, 147–158. (1999)
- 9) R. Hashimoto, J.C. Rothwell, Dynamic changes in corticospinal excitability during motor imagery, *Exp. Brain Res.*, **125**, 75–81. <https://doi.org/10.1007/s002210050660>. (1999)
  - 10) J.C. Rothwell, M.M. Traub, B.L. Day, J.A. Obeso, P.K. Thomas, C.D. Marsden, MANUAL MOTOR PERFORMANCE IN A DEAFFERENTED MAN, *Brain.*, **105**, 515–542. <https://doi.org/10.1093/brain/105.3.515>. (1982)
  - 11) M. Wiesendanger, T.S. Miles, Ascending pathway of low-threshold muscle afferents to the cerebral cortex and its possible role in motor control, *Physiol. Rev.*, **62**, 1234–1270. <https://doi.org/10.1152/physrev.1982.62.4.1234>. (1982)
  - 12) J. Rothwell, P. Thompson, B. Day, S. Boyd, C. Marsden, Stimulation of the human motor cortex through the scalp, *Exp. Physiol.*, **76**, 159–200. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.1991.sp003485>. (1991)
  - 13) A. Sailer, G.F. Molnar, G. Paradiso, C.A. Gunraj, A.E. Lang, R. Chen, Short and long latency afferent inhibition in Parkinson' s disease, *Brain.*, **126**, 1883–1894. <https://doi.org/10.1093/brain/awg183>. (2003)
  - 14) H. Tokimura, V. Lazzaro, Y. Tokimura, A. Oliviero, P. Profice, A. Insola, P. Mazzone, P. Tonali, J.C. Rothwell, Short latency inhibition of human hand motor cortex by somatosensory input from the hand, *J. Physiol.*, **523**, 503–513. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00503.x>. (2000)
  - 15) M. Fischer, M. Orth, Short-latency sensory afferent inhibition: conditioning stimulus intensity, recording site, and effects of 1 Hz repetitive TMS, *Brain Stimulat.*, **4**, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2010.10.005>. (2011)
  - 16) H. Devanne, A. Degardin, L. Tyvaert, P. Bocquillon, E. Houdayer, A. Manceaux, P. Derambure, F. Cassim, Afferent-induced facilitation of primary motor cortex excitability in the region controlling hand muscles in humans, *Eur. J. Neurosci.*, **30**, 439–448. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06815.x>. (2009)
  - 17) Z. Ni, S. Charab, C. Gunraj, A.J. Nelson, K. Udupa, I.-J. Yeh, R. Chen, Transcranial Magnetic Stimulation in Different Current Directions Activates Separate Cortical Circuits, *J. Neurophysiol.*, **105**, 749–756. <https://doi.org/10.1152/jn.00640.2010>. (2011)
  - 18) R.F.H. Cash, R. Isayama, C.A. Gunraj, Z. Ni, R. Chen, The influence of sensory afferent input on local motor cortical excitatory circuitry in humans: Effects of sensory input on SICF, *J. Physiol.*, **593**, 1667–1684. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2014.286245>. (2015)
  - 19) N. Kaneko, H. Yokoyama, Y. Masugi, K. Watanabe, K. Nakazawa, Phase dependent modulation of cortical activity during action observation and motor imagery of walking: An EEG study, *NeuroImage.*, **225**, 117486. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117486>. (2021)
  - 20) M.J. Asmussen, C.M. Zapallow, M.F. Jacobs, K.G.H. Lee, P. Tsang, A.J. Nelson, Modulation of Short-Latency Afferent Inhibition Depends on Digit and Task-Relevance, *PLoS ONE.*, **9**, e104807. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104807>. (2014)
  - 21) E. Gerardin, Partially Overlapping Neural Networks for Real and Imagined Hand Movements, *Cereb. Cortex.*, **10**, 1093–1104. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.11.1093>. (2000)
  - 22) R.M. Hardwick, S. Caspers, S.B. Eickhoff, S.P. Swinnen, Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution, *Neurosci. Biobehav. Rev.*, **94**, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.08.003>. (2018)
  - 23) T. Kato, A. Sasaki, K. Nakazawa, Disinhibition of short-latency but not long-latency afferent inhibition of the lower limb during upper-limb muscle contraction, *NeuroReport.*, **34**, 280–286. <https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000001889>. (2023)
  - 24) N. Mizuguchi, T. Yamagishi, H. Nakata, K. Kanosue, The effect of somatosensory input on motor imagery depends upon motor imagery capability, *Front. Psychol.*, **6**. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00104>. (2015)

# 過去の運動習慣が将来のうつ・不安を予防する メカニズムの解明

佐賀大学 富賀裕貴  
(共同研究者) 福岡大学 檜垣靖樹  
佐賀大学 高橋宏和

## Effects of Past-Exercise Training on Mood-Related Behaviors and Epigenetic Modification in Mice

by

Yuki Tomiga

*Faculty of Medicine, Saga University*

Yasuki Higaki

*Faculty of Sports and health science, Fukuoka University*

Hirokazu Takahashi

*Liver Center, Saga University Hospital*

### ABSTRACT

Regular exercise is effective treatment for the improvement of mental illness. However, the duration of exercise effects and the impact on future mood-related behaviors, such as anxiety and depression, remain unclear. Therefore, we determined the long-term impacts of regular exercise on mood behaviors after cessation of exercise. Moreover, we focused on epigenetics, which is one of the mechanisms for the regulation of gene expression independent of DNA sequences, in hippocampal BDNF as its underlying mechanisms. Anxiety-like behaviors as a mood-related behaviors were measured by Elevated Plus Maze test. After 4 weeks of exercise training, the anxiolytic effects were lasting after 2 weeks of exercise cessation. Meanwhile, after 4 weeks of

exercise cessation, anxiety-like behaviors were increased on the contrary. In contrast to our hypothesis, hippocampal *Bdnf* mRNA and DNA methylation levels were unchanged after 2 and 4 weeks of exercise cessation. These results suggest that the beneficial effects on mood-related behaviors after cessation of exercise are maintained in the short term. However, over a more extended withdrawal period, they can lead to an increase in anxiety.

キーワード

運動, 過去の運動, 海馬, エピジェネティクス, 脳由来神経栄養因子

Keyword

Exercise, past-exercise, hippocampus, epigenetics, Brain-derived neurotrophic factor

## 要 旨

定期的な運動がうつ・不安の改善に効果的であることはよく知られている。しかしながら、その効果の持続期間や、将来のうつ・不安を予防するののかについては不明な点が多い。本研究では、動物を対象に4週間の運動トレーニングを実施させ、運動停止期間後の気分行動を定量した。さらに、その海馬内分子メカニズムとして脳由来神経栄養因子 (Brain-derived neurotrophic factor: BDNF) のエピジェネティックな変化に着目した検討を行った。気分行動の評価は、不安様行動の計測によく用いられる高架式十字迷路試験およびオープンフィールド試験を用いた。高架式十字迷路試験の結果、抗不安様行動の指標の一つであるオープンアームでの移動距離は、運動トレーニング停止2週間後においても高値を示していた。一方で、運動トレーニング停止4週間後ではオープンアームでの移動距離が、コントロール群に比べ有意に減少していた。オープンフィールド試験における中心エリアへの侵入回数は、運動トレーニング停止2および4週間後において群間差は認められなかった。*Bdnf* の mRNA レベル、エピジェネティクスの一つである DNA メチル化レベルは変化していなかった。本研究結果から、運動による抗不安効

果は短期的には維持される一方で、離脱期間が長期にわたるとむしろ不安が増加することが明らかとなった。またその分子背景には、今回解析した領域における海馬 *Bdnf* のエピジェネティックな制御機構は関与していない可能性が示唆された。

## 緒 言

うつや不安は世界的な健康問題の一つであり、その予防・治療策の構築は重要な課題である。疫学調査からは、定期的な運動は、将来のうつ予防に効果的であることが示されている。逆に運動習慣がない場合、将来的なうつ発症リスクが44%増加する<sup>1)</sup>。興味深いことに、薬物療法に比べ、同期間の運動介入を受けたうつ病患者は、介入終了6か月後の時点で、うつ病の再発率が低いことが報告されている<sup>2)</sup>。すなわち運動療法には、薬物治療とは異なるうつ・不安の持続的な抑制効果が存在する可能性が示唆されている。

古くから「昔とった杵柄」という言葉があるように、過去に獲得した技能や特徴が年月を経ても衰えないことは、経験的にもよく知られている。近年のスポーツ科学分野においても“マッスルメモリー”という用語に代表されるように、運動の記憶が骨格筋に刻み込まれている可能性が明らか<sup>3)</sup>。実際にトレーニング後に得ら

れる筋力向上・筋肥大効果は、事前トレーニングを行っていない者に比べ、行っていた者の方が高い<sup>4)</sup>。このメカニズムとして、エピジェネティクスという遺伝子発現調節機構が関与している可能性が示唆されている。エピジェネティクスは「DNA塩基配列によらない遺伝子発現調節機構」と定義される。代表的なエピジェネティクスであるDNAメチル化は、遺伝子発現を抑制する制御機構であり、逆にメチル化が取り除かれると遺伝子発現が促進される。一卵性双生児を対象とした研究から、一度刻まれたこのDNAメチル化パターンは、容易には変化しないことが知られている<sup>5)</sup>。

脳由来神経栄養因子 (Brain-derived neurotrophic factor: BDNF) は、運動により海馬で誘導される重要な栄養因子の一つである。ヒトでは、血中BDNF DNAメチル化レベルが精神疾患のバイオマーカーとなり得ることが示唆されている<sup>6)</sup>。本研究は、運動により脳に刻まれた海馬BDNF DNAメチル化レベルの変化が、運動中断後も継続的に維持されることで、うつ・不安発症の予防に寄与しているという仮説を立てた。本研究の目的は、過去の運動経験によるうつ・不安予防効果がどの程度の期間維持されるのか、またその背景にある海馬でのエピジェネティックな分子基盤を明らかにすることを目的とした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 実験動物及び運動トレーニング

実験動物には7週齢のC57BL/6J雄性マウスを用いた。マウスは、室温 ( $23.8 \pm 0.2$  °C)、および湿度 ( $50.4 \pm 1.9$  %) が維持されている12時間の明暗サイクルに設定された佐賀大学総合分析実験センター飼育室で飼育した。標準固形資料と水は自由に摂取させた。すべての実験は、佐賀大学動物実験委員会の承認を得て実施した。

運動 (EX) 群は回転ホイールが設置されたケージ内で飼育し、4週間の自発走行運動を実施させた。安静 (SED) 群は、回転ホイールの設置していない同サイズのケージ内で飼育した。運動トレーニングから4週間後に安静群と同様のケージに戻し、運動停止後2 (SED:n=7, Ex:n=8)、または4週間 (SED:n=7, Ex:n=7)、CON群と同様に通常通り飼育した (図1)。最終的に、体重は、飼育開始前および屠殺前に測定された。

### 1. 2 行動テスト

気分行動はオープンフィールド試験 (Open field test: OFT) および、高架式十字迷路試験 (Elevated plus maze: EPM) により評価した。マウスをオープンフィールド (40×40×15cm) の中心エリアに投入した後、マウスを5分間自由に行動させた。EPM装置はオープンなアーム (30×5cm) と

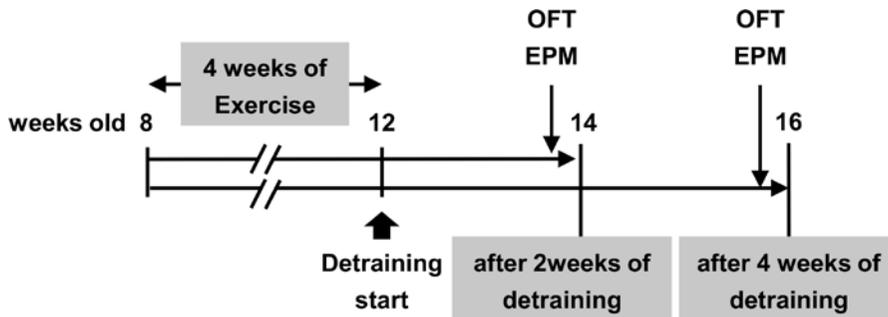


図1 実験の概要  
OFT: Open filed test, EPM: Elevated plus maze.

クローズドなアーム (30×5×15cm) から構成されており、地上から40cmの位置に設置された。マウスをオープンアーム方向に向け、センターエリアに投入した後、5分間自由に行動させた。全ての行動テストは、ビデオカメラと動物行動トラッキングシステム Smart 3.0 software (Panlab, Barcelona, Spain) により記録した。OFTにおける中心エリアへの侵入回数 (center entries), EPMにおけるオープンアーム上での移動距離割合 (percentage of open/total arm distance) ならびにマウスが静止している時間 (resting time) を定量化した。試験はOFT, EPMの順で、屠殺2日前に実施された。行動テストに対する馴化の影響を避けるため、OFT, EPMは、介入後のみ実施した。

### 1. 3 検体採取

行動テストの翌日、イソフルラン麻酔下においてマウスを安楽死させた後、海馬組織を採取し、RNA安定化剤に4℃で24時間浸漬させた。RNA安定化剤を除去した後、実験に使用するまで-80℃で保存した。

### 1. 4 リアルタイムRT-PCR法

Total RNA 溶液は、FastGene RNA basic Kit (Nippon Gene, Tokyo, Japan) を用いて抽出し、濃度および純度はNanoDrop 2000 (ThermoFisher Scientific) により評価した。Total RNAは、PrimerScript RT Master Mix (Takara Bio, Otsu, Japan) を用いて逆転写し、SYBR Green Master Mix (Applied Biosystems, Foster City, CA, United States) を使用し、QuantStudio 3 real-time PCR system により *Bdnf* (Forward: TGGCCCTGCGGAGGCTAAGT, Reverse: AGGGTGCTTCCGAGCCTTCCT) および *Gapdh* (Forward: AACGACCCCTTCATTGAC, Reverse: TCCACGACATACTCAGCAC) のmRNA発現量を評価した。

### 1. 5 パイロシーケンス法

ゲノムDNAは、QIAamp DNA Mini Kit (Qiagen, Germantown, MD, USA) を用いて抽出した。その後DNAは、EpiTect Bisulphite Kit 48 (Qiagen) によりバイサルファイト処理された。バイサルファイトDNAの増幅には、TaKaRa EpiTaq HS for bisulphite-treated DNA (Takara Bio) および *Bdnf* プライマーを使用した (Forward: TAGGATTGGAAGTGAAAATATTTATAAAGT; reverse: CCTTCAACCAAAACTCCATTTAATCT)。DNAメチル化レベルは、PyroMark Q96 ID pyrosequencer を用いて定量化した (sequencing primer: AGAGGAGGTATTATATGATAG)。

### 1. 6 統計

データは平均値±標準誤差で示した。統計解析には、GraphPad Prism 7を使用した。SED群とEX群の比較には対応のないt検定を使用し、有意水準は5%とした。

## 2. 結果

4週間の運動トレーニングを実施した後、運動停止から2、または4週間の体重を評価した。運動停止2、または4週間後の体重は、安静群と比較して、違いは認められなかった (図2A and B)。

運動停止2週間後において、OFTにより評価した中心エリアへの侵入回数は安静群と運動群の間に差は認められなかった (図3A)。EPMにより評価したオープンアームでの移動距離割合は、安静群と比較し、運動群で有意に増加していた (図3B)。EPM試験中の安静時間は、2群間で差は認められなかった (図3C)。一方運動停止4週間後群では、OFTにおける中心エリア侵入回数は2群間で差がなかったものの (図4A)、EPMにより評価したオープンアームでの移動距離割合は、運動群において減少していた (図4B)。運動停止2週間後と同様、EPM試験中の安静時間には、群間

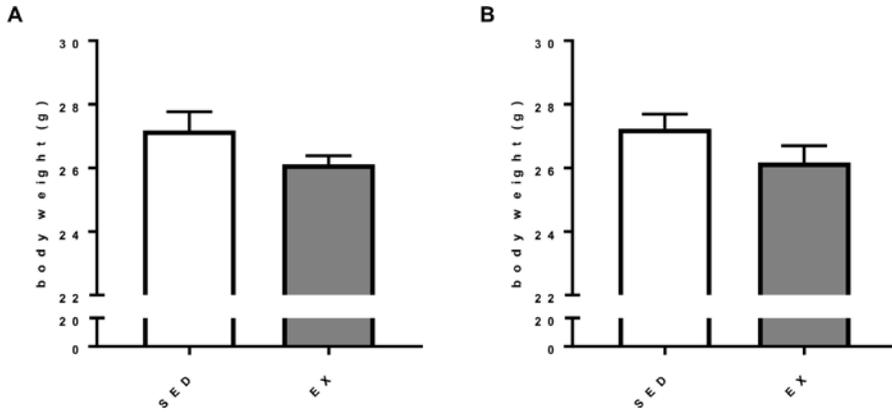


図2 運動停止2週間後(A)および4週間後(B)の体重. 平均±標準誤差.  
SED: sedentary, EX: exercise.

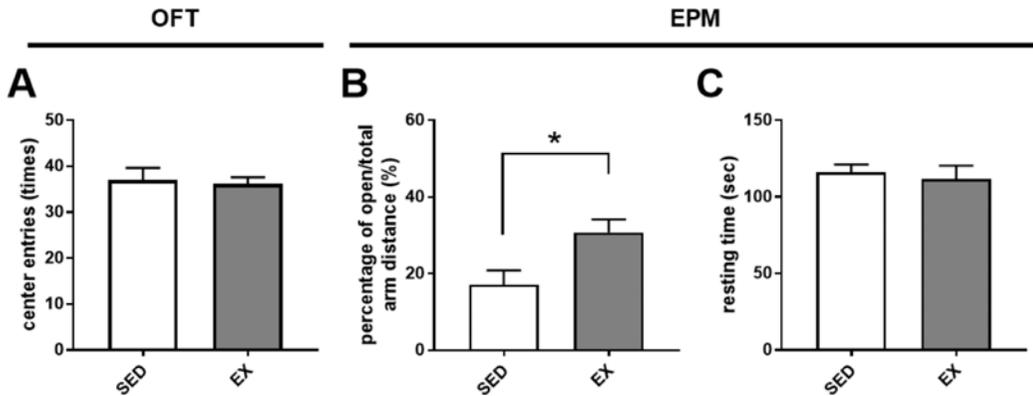


図3 2週間の運動停止が行動テストに及ぼす影響. (A) OFTによる中心エリアへの侵入回数, (B) EPMによるオープンアーム移動距離割合および (C) 安静時間. \*:P < 0.05. 平均±標準誤差  
SED: sedentary, EX: exercise. OFT: Open filed test, EPM: Elevated plus maze.

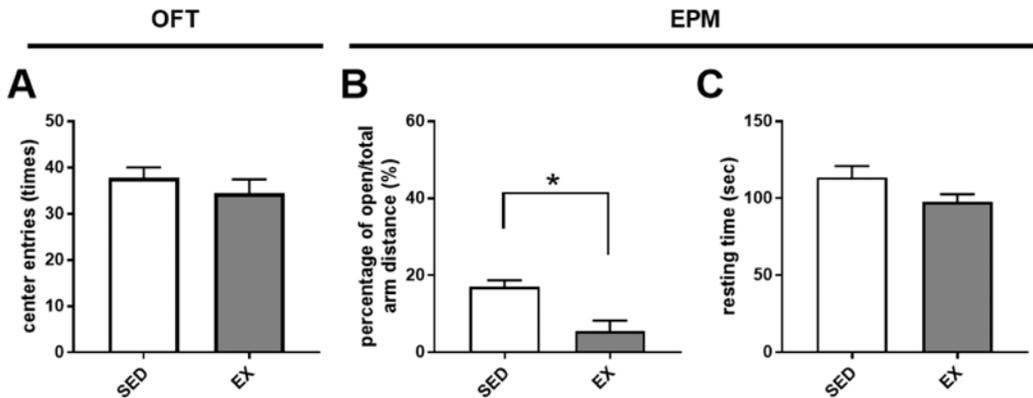


図4 4週間の運動停止が行動テストに及ぼす影響. (A) OFTによる中心エリアへの侵入回数, (B) EPMによるオープンアーム移動距離割合および (C) 安静時間. 平均±標準誤差  
SED: sedentary, EX: exercise. \*:P < 0.05. OFT: Open filed test, EPM: Elevated plus maze.

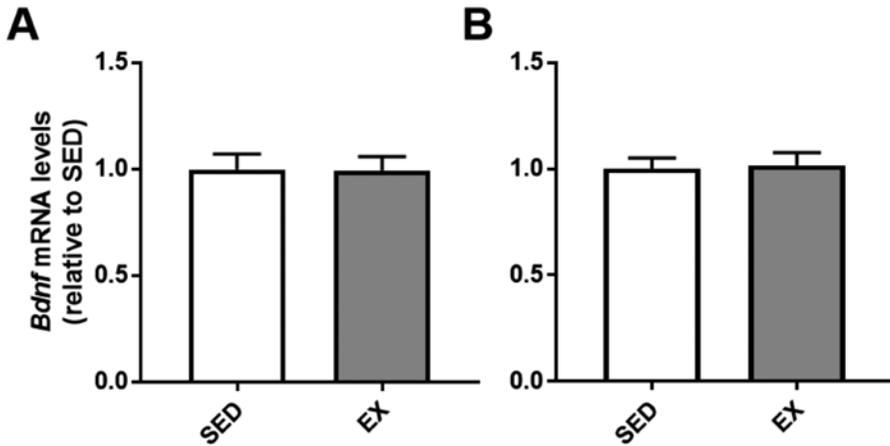


図5 運動停止2週間後 (A) および4週間後 (B) の海馬*Bdnf* mRNA発現量. 平均±標準誤差  
SED: sedentary, EX: exercise.

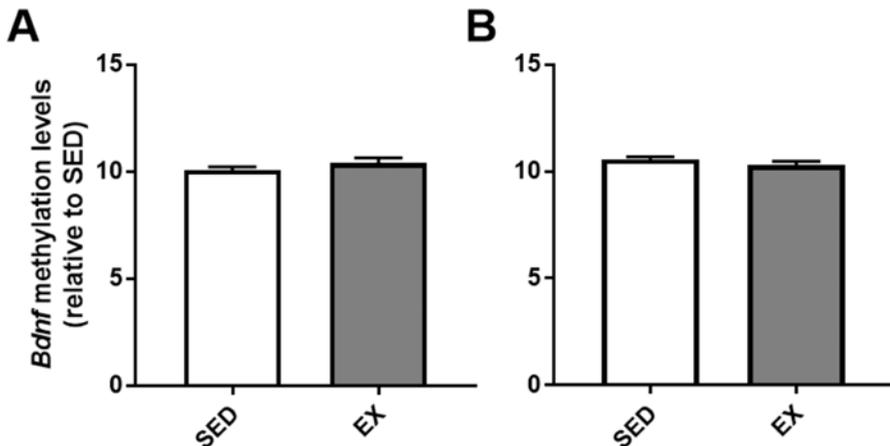


図6 運動停止2週間後 (A) および4週間後 (B) の海馬*Bdnf* DNAメチル化レベル. 平均±標準誤差  
SED: sedentary, EX: exercise.

差はなかった (図4C)。以上の行動テストの結果から、運動停止後2週間までは運動による抗不安効果が残存しているが、運動停止4週間後には逆に負のリバウンド効果をもたらすことが示唆された。

次に、海馬における *Bdnf* mRNA 発現量を評価した。その結果、運動停止2、または4週間後のどちらにおいても、運動による影響は観察されなかった (図5A and B)。神経活動依存的に活性化することが既に報告されている *Bdnf* promoter IV 領域のDNAメチル化レベルをパイロシークエンス法で評価した。遺伝子発現量の結果と同様に、

*Bdnf* promoter IV DNAメチル化レベルは、運動停止2、または4週間後のどちらにおいても、運動による影響は観察されなかった (図6A and B)。

### 3. 考 察

本研究の結果、運動停止後、短期的には運動の抗不安効果が維持され、一定期間が経過すると逆に負のリバウンド効果をもたらすことが明らかになった。このような現象の背景において、海馬内 *Bdnf* 遺伝子発現制御機構は、関与していない可能性が示唆された。

我々の先行研究も含め、動物を用いた回転ホ

イール運動では、体重減少効果が得られることが既に示されている<sup>7)</sup>。本研究の結果、運動停止2週間後の段階で、このような体重減少効果は認められなかった。そのため、本研究で明らかとなった、不安様行動に対する運動停止2週間後のポジティブな、運動停止4週間後のネガティブな効果は、少なくとも運動による体重の変動に依存していない可能性が示唆された。

本研究から、運動停止2週間後では抗不安効果が認められた一方で、運動停止4週間後では、逆に不安様行動が惹起されている可能性が示唆された。先行研究では、マウスにおいて8週間の運動トレーニング後、8週間の運動停止期間を設けた場合、EPMにより評価した不安様行動が増加すること、さらに海馬神経新生が部分的に障害されることを示している<sup>8,9)</sup>。本研究では、4週間の運動に対し、2および4週間の停止期間を設けた。したがって、運動及び停止期間の比は、2.0および1.0となる。本研究の結果より運動及び停止期間の比が2.0である場合は、運動による抗不安効果が維持されていた(図2B)。一方で本研究あるいは先行研究の結果から、運動及び停止期間の比が1.0である場合には、不安様行動の増加や、神経新生の低下が示されている<sup>8,9)</sup>。以上の結果から、少なくとも事前の運動トレーニング期間と同程度、あるいはそれを超える非運動期間が経過した場合、運動による気分行動への効果は負の方向に制御される可能性が示された。しかしながらヒトにおいては、運動療法によるうつ病の再発率は、薬物療法や薬物と運動の複合療法に比べて低いことが報告されている<sup>2)</sup>。また、過去の運動経験は、骨格筋においてはエピジェネティックに記憶されていることが知られており<sup>3)</sup>、筋力向上や筋肥大といった効果は、事前トレーニングを行っていない者に比べ、行っていた者の方が高い<sup>4)</sup>。そのため、再トレーニング後にはより短期間の運動で抗うつ・不安効果が得られる可能性があるが、この

点についてはさらなる研究が必要である。

運動停止2週間後の抗不安効果の維持において、海馬*Bdnf*遺伝子とその発現制御の関与を検討した。その結果、*Bdnf* mRNAレベルは、運動停止2および4週間後のどちらにおいても群間での差は認められなかった。海馬での*Bdnf*遺伝子発現の増加は、運動による脳機能の維持・増進に重要であることは既によく知られている<sup>10)</sup>。*Bdnf*はいくつかのスプライシングバリエントがあり、神経活動依存的にはpromotor IおよびIVから転写されるバリエントが報告されている。運動による海馬での*Bdnf*スプライシングバリエント発現には違いがあり、4週間の運動では*Bdnf* promotor Iのみ10、11日間の比較的短期間の運動では*Bdnf* promotor IおよびIVの両方が誘導されることが報告されている<sup>7)</sup>。本研究では、共通のcoding領域の*Bdnf*遺伝子発現レベルを定量していることから、運動停止後の海馬*Bdnf*発現は、スプライシングバリエントごとに異なる可能性がある。

*Bdnf*遺伝子発現の結果と一致して、運動停止後の*Bdnf* DNAメチル化レベルは非運動群と同等であった。本研究で解析した*Bdnf* promotor IVのCpG領域は、ヒトとマウスでの相同性が96%であることに加え、その血中BDNF DNAメチル化レベルが精神疾患のバイオマーカーとなり得ることが示唆されている<sup>6)</sup>。また我々は以前、本解析領域の*Bdnf* DNAメチル化レベルは、11日間の運動により海馬で低下することを報告した<sup>7)</sup>。そのため、少なくとも4週間の運動を実施した後、2週間の運動停止期間をおいた時点で、運動11日後に観察される海馬*Bdnf*低メチル化パターンは消去されていると考えられる。したがって、運動停止2週間後に維持されていた抗不安効果は、*Bdnf* coding領域の遺伝子発現、およびpromotor IV領域のDNAメチル化は関与していない可能性が示唆された。*Bdnf*にはいくつかのスプライシングバリエントや、promotor上には複数のCpG領

域が存在することから、異なるスプライシングバリエーションおよびCpG領域が関与しているかどうかはさらなる研究が必要である。また、DNA修飾だけでなく、アセチル化をはじめとするヒストン修飾も、重要なエピジェネティック修飾の一つである。最近の先行研究では、*Bdnf* promoter IやIVの誘導の一部に、ヒストンH3のアセチル化や、H3K4メチル化が関与していることが明らかにされた<sup>11)</sup>。そのため、運動および運動停止後に海馬に刻まれる運動効果の背景には、DNA修飾ではなくヒストン修飾が関与している可能性がある。

#### 4. 結 論

本研究の結果、4週間の定期的な運動による抗不安効果は、運動停止2週間後まで維持され、運動停止4週間後には逆に不安様行動を誘発することが明らかとなった。その海馬内での分子的な背景には、*Bdnf*とそのエピジェネティックな制御機構は関与していない可能性が示唆された。

#### 謝 辞

本研究の遂行にあたり研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また実験の遂行にあたり多大なご協力いただきました佐賀大学医学部肝臓・糖尿病・内分泌内科 技術補佐員 高野阿希子氏に深く感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) Harvey S. B. et al., Exercise and the prevention of depression: results of the HUNT Cohort Study., *American Journal of Psychiatry*, **175**, 28–36 (2018)
- 2) Babyak M. et al., Exercise treatment for major depression: maintenance of therapeutic benefit at 10 months., *Psychosomatic Medicine*, **62**, 633–638 (2000)
- 3) Sharples A. P., Stewart C. E., Seaborne R. A., Does skeletal muscle have an ‘epi’-memory? The role of epigenetics in nutritional programming, metabolic disease, aging and exercise., *Aging Cell*, **15**, 603–616 (2016)
- 4) Staron R. S. et al., Strength and skeletal muscle adaptations in heavy-resistance-trained women after detraining and retraining., *Journal of Applied Physiology*, **70**, 631–640 (1991)
- 5) Fraga M. F. et al., Epigenetic differences arise during the lifetime of monozygotic twins., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **102**, 10604–10609 (2005)
- 6) Kundakovic M. et al., DNA methylation of BDNF as a biomarker of early-life adversity., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**, 6807–6813 (2015)
- 7) Tomiga Y. et al., Short-term running exercise alters DNA methylation patterns in neuronal nitric oxide synthase and brain-derived neurotrophic factor genes in the mouse hippocampus and reduces anxiety-like behaviors., *The FASEB Journal*, **35**, e21767 (2021)
- 8) Nishijima T. et al., Cessation of voluntary wheel running increases anxiety-like behavior and impairs adult hippocampal neurogenesis in mice., *Behavioural Brain Research*, **245**, 34–41 (2013)
- 9) Nishijima T., Kamidozono Y., Ishiizumi A., Amemiya S., Kita I., Negative rebound in hippocampal neurogenesis following exercise cessation., *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, **312**, R347–R357 (2017)
- 10) Cotman C. W., Berchtold N. C., Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity., *Trends in Neurosciences*, **25**, 295–301 (2002)
- 11) Li C. et al., Leptin regulates exon-specific transcription of the *Bdnf* gene via epigenetic modifications mediated by an AKT/p300 HAT cascade., *Molecular Psychiatry*, **26**, 3701–3722 (2021)

# 発育期の子どもにおける運動制御の正確性と 運動単位活動との関連

岩手大学・中京大学 奥平 柁道  
(共同研究者) 京都大学大学院 廣野 哲也  
中京大学 竹田 良祐  
同 渡邊 航平

## The Association between Accuracy of Motor Control and Motor Unit Activity in Developing Children

by

Masamichi Okudaira

*Faculty of Education, Iwate University*

*School of Health and Sport Sciences, ChukyoUniversity*

Tetsuya Hirono

*Graduate School of Medicine, Kyoto University*

Ryosuke Takeda, Kohei Watanabe

*School of Health and Sport Sciences, ChukyoUniversity*

### ABSTRACT

The accuracy of force production in children is recognized to be less than that of adults, yet the motor unit (MU) activation pattern, the smallest unit of the neural system and muscle fiber, remains incompletely understood. This research aimed to clarify the accuracy of force production and MU activity in children. Eighteen children aged 6 to 12 and 18 healthy young adults performed the maximal voluntary isometric contraction (MViC) and ramp-up contraction to 50 %MViC in knee extension. High-density surface electromyography was recorded from the vastus lateralis and

decomposed into individual MU activity. Children exhibited significantly lower accuracy of force production during the ramp-up phase compared to adults ( $p < 0.001$ ). Regarding MU activity, children demonstrated a significantly higher MU firing rate (FR) compared to adults ( $p < 0.05$ ). The increase in FR was significantly greater for the lower-threshold MUs in children during the initial recruitment phase ( $p < 0.05$ ), whereas adults displayed a greater increase in FR for higher-threshold MUs during the later phase of ramp-up contraction ( $p < 0.05$ ). These findings suggest that children not only regulate MUs at a high FR but also show a tendency to rapidly increase FR during the initial recruitment phase. Differences in force production accuracy between children and adults could be linked to the characteristics of MU activity.

キーワード

力の正確性, 発火頻度, 高密度表面筋電図, デコンポジション, 外側広筋

Keyword

force steadiness, firing rate, high-density surface electromyography, decomposition, vastus lateralis

## 要旨

子どもは大人と比較して力発揮の正確性が劣ることが知られているが, 筋収縮を行うための指令を伝達している運動単位 (Motor unit, 以下MU) の活動特性については十分に理解されていない。本研究は, 子どもにおける力発揮の正確性とMU活動の特徴について明らかにすることを目的とした。6歳から12歳の子ども18名と健康な大人18名が, 等尺性最大膝伸展筋力 (Maximal voluntary contraction, 以下MVC) と50% MVCまでのランブアップ (徐々に発揮筋力を増加させる) 課題を実施した。外側広筋より運動中の高密度表面筋電図を収集し, 個々のMU活動に分解した。結果より, 子どもは大人と比較して発揮筋力の増加時に力発揮の正確性が有意に低かった ( $p < 0.001$ )。MU活動について, 子どもは大人と比較して有意に高いMUの発火頻度 (Firing rate, 以下FR) を示し ( $p < 0.05$ ), 全ての動員閾値 (Recruitment threshold, 以下RT) のMUにおいて同様の傾向

が見られた。MU FRの増加量は, 最もRTの低いMUについて動員初期に大きく, 対照的にRTがより高いMUについては, 動員初期を除く区間において大人が大きい結果を示した。以上のことから, 子どもはMUを高いFRで制御しているだけでなく, 動員初期に急激にFRを高めている傾向が見られた。子どもと大人における力発揮の正確性の違いは, このMU活動の特徴に関連している可能性が示唆された。

## 緒言

子どもは大人と比較して, 発揮筋力を正確に調整する能力に劣ることが知られている<sup>1-5)</sup>。このような特徴は, 子どもの未発達な神経系機能に起因していると考えられている<sup>6,7)</sup>。しかしながら, 神経系の発育発達過程については, 脳や眼球の大きさといった解剖学的な変化に基づいて理解されているため<sup>8)</sup>, 神経系の機能的な評価に基づく解釈が十分に行われていない。特に筋力発揮を制御している脊髄内の運動神経細胞から筋線維までを

指す運動単位 (Motor unit, 以下MU) の活動については, 子どもの特徴が十分明らかになっていないのが現状である。

ヒトが発揮筋力を増加させる場合, 1) 新たなMUを動員する, 2) 既に動員されているMUの発火頻度 (Firing rate, 以下FR) を増加させる (レートコーディング), という主に2つの方略が取られる<sup>9)</sup>。後者は特に発揮筋力の正確性と関連付けられる生理指標として先行研究で用いられてきた<sup>10, 11)</sup>。子どものMU活動の特徴について検討した先行研究では, 定常筋力発揮中に見られるMU FRを大人と比較しているが, 意図的に発揮筋力を調整するような正確性の課題においては検討されていない。

そこで本研究では, 発揮筋力を目標まで一定の割合で正確に増加させていくランプアップ課題を採用し, 1) ランプアップ局面における力の正確性に子どもと大人で違いが見られるか, 2) ランプアップ局面でのMU活動について子どもと大人で違いが見られるかについて, 明らかにすることを目的とした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 対象者

健康な子ども18名 (年齢  $9.46 \pm 1.62$  歳 [6.68 ~ 11.94 歳], 身長  $1.35 \pm 0.09$ m, 体重  $28.8 \pm 5.1$ kg) と, 健康な大人18名 (年齢  $22.1 \pm 3.4$  歳, 身長  $1.71 \pm 0.57$ m, 体重  $65.2 \pm 8.8$ kg) が本研究に参加した。いずれの群も男性16名, 女性2名で構成されている。対象者からは書面によるインフォームドコンセントを得ており, 子どもの対象者については保護者から書面によるインフォームドコンセントを得た。本研究はヘルシンキ宣言に基づき, 中京大学研究倫理委員会によって承認された (承認番号: 2021-101)。

### 1. 2 実験デザイン

測定に先立ち, 対象者は最大努力の50%で2回, 70%で1回の標準化されたウォーミングアップおよび馴化プロトコルを行った。対象者は右脚で等尺性最大膝伸展筋力 (MVC) の測定を2回実施し, より大きな値が分析に用いられた。その後, 50%MVCを目標として, 17秒間で直線的に発揮筋力を増加させるランプアップ局面と, 10秒間の維持局面から構成されるランプアップ課題を実施した。対象者は正確な力発揮を行うために, ランプアップ課題の測定に先立って2~3回の練習試技を実施した。運動中の右脚外側広筋から高密度表面筋電図を収集し, 個々のMU活動の解析に用いた。各試行間には, 疲労の影響を避けるために十分な回復時間が設けられた。

### 1. 3 力の計測

発揮される力のデータは, 特製の膝伸展筋力計 (T.K.K.5715a, 竹井機器工業, 新潟) に取り付けられたフォーストランスデューサー (LU-100KSE, 共和電業, 東京) から取得された。対象者は, 股関節および膝関節を90度とした状態で筋力計に座り, 座面を握った状態で, 全ての測定試技を実施した。フォーストランスデューサーは対象者の足首 (外果から5cm上) に緩みが無いよう十分に固定された。力のデータはストレインアンプ (TSA-210, 竹井機器工業, 新潟) を介して2,000 Hzで収集され, 16ビットマルチチャンネルアンプ (Sessantaquattro, OT Bioelettronica, Torino, Italy) によってデジタルデータに変換された。

ランプアップ課題中は, 対象者の正面に設置されたモニタ上に目標筋力と発揮筋力をリアルタイムで提示し, 目標筋力に可能な限り, 近似した発揮筋力となるように指示した。

#### 1. 4 高密度表面筋電図の計測

高密度表面筋電図の測定には、64チャンネル高密度電極グリッド (GR08MM1305; 13行×5列; 直径1mm; 電極間距離8mm, OT Bioelettronica, Torino, Italy) が用いられた。貼付位置の基準として、対象者の大転子から膝蓋骨外側上端を結ぶ基準線を設け、電極の3列目を基準線に沿わせ、7行目を基準線の midpoint に合わせた位置に貼付した。電極の貼付箇所は必要に応じて剃毛し、清潔な水で洗浄された。電極は伝導性ペースト (Elefix V, 日本光電, 東京) が充填された両面粘着フォーム (KIT08MM1305, OT Bioelettronica, Torino, Italy) によって貼付された。湿った電極ストラップ (WS2, OT Bioelettronica, Torino, Italy) が下腿近位端に固定され、アース電極として用いられた。筋電図信号は単極モードで記録し、16ビットマルチチャンネルアンプ (Sessantaquattro, OT Bioelettronica, Torino, Italy) を用いてデジタルデータに変換され、力のデータと同期された。これらの信号は256倍に増幅された後に2,000Hzでサンプリングされ、バンドパスフィルター (10-500Hz) によって処理された。

#### 1. 5 力と高密度表面筋電図の解析

解析は、MATLAB (MATLAB R2019a, MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts) を用いて行われた。発揮された力のデータは、4次の low-pass digital butterworth filter (カットオフ周波数6Hz) によって処理された。ランプアップ局面における力の正確性の評価として、分析区間における発揮筋力 (%MVC) とターゲットの差の標準偏差から力の安定性 (Force steadiness, 以下FS) を求めた。このFSは発揮筋力の変動性を示しており、数値が高いほど力の正確性が低いことを意味している。高密度表面筋電図から得られた64個の単極信号は、電極グリッドの長軸方向に隣接する電極間で差動導出した。次に59個の双極信号に対して

Decomposition of Motor Unit Surface EMG (DEMUSE) ソフトウェア (ver. 5.0.1; University of Maribor, Slovenia) と Convulsion Kernel Compensation法を使用した分解分析を行った<sup>12, 13)</sup>。検出された全てのMUは、経験豊富な1名の研究者によって注意深く解析処理が行われ、パルスノイズ比が30dBを超えるMUのみが分析に使用された<sup>14)</sup>。各MUについて、ランプアップ課題中のスパイク間隔の逆数よりMU FRが算出された。各MUの最初の発火の瞬間に発揮されている発揮筋力 (%MVC) が、そのMUの動員閾値 (RT) として定義された。10, 20, 30, および40%MVCにおけるMU FRは、それぞれ7.5 - 12.5, 17.5 - 22.5, 27.5 - 32.5, および37.5 - 42.5%MVCの区間におけるMU FRの中央値から定義し、隣接する区間での発火頻度の変化量 ( $\Delta$  MUF<sub>R</sub>) を算出した (図1)。MU FRは動員閾値 (Recruitment threshold, 以下RT) の影響を受けるため、検出されたMUをRT別に4つのグループに分け、対応するMUを群間で比較した: 1) RTが10%MVC未満のMU, 2) RTが10%以上20%未満のMU, 3) RTが20%以上30%未満のMU, および4) RTが30%以上40%未満のMU。

#### 1. 6 統計

測定データは、平均値±標準偏差で示された。独立したサンプルのt検定を用いて、グループ間のMVC、体重に対するMVC (MVC/BW)、FSを比較した。MU FRと $\Delta$  MU FRを比較するために、被験者間因子として群 (子ども vs 大人)、被験者内因子として発揮筋力 (10, 20, 30, および40%MVC; 10 - 20, 20 - 30, および30 - 40%MVC) とする二要因分散分析を行った。有意な交互作用が認められた場合は、Bonferroni法による事後検定を用いた。全ての統計分析は、SPSS 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY) によって実行され、有意水準は0.05に設定された。

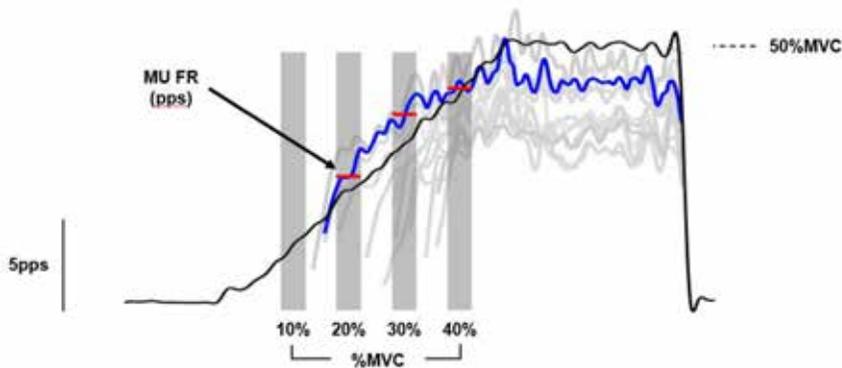


図1 ランプアップ収縮中における個々の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR) の典型例

黒い線は発揮筋力を示し、青色および灰色の線は個々の MU FR を示している。赤い線は、MVCの20, 30, および 40%MVCにおける MU FR を示している。MU FRは、それぞれMVCの17.5~22.5%, 27.5~32.5%, および37.5~42.5%の区間で見られる MU FR の中央値から計算されている。MU FR の増加量 ( $\Delta$ MU FR) は隣接する区間の MU FR との差から計算されている。

表1 対象者の身体特性と最大筋力, 力の安定性

	子ども (n = 18)	大人 (n = 18)	p value
年齢 (歳)	9.46 ± 1.62	22.1 ± 3.4	
身長 (m)	1.35 ± 0.09	1.71 ± 0.57	
体重 (kg)	28.8 ± 5.1	65.2 ± 8.80	
MVC (Nm)	57.4 ± 19.7	210.8 ± 57.9	<0.001
MVC/BW (Nm/kg)	2.0 ± 0.5	3.2 ± 0.7	<0.001
FS (%MVC)	1.80 ± 0.62	0.96 ± 0.28	<0.001

MVC, maximal voluntary isometric contraction, 等尺性最大膝伸筋力; BW, body weight, 体重; FS, force steadiness 力の安定性

## 2. 結果

### 2.1 最大筋力と力の正確性

子どもは大人よりも MVC および MVC/BW おいて有意に低い値を示した。ランプアップ局面における FS について、子どもが大人と比較して高い FS を示した (表1)。

### 2.2 運動単位発火頻度

各群においてランプアップ課題中に検出された MU の数と RT を図2に示した。大人と比較して子どもでは少ない数の MU が検出されたが、群間で RT に有意な差は確認されなかった ( $p=0.154$ )。子ども (9.6歳) と大人 (23.5歳) における MU FR の典型例を図3に示す。

RT が 10%MVC 未満の MU においては、MU FR に対する 群 × 発揮筋力の交互作用が統計的

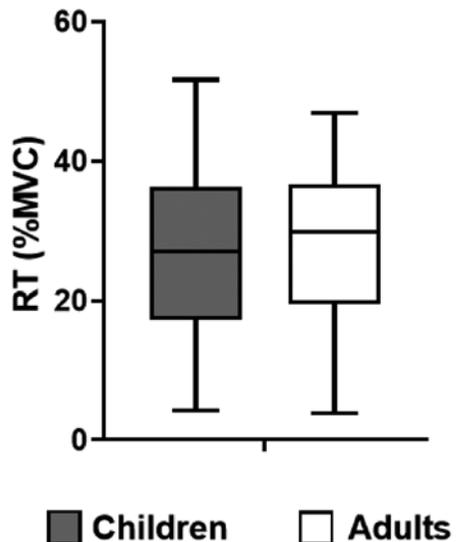


図2 子ども (Children) と大人 (Adults) における ランプアップ課題中に検出された 運動単位 (MU) の数と動員閾値 (RT) 群間で RT に有意差は認められなかった。

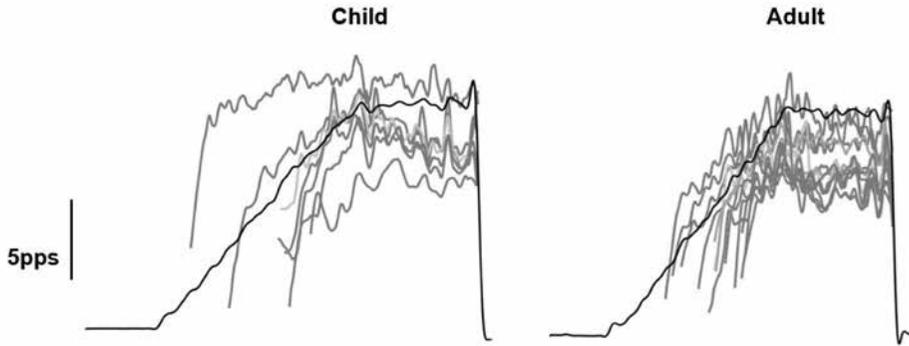


図3 子ども (Child, 9.6 歳) と大人 (Adult, 23.5 歳) におけるランプアップ課題中における個々の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR) の典型例  
黒い線は発揮筋力を示し, 灰色の線は個々の MU FR を示している。

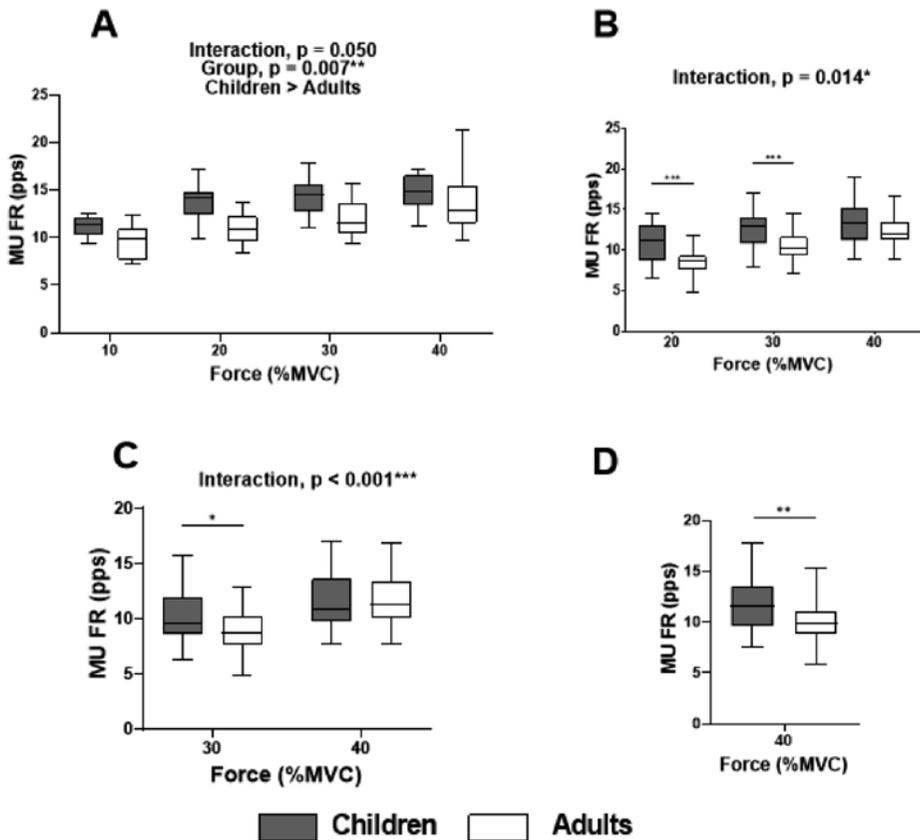


図4 ランプアップ課題中における, 子ども (Children) および大人 (Adult) の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR)  
(A) 動員閾値 (RT) が10%MVC未満のMU, (B) RTが10%以上20%未満のMU,  
(C) RTが20%以上30%未満のMU, (D) RTが30%以上40%未満のMU. \*,  $p < 0.05$ . \*\*,  $p < 0.01$ . \*\*\*,  $p < 0.001$ .

に有意ではないものの, 傾向として確認された ( $p=0.050$ ). MU FR に対する有意な群の主効果が確認され ( $p=0.007$ ), 子どもは大人よりも有意に高い MU FR を示した (図4A).

RT が 10%MVC 以上 20%MVC 未満の MU においては, MU FR に対する 群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた ( $p=0.014$ ). 子どもは大人よりも, 20 および 30 % MVC の区間で有意に高い

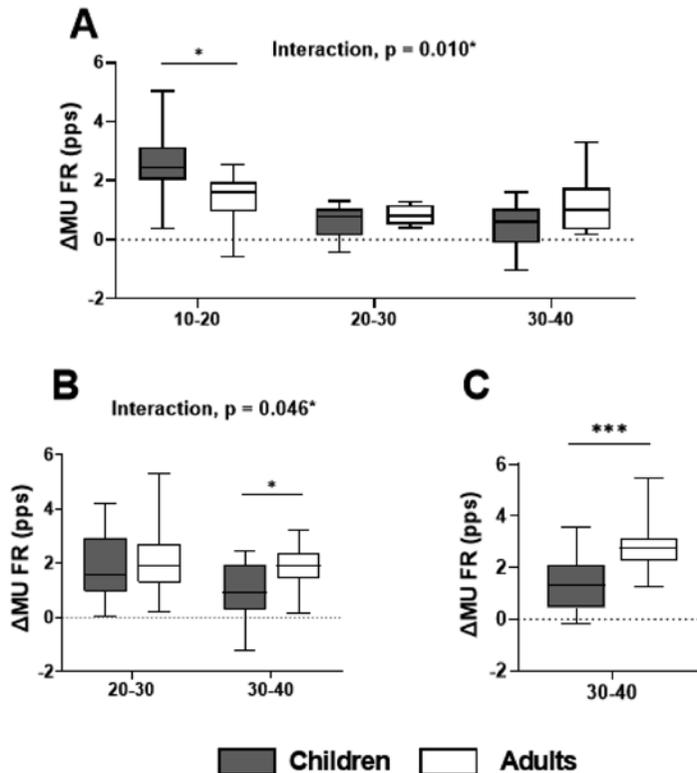


図5 ランプアップ課題中における,子ども (Children) および大人 (Adult) の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR) の増加量 ( $\Delta$  MU FR) (A) 動員閾値 (RT) が10%MVC未満のMU, (B) RTが10%以上20%未満のMU, (C) RTが20%以上30%未満のMU. \*,  $p < 0.05$ . \*\*,  $p < 0.01$ . \*\*\*,  $p < 0.001$ .

MU FRを示したが, 40%MVCの区間では有意な差は認められなかった(図4B).

RTが20%MVC以上30%MVC未満のMUにおいては, MU FRに対する群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた( $p < 0.001$ ). 子どもは大人よりも, 30% MVCの区間で有意に高いMU FRを示したが( $p=0.030$ ), 40%MVCの区間では有意な差は認められなかった(図4C).

RTが30%MVC以上40%MVC未満のMUにおいては, 子どもは大人よりも, 40% MVCの区間で有意に高いMU FRを示した(図4D,  $p=0.001$ ).

### 2. 3 運動単位発火頻度の増加量

RTが10%MVC未満のMUにおいては,  $\Delta$  MU FRに対する群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた( $p=0.010$ ). 子どもは大人よりも, 10-

20% MVC区間において有意に高い $\Delta$  MU FRを示した(図5A,  $p=0.034$ ).

RTが10%MVC以上20%MVC未満のMUにおいては,  $\Delta$  MU FRに対する群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた( $p=0.046$ ). 子どもは大人よりも, 30-40% MVC区間において有意に低い $\Delta$  MU FRを示したが( $p=0.046$ ), 20-30% MVC区間においては有意な差が認められなかった(図5B,  $p=0.046$ ).

RTが20%MVC以上30%MVC未満のMUにおいては, 子どもは大人よりも, 30-40% MVCの区間で有意に低い $\Delta$  MU FRを示した(図5C,  $p < 0.001$ ).

### 3. 考 察

本研究では, 1) ランプアップ課題中の力の正

確性に子どもと大人で違いが見られるか、2) ランプアップ課題中のMU活動に子どもと大人で違いは見られるかを検討した。結果より、子どもは大人と比較してランプアップ課題中の力の正確性が劣ることが示された。さらにMU活動に着目すると、MU FRは多くの分析区間において子どもが高い値を示すことが明らかとなった。ΔMU FRについては、RTの低いMUにおいて動員初期の区間で高いΔMU FRが認められ、対照的にRTのやや高いMUにおいては動員初期を除く区間において子どもが低いΔMU FRを示すことが明らかとなった。

子どもは大人と比較し、ランプアップ局面のあらゆる区間でFSが高いことが示され、すなわち力の正確性が劣っていることが示された(表1)。これまでの先行研究では、一定の筋力発揮を維持するような課題を採用し、子どもにおける低い力の正確性を報告してきた<sup>1-5)</sup>。本研究は、発揮筋力の正確な調整に着目し、一定の割合で発揮筋力を増加させるランプアップ局面においても、大人と比較して子どもの力の正確性が劣ることを示した初めての研究である。以降は、このランプアップ局面に見られる運動単位活動の特徴について検討する。

子どものMU FRは、ほとんどの分析区間において大人よりも有意に高いことが示された(図4)。検出された全てのMUはRTに基づいて分類され比較されたが、RTに特有の結果は確認されず、ほとんどの区間で子どものMU FRが高い結果を示した。これらの結果は、子どもの筋線維に見られる収縮特性によって説明される可能性がある。先行研究では、子どもの筋線維において後過分極時間が大人と比較して短いことが報告されている<sup>15)</sup>。この後脱分極時間の長短は、筋線維が完全強縮するために必要な発火頻度(電気刺激による誘発筋力発揮の場合は刺激頻度)の高低と関連する。すなわち子どもの筋線維に見られる短い

後過分極時間は、完全強縮のためにより高い発火頻度を要求する特性を有していることを示している。子どもにおいて電気刺激による誘発筋力発揮を調査した先行研究では、最大下での刺激周波数(10Hz)において、より年齢の低い子ども(9歳)はより年齢の高い子ども(15歳)に比べて誘発筋力が低いことが示されている<sup>16)</sup>。このことは子どもの中でも、より年齢が低いほど、完全恐縮には、より高い頻度での運動単位の発火が必要であることを意味している。本研究では、末梢の筋線維特性に関する直接的な評価は実施できていないが、子どもにおいて観察されたより高いMU FRは、筋線維が有する電気生理学的な特性によって説明づけられると考えられる。

また子どものΔMU FRについて着目すると、RTが低いMUにおける動員初期の区間を除いて、ΔMU FRは大人と同等もしくは低い傾向が見られた(図5)。子どもは筋線維の特性に応じて動員初期にFRを急激に増加させている。そのため、個々のMUによってより大きな筋力を発揮するためにFRを増大する余地が限られている可能性がある。本研究では、40%MVC未満で動員されたMU活動を調査したため、RTが高いMUについてさらなる調査が必要である。しかしながら、ランプアップ課題中における子どものMUは、動員初期において大きくFRが増加し、発揮筋力の増大に伴うΔMU FRが小さい特徴を有していることが明らかとなった。

以上の結果は、子どもにおけるMUの動員戦略に関して示唆を与えるものである。一般的に、子どもは随意最大筋力を発揮する際の随意活動レベルが低いということが指摘されている<sup>17-19)</sup>。すなわち、子どもは発揮筋力の大きさに寄与する神経的要因の貢献が小さいとされている。しかしながら、本研究では子どもにおいてより高いMU FRが確認されたため、これらの見解と矛盾する傾向であった。一方で、本研究の結果は、子ども

において大きな筋力発揮を行う際に、新たなMUを動員することができていない可能性も示唆。理論的には、発揮筋力の増大に寄与するMU活動には、MU FRを増大させることと、新たなMUを動員することという2つが考えられる<sup>9)</sup>。このような生理学的な背景に基づけば、個々のMUがより高いFRを示す場合、子どもにおける神経的要因の小さな貢献は、動員されるMUの数がより少ないということを意味するだろう。筋収縮中に見られるMUの動員数を評価する方法はこれまで確立されていないため、この示唆に関してはさらなる研究が必要であると考えられる。しかしながら本研究は、子どもが大人よりも高いMU FRで筋力の発揮を制御していること、そして新たなMUの動員が十分に行われていない可能性を示した。

本研究で示された、子どもの低い力の正確性、高いMU FR、小さい $\Delta$  MU FRは、子どものための筋力トレーニングと運動プログラムに対して重要な示唆を与える。子どもでは大人と比較して神経的要因が著しく劣っているとされており、そのため長期的なアスリートの育成モデルにおいては神経的要因の機能を向上させる運動プログラムが推奨されている<sup>6,7)</sup>。しかし本研究では、動員されているMUは高いFRを示すことが明らかとなり、これは子どもがより大きなサイズのMUを動員できていない可能性を示している。現在の子どもの向けのガイドラインでは、安全上の理由から低強度のトレーニングや運動プログラムが推奨されているが<sup>6,7)</sup>、我々の研究は、より少ないMUの動員のみで遂行される低強度のトレーニングでは、子どもの神経的要因の機能を改善するには不十分であることを示唆している。安全に配慮した上で、大きな発揮筋力を必要とするトレーニングや運動プログラムが、運動機能の発達のために重要である可能性がある。また、神経系の機能に関する特徴が末梢の筋線維特性に起因しているという点に基づけば、子どもにおいては中枢神経より

も末梢の筋線維特性の適応が運動機能の発達に寄与している可能性が考えられる。今後、これらのMU活動が何歳で大人と同じレベルに達するのか、さらに末梢の筋線維特性との関連について詳細な検討が行われることが期待される。

本研究にはいくつかの限界がある。第一に、方法論上の制約により拮抗筋からのMU活動を評価することができなかったため、主動筋と拮抗筋の共収縮による影響が本研究の結果に影響を与えている可能性が考えられる。子どもにおいて、より大きな共収縮が見られるかについては議論があるが<sup>17,20,21)</sup>、今後方法論上の発展とともにさらなる研究が期待される。さらに、ランプアップ課題の目標を50%MVCとしたため、より高い収縮強度ではMU活動が異なる可能性がある<sup>22)</sup>。

#### 4. 結 論

結論として、6歳から12歳の子どもにおいては、ランプアップ課題中に見られる力の正確性が大人と比較して劣っていた。神経系の特徴に着目すると、子どものMU FRは大人と比較して高いことが明らかとなり、動員初期の段階で高いMU FRが獲得され、その後の $\Delta$  MU FRについては大人と比較して小さいことが示された。これらの結果は、子どものMU活動の特徴として、大人よりも高いFRで活動することができるものの、新たなMUの動員が行われにくい可能性を示唆している。

#### 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、本研究の実施に当たり多大なご協力を頂きましたみよしスポーツアカデミーならびに研究協力者の皆様に厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Smits-Engelsman B.C., Westenberg Y., Duysens J., Development of isometric force and force control in children., *Brain Res. Cogn. Brain Res.*, 17 (1) :68-74 (2003)
- 2) Smits-Engelsman B.C., Van Galen G.P., Duysens J., Force levels in uni- and bimanual isometric tasks affect variability measures differently throughout lifespan., *Motor Control.*, 8 (4) :437-49(2004)
- 3) Deutsch K.M., Newell K.M., Age differences in noise and variability of isometric force production., *J. Exp. Child. Psychol.*, 80 (4) :392-408(2001)
- 4) Deutsch K.M., Newell K.M., Children's coordination of force output in a pinch grip task., *Dev. Psychobiol.*, 41 (3) :253-64(2002)
- 5) Potter N.L., Kent R.D., Lindstrom M.J., Lazarus J.A., Power and precision grip force control in three-to-five-year-old children: velocity control precedes amplitude control in development., *Exp. Brain Res.*, 172 (2) :246-60(2006)
- 6) Ford P., De Ste Croix M., Lloyd R. et al., The long-term athlete development model: physiological evidence and application., *J. Sports Sci.*, 29 (4) :389-402(2011)
- 7) Lloyd R.S., Cronin J.B., Faigenbaum A.D. et al., National Strength and Conditioning Association Position Statement on Long-Term Athletic Development., *J. Strength Cond. Res.*, 30 (6) :1491-509(2016)
- 8) Scammon R.E., The measurement of body in childhood., *The Measurement of Man.*, (1930)
- 9) Enoka R.M., Morphological features and activation patterns of motor units., *J. Clin. Neurophysiol.*, 12 (6) :538-59(1995)
- 10) Ely I.A., Jones E.J., Inns T.B. et al., Training-induced improvements in knee extensor force accuracy are associated with reduced vastus lateralis motor unit firing variability., *Exp. Physiol.*, 107 (9) :1061-70(2022)
- 11) Vila-Cha C., Falla D., Strength training, but not endurance training, reduces motor unit discharge rate variability., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 26:88-93 (2016)
- 12) Holobar A., Farina D., Gazzoni M., Merletti R., Zazula D., Estimating motor unit discharge patterns from high-density surface electromyogram., *Clin. Neurophysiol.*, 120 (3) :551-62(2009)
- 13) Holobar A., Zazula D., On the selection of the cost function for gradient-based decomposition of surface electromyograms., *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 2008:4668-71 (2008)
- 14) 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 (1) :016008(2014)
- 15) Piotrkiewicz M., Kudina L., Mierzejewska J., Jakubiec M., Hausmanowa-Petrusewicz I., Age-related change in duration of afterhyperpolarization of human motoneurons., *J. Physiol.*, 585 (Pt 2) :483-90(2007)
- 16) Backman E., Henriksson K.G., Skeletal muscle characteristics in children 9-15 years old: force, relaxation rate and contraction time., *Clin. Physiol.*, 8 (5) :521-7(1988)
- 17) Grosset J.F., Mora I., Lambertz D., Perot C., Voluntary activation of the triceps surae in prepubertal children., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 18 (3) :455-65(2008)
- 18) Paasuke M., Ereline J., Gapeyeva H., Twitch contraction properties of plantar flexor muscles in pre- and post-pubertal boys and men., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82 (5-6) :459-64(2000)
- 19) Martin V., Kluka V., Garcia Vicencio S., Maso F., Ratel S., Children have a reduced maximal voluntary activation level of the adductor pollicis muscle compared to adults., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115 (7) :1485-91(2015)
- 20) Dotan R., Mitchell C., Cohen R., Klentrou P., Gabriel D., Falk B., Child-adult differences in muscle activation--a review., *Pediatr. Exerc. Sci.*, 24 (1) :2-21(2012)
- 21) Kellis E., Unnithan V.B., Co-activation of vastus lateralis and biceps femoris muscles in pubertal children and adults., *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 79 (6) :504-11(1999)
- 22) Gillen Z.M., Housh T.J., Schmidt R.J. et al., Comparisons of muscle strength, size, and voluntary activation in pre- and post-pubescent males and females., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 121 (9) :2487-97 (2021)

# 異なるハーフタイム戦略がサッカー選手の 反復性スプリントパフォーマンスに与える影響

広島大学大学院 柳 岡 拓 磨

## Effect of Different Half-Time Strategies on Repeated-Sprint Ability in Soccer Players

by

Takuma Yanaoka

*Graduate School of Humanities and Social Sciences,  
Hiroshima University*

### ABSTRACT

The present study examined the effects of different half-time strategies on repeated-sprint ability (RSA). In a randomized cross-over design, ten male soccer players completed two RSA tests (6, 6-s sprints separated by 24 s of passive rest, first and second halves) separated by a 15-min half-time. During the half-time, the participants were assigned to a 15-min seated rest (CON), a 7.5-min passive heating (wearing a jacket at 5 to 12.5 min during the 15-min half-time, PAS), a 1.5-min active heating before the end of the half-time (performing a re-warm up at 12.5 to 14 min during the 15-min half-time, ACT), or a combination of both passive and active heating (COMB). All trials were performed on a non-motorized treadmill in a thermoneutral environment ( $17.1 \pm 1.1^\circ\text{C}$ ,  $52.2 \pm 8.1\%$  relative humidity). In CON, mean and maximum running speeds were significantly lower during the second half than during the first half ( $p < 0.05$ ), but this difference was not observed in the other trials. In the half-time, PAS, ACT, and COMB did not decrease magnitudes of the drop in gastrointestinal temperature. Skin temperature at the start of the second half was significantly higher in COMB than in CON ( $p < 0.05$ ). In the second half, there were

no significant differences in gastrointestinal temperature, electromyography, or muscle oxygenation between trials. Heart rate during the second half was significantly higher in ACT and COMB than in CON and PAS ( $p < 0.05$ ). In conclusion, PAS, ACT, and COMB improved RSA during the second half compared to CON.

#### キーワード

胃腸温, 筋活性, 筋酸素動態, リウォームアップ, パッシブヒーティング

#### Keyword

gastrointestinal temperature, muscle activation, muscle oxygenation, re-warm up, passive heating

### 要 旨

本研究では、異なるハーフタイム戦略が反復性スプリントパフォーマンス (RSA) に与える影響を検討した。10名の男子サッカー選手は、4試行の無作為化交差試験を実施した。本試験では、15分間のハーフタイムを挟む2回 (前・後半) のRSAテスト (6秒スプリント-24秒レストを6セット) を行った。4条件のハーフタイムの介入は、1) 安静座位 (CON 試行)、2) ジャケット着用 (PAS 試行)、3) リウォームアップ実施 (ACT 試行)、4) PASおよびACT介入の併用 (COMB 試行) のいずれかとした。後半の平均・最高走速度はCON試行で前・後半間に有意差が認められ、後半は低値であったが ( $p < 0.05$ )、他の試行では前・後半間の有意な差は認められなかった。後半中の胃腸温、筋電図、筋酸素動態には試行間の有意な差は認められなかった。後半開始時の平均皮膚温には試行間の有意差が認められ ( $p < 0.05$ )、CON試行と比較し、COMB試行は高値であった。後半の心拍数には試行間の有意な差が認められ ( $p < 0.05$ )、CONおよびPAS試行と比較し、ACTおよびCOMB試行は高値であった。従って、本研究で用いたいずれかの介入を行うことでRSA低下を防止できることが示唆された。

### 緒 言

サッカーに代表される間欠性球技系競技において、スプリント等の高強度運動を繰り返し行うことが重要であり、高強度運動パフォーマンスは試合の勝敗を左右する要素の一つである<sup>1)</sup>。特に、完全な回復を達成することのできない短時間の休息を挟み、最大強度のスプリントを繰り返す能力 (反復性スプリント能力: RSA) はエリートレベルのサッカー選手の中で高い外的妥当性が報告されており、高強度運動パフォーマンスの評価に広く用いられている<sup>2)</sup>。

気温20℃程度の通常環境下の試合における高強度運動パフォーマンスは、試合終了前のみならず後半開始後に減少することが知られている<sup>3)</sup>。後半開始後の高強度運動パフォーマンス低下は、主に体温の低下と関連している<sup>4)</sup>。そのため、ハーフタイム中の体温保持を目的とした15分間の保温器具の着用 (パッシブヒーティング: PAS<sup>5)</sup>) や7分程度のリウォームアップ (アクティブヒーティング: ACT<sup>6)</sup>) およびそれらの併用 (COMB<sup>7)</sup>) がハーフタイム中の体温保持とその後のスプリントパフォーマンスに与える影響が検討され、それぞれポジティブな効果が報告されている。一方、実際の試合でこれらのハーフタイム戦略を応用するためには、時間的制約の課題を解決する必

要がある<sup>8)</sup>。近年、我々は1分間・最大酸素摂取量の90%強度で行うリウォームアップがその後のスプリントパフォーマンスを改善すること、このメカニズムとして酸素摂取量や筋酸素動態の改善、筋活性の亢進が挙げられることを報告した<sup>9, 10)</sup>。一方で、より長時間の介入と比べ、体温保持効果は低いことが明らかとなり、短時間・高強度のリウォームアップとPASを組み合わせる必要性が示唆された。

そこで本研究では、先行研究と比較し介入時間を短く設定したPAS, ACT, COMBがその後のRSAに与える影響をそのメカニズムを含め明らかにすることを目的とした。

## 1. 方法

### 1.1 研究対象者

本研究は、アマチュア男子サッカー選手10名を対象とした。被験者の身体特性は、年齢 $21 \pm 3$ 歳、身長 $1.70 \pm 0.05$ m、体重 $68.5 \pm 6.8$ kg、除脂肪体重 $57.0 \pm 3.4$ kg、体脂肪率 $16.1 \pm 4.5\%$  (平均 $\pm$ 標準偏差)であった。被験者には、試験開始前に研究参加に関する説明を十分に実施し、書面にて研究参加に対する同意を得た。本研究は、広島大学大学院教育学研究科倫理審査委員会の承認を得て、実施した(承認番号: 2019540)。

### 1.2 研究デザイン

被験者は、身体特性の測定および運動プロトコルの練習試技(来研1)の後、無作為化交差試験法を用いた4試行の本試験(来研2-5)を実施した。すべての試験は72時間以上の間隔をあけて行い、本試験は日内変動の影響を排除するため、同じ時間帯に行った。被験者は、各試験の24時間前からカフェインおよびアルコールの摂取を禁止され、3時間前より水以外の飲食を控えた。また、各試験の24時間前から疲労困憊に至る激しい運動を禁止され、24時間以内の食事を各本試

験間で統一するよう指示された。本研究は実験室内で行われ、熱中性環境下(気温:  $17.1 \pm 1.1^\circ\text{C}$ 、相対湿度:  $52.2 \pm 8.1\%$ )で行われた。

### 1.3 身体組成測定と練習試技

最初に身体特性を測定した。身長は身長計(seca 213, seca Nihon, Japan)を用いて測定した。体重、体脂肪率、除脂肪体重は、多周波生体電気インピーダンス分析装置(Inbody470, Inbody Japan, Japan)を用いて測定した。大腿直筋筋腹部の皮下脂肪厚を超音波診断装置(JS2, Medicare, Japan)のBモード法を用いて撮影し、画像解析ソフト(ImageJ 1.52, National Institute of Mental Health, USA)を用いて測定した。大腿直筋筋腹部は、上前腸骨棘と膝蓋骨の上面を結ぶ線の間中位と定義した<sup>11)</sup>。

練習試技は、以下に示すコントロール試行と同様の運動を実施した。

### 1.4 本試験の運動プロトコル

被験者は測定器具を装着した後、規定されたウォーミングアップ(8km/hの速度で5分間のジョギング、10分間のダイナミックストレッチ、3分間の75%努力でのランニング、ダイナミックスタートのスプリント走を2本、スタティックスタートのスプリント走を2本)を行った。ウォーミングアップ終了後、10分間の安静を保った。その後、1回目のRSAテスト(前半)を実施した。RSAテストはスタティックスタートの6秒スプリントと24秒間の安静を6回繰り返すものであった。RSAテスト終了後、15分間のハーフタイムを挟み、2回目のRSAテスト(後半)を実施した。RSAテストは自走式トレッドミル(CURVE WWT-100, WoodWay, USA)上で行った。RSAテスト中は、被験者が走速度を確認できないように配慮し、スプリントの本数と経過時間のみ教示した。胃腸温測定用飲料型ピルセンサーに対する飲料摂取の影

響を排除するため、前半開始後の水分摂取は認められなかった。

### 1. 5 ハーフタイム介入

ハーフタイムの介入は4条件であり、1) 安静座位 (CON 試行)、2) ハーフタイム中のブリザードサバイバルジャケット着用 (PAS 試行)、3) ハーフタイム終了前のリウォームアップ実施 (ACT 試行)、4) PASおよびACT介入の併用 (COMB 試行) のいずれかであった。

コントロール試行では、被験者は15分間の安静座位を保った。PAS 試行では、被験者は15分間の安静座位を保ち、ハーフタイム開始5分後から12.5分後までの計7.5分間にブリザードサバイバルジャケット (Blizzard Survival Jacket, Blizzard Protection Systems, UK) を着用した。ACT 試行では、ハーフタイム開始から12.5分間の座位安静を保った後、1.5分間のリウォームアップを実施した。リウォームアップ内容は30秒間の45%努力でのランニング ( $9.5 \pm 2.1\text{km/h}$ )、15秒間の75%努力でのランニング ( $13.2 \pm 1.9\text{km/h}$ )、15秒間の90%努力でのランニング ( $17.3 \pm 1.9\text{km/h}$ )、3秒間の全カスプリント2回とした。実際の試合におけるフィールドへの移動時間を考慮し、リウォームアップはハーフタイム終了の1分前に終了させた。

## 1. 6 測定項目

### 1. 6. 1 反復性パフォーマンス

スプリント1本ごとの平均走速度および最高走速度を専用ソフトウェア (CURVE 1.5, WoodWay, USA) を用いて100Hzで測定した。前半1本目の平均走速度または最高走速度を100%とした相対値で評価した。

### 1. 6. 2 体温

カプセル式深部体温測定器 (CorTemp, HQinc, USA) を用いて、胃腸温を20秒ごとに測定した。

胸部・上腕部・大腿部・下腿部の皮膚温をボタン式データロガー (Thermocron SL, KN Laboratories, Japan) を用いて、30秒ごとに測定した。平均皮膚温は、先行研究に基づき<sup>12)</sup>、算出した (平均皮膚温 =  $0.3 \times (\text{胸部} + \text{上腕部}) + 0.2 \times (\text{大腿部} + \text{下腿部})$ )。

ハーフタイム中の胃腸温および平均皮膚温を前半終了後からの変化量 ( $\Delta$ ) として評価した。

### 1. 6. 3 表面筋電図

右大腿直筋筋腹の筋電図 (EMG) を、接地電極を膝蓋骨に配置した表面電極 (OE-WS1223-W, 追坂電子, Japan) を用いてRSAテスト中に記録した (サンプリング周波数: 1000Hz, バンドパスフィルター: 20 ~ 400Hz)。ディスプレイ電極 (エルローデ, メッツ, Japan) を使用し、電極間距離は3cmとした。インピーダンス ( $< 2\text{k}\Omega$ ) を低減するために、電極の貼付け前に皮膚を擦過し、アルコールで洗浄した。各スプリントについて、バーストの開始から6秒間の二乗平均平方根 (RMS) および中央周波数 (MDF) を算出した。RMS値は、前半1本目のスプリントから得られた値に対して正規化した。バーストの開始は、安静時のRMS平均値から標準偏差の2倍を超えたときと定義した。

### 1. 6. 4 筋酸素動態

2波長 (770, 830 nm) の空間分解近赤外分光法 (NIRSRS: Oxy-Pro, ASTEM, Japan) を用いて、右大腿直筋の酸素化 (oxy-Hb)、脱酸素化 (deoxy-Hb)、総ヘモグロビン (total-Hb) 濃度および筋酸素飽和度 ( $\text{SmO}_2$ ) を連続的かつ非侵襲的に5Hzで測定した。NIRSRSプローブは1つの光源と2つの受光部で構成され、光源・受光部間の距離は20mmと30mmであった。NIRSRSプローブは筋電図測定用ディスプレイ電極に隣接させた。後半中のoxy-Hb, deoxy-Hbおよびtotal-Hbを、前半中の平均値からの $\Delta$ として評価した。 $\text{SmO}_2$ は、以下の式で算出した。

$SmO_2 = \text{oxy-Hb} / \text{total-Hb}$

NIRSRSで得られた測定値は脂肪層の厚さに影響されるため、脂肪層の厚さを利用し、データを補正する必要がある<sup>13)</sup>。そこで、身体計測時に得られた大腿直筋筋腹部の脂肪厚 ( $6.1 \pm 1.8\text{mm}$ ) を用いて、専用ソフトウェア (Oxy-Pro測定プログラム, ASTEM, Japan) でNIRSRSの計測値を補正した。

### 1. 6. 5 心拍数

心拍数は無線式心拍センサー (Polar RS800CX, Polar, Finland) を用いて測定した。

### 1. 6. 6 主観的指標

ボルグスケールを用いて、主観的運動強度 (RPE) を安静時 (Pre), ウォーミングアップ終了後 (W-up), 前半開始直前 (Pre-RSA1), ハーフタイム開始直後 (HT0), ハーフタイム開始5分後 (HT5), 10分後 (HT10), 15分後 (HT15), 後半終了後 (Post-RSA2) に測定した<sup>14)</sup>。熱感覚 (TS) を13ポイントのスケール (-6 とても寒い, 6 とても暑い) を用いて, Pre, W-up, Pre-RSA1, HT0, HT5, HT10, HT15, Post-RSA2に測定した<sup>15)</sup>。

## 1. 7 統計解析

すべての値は平均値±標準偏差で示した。統計解析は統計分析ソフト (IBM SPSS Statistics Version 29, IBM Japan, Japan) を用いた。スプリント中の平均走速度および最高走速度, RMS, MDFは、対応のある三要因 (試行×ハーフ×スプリント本数) の分散分析を用い分析した。スプリントパフォーマンスの減少率は、対応のある一要因 (試行) の分散分析を用い分析した。体温, 筋酸素動態, 心拍数, 主観的指標は、対応のある二要因 (試行×測定ポイント) の分散分析を用い分析した。主効果, 一次交互作用または二次交互作用が認められた場合, Bonferroni多重比較法を用い, その後の検定を行った。統計学的有意水準は危険率5%未満とした。

## 2. 結果

### 2. 1 RSA

RSAテスト中の平均走速度に二次交互作用が認められた ( $p=0.024$ , 図1A)。後半1本目の平均走速度には試行間の有意差が認められ, COMB試行はCON試行と比較し高値であり ( $p=0.038$ ), ACT試行はPAS試行と比較し高値であった ( $p=0.009$ )。また, CON試行では前・後半間に平均走速度の全平均の有意差が認められ, 後半は前半と比較し低値であった ( $p=0.025$ )。他の試行では有意差は認められなかった ( $p>0.05$ )。

RSAテスト中の最高走速度に二次交互作用は認められなかったが ( $p>0.05$ )、試行×ハーフの一次交互作用が認められた ( $p=0.028$ , 図1B)。CON試行では前・後半間に最高走速度の全平均の有意差が認められ, 後半は前半と比較し低値であった ( $p=0.021$ )。他の試行では有意差は認められなかった ( $p>0.05$ )。

### 2. 2 体温

ハーフタイム中の $\Delta$ 胃腸温には試行の主効果および交互作用が認められなかった ( $p>0.05$ , 図2A)。機器不良のため, 8名のデータを解析した。

ハーフタイム中の $\Delta$ 平均皮膚温には交互作用が認められた ( $p<0.001$ , 図2B)。HT10における $\Delta$ 平均皮膚温には試行間の有意差が認められ, PASおよびCOMB試行は, CONおよびACT試行と比較し高値であった ( $p<0.001$ )。HT15における $\Delta$ 平均皮膚温には試行間の有意差が認められ, ACT試行は他の試行と比較し低値であり ( $p<0.05$ )、PAS試行はCONおよびCOMB試行と比較し高値であった ( $p<0.05$ )。機器不良のため, 9名のデータを解析した。

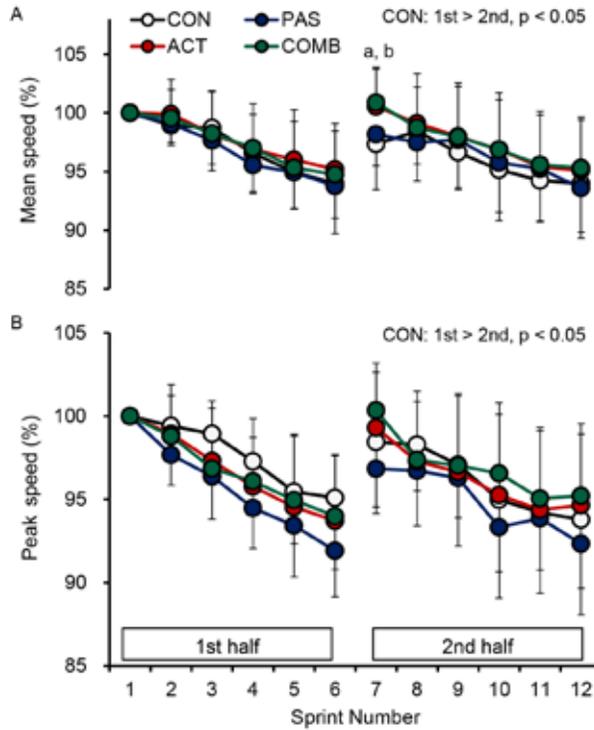


図1 各試行における平均 (A) および最高 (B) 走速度  
 n = 10, 平均±標準偏差, a: CON vs COMB  $p < 0.05$ , b: PAS vs ACT  $p < 0.05$ .

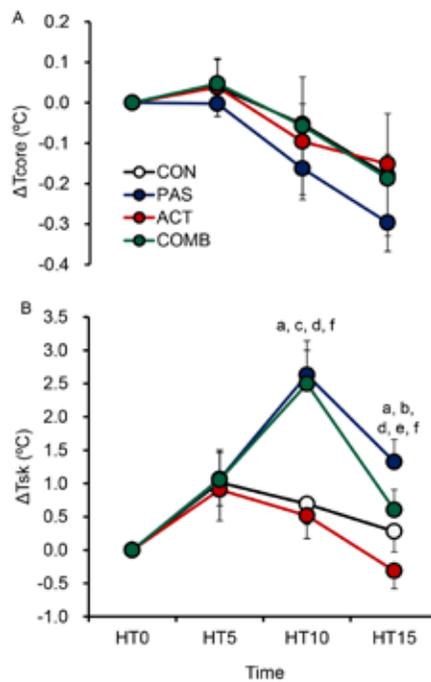


図2 ハーフタイム (HT) における胃腸温 (A) および平均皮膚温 (B) の変化  
 胃腸温: n = 8, 平均皮膚温: n = 9, 平均±標準偏差, a: CON vs PAS  $p < 0.05$ , b: CON vs ACT  $p < 0.05$ , c: CON vs COMB  $p < 0.05$ ,  
 d: PAS vs ACT  $p < 0.05$ , e: PAS vs COMB  $p < 0.05$ , f: ACT vs COMB  $p < 0.05$ .

### 2. 3 EMG

RSA中のRMSには、一次および二次交互作用が認められなかった ( $p>0.05$ , 図3A)。RSA中のMDFに二次交互作用が認められたが ( $p=0.001$ , 図3B), その後の検定の結果, 試行間の有意な差は認められなかった。機器不良のため, 7名のデータを解析した。

### 2. 4 筋酸素動態

後半開始直前から後半終了における5秒ごとの筋酸素動態の変化を図4に示した。  $\Delta$  oxy-Hb および  $\Delta$  total-Hb には交互作用が認められなかった ( $p>0.05$ )。  $\Delta$  deoxy-Hb ( $p<0.001$ ) および  $\text{SmO}_2$  ( $p<0.001$ ) には交互作用が認められた。後半開始時の  $\Delta$  deoxy-Hb には試行間の有意差が認められ, ACTおよびCOMB 試行はPAS 試行と比較し高値であったが ( $p<0.05$ )。後半中の  $\Delta$  deoxy-Hb には試行間の有意差は認められなかった。後半開始時の  $\text{SmO}_2$  には試行間の有意差が認められ, ACTお

よびCOMB 試行はCONおよびPAS 試行と比較して低値であったが ( $p<0.05$ )。後半中の  $\text{SmO}_2$  には試行間の有意差は認められなかった。

### 2. 5 心拍数

後半開始直前から後半終了における5秒ごとの心拍数を図4に示した。心拍数には交互作用が認められた ( $p<0.001$ )。後半開始25秒前から後半開始後135秒後 (5本目のスプリント終了から15秒後) までの心拍数には試行間の有意差が認められ, ACTおよびCOMB 試行はCONおよびPAS 試行と比較し, 高値であった ( $p<0.05$ )。

### 2. 6 主観的指標

RPE ( $p<0.001$ ) およびTS ( $p<0.001$ ) に交互作用が認められた。HT15におけるRPEには試行間の有意差が認められ, ACTおよびCOMB 試行はCONおよびPAS 試行と比較し高値であった (CON:  $9.4 \pm 2.2$ , PAS:  $10.4 \pm 1.6$ , ACT:  $14.5 \pm$

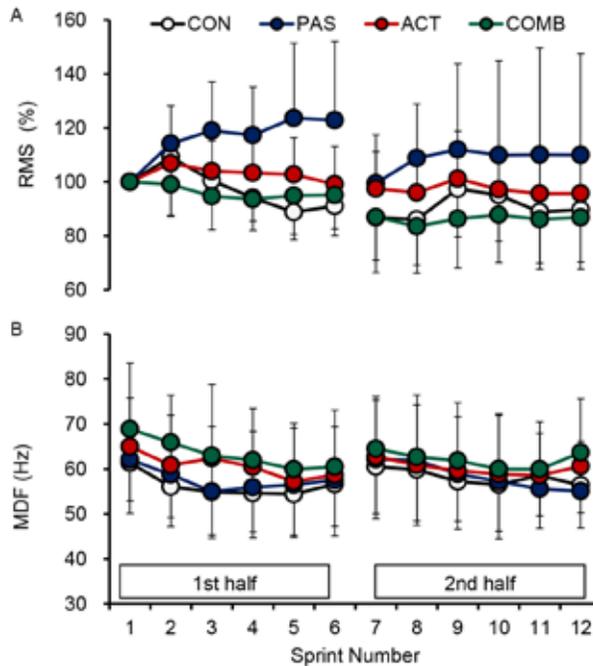


図3 各試行における二乗平均平方根 (A) および中央周波数 (B)  
n = 7, 平均 ± 標準偏差。

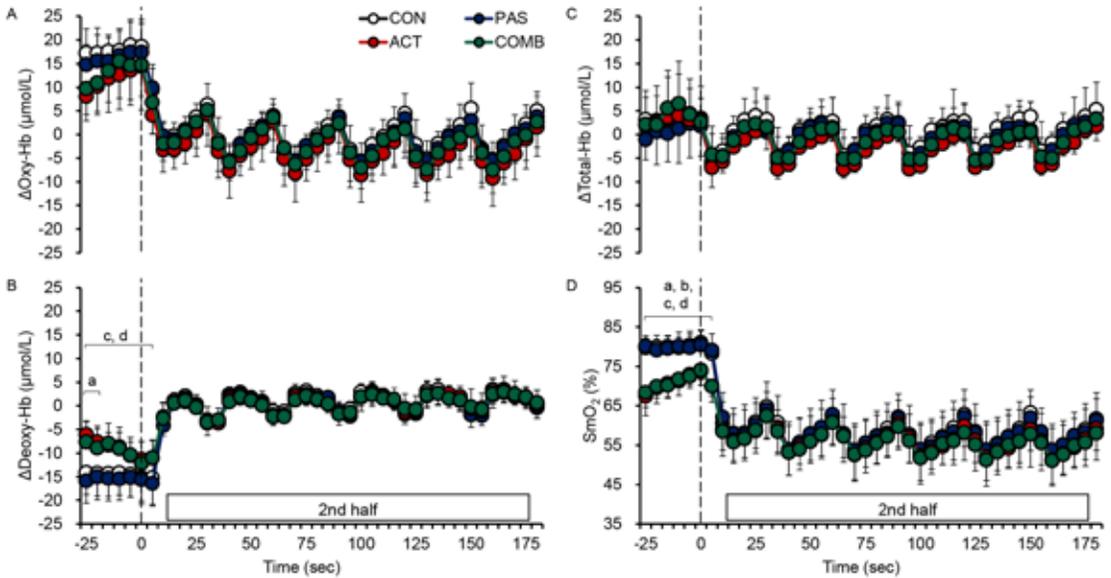


図4 後半における大腿直筋の酸素化 (A), 脱酸素化 (B) および総ヘモグロビン (C) 濃度の変化および筋酸素飽和度 (D) n = 8, 平均±標準偏差. a: CON vs ACT p < 0.05, b: CON vs COMB p < 0.05, c: PAS vs ACT p < 0.05, d: PAS vs COMB p < 0.05.

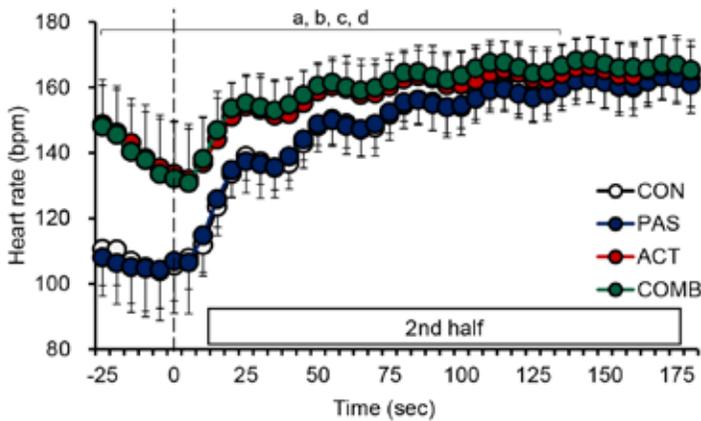


図5 後半における心拍数の変化 n = 10, 平均±標準偏差. a: CON vs ACT p < 0.05, b: CON vs COMB p < 0.05, c: PAS vs ACT p < 0.05, d: PAS vs COMB p < 0.05.

1.9, COMB: 14.3 ± 1.8, p<0.05). HT10 における TS には試行間の有意差が認められ, PAS および COMB 試行は CON および ACT 試行と比較し高値であった (CON: -0.2 ± 1.0, PAS: 2.8 ± 1.0, ACT: -0.4 ± 1.3, COMB: 3.4 ± 0.7, p<0.05). HT15 における TS には試行間の有意差が認められ, ACT および COMB 試行は CON 試行と比較し高値であり, COMB 試行は PAS 試行と比較し高値であった (CON: -1.2 ± 1.1, PAS: -0.6 ± 1.3, ACT: 0.7 ± 1.1,

COMB: 1.3 ± 1.3, p<0.05).

### 3. 考察

本研究では, 7.5分間の PAS, 1.5分間の ACT, COMB が後半の RSA に与える影響を検討することを目的とした. 本研究の結果, PAS, ACT, COMB のいずれかの介入を行うことで, 前半と比較した後半の RSA 低下を抑制できることが明らかとなった. 一方で, 先行研究で報告されてい

る15分間のPASによるハーフタイム中の胃腸温低下抑制<sup>7)</sup>や1分間・高強度のACTによる筋酸素動態の改善<sup>9)</sup>は、本研究では認められなかった。

ハーフタイム中にサバイバルジャケットを着用することで後半のRSAが維持されたことを報告している先行研究では、そのメカニズムとして胃腸温の低下抑制を報告している<sup>5,7)</sup>。一方、本研究ではPASおよびCOMBにおける胃腸温の低下抑制が認められなかったにも関わらず、後半のRSAが維持された。これは、サバイバルジャケットの着用による平均皮膚温の上昇とそれに起因する神経伝達速度の向上<sup>16)</sup>に関連している可能性がある。先行研究によると、ウォーミングアップ後に皮膚温および筋温が高まることで神経伝達速度が加速し筋力発揮率とパワー出力が上昇することが報告されている<sup>17)</sup>。従って、本研究でも平均皮膚温の上昇とそれに起因する神経伝達速度の向上によって、RSAが維持された可能性がある。

本研究ではACTによるRSA低下抑制に関する明確なメカニズムを明らかにすることはできなかった。考えられるメカニズムとしては、Post-activation performance enhancement (PAPE) が考えられる<sup>18)</sup>。PAPEは、主運動前に行う高強度の随意的コンディショニング収縮によって主運動の運動パフォーマンスが向上することと定義されている<sup>18)</sup>。PAPEによる運動パフォーマンスの向上は、筋温および筋水分含有率、筋活性化の亢進（一部は動機づけによる）が関連していると考えられる<sup>18)</sup>。これらの変化は筋電図では検出されない可能性が示唆されており<sup>18)</sup>、今後の研究でより詳細なメカニズムの検討が望まれる。

本研究の限界点の一つは、筋温の測定ができていないことである。筋温はハーフタイム後の高強度運動パフォーマンスの低下と強く関連する因子であるため<sup>4)</sup>、今後の研究で調査する必要がある。二点目の限界点として、運動時間が短いことが挙げられる。実際のサッカー競技は90分間行われ

るため、より運動時間が長い場合でも同様の結果が得られるか検討する必要がある。

#### 4. 結 論

本研究では、15分間のハーフタイム中に行うPAS, ACT, COMBがRSAに与える影響を検討した。その結果、PAS, ACT, COMBは前半と比較した後半のRSA低下を予防することが明らかとなった。

#### 謝 辞

本研究に対して、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝いたします。また、被験者として協力いただいた皆様に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) Chmura P., Konefał M., Chmura J., Kowalczyk E., Zajac T., Rokita A. et al., Match outcome and running performance in different intensity ranges among elite soccer players., *Biol. Sport*, 35:197–203 (2018)
- 2) Rampinini E., Bishop D., Marcora S.M., Ferrari Bravo D., Sassi R., Impellizzeri F.M., Validity of simple field tests as indicators of match-related physical performance in top-level professional soccer players., *Int. J. Sports Med.*, 28:228–35 (2007)
- 3) Bradley P.S., Sheldon W., Wooster B., Olsen P., Boanas P., Krstrup P., High-intensity running in English FA Premier League soccer matches., *J. Sports Sci.*, 27:159–68 (2009)
- 4) Mohr M., Krstrup P., Nybo L., Nielsen J.J., Bangsbo J., Muscle temperature and sprint performance during soccer matches - Beneficial effect of re-warm-up at half-time., *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, 14:156–62 (2004)
- 5) Russell M., West D.J., Briggs M.A., Bracken R.M., Cook C.J., Giroud T. et al., A passive heat maintenance strategy implemented during a simulated half-time improves lower body power output and repeated sprint ability in professional

- Rugby Union players., *PLoS One.*, 10:1–10 (2015)
- 6) Edholm P., Krstrup P., Randers M.B., Half-time re-warm up increases performance capacity in male elite soccer players., *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, 25:e40–9 (2015)
  - 7) Russell M., Tucker R., Cook C.J., Giroud T., Kilduff L.P., A comparison of different heat maintenance methods implemented during a simulated half-time period in professional Rugby Union players., *J. Sci. Med. Sport. Sports Medicine Australia*; 21:327–32 (2018)
  - 8) Towlson C., Midgley A.W., Lovell R., Warm-up strategies of professional soccer players: Practitioners' perspectives., *J. Sports Sci.*, 31:1393–401 (2013)
  - 9) Yanaoka T., Hamada Y., Fujihira K., Yamamoto R., Iwata R., Miyashita M. et al., High-intensity cycling re-warm up within a very short time-frame increases the subsequent intermittent sprint performance., *Eur. J. Sport Sci.*, 20:1307–17 (2020)
  - 10) Yanaoka T., Iwata R., Yoshimura A., Hirose N., A 1-minute re-warm up at high-intensity improves sprint performance during the Loughborough Intermittent Shuttle Test., *Front Physiol.*, 11:616158 (2021)
  - 11) Temfemo A., Bishop D., Merzouk A., Gayda M., Ahmaïdi S., Effects of prior exercise on force-velocity test performance and quadriceps EMG., *Int. J. Sports Med.*, 27:212–9 (2006)
  - 12) Ramanathan N.L., A new weighting system for mean surface temperature of the human body., *J. Appl. Physiol.*, 19:531–3 (1964)
  - 13) Niwayama M., Suzuki H., Yamashita T., Yasuda Y., Error factors in oxygenation measurement using continuous wave and spatially resolved near-infrared spectroscopy., *J. Japanese Coll. Angiol.*, 52:211–5 (2012)
  - 14) Borg G.A., Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc.* 14:377–81 (1982)
  - 15) Olesen B.W., Brager G.S., A better way to predict comfort: the new ASHRAE standard 55-2004., *ASHRAE J.*, 8:20–6 (2004)
  - 16) Kelly R., Beehn C., Hansford A., Westphal K.A., Halle J.S., Greathouse D.G., Effect of fluidotherapy on superficial radial nerve conduction and skin temperature., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 35:16–23 (2005)
  - 17) McGowan C.J., Pyne D.B., Thompson K.G., Rattray B., Warm-up strategies for sport and exercise: Mechanisms and applications., *Sport Med. Springer International Publishing*; 45:1523–46 (2015)
  - 18) Blazeovich A.J., Babault N., Post-activation Potentiation Versus Post-activation Performance Enhancement in Humans: Historical Perspective, Underlying Mechanisms, and Current Issues., *Front Physiol.*, 10:1359 (2019)

# 膝前十字靭帯再建術後の筋力低下に対する 新たな治療方法としての Cryotherapy の効果

山 梨 大 学 吉 井 諒  
(共同研究者) 東 京 大 学 竹 下 大 介  
山 梨 大 学 山 縣 然太朗

## Effect of Cryotherapy as New Treatment Method on Muscle Dysfunction Induced Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

by

Ryo Yoshii, Zentaro Yamagata

*Department of Health Sciences, Division of Medicine,  
Interdisciplinary Graduate School, University of Yamanashi*

Daisuke Takeshita

*Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo*

### ABSTRACT

Patients following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction suffer from dysfunction of the quadriceps femoris muscle (QF) for a long period of time due to neurophysiological abnormalities called arthrogenic muscle inhibition (AMI), preventing the patients from returning to sport. Failure to reduce AMI at early phases following injury or surgery could lead chronic muscular impairments due to supraspinal dysfunction. Recently, a systematic review reported the effect of cryotherapy as a treatment for AMI of QF. However, the effect of intervention using cryotherapy in early postoperative period for a certain period of time has not been investigated. In cryotherapy, exercise intervention is performed while exercise efficiency is temporarily higher by focal cooling of joints. In the present study, to examine the effect of

cryotherapy intervention in early postoperative period on QF strength, cryotherapy was applied immediately before starting each rehabilitation session for 4 weeks at early phase following ACL reconstruction. The knee extension strength of patients who received cryotherapy tended to be higher than that of patients who did not receive cryotherapy. This result suggests that AMI of QF following ACL reconstruction could be treated at an early phase as hospitalization using cryotherapy.

#### キーワード

前十字靭帯, 大腿四頭筋, 関節因性筋抑制, クライオセラピー, 感覚過負荷メカニズム

#### Keyword

Anterior cruciate ligament, Quadriceps femoris, Arthrogenic muscle inhibition, Cryotherapy, Sensory overload mechanism

#### 要旨

膝前十字靭帯 (ACL) 再建術後は、大腿四頭筋に関節因性筋抑制 (AMI) と呼ばれる神経生理学的異常により、長期にわたって筋機能低下が生じやすく、安全なスポーツ復帰を妨げている。このAMIは発生早期の段階で軽減できないと上位中枢に作用し慢性化する可能性が指摘されている。大腿四頭筋のAMIの治療法としてCryotherapyが注目されているが、術後早期における一定期間の介入効果はまだわかっていない。Cryotherapyは、関節を冷却することで一時的に運動効率を上げ、その間に運動療法を行って筋機能改善を図る治療法である。本研究は、ACL再建術後早期の患者に対し、4週にわたりリハビリテーション直前にCryotherapyを実施し、大腿四頭筋筋力に対する効果を検証した。その結果、リハビリテーション直後にアイシングを行ったコントロール群と比較し、Cryotherapy介入群では等尺性膝伸展筋力患健比が高い傾向が認められた。ACL再建術後の大腿四頭筋AMIに対して、Cryotherapyを用いることで入院中からの早期治療アプローチができる可能性が示唆された。

#### 緒言

膝前十字靭帯 (ACL) 損傷は、スポーツ場面で頻繁に発生し、米国では年間12万人を超える損傷が発生していると言われている<sup>1)</sup>。また、治療の第一選択である再建手術を行ってもスポーツ復帰には6-9か月は要し<sup>2)</sup>、対象者の活動レベルによってばらつきがあるものの、復帰後のACL再断裂率は2.0～19.3%に及ぶと報告されている<sup>3)</sup>。したがって、ACL再建術後に患者が安全に復帰するためのリハビリテーションにおいて、その質を高めることは急務である。

安全なスポーツ復帰に必要な要素として大腿四頭筋の筋力は重要視されているが<sup>4,5)</sup>、ACL再建術後の患者の大腿四頭筋は特異的に筋力が低下することがわかっている<sup>6,7)</sup>。そしてこの筋力低下は、廃用性筋力低下とは異なり、神経生理学的異常が関わっているとされている<sup>8)</sup>。この異常が機能回復に向けたリハビリテーションにおいて大きな障害となるため、近年では関節因性筋抑制 (Arthrogenic Muscle Inhibition; AMI) と定義され、多くの研究が行われている<sup>6,7,9)</sup>。しかしながら、AMIの機序はその複雑さ故にまだ

不明な点も多く、そのため治療方法は確立されていない<sup>9,10)</sup>。現状におけるAMIの治療法を検証したシステマティックレビューによると、Cryotherapyの効果が注目されている<sup>10)</sup>。ここで言うCryotherapyはアイスバッグなどで患部を冷やした上で運動療法を行うことを指す。実際、Cryotherapyは、人工的に膝に腫脹を引き起こして大腿四頭筋をAMIの状態にした健常者に対し即時効果が認められている<sup>11,12)</sup>。またACL再建術後慢性期の患者に2週間にわたりリハビリテーション直前にCryotherapyを実施することで大腿四頭筋のAMIを軽減したとの報告<sup>13,14)</sup>や、急性期ACL再建術後患者における即時効果も認められている<sup>15)</sup>。Cryotherapyの効果は一時的であるが、効果の持続中に運動療法を施行することで運動療法の効率が上がることが示唆されている<sup>13,14)</sup>。AMIは時間経過とともに脊髄反射レベルの障害から皮質レベルへと影響が波及し、持続的な筋機能障害や代償運動パターンを惹起させる可能性が指摘されている<sup>7,9)</sup>。そのため、AMI発生後は、なるべく早期に介入することが重要と考えられている<sup>7,9)</sup>。しかしながら急性期症例の一定期間におけるCryotherapy介入による筋機能への効果に関しては報告されておらず、術後早期の臨床実装が可能かは不明である。ACL再建術後早期の入院期間中において、大腿四頭筋の筋力に対するCryotherapyの効果が認められれば、その簡便さ故に臨床において取り入れやすく、またAMIに対する早期アプローチとして、ACL再建術後患者の安全なスポーツ復帰のための貢献度は大きいと言える。そこで本研究の目的は、ACL再建術後早期におけるリハビリテーション直前のCryotherapyの大腿四頭筋筋力に対する効果を検証することとした。

## 1. 研究方法

### 1.1 対象

2022年8月から2023年4月の間に国立病院機構甲府病院にて初回ACL再建術を行った運動習慣のある患者（年齢14-35歳）のうち本研究に同意を得られた18人を対象とした。

本研究は国立病院機構甲府病院倫理審査委員会の承認（R4-5）を受けた上で実施した。

### 1.2 手順

研究デザインは無作為化比較試験とし、対象者をCryotherapy介入群（CRYO群）、コントロール群（CON群）の2群へ分類した。その際、各群で総人数および男女の割合が同等となるよう層別およびブロックランダム化を行って割り付けた。Cryotherapyはアイスバッグにより膝を冷やすことで、通常臨床で術後のケアとして行われるアイシングと同様の処置であるが、前者は運動効率を上げるために行い、後者は炎症を抑えるケアのために行うため、目的が異なる。本研究では、CRYO群は通常のリハビリの直前において、先行研究をもとに20分間のアイシングを行い<sup>13-15)</sup>、それに対してCON群は、対象者に与えられる治療の総量をCRYO群と同等にするため、リハビリ直後に20分間のアイシングを行った（図1）。当院における入院中の通常リハビリは、ACL術後患者全員同一の運動プログラムに沿って一回40分間を週5回行い、ACL再建術後2週で部分荷重開始、4週で全荷重にて退院となる。Cryotherapyの効果は概ね40分間持続するとされているため<sup>13,14)</sup>、CRYO群ではアイシング後即座に通常リハビリを開始した。2群間においてCryotherapy以外で差異が極力生じないよう、CRYO群はアイシング直前の40分間と通常のリハビリ直後の40分間、CON群は通常のリハビリ開始直前の40分間とアイシング直後の40分間安静状態にてアイシ



図1 研究プロトコル

ングを行わない期間を設けた(図1)。アイシングにはアイスバッグ(ICE MAT. MIZUNO., Tokyo, Japan)を二つ使用し膝の前面と後面に当て、バンテージで固定した。週5回の介入を4週間継続し、術後4週時点でアウトカムとして、BIODEX system 4.0(Biodex Medical Systems Inc., Shirley, USA)のACLアタッチメントを使用して膝70°屈曲位にて等尺性膝伸展筋力(患健比)を測定した。測定は対象者へのリハビリ治療や介入、解析に関与していない第三者が行った。

### 1. 3 データ解析

ここで得られた等尺性膝伸展筋力患健比の値に関して、t検定を使用してCRYO群とCON群の間での差を比較した。また、2群の背景因子に差異が無いかを確認する目的で、性別、年齢、身長、体重、スポーツレベルを示すTegner activity scale(TAS)、心理面の評価として術前の日本語版Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after

Injury Scale(ACL-RSI)と術後介入開始時の日本語短縮版Tampa Scale for Kinesiophobia(TSK-11)を調査した。さらに経時的評価として腫脹の程度を示すStroke test、痛みの程度を示すVisual analog scale(VAS)(膝屈曲70度位での等尺性最大膝伸展動作時)、炎症マーカーであるC-reactive protein(CRP)を介入開始時、術後2週時、術後4週の最終評価時に調査し、それぞれの要素を2群間で比較した。その際、順序尺度であるStroke testのみMann-WhitneyのU検定を使用し、その他はt検定を使用した。解析は統計解析ソフトR(IBM Corporation, Armonk, USA)を使用し、有意水準は5%未満とした。

### 2. 研究結果

性別、年齢、身長、体重、TAS、ACL-RSI、TSK-11において、CRYO群とCON群の間に有意差は認められなかった(表1)。また、この2群の等尺性膝伸展筋力患健比において統計学的有意

表1 対象者の基本属性

	CRYO	CON	p
性別(男性/女性)	6/3	6/3	-
年齢(歳)	20.2±6.7	19.2±3.8	0.75
身長(cm)	167.1±13.0	168.7±5.5	0.79
体重(kg)	63.8±11.9	71.1±17.6	0.46
TAS	7.8±1.6	7.2±2.2	0.61
ACL-RSI	45.8±9.8	51.4±6.1	0.28
TSK-11	23.8±3.0	24.2±7.7	0.92

平均±標準偏差(性別は人数を示す)

CRYO: Cryotherapy介入群, CON: コントロール群, TAS: Tegner activity scale, ACL-RSI: Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury, TSK: Tampa Scale for Kinesiophobia

表2 等尺性膝伸筋力健患比と各経時的評価項目

	介入開始時			術後2週時			最終評価時		
	CRYO	CON	p	CRYO	CON	p	CRYO	CON	p
等尺性膝伸筋力 患健比(%)	-	-	-	-	-	-	57.1±13.1	48.0±8.5	0.066
VAS(cm)	4.4±2.7	3.9±2.9	0.80	0.3±0.4	0.4±0.4	0.80	0.2±0.3	0.3±0.3	0.89
CRP(mg/dl)	1.2±1.0	0.7±0.4	0.31	0.2±0.1	0.2±0.1	0.97	0.04±0.01	0.05±0.03	0.77
Stroke Test 0/T/1+/2+/3+	0/2/2/3/2	0/3/2/2/2	0.72	3/4/2/0/0	3/3/3/0/0	0.82	9/0/0/0/0	9/0/0/0/0	-

平均±標準偏差(Stroke Testは各段階ごとの人数を示す)

CRYO: Cryotherapy介入群, CON: コントロール群, VAS: Visual analog scale, CRP: C-reactive protein

差を検出できなかったもののCRYO群で高い傾向が見られた(p=0.066)(表2)。また、介入開始時、術後2週時、最終評価時のいずれにおいても、VAS、CRP、Stroke testの結果に有意差は認められなかった(表2)。

### 3. 考 察

ACL再建術後患者に生じる大腿四頭筋のAMIは、神経制御異常を伴う筋機能不全であると考えられており、安全なスポーツ復帰を妨げる大きな要因の一つである<sup>5-8)</sup>。AMIには、複数の要素が複雑に影響し合っており<sup>16-20)</sup>、効果的な治療法は未だ確立されていない。本研究ではACL再建術後早期の患者のAMIに対する治療法として、Cryotherapyの効果を検証した初めての研究である。結果として術後4週間の介入により、統計学的有意差は認められなかったもののCRYO群で筋力が大きくなる傾向が見られ、介入効果がある可能性が示唆された。

AMIのメカニズムは、脊髄の運動ニューロンプール興奮性の低下という脊髄反射性メカニズムに加え、上位の中枢活性化障害が関与している<sup>9)</sup>。特に前者はAMI発生の急性期に生じやすく、組織の損傷、関節弛緩、滲出液、痛み、炎症などがその原因とされている<sup>7,9)</sup>。そして、ここで指摘されているメカニズムは、靭帯損傷などの関節内の機械受容器の損傷に起因する神経入力減少(求心性遮断メカニズム)<sup>9,21)</sup>と痛みや滲出液などによる侵害受容器や関節機械受容器の活

動亢進(感覚過負荷メカニズム)<sup>9,22,23)</sup>である。Cryotherapyは主にこの感覚過負荷メカニズムに作用し、ある種の鎮静効果により結果として筋機能低下を抑える可能性を先行研究は示唆している<sup>11,15)</sup>。実際に、実験的に腫脹させてAMIの状態にした膝に麻酔を注射して鎮静をかけると筋機能が改善したとの報告もある<sup>24)</sup>。本研究では、腫脹、痛み、炎症マーカーを経時的に評価しており、手術後早期ではこれらの数値が高く、時間経過とともに徐々に軽減していく様子が確認できた。そして、CRYO群とCON群でこれらの数値に差がなかったことを鑑みると、Cryotherapyが腫脹や痛み、炎症そのものには影響を与えているわけではない。したがって、本結果にてCryotherapyによる介入で大腿四頭筋の筋力増加傾向が見られた背景としては、特にこの早期における感覚過負荷メカニズムに作用し、過活動となっている侵害受容器や関節機械受容器からの抑制性の神経活動を関節の冷却により抑え、一時的に筋機能を上げることで運動効率の向上が図れたと考えられる。

ACL損傷後や再建術後早期に認められる大腿四頭筋のAMIには脊髄の運動ニューロンプール興奮性低下が大きく関与していると言われているが、時間経過とともに皮質レベルへと影響が波及し、長期に渡る皮質脊髄路興奮性の低下とそれに伴う筋機能障害を引き起こす可能性が報告されている<sup>7,9)</sup>。したがってこの早期の段階で大腿四頭筋の機能障害を軽減させることは、ACL再建術後患者が安全にスポーツ復帰する上で重要な意味

を持つ。本研究によって、ACL再建術後患者における大腿四頭筋のAMIに対する入院中からの早期治療アプローチができる可能性を見出したことで、今後のAMI治療に関する研究の一助となると考える。

本研究の限界点として、アイシングを使用する本研究の特性上、対象者やリハビリ提供者に対してマスク化を行えなかった。しかしながら、本研究開始時点でCryotherapyの効果は不明であり、対象者に対してはアイシングがリハビリの前後どちらが効果的かといった情報は伝えていないため、マスクに近い状況だと考える。

今回の研究では、時間的制約により、対象者数が不十分であったため、今後も被験者を増やし、継続していく予定である。

#### 4. まとめ

本研究により、ACL再建術後患者における大腿四頭筋のAMIに対して、Cryotherapyを用いることで入院中からの早期治療アプローチができる可能性が示唆された。今後は対象者を増やし、長期にわたる縦断研究を行っていくことで、ACL再建術後患者のより安全なスポーツ復帰のためのリハビリプロトコルの提案に繋げていく。

#### 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、ご協力いただいた国立病院機構甲府病院の萩野哲男院長並びに落合聡司副院長、防衛大学の小西優教授に御礼申し上げます。

#### 文 献

1) Gornitzky A.L. et al., Sport-specific yearly risk and incidence of anterior cruciate ligament tears in high school athletes: a systematic review and meta-analysis., *Am. J. Sports Med.*, **44**, 2716–2723 (2016)

2) Burgi C.R. et al., Which criteria are used to clear patients to return to sport after primary ACL reconstruction? A scoping review., *Br. J. Sports Med.*, **53**, 1154–1161 (2019)

3) Pinheiro V.H. et al., Rates and Levels of Elite Sport Participation at 5 Years After Revision ACL Reconstruction., *Am. J. Sports Med.*, **50**, 3762–3769 (2022)

4) Schmitt L.C., Paterno M.V. Hewett T.E., The impact of quadriceps femoris strength asymmetry on functional performance at return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction., *J. Orthop. Sport. Phys. Ther.*, **42**, 750–759 (2012)

5) Grindem H., Snyder-Mackler L., Moksnes H., Engebretsen L., Risberg M. A., Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study., *Br. J. Sports Med.*, **50**, 804–808 (2016)

6) Palmieri-Smith R.M., Thomas A.C., A neuromuscular mechanism of posttraumatic osteoarthritis associated with ACL injury., *Exerc. Sport Sci. Rev.*, **37**, 147–153 (2009)

7) Rush J.L., Glaviano N.R., Norte G.E., Assessment of Quadriceps Corticomotor and Spinal-Reflexive Excitability in Individuals with a History of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis., *Sport. Med.*, **51**, 961–990 (2021)

8) Konishi Y., Fukubayashi T., Takeshita D., Possible mechanism of quadriceps femoris weakness in patients with ruptured anterior cruciate ligament., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **34**, 1414–1418 (2002)

9) Norte G., Rush J., Sherman D., Arthrogenic muscle inhibition: Best evidence, mechanisms, and theory for treating the unseen in clinical rehabilitation., *J. Sport Rehabil.*, **31**, 717–735 (2021)

10) Sonnery-Cottet B., et al., Arthrogenic muscle inhibition after ACL reconstruction: A scoping review of the efficacy of interventions., *British Journal of Sports Medicine*, **53** 289–298 (2019)

11) Hopkins J.T., Ingersoll C.D., Edwards J., Klootwyk T.E., Cryotherapy and transcutaneous electric neuromuscular stimulation decrease arthrogenic muscle inhibition of the vastus medialis after knee joint effusion., *J. Athl. Train.*, **37**, 25 (2002)

12) Rice D., McNair P.J., Dalbeth N., Effects of cryotherapy on arthrogenic muscle inhibition using

- an experimental model of knee swelling., *Arthritis Care Res.*, **61**, 78–83 (2009)
- 13) Hart J.M., Kuenze C.M., Diduch D.R., Ingersoll C.D., Quadriceps muscle function after rehabilitation with cryotherapy in patients with anterior cruciate ligament reconstruction., *J. Athl. Train.*, **49**, 733–739 (2014)
  - 14) Kuenze C.M., Kelly A.R., Jun H.-P., Eltoukhy M., Unilateral quadriceps strengthening with disinhibitory cryotherapy and quadriceps symmetry after anterior cruciate ligament reconstruction., *J. Athl. Train.*, **52**, 1010–1018 (2017)
  - 15) Loro W.A., Thelen M.D., Rosenthal M.D., Stoneman P. D., Ross M.D., The effects of cryotherapy on quadriceps electromyographic activity and isometric strength in patient in the early phases following knee surgery., *J. Orthop. Surg.*, **27**, 2309499019831454 (2019)
  - 16) Rice D.A., McNair P.J., Quadriceps Arthrogenic Muscle Inhibition: Neural Mechanisms and Treatment Perspectives., *Seminars in Arthritis and Rheumatism*, **40** 250–266 (2010)
  - 17) Hart J.M., Pietrosimone B., Hertel J., Ingersoll C.D., Quadriceps activation following knee injuries: a systematic review., *J. Athl. Train.*, **45**, 87–97 (2010)
  - 18) Hopkins J. T., Ingersoll C.D., Arthrogenic muscle inhibition: a limiting factor in joint rehabilitation., *J. Sport Rehabil.*, **9**, 135–159 (2000)
  - 19) Meier W. et al., Total knee arthroplasty: muscle impairments, functional limitations, and recommended rehabilitation approaches., *J. Orthop. Sport. Phys. Ther.*, **38**, 246–256 (2008)
  - 20) Palmieri-Smith R.M., Thomas A.C., Wojtys E.M., Maximizing quadriceps strength after ACL reconstruction., *Clin. Sports Med.*, **27**, 405–424 (2008)
  - 21) Konishi Y., Suzuki Y., Hirose N., Fukubayashi T., Effects of lidocaine into knee on QF strength and EMG in patients with ACL lesion., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **35**, 1805–1808 (2003)
  - 22) Palmieri-Smith R.M., Villwock M., Downie B., Hecht G., Zernicke R., Pain and effusion and quadriceps activation and strength., *J. Athl. Train.*, **48**, 186–191 (2013)
  - 23) Palmieri R.M. et al., Arthrogenic muscle response induced by an experimental knee joint effusion is mediated by pre-and post-synaptic spinal mechanisms., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **14**, 631–640 (2004)
  - 24) Spencer J.D., Hayes K.C., Alexander I.J., Knee joint effusion and quadriceps reflex inhibition in man., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, **65**, 171–177 (1984)

## 2型糖尿病患者・肥満患者における病態と 爪郭毛細血管の定量評価の関連について

東京大学大学院 三好建吾  
(共同研究者) 東京大学 近森正智  
東京大学大学院 青山倫久  
東京大学 松永行子  
東京大学大学院 山内敏正

### **The Relationship of Morphology and Color of Nailfold Capillaries with Disease State of Diabetes and Obesity: An Observational Study**

by

Kengo Miyoshi, Tomohisa Aoyama,  
Toshimasa Yamauchi

*Department of Diabetes and Metabolic Diseases,  
Graduate School of Medicine, The University of Tokyo*

Masatomo Chikamori, Yukiko Matsunaga  
*Institute of Industrial Science, The University of Tokyo*

#### ABSTRACT

Nailfold capillaries are small hairpin-shaped blood vessels that align the nailfold at the tips of fingers and toes. Those vessels can be repeatedly observed using relatively inexpensive and small microscopy without injecting needles or administering drugs. Nailfold capillary morphology is known to be altered by various diseases, and morphological abnormalities have been associated with type 2 diabetes and its complications. Though, there have been few reports of quantitative analysis of nailfold capillary morphology. The conventional semi-quantitative analysis could

only analyze the presence or absence of diseases and complications, so by shifting to quantitative analysis, nailfold capillaroscopy would be a new examination method in the treatment of type 2 diabetes, as it will provide more accurate results and also enable the evaluation of disease severity. In this study, we quantitatively analyzed not only the morphology of nailfold capillaries but also the colors of the capillaries, and showed that capillary diameters in hospitalized patients with diabetes had a significantly positive correlation with HbA1c levels, a glycemic control index that indicates the disease status of diabetes ( $R^2=0.21, p=0.027$ ). Additionally, obesity, associated with insulin resistance in diabetes, had a significantly negative correlation with delta E, a color contrast between the inside and outside of capillaries in obese and diabetic patients ( $R^2=0.19, p=0.035$ ).

#### キーワード

爪郭毛細血管, 爪郭毛細血管顕微鏡, 糖尿病, 肥満症

#### Keyword

Nailfold capillary, Nailfold capillaroscopy, Diabetes, Obesity

#### 要旨

爪郭毛細血管は手指先端の爪郭部に存在するヘアピループ状の微小な血管群のことで、注射針の穿刺や薬剤の使用などの侵襲性なく、比較的低価格の小型顕微鏡で簡便かつ非侵襲に観察が可能である。爪郭毛細血管の形態は様々な疾患によって変化することが知られ、これまでに2型糖尿病や合併症との関連が指摘されてきたが、爪郭毛細血管形態についての画像の定量的解析を行った報告は少ない。従来の半定量的な画像解析では主として疾患・合併症の有無のみの解析が限界で、より精度の高い定量解析に移行することで、疾患の重症度を評価することも可能になるため、爪郭毛細血管顕微鏡が2型糖尿病診療における新たな検査方法となることが期待される。本研究では、糖尿病入院患者の血管径が、糖尿病の病勢を示す血糖コントロール指標であるHbA1cと有意に相関することを示した ( $R^2=0.21, p=0.027$ )。ま

た糖尿病におけるインスリン抵抗性と関連するとされる肥満度は、肥満患者・糖尿病患者の血管内外の色のコントラストdelta Eと有意に相関した ( $R^2=0.19, p=0.035$ )。

#### 緒言

糖尿病は国民健康・栄養調査で示されるように予備群も含めると成人の実に27%を占める主要な国民病と呼べる。慢性的な高血糖とインスリンの不足を含む代謝障害により、三大合併症と言われる糖尿病網膜症、糖尿病性腎症、糖尿病性神経障害といった全身の微小な血管の病変(細小血管障害)や狭心症、脳梗塞といった大血管の動脈硬化病変(大血管障害)をきたす疾患である。網膜症は日本における失明原因の第3位<sup>1)</sup>であり、腎症は同じく透析導入の原疾患の第1位<sup>2)</sup>であり、糖尿病治療において合併症の発症・進展抑制が重要課題といえる。しかし、糖尿病診療の場において合併症のスクリーニング状況が十分とは言い難

く、網膜症の検査を1年に1回以上受けている糖尿病患者は全体の46.5%、腎症の指標である尿蛋白・アルブミン定量検査については同じく19.4%に過ぎないという報告もあり<sup>3)</sup>、合併症の把握について改善の余地は大きいといえる。糖尿病の治療状況の把握には血液・尿検査が用いられ、網膜症の評価には眼底検査が行われているが、いずれも侵襲とコストを伴う検査方法であり、非侵襲的かつ低コストな検査方法が望まれると考えられる。

爪郭毛細血管は、爪の甘皮の中核側にある爪郭という部分の皮下に水平に並んだヘアピループ状の毛細血管であり、体外から特殊な機器・薬剤を用いずに比較的簡単に観察できる唯一といってよい血管である。これまで強皮症といった全身性自己免疫疾患を中心に、様々な疾患で爪郭毛細血管の形態が変化することが報告されており、糖尿病に罹患した場合や、糖尿病網膜症<sup>4)</sup>を合併した場合にも形態が変化することが報告され、糖尿病の発症リスクや難治性に関連するインスリン抵抗性と関連するとされる肥満症でも血管形態が変化しねじれた血管が増えると報告<sup>5)</sup>されている。

しかし、これまで糖尿病患者を含め、爪郭毛細血管の定量的な解析は血管長、血管本数、血管径を除くと報告は稀で、他の形態については半定量解析（段階評価）に基づくため統計的な検定力が低い。本研究では、爪郭毛細血管の定量評価を開発し、2型糖尿病または肥満症をもつ患者に対して、臨床所見と爪郭毛細血管の関連について検証した。

## 1. 研究方法

### 1.1 対象症例

本研究の対象者は2型糖尿病または肥満症の診断を有し、東京大学医学部附属病院 糖尿病・代謝内科へ入院した患者から選定し、本研究の参加にあたり口頭及び文書にて十分な説明を受け、書

デサントスポーツ科学 Vol. 45

面による同意が得られた51例（男性30例、女性21例）を参加者とした。また、以下のいずれかに抵触する者は本研究に組み入れないこととした。

1) 悪性腫瘍、膠原病、慢性皮膚疾患の治療の既往歴がある者 2) 認知症や精神疾患により認知機能に問題がある者 3) その他、研究責任医師が本研究の対象として不適切と判断した者。

本研究は東京大学医学部倫理委員会の承認を受け実施した（審査番号：2020316-NI）。

### 1.2 爪郭毛細血管顕微鏡

本研究で使用した爪郭毛細血管顕微鏡は、顕微鏡 Smart G-SCOPE (Genie Tech) 及び顕微鏡スタンド SGS-H100 (Genie Tech, Korea) を基に、スタンド制御のためのステッピングモーター 8HS15-0604S (OSM Technology, China) 及び Arduino CNC Shield V3.00 (Protoneer, New Zealand), System on Module の Jetson Xavier NX Developer Kit (NVIDIA, USA) を東京大学生産技術研究所 DLX デザインラボにて組み合わせて製作しており、イントラネットで接続したブラウザ Google Chrome (Alphabet Inc, USA) から顕微鏡スタンドの制御を可能にした。(図1)

### 1.3 研究手順

研究参加者の入院後（入院直後）および退院直前の2回にわたり、非利き手第4指の爪郭毛細血管を上記顕微鏡を用いて250倍の倍率で撮影した。撮影室は病棟内の空調管理がなされ、気温18℃～25℃程度に管理された蛍光灯環境下で、撮影は午前9-12時の間に行われた。画像データの生成時にIDを自動生成し、このIDとともに画像データを接続したPCに保存した。電子診療録からの情報収集もこのIDに紐づけて匿名保存し、別途IDに対して患者番号の対応表を作成し管理した。

また入院患者は入院初日に身体検査として身長、体重を、血液検査でHbA1cを計測し、研究

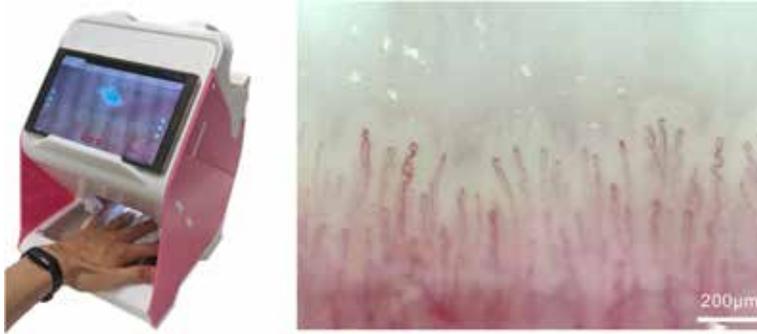


図1 爪郭毛細血管顕微鏡および爪郭毛細血管の顕微鏡写真

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_{\text{capillary}} - L^*_{\text{background}})^2 + (a^*_{\text{capillary}} - a^*_{\text{background}})^2 + (b^*_{\text{capillary}} - b^*_{\text{background}})^2}$$

図2 delta E の計算式

参加者の診療録から情報を得た。

### 1. 4 画像解析方法

画像解析は、明らかに取得画像が不鮮明もしくは焦点が合っていないためいずれの爪郭毛細血管のヘアピン構造が癒合して1本に見える画像を除いて、画像解析ソフト Fiji<sup>6)</sup> を使用しておこなった。取得画像は爪郭毛細血管と背景の二値化画像に変換した。血管径は二値化画像を爪郭毛細血管径のヒートマップ画像に変換した後、血管に沿って色強度を計測し平均値を計算した。爪郭毛細血管と背景皮膚の色のコントラストは、取得画像を RGB 画像から CIELAB (L\*a\*b\*) 画像に変換した後、二値化画像で爪郭毛細血管と背景皮膚をそれぞれ選択し、色差 delta E として計算した (図2)。

### 1. 5 データ分析

統計解析には Microsoft Office Excel (Microsoft, USA) 及び JMP<sup>®</sup> Pro 16 (SAS Institute Inc., USA) を使用し、検定には2群比較では Student の t 検定を用い、前後比較では対応のある t 検定を用いた。2変量の相関は Pearson の相関係数を用いた。有意水準はいずれも5%とし、得られた指標は平均値 ± 標準偏差で記載した。

## 2. 研究結果

### 2. 1 患者背景

研究参加者のうち、入院直後および退院直前に解析可能な爪郭毛細血管画像を得られたのは23例 (男性15例, 女性8例) だった。患者背景を表1に示す。平均年齢は54.7歳で、糖尿病患者・肥満患者の平均 Body mass index (BMI) は 29.3kg/m<sup>2</sup> と1度~2度肥満の症例が多くを占め、糖尿病患者における HbA1c は平均8.9%であった。また2型糖尿病の診断を有するものが21例、耐糖能異常を有するものが2例であり、BMI 25kg/m<sup>2</sup> 以上で肥満を有するものが17例、肥満のないものが6例であった。入院直後に撮影した糖尿病患者・肥満患者の毛細血管画像の解析では、血管径は 7.5 ± 0.8 μm で、delta E は 8.3 ± 2.0 だった (図3, 表2)。

### 2. 2 爪郭毛細血管画像と臨床データの比較

入院直後の爪郭毛細血管画像と症例のプロ

表1 患者背景

年齢(歳)	54.7 ± 10.7
性別(男/女)	(15 / 8)
身長(cm)	165.3 ± 6.8
体重(kg)	80.1 ± 17.8
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	29.3 ± 6.1
HbA1c(%)	8.95 ± 2.06

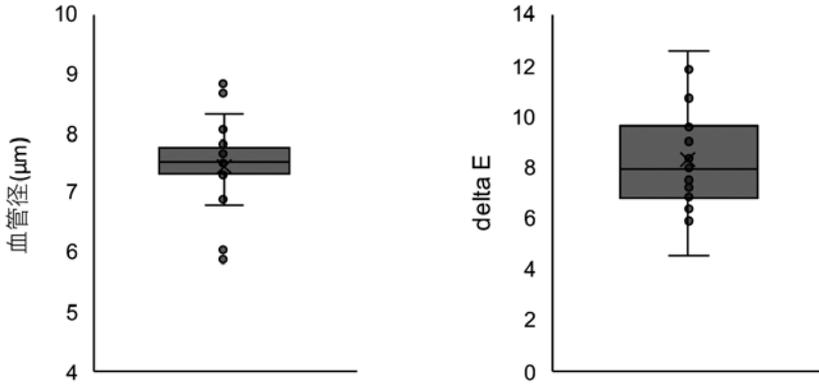


図3 入院直後の血管径および delta E

表2 入院直後の血管径およびdelta E

血管径(μm)	7.5 ± 0.8
delta E	8.3 ± 2.0

ファイルと比較した(図4, 図5, 表3)。糖尿病患者の血管径は, HbA1c と有意な正の相関を示し ( $R^2=0.21, p=0.027$ ), 入院前の血糖コントロールが不良なほど爪郭毛細血管径が拡大した。また爪郭毛細血管と背景皮膚のコントラストを示す delta E は, BMI と有意な負の相関 ( $R^2=0.19, p=0.035$ ) を示し, 肥満度が高いほどコントラストが低下していた。一方, 糖尿病網膜症の有無, および糖尿病性腎症の指標である eGFR, 尿中アルブミン/クレアチニン比と血管径および delta E の間で有意な関連はみられなかった。また, 入院直後と退院直前の前後比較では, 血管径および delta E とも有意な変化を示さなかった。

### 3. 考察

本研究で, 2型糖尿病および肥満症の入院患者を対象に, 爪郭毛細血管の所見を解析した結果, 入院時のHbA1cと血管径, BMIと血管内外のコントラストに有意な相関がみられ, 爪郭毛細血管の所見が糖尿病や肥満症の病態の指標となる可能性が示された。

糖尿病および肥満症と爪郭毛細血管の形態変化の関連は数多く指摘されている。複数の研究において, 血糖コントロール不良状態の糖尿病患者では血管径の拡大や部分的な血管拡張, 血管密度の低下や枝分かれ状の血管といった異常所見を示すことが指摘されている<sup>7)</sup>。近年では, 2型糖尿病において爪郭毛細血管の交差所見の有無が糖尿病網膜症の存在を示唆する可能性<sup>4)</sup>や, 腹部肥満を

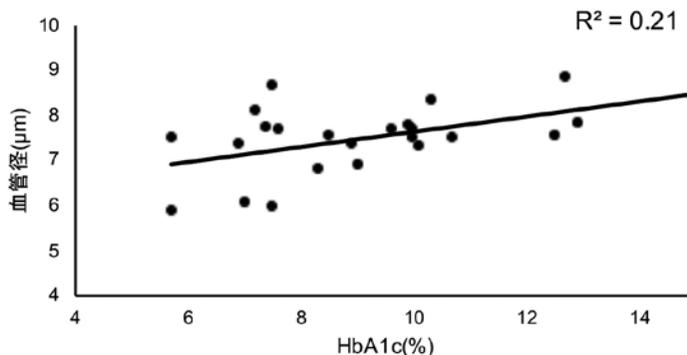


図4 HbA1c と血管径の相関

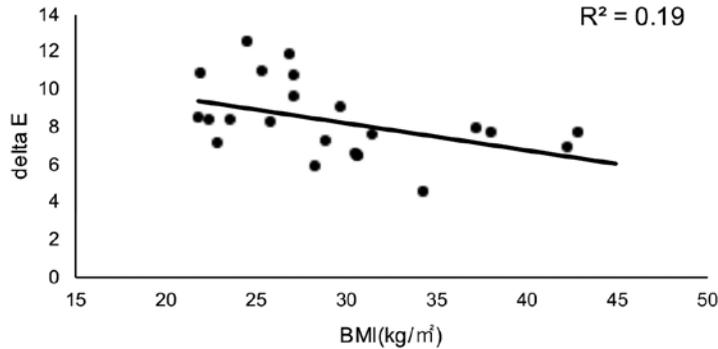


図5 BMIとdelta Eの相関

表3 BMI, HbA1cと関連した画像パラメータ

	$\rho$	p値	
HbA1c(%)	血管径( $\mu$ m)	0.46	0.027
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	delta E	-0.44	0.035

有する2型糖尿病患者では交差血管が増加しているという所見の報告<sup>5)</sup>がみられている。糖尿病治療による血管形態の変化としては、高血糖緊急症をきたし緊急入院を行った中年男性症例の報告で、血糖コントロール改善後では毛細血管の密度が上昇し、血管拡張像や枝分かれした血管が改善したという報告<sup>8)</sup>がある。2型糖尿病や肥満症に対する治療介入時の爪郭毛細血管への影響について、Costaらの報告では2型糖尿病患者に対し14日間のL-アルギニン投与により、爪郭毛細血管の血流速度が上昇したが、血管径は変化がなかったとされている<sup>9)</sup>。しかし、血管形態に加え色情報について解析した報告はこれまでない。

本研究では、入院時の糖尿病の血糖コントロールの指標であるHbA1cが高値であるほど毛細血管径が増大することが示された。これはUyarら<sup>7)</sup>やAbd El-Khalikら<sup>10)</sup>の報告と一致するものであった。Kuryliszyn-Moskalらの報告<sup>11)</sup>では、高血糖等による血管内皮障害により毛細血管密度が低下し、代償的に血管内皮増殖因子(VEGF, vascular endothelial growth factor)、可溶性トロンボモジュリンやエンドセリン-1といった血管新

生因子が放出され、新生血管形成が促進されることにより枝分かれ状の血管や血管径の拡張が生じるとされている。またSantosらの報告<sup>12)</sup>では、糖尿病網膜症において血管周囲のペリサイトの脱落が毛細血管からの出血や浮腫に関与することが示唆されており、爪郭毛細血管においても同様の機序で血管形態が変化している可能性がある。一方で、本研究で算出された血管径は先行論文で報告されたものよりも細かった。これは従来の測定方法では手動で代表的な1ヶ所から血管径を計測している一方で、本研究では爪郭毛細血管に沿って爪郭毛細血管径を全長にわたり合算してから平均化しているため、画像を二値化する際に細く抽出されてしまった血管部位や、先細りしている爪郭毛細血管端点周辺も合算してしまうため低値になったと考えられる。またHbA1cは入院までの2~3ヶ月間の平均血糖に比例するものである一方、入院直後から患者は食事・運動・薬物療法により血糖が改善傾向となるため、入院直後の撮影時点ですでに爪郭毛細血管の状態が改善し血管径が縮小した可能性がある。今後は血管径を抽出血管全体の平均値として計測するのではなく、端点などの特定の部位を除外することで、臨床データとより強く相関する可能性はある。

入院直後のBMIと爪郭毛細血管・背景のコントラスト delta E は有意に負の相関を示した。爪郭毛細血管の周囲は表皮細胞に囲まれており、特

に角化していない生きた表皮細胞が存在する部分 perivascular zone は顕微鏡でも視認可能である。perivascular zone の大きさは心不全患者において心不全の重症度と関連するという報告<sup>13)</sup>があり、循環血液量や体水分量による末梢循環への負荷を反映していると考えられる。2型糖尿病においては毛細血管からの微小出血が生じやすく、また肥満では食事からの塩分摂取による体液過剰や、高血圧の合併により末梢血管への負荷が生じると考えられ、それらが血管内外のコントラスト低下につながった可能性がある。

本研究においては、研究参加者の糖尿病性腎症および糖尿病網膜症の進展と、血管径および delta E については有意な関連がみられなかった。腎症および網膜症は糖尿病発症から5~10年程度で進展がみられるものであり、また一部は不可逆的な経過をたどる。一方、爪郭毛細血管の形態は数日単位での変動も生じるため、今回検討した爪郭毛細血管の指標と合併症の状態とは、必ずしも関連するものではない可能性がある。ただし、交差血管の有無と糖尿病網膜症の関連<sup>4)</sup>を示唆する報告もあり、検索する所見について検討が必要である。また本研究においては、入院時点で糖尿病網膜症の検査歴がなく、網膜症に関してデータ欠損となった症例が一定数生じていたほか、腎症については23人中19人が eGFR 60mL/min/1.73m<sup>2</sup>以上、15人が尿中アルブミン/クレアチニン比 30mg/gCre 未満と腎障害の程度が比較的軽度であったため、有意な所見が得られなかった可能性がある。

また、本研究では入院直後ならびに退院直前の2回にわたり撮影を行ったが、画像が得られた23例の解析では血管径および delta E とも有意な変化を示さなかった。いずれについても、研究対象者をさらに追加しての検討も今後の課題と考えられた。

#### 4. 結 論

本研究では、2型糖尿病患者および肥満症患者に対して、爪郭毛細血管の形態および色情報を定量的に測定した。糖尿病の病勢を示す血糖コントロール指標である HbA1c が悪化し高くなる程、有意に血管径が太くなることが示された。以上から爪郭毛細血管顕微鏡は、糖尿病の病態モニタリングに有用であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究は、2023年度公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団学術研究課題の助成金交付により、遂行することができました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。また爪郭毛細血管顕微鏡の開発をいただいた東京大学生産技術研究所 価値創造デザイン推進基盤 Yuri Klebanov 特任研究員、Miles Pennington 教授、同研究所 機械・生体系部門 安藤誉特任研究員に深く感謝いたします。

#### 文 献

- 1) Morizane Y., Morimoto N., Fujiwara A., Kawasaki R., Yamashita H., Ogura Y., et al., Incidence and causes of visual impairment in Japan: the first nation-wide complete enumeration survey of newly certified visually impaired individuals., *Jpn. J. Ophthalmol.*, **63** (1) : 26-33 (2019)
- 2) 花房規男, 阿部雅紀, 常喜信彦, 星野純一, 和田篤志, 菊地勘, et al., わが国の慢性透析療法の実況 (2021年12月31日現在). *日本透析医学会雑誌*. **55** (12) : 665-723 (2022)
- 3) Sugiyama T., Imai K., Ihana-Sugiyama N., Tanaka H., Yanagisawa-Sugita A., Sasako T., et al., Variation in process quality measures of diabetes care by region and institution in Japan during 2015-2016: An observational study of nationwide claims data., *Diabetes. Res. Clin. Pr.*, **155**: 107750 (2019)
- 4) Shikama M., Sonoda N., Morimoto A., Suga S., Tajima T., Kozawa J., et al., Association of crossing capillaries in the finger nailfold with diabetic

- retinopathy in type 2 diabetes mellitus., *J. Diabetes Investig.*, **12** (6) : 1007–14 (2021)
- 5) Shikama M., Sonoda N., Morimoto A., Suga S., Tajima T., Kozawa J., et al., Association of abdominal obesity with crossing capillaries in the finger nailfold in type 2 diabetes mellitus., *Diabetol. Int.*, **12** (3) : 260–7 (2021)
  - 6) Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., et al., Fiji: an open-source platform for biological-image analysis., *Nat. Methods.*, **9** (7) : 676–82 (2012)
  - 7) Uyar S., Balkarlı A., Erol M.K., Yeşil B., Tokuç A., Durmaz D., et al., Assessment of the Relationship between Diabetic Retinopathy and Nailfold Capillaries in Type 2 Diabetics with a Noninvasive Method: Nailfold Videocapillaroscopy., *J. Diabetes Res.*, **2016**: 1–7 (2016)
  - 8) Maldonado G., Chacko A., Lichtenberg R., Ionescu M., Rios C., Nailfold capillaroscopy in diabetes mellitus: a case of neo-angiogenesis after achieving normoglycemia., *Oxf. Med. Case Rep.*, **2022** (9) : omac088 (2022)
  - 9) Costa G., Shushanof M., Bouskela E., Bottino D., Oral L-Arginine (5 g/day) for 14 Days Improves Microcirculatory Function in Healthy Young Women and Healthy and Type 2 Diabetes Mellitus Elderly Women., *J. Vasc. Res.*, **59** (1) : 24–33 (2022)
  - 10) Abd EL-Khalik D.M., Hafez E.A., Hassan H.E., Mahmoud A.E., Ashour D.M., Morshedy N.A., Nail Folds Capillaries Abnormalities Associated With Type 2 Diabetes Mellitus Progression and Correlation With Diabetic Retinopathy., *Clin. Med. Insights Endocrinol. Diabetes.*, **15**: 117955142211228 (2022)
  - 11) Kuryliszyn-Moskal A., Zarzycki W., Dubicki A., Moskal D., Kosztyła-Hojna B., Hryniewicz A., Clinical usefulness of videocapillaroscopy and selected endothelial cell activation markers in people with Type 1 diabetes mellitus complicated by microangiopathy., *Adv. Med. Sci.*, **62** (2) : 368–73 (2017)
  - 12) Santos G.S.P., Prazeres P.H.D.M., Mintz A., Birbrair A., Role of pericytes in the retina., *Eye.*, **32** (3) : 483–6 (2018)
  - 13) Shirshin E.A., Gurfinkel Y.I., Matskeplishvili S.T., Sasonko M.L., Omelyanenko N.P., Yakimov B.P., et al., In vivo optical imaging of the viable epidermis around the nailfold capillaries for the assessment of heart failure severity in humans., *J. Biophotonics.*, **11** (9) : e201800066 (2018)

# 運動時の温熱性発汗量から血液の濃縮度を評価し、 水分摂取の緊急度をスマホに告知する装置の開発： 熱中症予防システムへの応用

信州大学 大橋 俊夫  
(共同研究者) 同 百瀬 英哉  
スキノス東御研究所 坂口 正雄  
信州大学 小林 正義  
東北医科薬科大学 河合 佳子

## **Heatstroke Risk Informing System Using Wearable Perspiration Ratemeter: Human Experiments to Decide The Timing Point for Informing Heatstroke and to Evaluate The Validity of Wearable Apparatus**

by

Toshio Ohhashi, Hideya Momose,  
Masayoshi Kobayashi  
*Shinshu University School of Medicine*  
Masao Sakaguchi  
*Toumi Institute of Skin Co. Ltd.*  
Yoshiko Kawai  
*Tohoku Medical and Pharmaceutical University*

### ABSTRACT

We constructed a wearable perspiration ratemeter to develop an informing system to users for the heatstroke risk. To decide the timing point for informing heatstroke risk, we conducted human experiments of 16 healthy subjects with the step up and down physical exercises. In addition, a wearable self-identification and -information

system of thirst response was developed with a smartphone. The blood and urine samples of the subjects was collected before and after the 30-min physical exercise. The concentrations of total protein (TP), albumin (Alb), and red blood cells (RBC) increased slightly with the exercise. In contrast, the concentrations of vasopressin in all subjects remarkably increased with exercise. Using the simultaneous recording of perspiration ratemeter, we decided that the timing point for informing heatstroke risk was to change from positive to negative on the second derivative of sweating curve. In almost subjects they identified their thirst response until several min after the informing for heatstroke risk. In conclusion, the wearable ratemeter and self-informing system of thirst response were suitable for informing system of heatstroke risk.

#### キーワード

小型ウェアブル発汗計, 枯渇感, 無線装置, 臨床実験, 熱中症

#### Keyword

wearable thermal perspiration ratemeter, thirst response, informing system for thirst response with wireless smartphone, clinical human experiment, heatstroke

#### 要旨

我々はこれまでに熱中症の危険を予知するためのウェアブル小型発汗計を開発してきた。今回の研究では、発汗によって生じる血液濃縮度を血液・尿検査と血液バゾプレシン濃度測定を用いて定量的に評価し、熱中症の危険を告知する時点の決定方法を開発し、その時点の正確度合いについて枯渇感を自己申告出来る装置を開発して検証した。その結果、温熱性発汗量、血液濃縮度、枯渇感、血中バゾプレシン濃度の変化から熱中症発症の危険度を推定出来る事を実証した。

#### 緒言・まえがき

我々は、スウェーデンで開発された高感度湿度センサーを用いて、手掌部の発汗量を高感度で連続的に、しかも簡便に測定できる局所発汗量連続記録装置を開発しました<sup>1,2,3,4,5)</sup>。その装置は医用機器として認定され、厚生労働省から保険適用の

許可を得て研究、臨床の現場で活用されています(図1)。

#### 1. 研究方法・実験方法

1A温熱性・運動性発汗を呈している時に感じる枯渇感を生体に装着したスマートホンのアイコンをタッチすると無線で我々が既に開発した小型・ウェアラブル発汗計(図2)の記録上に同時に表示出来る装置を開発する。

1Bヒト臨床研究を倫理委員会に申請して認可を受け(令和元年5月に信州大学医学部倫理委員会で承認済み)、開発した小型発汗計と枯渇感告知。

スマートホンをボランティアの頸部ならびに前腕部にそれぞれ装着して、踏み段昇降の運動負荷を30分行い発汗量、告知られた枯渇感を同時記録する。併せて、運動負荷前後で、体重測定、採血、採尿を行い、血液濃縮度、血液バゾプレシン濃度変化、尿量、尿浸透圧変化を測定する。

●基本情報

販売名	発汗計SKN-2000M		
類別	内臓検査用器具	一般的名称	多用途測定記録装置
薬機法承認番号	21600BZZ00433000	承認年月日	平成16年09月02日

●製品概要

本装置は、人体の皮膚表面に発汗量検出プローブを装着することにより発汗量を連続、簡便かつ定量的に測定できる装置。

●原理



図1



図2 小型ウェアラブル発汗計

1C 発汗量, 体重減少量, 枯渇感発生タイミング, 血中バゾプレシン濃度変化量, 尿量, 尿浸透圧変化の相関関係から血液濃縮度と熱中症発生の危険度を推定, 告知するする時点を決定する。

2. 装置開発結果・実験結果

2A 温熱性・運動性発汗を起こしている時に感じた枯渇感を告知するスマートホン装置を開発し

た(図3)。

この装置は、温熱・運動性発汗時に感じた枯渇感を感じた際、スマートホンに表示された「枯渇感+ (少し喉が乾いた.)」「枯渇感++ (かなり喉が乾いた.)」「枯渇感+++ (我慢できないほど喉が渴いた.)」のアイコンをタッチすると、そのタイミングが発汗曲線の上に記録されるように出来ている。測定データはMicrosoft Excelでも表示可能



図3 枯渇感告知計

な csv 形式として保存され、枯渇感を感じた時点に発汗量がどのように変化したかを記録・解析することができる様になっている。

#### 2B ヒト臨床実験測定結果

発汗量、体重減少量、枯渇感発生時点、血中バゾプレシン濃度変化、尿量、尿浸透圧変化の相関関係から血液濃縮と熱中症発生の危険度を検出するタイミングを決定するために16名のボランティアで実験を行った。図4Aのa, bはその実験結果の典型例である。aは40歳台の女性、bは40歳男性が踏み段昇降運動を30分間行った時の頸部発汗量、枯渇感の告知時点(+, ++, +++), 熱中症の危険告知時点(●)を示している。熱中症の危険告知時点は涸渇感の告知時点、血液バゾプレシン濃度上昇率、発汗曲線の増加率の相関関係から、発汗曲線の2次微分値が正から負に転じる時点(発汗曲線の傾きが鈍化し始めた時点)が妥当であると結論した。図4Bは熱中症の危険告知時点(横軸の0点)と被検者が枯渇感を感じた時点の12例のまとめたものである。4例の被検者は30分の運動でも枯渇感を感じなかった。図から判るように12例中9例では熱中症の危険告知時点(横軸の0点)あるいはその数分以内に枯渇感を訴えている。

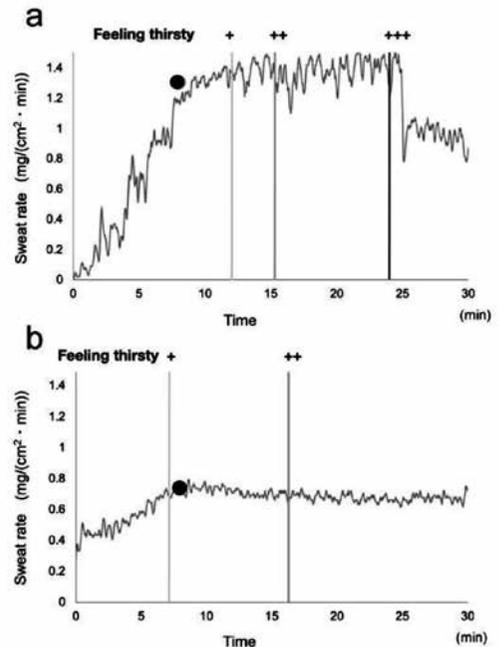


図4A a: 40歳女性, b: 40歳台男性の30分運動時の発汗曲線  
枯渇感告知時点(+, ++, +++),  
熱中症の危険告知時点(●)の典型例

### 3. 考察

すでに開発した小型ウェアブル発汗計はヒトの臨床実験でその性能を評価してみると使用しやすく有用である事が確認できた。手掌部発汗計に比べ測定性感度は落ちるものの、小型カプセルを測

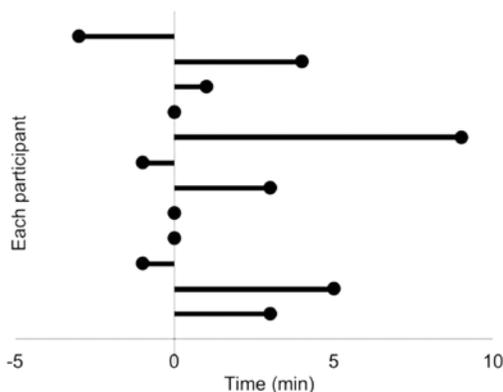


図4B 熱中症の危険告知時点(横軸0)と  
 枯渇告知時点(●)の12被検者の結果

定部位に両面テープで貼り付け、送信機をポケットなどに入れて使用すれば身体の動きなどに影響されことなく測定できる事を確認した。

今回開発した枯渇感知システムも小型ウェアラブル発汗計と併用することで利用価値が高まる事を確認した。

ヒト臨床実験で、熱中症の危険告知時点は発汗曲線の2次微分値が正から負に変わる時点が妥当である事が証明された。

#### 4. 結 語

この研究で、小型ウェアラブル発汗量測定計と今

回開発した枯渇感知システムを活用することで熱中症の危険を科学的根拠に基づいて告知する事が可能になった。

#### 謝 辞

ヒトの臨床実験に参加頂いたボランティアの方々に心より御礼申し上げます。さらに本研究を経済面でご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感謝致します。

#### 文 献

- 1) Ohhashi T., Sakaguchi M., Tsuda T., Human perspiration measurement., *Physiol. Meas.*, **19**: 449-461(1998)
- 2) Ohhashi T., Kawai Y., Sweat gland control., *Encyclopedia of neuroscience*, **19**: 3911-3914(2009)
- 3) 坂口正雄, 大橋俊夫, 東 健彦: 湿度センサーを用いた局所発汗量連続測定装置. 電子通信学会論文誌, **J68**: 511-512(1985)
- 4) 坂口正雄, 大橋俊夫, 森健治: 特許第 1662743号, 局所発汗量連続記録装置(1986)
- 5) 精神性発汗現象-測定法と臨床応用-, 大橋俊夫, 宇尾野公義編, ライフメディコム, 名古屋(1993)

# 妊娠中に競技復帰目的のトレーニングを行った選手の 体組成変化の記録

国立病院機構  
西別府病院  
(共同研究者) 同  
同

松田 貴雄  
清永 康平  
宮崎 奈美

## Documentation of Changes in Body Composition in Athletes Who Trained for Return to Competition During Pregnancy

by

Takao Matsuda, Kohei Kiyonaga,  
Nami Miyazaki  
*Institute of sport medicine,  
Nishibeppu National Hospital, National Hospital Organization*

### ABSTRACT

**Objective:** Although body weight is used for routine physical conditioning, it is desirable for athletes to be able to routinely measure total body water (TBW) content, which correlates with skeletal muscle mass. Body composition changes during pregnancy were documented in para-athletes who continued training during pregnancy in order to return to competition after childbirth.

**Methods:** Body composition was measured once a month during an outpatient visit and compared with the TBW calculated using a body water meter (BWM) developed to easily calculate TBW on the upper arm.

**Results:** TBW showed an increase until 20 weeks gestation, then decreased once, and increased in the third trimester. TBW on BWM was almost constant and showed similar changes to the changes in body water content in the upper arm.

Consideration: Because she continued to train throughout her pregnancy, her weight in the third trimester was considered to be almost constant, a pregnancy in which she was able to manage her weight properly. Weight gain in the first half of pregnancy showed an increase in intracellular water content, although an increase in fat mass was observed. A decrease in fat mass and an increase in TBW were observed in the third trimester. This was mainly an increase in extracellular body water content, which was thought to be an increase in amniotic fluid, and an increase in trunk water content.

#### キーワード

体水分量, 体組成, 生体インピーダンス法, 妊娠性変化, パラアスリート

#### Keyword

total body water, body composition, bioelectrical impedance analysis, fertility change, para-athlete

## 要 旨

目的：日常の体調管理に体重が用いられるが、アスリートの場合、骨格筋量と相関する体水分量が日常的に測定できることが望ましい。今回、産後の競技復帰を目指して妊娠中にトレーニングを継続したパラアスリートの妊娠中の体組成変化を記録した。

方法：前腕にて簡便に測定できるように開発した体水分量計を用いて体水分量を日常的に測定して、1か月に1回外来受診時に測定した体組成値と比較を行った。

結果：体水分量は妊娠20週まで増加を示し、その後、いったん低下して、妊娠28週から分娩前まで増加した。体水分量計での測定値は20週以降ほぼ一定の値を示し、上肢の体組成と同様の变化を示した。

考察：妊娠前半は体脂肪量と細胞内水分量の増加が見られた。妊娠後半はトレーニングを継続して行ったことで体重はほぼ一定であった。体脂肪量は減少し、細胞外水分量の増加が主で、羊水の増加を含むと考えられ、体幹の水分量の増加で

あった。

## 緒 言

女性の体調管理には基礎体温や血圧測定などがあるが、スポーツ選手では体重が簡便で安価にそして日常的に測定できる身体指標としてコンディショニング評価に欠かせないものとなっている。一般に成人では体重の増減は体脂肪量 (fat mass: FM) の増減と判断される。このため、体重を身長<sup>2</sup>で除した体格指数 (body mass index: BMI) は肥満の指標<sup>1)</sup>とされ、様々な判断やそれによって区分がなされ、生活習慣病などでは疾患リスクが計算されている。

スポーツを行うと一般と異なる変化が見られる。トレーニングによってFMの減少が見られるが、骨格筋量の増加もあり、BMIでは両者が相殺して変化を把握しにくい。老齢の場合、四肢の骨格筋の萎縮を表すサルコペニア指数 (四肢の骨格筋量を身長<sup>2</sup>で除したもの: skeletal muscle index: SMI) が用いられるようになってきている<sup>2)</sup>。しかしながら現時点では医療機関での専用機器による測定が必要で、体重のように簡便で安価

にそして日常的に変化を把握できる指標ではない。

トレーニングの効果を判定する場合、体組成を分画してFMとそれ以外の除脂肪体重 (lean body mass: LBM) に分けて判断すべきと考えられる<sup>3)</sup>。体組成分画のうち、LBMに含まれる構成要素は体水分量 (total body water: TBW) と蛋白、ミネラルに分けられ、恒常性維持のため、比率はほぼ一定とされ、成人ではTBWは73.8%とされる<sup>4)</sup>。水分を含まないFMに対して、水分を含むLBMの変化はトレーニングによって増減した骨格筋量の変化を表すと考えられ、近年、TBWを測定するために微弱電流を用いた生体インピーダンス法 (BIA)<sup>5)</sup> が利用されている。

本人が巨大児 (出生時体重約4200g) として生まれ、分娩時の肩甲難産による腕神経引き抜き損傷が原因で左上肢の麻痺による障害を有するパラアスリート (スキージョーロディック競技) に対して1か月に1回コンディション管理として体組成測定や血液検査などを行っていた。このアスリートが妊娠に至り、産後の競技復帰を目指して妊娠中もトレーニングを継続することとなり、妊娠中の体水分量変化を観察する機会を得た。

妊娠中は胎児や羊水を含む体幹の重量変化が推測されるが、妊娠経過を通じての体水分量変化、特に部位別に変化を観察された報告は一般妊婦においても無い。産後早期の競技復帰を見据え、妊娠中にトレーニングをおこなったアスリートでの報告もない。

今後の女性アスリートの妊娠中のトレーニング管理の指標とする目的に加え、一般妊婦の妊娠管理において体組成測定を導入する可能性について考察する。

## 1. 方法

身長は毎回自動身長測定器である肥満度計 BSM330E (Biospace 社製) にて測定し、付属する

体重計で測定を行った。体組成測定はボディコンポジションアナライザー InBody S10 (インボディージャパン社製) にて坐位にて行った。細胞内水分量、細胞外水分量、部位別水分量が測定される。BMIは体重 (kg) を、FMI (fat mass index) はFMを身長 (m) の2乗で除した。TBWからLBMが算出され、これを身長 (m) の2乗で除したものをLBMIとして計算した。SMIは四肢のLBMの合計を身長 (m) の2乗で除して計算した。

体水分量計の測定において、身長入力には前腕長を予測するために行い、cm単位の入力とした。体重入力は大まかな体型を把握する目的のもので、kg単位で入力し、原則2kg以下の変化は入力しないこととした。電極クリップの装着位置は非利き手の前腕、近位は上腕骨内側上顆から小頭にかけて、肘を屈曲した際に生じる最も深い、肘を横断する皺と、遠位は手首を屈曲させた際に橈骨及び尺骨茎状突起に間に生じる最も遠位の皺に電極の近位と遠位の端を合わせて装着することとした。測定結果は予測TBWが表示される。被測定者には周波数50kHzの電圧が印加され、手首と肘の間に高周波微弱電流が流れ、生体インピーダンスを算出して手首・肘間距離が身長に比例する<sup>6)</sup> ことを利用してTBWを算出する。上肢の障害のない健側 (右前腕) を用いて自宅で測定を行った。測定時間や頻度は設定せず、機会測定で測定を行った。1日に数回測定がある場合は平均値を記録した。トレーニングによる1日の体水分量減少が体重の2%の約2kgを越えないように体重コントロールをしてもらった。

この研究は国立病院機構西別府病院倫理委員会にて承認された (令和4年度第4-6号)。

## 2. 結果

### 2. 1 体水分量計機器作製

図1にDELTA-LINK社にて作製した体水分量計を示す。生体電気評価用ボードは皮膚、体イ



A 機器:電極の位置と外観

B 内部基盤

図1 体水分量計概要

インピーダンス測定用AD5941, メインプロセッサはArduinoマイコン Seeeduino XIAOを用いて, パソコンとの通信に用いるUSBシリアル変換する通信ポートを備えた. TBW計算式は(身長<sup>2</sup>÷インピーダンス平均値×片腕定数×0.205366512568154 + 体重×0.435943254380304 +

BMI×(-0.744115005120324) + 13.3921556773984とした.

## 2. 2 妊娠中の体組成変化

今回の妊娠中の体格・体組成変化を図2と図3に示す. 妊娠前の体重は60.2kgで体脂肪率

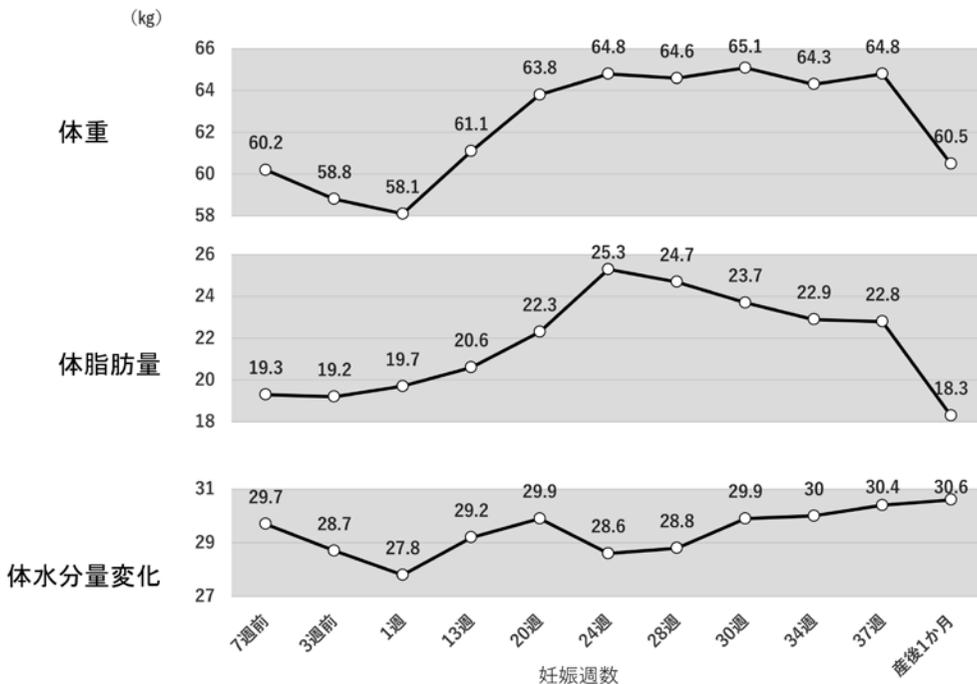


図2 体重・体脂肪量・体水分量変化

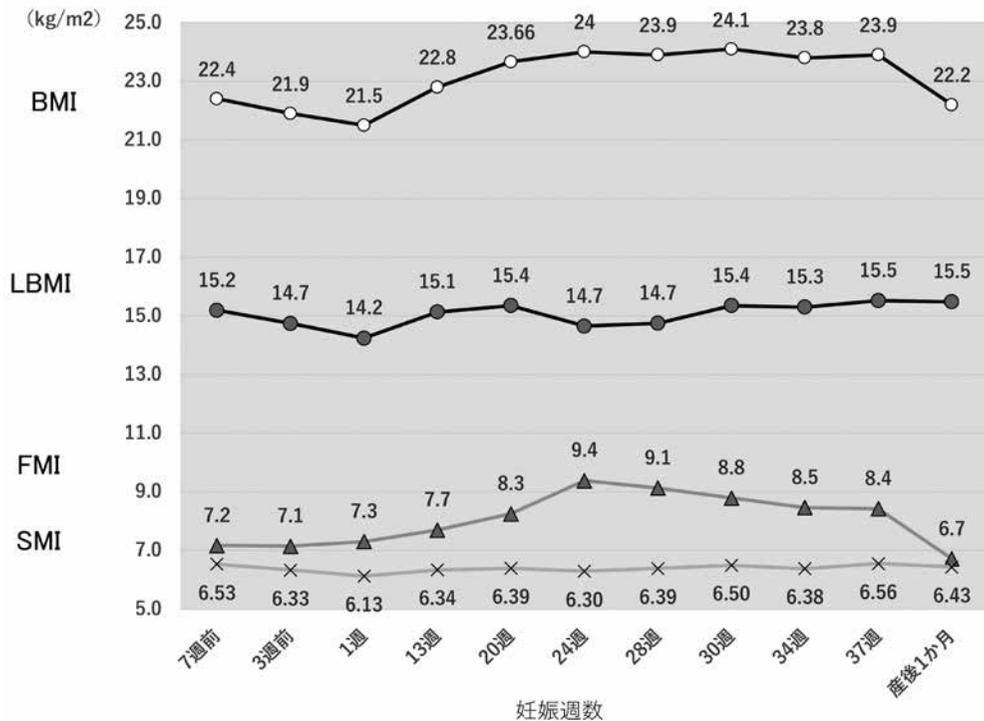


図3 体組成変化

32.1%, BMIは22.4kg/m<sup>2</sup>でほぼ適正体重で日本人の標準的な体型と考えられた。BMIを構成する成分のうち、FMを表すFMIは7.2kg/m<sup>2</sup>, FM以外のLBMIは16.2kg/m<sup>2</sup>で、四肢の骨格筋量を示すSMIは6.53kg/m<sup>2</sup>であった。

妊娠中の変化は、体重は妊娠24週まで徐々に増加したが、それ以降はほぼ安定で、分娩直前の37週では64.8kgで6.7kgの増加であった。FMは24週にかけて増加して5.6kgの増加であったが、それ以降は漸減していた。(図2)

BMIは24週まで増加し、FMIも24週まで増加を示したが、LBMIは20週まで増加したのち、24週ではいったん減少を示し、28週から再び増加をして、30週以降はほぼ安定していた。SMIは妊娠を通じて大きな変化は見られなかった。(図3)

図4に体水分の変化を示す。TBWは妊娠直前が27.8kgで妊娠20週に2.1kgの増加が見られた。

その後、いったん24週で28.6kgに減少したものの再度増加に転じ、分娩前の37週では1.8kg増加した。細胞内と細胞外水分量の変化はほぼ同様の変化を示し、妊娠20週では細胞内1.6kg, 細胞外0.5kgの増加を示したが、24週から28週にかけて細胞内の増加が停滞したのに対して細胞外ではわずかであるが、増加を示し、そのまま37週まで増加傾向が見られた。

部位別変化を図5に示す。妊娠20週まで体幹水分量が1.5kg増加し、2.2kgの増加の大半を占めていた。右下肢はほぼ変化なく、右上肢も増加は0.28kgとわずかであった。体幹はTBWと同様、28週までいったん減少をして、その後分娩まで増加して分娩直前の37週で1.0kgの増加であった。

### 2. 3 体水分量計の測定値

妊娠前を基準にした右上肢の体水分量変化の割合と体水分量計を用いて右前腕の測定から計算

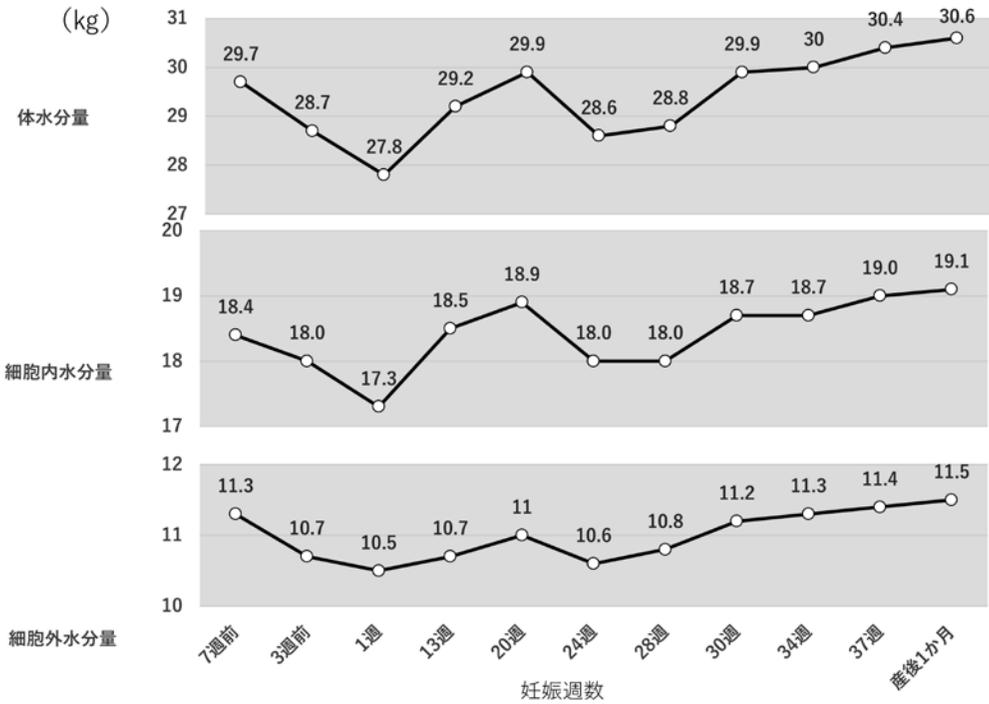


図4 体水分量変化

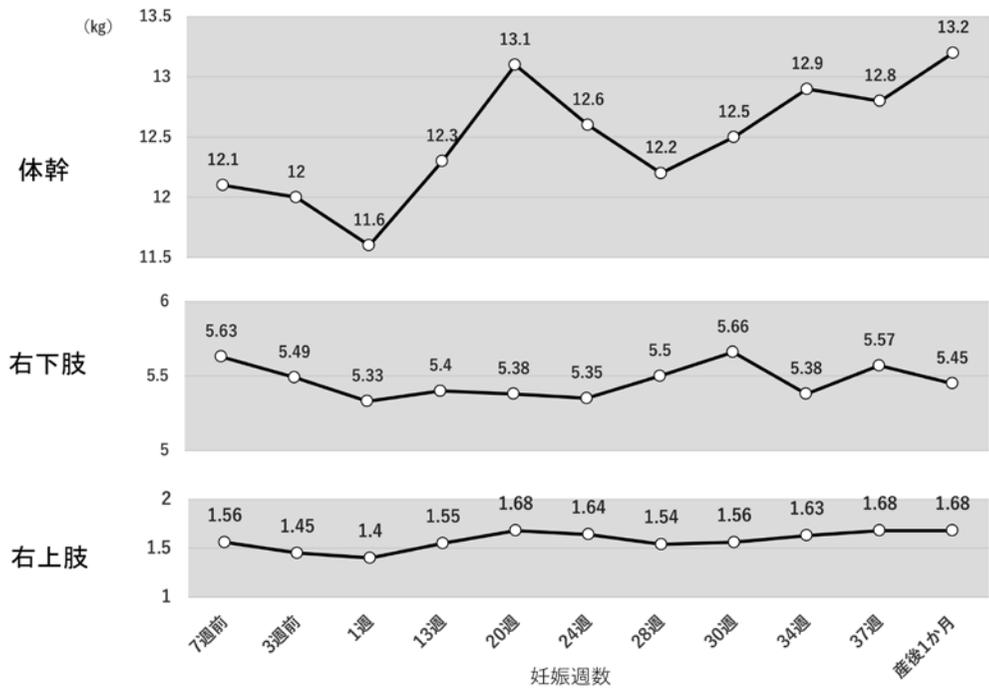


図5 部位別体水分量変化

されたTBW推定値の変化率の推移を図6に示す。  
妊娠24週で体組成計では17.1%の増加でその後

10%程度の増減が観察されたが、体水分量計では  
妊娠24週に15.5%増加となり、その後、変動幅5

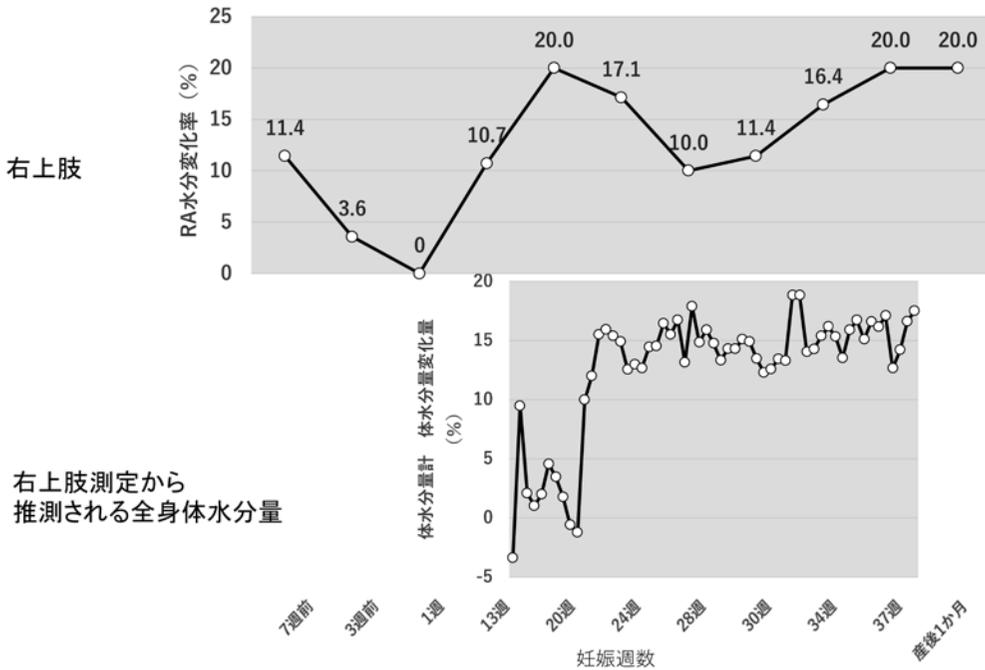


図6 体水分量変化率(%)

～6%で推移した。

### 3. 考察

#### 3.1 体水分量測定機器に関して

体組成測定はMRIなどを用いて画像的に診断されるものでFMの測定に関しても放射線を用いた二重X線吸収 (DEXA) 法がゴールドスタンダードである<sup>3)</sup>。放射線機器であるため、日常的な測定が困難でコンディション管理に用いることは困難である。近年、微弱電流を用いて生体インピーダンス法 (BIA) を用いてTBWを測定する機器が用いられるようになってきている。精密測定は複数の電極を四肢に装着して多周波の電流を用いる機器<sup>5)</sup>が必要で医療機関やフィットネスクラブでの利用で個人の日常測定は困難であるが、体脂肪率が測定できる体重計にBIA法を用いたものが販売され、体脂肪率からLBMが算出されるものがあり、日常のコンディション管理に用いられ始めている。しかしながら一般家庭用汎用機器もパ

ラアスリートや立位困難な寝たきりなどのケースで体重測定や足底間の通電が困難な場合には利用が制限される。このため今回、局所の体水分量の変化からTBWの変化を予測する機器を開発した。発汗などによる脱水は一般に細胞外液の変化としてとらえられる。細胞膜の抵抗を介さない低周波単一周波では主に細胞外液の変化をとらえる<sup>5)</sup>ことが可能で機器の低コスト化につながる。測定部位の選択についてはスポーツを行っている最中の測定を前提として衣服やシューズ、装具の着脱を最小限にできる部位として前腕を選択した。前腕は皮下脂肪の割合が少ないと考えられ、前腕骨の長さは身長に対して一定の割合が保たれ、人種や居住する緯度によってその割合が一定に近い。日本人における前腕長 (手首から肘の長さ) の身長に対する割合は12～13%とおおむね20～23cmである<sup>6)</sup>ため、電極間の距離は8cm以上が望ましいとされる<sup>5)</sup>ことから部位として適切と考えられた。

### 3. 2 妊娠中の体組成変化に関して

今回の測定対象者の妊娠経過及びトレーニング状況は、妊娠初期では悪阻はなく、摂食状態の問題はなく、ほぼ妊娠前と変わらぬトレーニングを行っている。妊娠中期は海外での代表合宿には参加を見合わせたものの、妊娠した本人に合わせたプログラムが日本スキー連盟にて作成され、それに基づく国内合宿には参加した。妊娠後期は派遣トレーナーが帯同してトレーニングを行った。腹圧がかからない工夫はされていたが、負荷の高い筋力トレーニングが行われている。摂取エネルギー量に関しては妊娠経過を通じて特に制限を行ってはいない。

妊娠管理に関しては1980年代までに様々な評価がなされて適正な体重変化についての知見は多い。妊娠糖尿病<sup>7)</sup>や妊娠高血圧症<sup>8)</sup>に対して肥満が悪影響を及ぼすとして妊娠中の体重管理がなされている。体組成に関しては妊娠初期から循環血液量の増加に伴い、血液希釈によって血色素、ヘマトクリットや総蛋白などの低下が見られる<sup>9)</sup>とされ、細胞外水分量が増加することが推定されてきたが、実際に体水分量に関して測定はなされていない。

今回のデータでは体重は妊娠24週までの増加を示し、非妊時から6.7kg増であった。うち5.6kgは体脂肪量の増加によるものであった。TBWは20週まで上昇し、その増加は2.1kgであった。妊娠を通じて循環血液量が増加して血液の希釈などが起こるとされているため、体水分量の増加は細胞外水分量の増加によるものと考えられていたが、細胞外水分量の増加は0.4kgであった。細胞内水分量が1.6kgで、荷重が増加する妊娠後期に向けて体格の充実をはかるため、骨格筋などの増量が考えられたが、体幹の体水分量の増加が大半を占め、下肢の体水分量などの増量ではなかった。24週以降の細胞外水分量の増加は胎児と胎盤、羊水などの付属物の増加と考えられ、妊娠37週

では体水分量の増加は24週から1.8kgであった。

今回、FMは24週まで増加を示したが、24週以降、増加は見られず、減少が見られた。通常、一般妊婦では増加が見られると考えられるが、これはトレーニングの運動を行ったことによる効果と考えられる。摂取エネルギーのコントロールを行わなくとも運動による代謝の向上で、体脂肪の増加は防げることが示唆された。

### 3. 3 体水分量計の妥当性に関して

今回開発した体水分量計では前腕の変化で全身を推定するため、妊娠中に大きく変化する体幹の変化はとらえていない。右上肢の体水分量変化と体水分量計から推測されるTBWの変化は妊娠20週から値の増加、その後の変化量の増減があまりない点は一致していた。体水分量計の測定は日常の測定が可能である点を考慮すると有用であると考えられた。

## 4. 主張・まとめ

今回、産後競技復帰の早期化を目的に妊娠中にトレーニングを継続したパラアスリートの妊娠管理を行った。妊娠中の体組成変化に関して知見が得られ、これまで体重管理しか行えなかった妊娠管理に新たな視点として、体組成測定による体水分量変化が有効であることが分かった。また食事を制限することなく、妊娠後半の体脂肪量の増加が抑えられたことから、一般の妊婦に対してもこれまで体重管理において食事制限しかなかった管理に運動による介入を取り入れられる可能性が提示されたと考える。また妊娠中にトレーニングを行うアスリートの管理においても体組成測定の重要性が認識され、今後、妊婦貧血などの血液性状の変化との関連や切迫流早産などとの関連に関しても検討を行っていく必要があると考えられた。

加えて、体水分量を日常的に測定可能な測定器を開発し、小型化し、携行性を向上させ、スポー

ツ現場など様々な場面で測定可能な機器とした。シューズや装具の着脱や着衣にほぼ影響されず、運動中でも簡易に測定できる、前腕での測定とした点が特徴で、今後、熱中症における体水分量の変化の把握などにも利用可能と推測される。これまで体組成測定機器は電極を増やして、多点間の測定を行うこと、また多周波を用いた測定を行うことでより正確な絶対値を表示するために高額となり、日常的な測定の用途に耐える価格のもではなかった。これまで体水分量測定が普及に至らない最大の原因はより正確な体脂肪率の算出のために各社で独自に統計補正がなされたことである。このため、計量検定を始めとした統一規格がないことで、体組成測定の普及を阻んでいたと考えられる。絶対値の算出には測定条件などの一定化が必要であったが、スポーツにおけるコンディショニングの用途においては前日との比較や気温などの測定条件の違いによる変化量を把握できることが重要となる。スポーツ現場では反復して測定することで変化率を見ていく用途には特に問題がないため、今後、より頻回の測定で変化を把握できる機器の提供で体水分量測定のさらなる普及が望まれる。

## 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深く感謝致します。また体水分量測定機器の構想着手から開発にあたり、旧シエルエレクトロニクス社森竹隆広氏、石井秀樹氏、橋本孝貴氏、機器改変にあたってDELTA-LINK社桑野修氏に多大な協力をいただき、感謝をいたします。

## 文 献

- 1) 新井俊彦. 肥満度, BMI および体脂肪率の各種疾患との相関による危険因子としての評価. 健康医学, 14(2) :168-173(1999)
- 2) 葛谷雅文. 9. 高齢者医療におけるサルコペニア・フレイルの重要性. 日本内科学会雑誌, 106(3) :557-561(2017)
- 3) 小宮秀一, 満園良一, 宇部一. Human Body Composition. 体力科学, 44(2) :211-223(1995)
- 4) 堤理恵, 大藤純, 福永佳容子, 他. 重症患者における体組成評価の有用性とその限界. 日本静脈経腸栄養学会雑誌, 31:803-806(2016)
- 5) Kyle UG., Bosaeus I., De Lorenzo AD., et al. Bioelectrical impedance analysis-part II: utilization in clinical practice., *Clinical nutrition*, 23(6) :1430-1453(2004)
- 6) 久保晃, 啓利英樹. 前腕長と下腿長を用いた高齢者の身長推定. 理学療法科学, 22(1) : 115-118(2007)
- 7) Wang C., Wei Y., Zhang X., et al. A randomized clinical trial of exercise during pregnancy to prevent gestational diabetes mellitus and improve pregnancy outcome in overweight and obese pregnant women., *American journal of obstetrics and gynecology*, 216(4) :340-351(2017)
- 8) Barakat R., Pelaez M., Cordero Y., et al. Exercise during pregnancy protects against hypertension and macrosomia: randomized clinical trial., *American journal of obstetrics and gynecology*, 214(5) :649.e1-8(2016)
- 9) 黒川浩美, 黒川通典, 伊藤美紀子. 妊婦の鉄摂取量と血中ヘモグロビン濃度における児の出生体重に及ぼす影響. 微量栄養素研究, 37:12-18(2020)

## 参考資料

特開 2021-029967「最終到達身長算出装置及び筋肉・内臓評価装置」<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/JP-2021-029967/0B3C410C0F9F6A233DFAD306C5273C0A70CA787D7E3A3BDF08C75643F9CC1F86/11/ja>



## 講 評

### 学 術 委 員

委員長(兼)	川 原 貴	一般社団法人大学スポーツ協会 副会長
委 員	井 上 真 理	神戸大学 大学院 人間発達環境学研究科 教授
委員(兼)	押 田 芳 治	名古屋大学 名誉教授
委 員	緒 方 徹	東京大学医学部附属病院 中央施設部門 リハビリテーション部 教授
委員(兼)	梶 原 莞 爾	信州大学 繊維学部 繊維学部コーディネータ
委 員	上 條 正 義	信州大学 繊維学部 教授
委 員	佐 藤 真 理 子	文化学園大学 服装学部 大学院生活環境学研究科 教授
委員(兼)	島 崎 恒 藏	日本女子大学 名誉教授
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	中部大学 応用生物学部 食品栄養科学科 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
委 員	田 畑 泉	立命館大学 スポーツ健康科学部 特任教員(教授)
委員(兼)	永 富 良 一	東北大学 大学院 医工学研究科 教授
委 員	西 村 太 良	京都工芸繊維大学 元教授
委 員	檜 垣 靖 樹	福岡大学スポーツ科学部 教授
委 員	平 田 耕 造	神戸女子大学 家政学部 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	鹿屋体育大学 特任教授
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  
福岡大学 スポーツ科学部 教授 檜垣靖樹

第45巻研究成果報告書に掲載された研究課題のうち、体力医学分野の4編の論文について講評する。いずれの研究課題もオリジナリティの高い着眼点と洗練された実験手法を巧みに組み合わせ、仮説に基づき多角的な視点より考察を行的確な結論を導いており、筆頭著者および共同研究者の方々に敬意を表したい。

「血流制限を併用したレジスタンス運動の効果：低負荷×長時間と高負荷×短時間の比較（沖田孝一氏）」では、レジスタンス運動に血流制限を併用すると、筋収縮に利用された高エネルギーリン酸が再合成されずに代謝産物が蓄積し、時間経過とともに代謝ストレスが漸増することから、血流制限という特殊な条件下においては、代謝ストレスが負荷強度依存ではなく総負荷量に依存するという仮説を立てた。強度別・負荷量別の条件を設定し、骨格筋内エネルギー代謝の評価にはMR装置を用い、クレアチニン酸およびpHの低下を筋内代謝ストレスと定義した。仮説通り、2つの筋内代謝ストレス指標は、強度依存ではなく総負荷量が同等となる運動終点で同レベルまで低下することが明らかとなり、血流制限下のレジスタンス運動においては、超低強度など一般的に使用される負荷強度ではなくても繰り返して実施し総負荷量を調整することで高強度トレーニングと同様な効果を得られる可能性が示唆された。現場での応用には専門スタッフ配置の必要性が考えられるものの、超低体力者への応用などに向けて、期待が持たれる研究である。

「トレーニングがもたらす骨格筋の腎保護作用（西裕志氏ほか）」では、近年注目されている慢性腎臓病の予防や治療に対する運動やトレーニングの有効性について動物モデルを用いて明らかにしようとした。高脂肪食マウスモデルを用い、運動はトレッドミルを用いた走行運動とし、週5日、1回1時間、8週間実施した。介入後、腎組織のRNAシーケンスを行い、高脂肪食によって発現が亢進、運動をすることで逆に減少する遺伝子群として、炎症反応やストレス反応に関連する遺伝子群を見出した。著者らはそのうちケモカインをコードするCxcl2に着目し、腎組織内の好中球浸潤を免疫組織学的に評価したが、仮説に反して高脂肪食や運動に伴う細胞浸潤の変化を認めなかった。筋と腎の連関については、irisin、FGF-21、myonectin、FABP2などの分子を介して直接的あるいは間接的に相互作用していることが明らかになりつつあり、次世代シーケンスを用いた網羅的な解析は運動がもたらす腎保護作用の分子メカニズムの一端を明らかにする強力な手法の一つであろう。残念ながら、本報告書には結果の一部の紹介にとどまり、その他のデータが示されていないため、今後の研究の進展に期待したい。

「膝前十字靭帯再建術後の筋力低下に対する新たな治療方法としてのCryotherapyの効果（吉井諒ほか）」では、術後に見られる関節因性筋抑制を防止する一つの手法として、Cryotherapyに着目した研究である。Cryotherapyとはアイスバックなどで患部を冷やしたうえで運動療法を行うこ

とをいう。関節因性筋抑制は発生早期の段階で軽減できないと上位中枢に作用し慢性化する可能性が指摘されていることから、Cryotherapy への期待は大きい。膝前十字靭帯再建術後早期の患者を対象に4週間にわたりリハビリテーション直前にCryotherapyを施行する群とリハビリテーション直後にアイシングを施したコントロール群を比較したところ、Cryotherapy 介入群において等尺性膝伸展力患健比が高い傾向を認め、Cryotherapyの有効性を示す結果となった。安全でかつ早期のスポーツ復帰を目指すアスリートにとって、リハビリテーション前にアイスバックなどで患部を冷やすという非常に簡単な介入により成果を検証できたことは朗報である。実験のアプローチ上、ダブルブラインドが不向きな介入のため、限界点はあるものの膝前十字靭帯再建術後患者のより安全なスポーツ復帰と再発防止に向けたあたらしいCryotherapy 手法の開発に期待が持たれる。

「運動時の温熱性発汗量から血液の濃縮度を評価し、水分摂取の緊急度をスマホに告知する装置の開発：熱中症予防システムへの応用（大橋俊夫ほか）」では、手掌部の発汗量を評価するために、高感度湿度センサーを用いた連続モニタリングシステム装置を開発し、発汗により生じる血液濃縮度および血中バソプレッシン濃度の定量評価を組

み合わせ、熱中症の危険度を評価した。さらに、その正確性について主観的な枯渇感もあわせて検討し、熱中症発症の危険度を推定できる装置開発を試みた。装置には、枯渇感を感じた際、スマホに表示されたアイコンをタッチするだけで、発汗曲線上に記録されるようになっており、データはcsv形式として保存され解析に供することが可能となっている。ビジュアル的にわかりやすい表示となっている。発汗量、体重減少量、枯渇感発生時点、血中バソプレッシン濃度変化、尿量、尿浸透圧変化の相関関係より血液濃縮と熱中症発症の危険度の検出タイミングを検討した結果、熱中症の危険度告知時点は枯渇感の告知時点、血液バソプレッシン濃度上昇率、発汗曲線の増加率の相関関係から、発汗曲線の2次微分値が正から負に転じる時点が妥当であるとの結論に至った。小型ウェアラブル発汗量測定計と枯渇感告知システムを活用することで、今後の熱中症の危険を科学的根拠、特に自身のデータに基づいて知らせることが可能となり、人にやさしい機器開発として今後の更なる進展に期待したい。

以上、4編の研究報告書の概要をまとめ、講評をさせていただいた。いずれの研究も今後のスポーツ科学研究の発展に寄与する貴重な報告である。

## 入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員  
東北大学 大学院 医工学研究科 教授 永 富 良 一

No.9中村洋平ら：「スポーツ脳震盪の診断と競技復帰に関わる唾液中のバイオマーカー探索研究」スポーツに関連する脳震盪は、競技復帰後に再受傷した場合に重篤な転帰をとるセカンドインパクト症候群や慢性外傷性脳症に至る可能性があり、その診断と競技復帰時期の診断や判断は重要である。しかし競技継続が可能かどうかに関わる診断はCTやMRIなどの画像診断を用いても容易ではない。現状では国際スポーツ脳震盪会議のコンセンサスとそれに基づくアセスメントツールによって判断が行われている。しかしこれらは医学生物学的なエビデンスに基づいているわけではないので、判断の信頼性を高めるためにも組織の微小損傷を反映し、リスクを客観的に評価できる試験が求められている。本研究は、スポーツ現場において受傷者からでも採取可能な唾液に着目し、学生アメリカンフットボール選手を対象に脳震盪発症前後に変化があるマイクロRNAを網羅的解析に通じた同定を試みた重要な研究である。唾液中のマイクロRNAはさまざまな要因で変動することが予測されるため今回受傷前後に有意に変動することが認められたSPRR1Aが脳組織の微小損傷を反映するか、またその回復をもって競技復帰可能の判断に用いるには今後のデータの集積を待たなくてはならない。また今回は受傷前、受傷後、回復後の分析可能検体中のマイクロRNAの平均値の比較を行った結果である。今後の研究において、受傷の有無にかかわらずコホートデザインで追跡を行い、受傷なしの選手のサンプルも対照と

して比較を行うことが現場のニーズに応えることにつながると考えられる。

No.10菊元孝則ら：「膝関節伸展位固定を用いた運動連鎖の遮断による慢性足関節不安定症の新たな評価手法の開発」

バスケットボールやサッカーなどのチームスポーツにおいて発生頻度が高い足関節内反捻挫を繰り返すと慢性足関節不安定症(CAI)に至ることがある。足関節内反捻挫によってもたらされる姿勢制御機能低下が捻挫の反復につながる悪循環をもたらす可能性があるため、リハビリテーションプログラムにおいて姿勢制御機能低下を補完するような介入ができれば悪循環を断ち切れる可能性がある。そのためにはさまざまな要素がある姿勢制御機構にどの要素に課題があるかを把握する必要がある。しかし姿勢評価の基本となるこれまでの立位姿勢の機能評価テストは総合的な評価にとどまり、どの要素に問題があるかどうかは明らかにできない。そこで菊元らはバスケットボールプレーヤーを対象に、重心動揺を評価するテストにおいて膝関節を伸展位で固定した場合の姿勢制御戦略の変化をCAIがあるプレーヤーとないプレーヤーで比較した。結果、CAI群では膝関節を固定すると両脚立位から片脚立位に移乗するときの足圧中心加速度が高くなることが明らかになり、股関節の寄与が大きいことがわかった。股関節要素が姿勢制御時に足関節の機能低下を補っている可能性が明らかになった。このことが再受傷

のリスクに繋がるかはさらなる検討が必要であるが、運動連鎖に寄与する要素を切り分けて評価できた価値は高い。足関節受傷前の状態から追跡し、受傷後の状態と比較する個人の追跡を行うコホートデザインを可能にするような運動器健診が実現するとより実用的な評価と対策を考案することが可能になる。

No. 14 国正陽子ら：「運動後の筋痛は筋損傷の指標となるか？—非侵襲的な筋損傷の測定手法の開発と応用—」

運動後に生じる主観的な筋痛は、運動にともなう筋損傷を反映する。損傷後に起こる筋再生は筋肥大や筋力増強に寄与すると考えられる。損傷が起こる筋線維は限定的であるため再生が起こっている間にも再度運動を行うことは可能であるが、損傷とその回復経過をより客観的な構造的な評価を行うことができればトレーニングの頻度やトレーニングのピリオダイゼーションをより効率的に計画することが可能になる。主観的な筋痛がなくなったことをもって回復したと判断されることがあるが、血中バイオマーカーやMRI T2緩和時間よりも早く回復すること、また再生現象の組織・細胞学的な検討からは筋再生はMRIや血中バイオマーカーの回復よりさらに長い時間がかかる可能性が指摘されている。国正らは、実用性を考慮し侵襲的な筋バイオプシーではなく、MRIの信号処理法の一つである微小構造の変化を捉えるのに適した拡散テンソル画像法に着目し、20km走を行ったランナーのレース前後と終了後の経過を主観的な筋痛、MRI T2緩和時間、拡散テンソル画像から得られる拡散パラメータの経時的変化を比較した。その結果、筋痛・T2緩和時間はレース1~2日後にピークとなりその後3~4日で回復したものの拡散パラメータはむしろ3~4日後まで増加し、パラメータの回復にはさらに長い時間がかかることを明らかにした。実際のレース条件での評価の

ため、筋損傷の程度が個人によって異なるものの、拡散パラメータの方が組織の損傷からの構造的な回復過程を把握するためには適していることを明らかにした。今後、さらに筋痛をともなうような運動後の経過観察事例を重ねることによってより実用的にMRIの拡散パラメータが利用されるようになることが期待される。

No.16 富賀裕貴ら：「過去の運動習慣が将来のうつ・不安を予防するメカニズムの解明」

身体活動や運動習慣がさまざまな疾病リスクを減じることが疫学研究から明らかになっている。肥満・耐糖能異常（インスリン抵抗性）など代謝に関連する疾患のリスク軽減にはエネルギーバランスの適正化が関与することが理解しやすいが、抑うつや認知症に対する運動のリスク軽減はエネルギーバランスで説明することは困難である。運動にともない骨格筋から分泌されるマイオカインが海馬などの辺縁系に作用することより、これらの疾患のリスク軽減につながるという仮説は魅力的であるが、長期的な効果を説明するには不十分である。近年遺伝子を改変することなく、遺伝子へのアクセス制御により長期的な適応をもたらす機構の一つとしてエピジェネティクスが注目されている。実際、自発運動を行っている妊娠マウスでは胎児には運動にともなう胎盤を通じてエピジェネティックな調節が作用しうまれてきた児の肝臓における糖代謝が改善することが明らかになっている。富賀らは自発走行運動が自由にできる環境におかれたマウスとそうでないマウスにおいて運動を行っているマウスの不安行動が少なくなること、運動を停止すると不安行動が高くなることに着目して、運動にともなう不安行動の変化に海馬の神経細胞の増殖に関与するBDNF遺伝子にエピジェネティック調節が関与している可能性を検討した。運動による不安軽減効果は行動学的に確認できたものの海馬におけるBDNFの転写レ

ベルに変化はなく、残念ながら少なくとも不安軽減効果にエピジェネティックな調節には関与していないことが明らかになった。本研究では仮説検証に至らなかったものの、今後運動効果のメカニズム、特に長期に定着するような運動や身体活動の効果に関しては、エピジェネティックな調節系が関与する可能性は高く、今後もさまざまな運動モデルとさまざまなアウトカムとの関連への挑戦が行われることを期待する。

No. 17 奥平 証道ら：「発育期の子どもにおける運動制御の正確性と運動単位活動との関連」

発育期の子どもの運動制御は正確性が劣っており、成長にともなって正確性が高くなることが知られている。奥平らは近年着目されている高密度

筋電図解析により、非侵襲的に運動単位の特性解析ができるようになったことを用いて、6才から12才の子どもたちと大人を対象に大腿四頭筋の発揮筋力漸増タスク中の運動単位の解析を行った。その結果、子どもでは幅広い動員閾値の運動単位いずれも動員初期より発火頻度が大人より高い一方、大人では動員閾値の高いMUは発揮筋力が大きくなってから発火頻度が高まることが確認された。このことが力の微妙な調節加減が大人の方が優れていることの裏付けになっている可能性が示唆された。器用さやトレーニングによる変化を明らかにできる可能性があり、今後の発展が楽しみな研究である。運動制御の正確性の発育段階における違いを明らかにしようとする優れた研究である。

## 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 特任教員 (教授) 田 畑 泉

ここでは『デサントスポーツ科学』第45巻の5件の成果報告書について講評する。

安藤創一らは、“骨格筋への電気刺激はどこまで運動の代替となるか？—応用可能性の検証—”で、骨格筋への電気刺激 (EMS) と抵抗性トレーニングが血管内皮機能に与える影響についてコントロール群との比較している。先行研究と同様に、週3日のEMSによる大腿四頭筋断面積や脚伸展トルクというような筋自体への効果は、抵抗性トレーニングと同様であった。先行研究により高強度の抵抗性トレーニングは、血管の内皮機能を低下させることが報告されているが、興味深いことに本研究では、血流依存性血管拡張反応 (Flow-mediated dilation: FMD) として測定された血管内皮機能がEMSで向上することが報告された。この結果は、脳血管疾患のリスクである血管内皮機能低下無くして、筋量を増加させるという方法論としてEMSが効果的であることを示した新規性のある研究と評価される。

高橋英俊と島崎健一郎は“6軸触覚センサ搭載インソールを用いた走行時の足裏反力測定”において、母指球、小指球、かかとの3つの部位に、MEMS6軸センサを配置したインソールを搭載したシューズを用いて、鉛直・前後・左右方向のせん断弾力及びモーメントを測定し、歩行、ジョギング、スプリントなどの動作を比較検討することにより、特徴量を抽出し、スプリントパフォーマンスを向上させることを目的とした研究を行った。研究結果より、歩行・ジョギングでは前足

部の反力に対して、かかとの反力が大きく、逆に、全力疾走では、かかとの反力は小さくなっていることが明らかとなった。これらの結果は、従来のフォースプレートを用いた研究結果と同様であった。したがって、本研究で対象としたMEMS6軸センサを搭載したインソールを用い母指球と小指球のセンサ出力の差から脚の軌道を推測し、フォースプレートに比べて、場所に依らずに容易にスプリント走の理想的なフォーム改善が可能となる可能性が示された。

佐々木陸らは“運動イメージが感覚運動統合能力に及ぼす影響の検討 - 効果的なイメージトレーニングの開発を目指して”イメージトレーニングが、感覚運動統合を評価する手法として用いられている短潜時求心性抑制 (short-latency afferent inhibition: SAI) に与える影響を明らかにすることを目的として研究を行った。その結果、35秒間のピンチ (つまみ) 動作の画像を見る運動イメージ条件と、コントロール条件 (モニターで (+) の画像を見る) の前後において、単発経頭蓋磁気刺激のより誘発される第一背側骨幹筋の筋電図で観察される運動誘発電位に対するSAI刺激 (条件刺激 (正中神経電気刺激) と単発経頭蓋磁気刺激の両方) の減衰量 (%) をSAIとして測定した。その結果、コントロール条件及び運動イメージ条件のMEPは、ベースラインのMEPより有意に小さいことが示されたが、その減衰の程度は、コントロール群と運動イメージ群とで差は無く、少なくとも本研究のセッティングにおいては、運動

イメージはSAIで評価される感覚運動統合機能に影響を与えないことを示している。このような運動イメージトレーニングに関する神経生理学的な基礎研究が少ない中、本研究で明らかになった知見は、運動イメージの神経生理学的効果に対する理解を進めるものであり、より効果的な運動イメージトレーニングの開発の一助となるものと評価される。

柳岡拓磨は“異なるハーフタイム戦略がサッカー選手の反復性スプリントパフォーマンスに与える影響”として、サッカー等のハーフタイムを模擬した15分間の活動が、その後の反復性スプリントパフォーマンス(6秒間スプリントと24秒間の安静を6回繰り返す)に与える影響を明らかにすることにより有効なハーフタイム戦略を明らかにすることを目的として研究を行った。その結果、15分後の1回目のスプリントパフォーマンス(6秒間のスプリント走の平均速度)は、ACT条件(12.5分後に1.5分間の運動(リウオーミングアップ)を行う)とCOMB条件(保温性のあるサバイバルジャケットを着用(5分から12.5分)した後、1.5分間、再度、ウオーミングアップを行った)

の方がコントロール群(安静のみ)よりも高いことが明らかとなった。これらの結果は、従来、研究の少ない前後半で行う球技におけるハーフタイムにおける効果的な戦略を明らかにするための基礎研究として貴重な研究であると評価できる。

三好建吾らは“2型糖尿病患者・肥満患者における病態と爪郭毛細血管の定量評価の関連”として、爪郭毛細血管(手指先端の爪の甘皮の中核側にある爪郭部の皮下に水平に並んだヘアピンループ状の毛細血管)の形態と糖尿病の臨床所見との関係を明らかにすることを目的に研究を行った。その結果、23名の糖尿病入院患者の爪郭毛細血管の血管経とヘモグロビンA1cとの間に、有意な相関関係があること( $R^2=0.21$ ,  $p=0.027$ )、肥満度(BMI)と血管内外の色のコントラストと有意な相関関係( $R^2=0.19$ ,  $p=0.035$ )があることが報告された。これらの研究結果は、体外から特殊な機器・薬剤を用いずに爪郭毛細血管顕微鏡で比較的簡単に計測される唯一の血管である爪郭毛細血管の形態の計測が糖尿病の病態モニタリングに有用であることを示した貴重なものと評価される。

## 入選研究者成果報告書講評

学術委員  
京都工芸繊維大学 元教授 西村 太良

第45回研究成果報告書の被服・工学関係の掲載論文は6件である。衣服の装着シミュレーション関連2件、衣服内関連の2件、衣料装着下での運動解析が1件、クールダウン関連1件であった。

シミュレーション関連の1件目は衣服圧に関するもので、山下義裕氏(福井大学 繊維・マテリアル研究センター)らによる、「全方位二軸変形試験法から導かれたひずみエネルギー密度関数を用いた衣服圧のCAEシミュレーション」である。

本論文は紡績糸の力学的特性を均質なモノフィラメントの等価モデルで置き換え、織物及び編物の構造をCAEでモデル化した変形挙動と実験結果と対比している。

平織物については二軸延伸挙動をCAEソフトのAbaqusを用いてシミュレーションは、応力ひずみ曲線の初期の線形変形、その後の凸の変形の実験結果をほぼできていると述べている。

編物については着衣時の変形に一番近いと判断したcourse方向への二軸変形からひずみエネルギー密度関数をMooney-Rivlinの近似式にあてはめ、応力ひずみ関数を推測し、二軸延伸挙動と汎用のマネキン、および、シャツのCADデータをもとにCADによる衣服圧シミュレーションを行っている。双方ともこれらのシミュレーションが有用であったと結論付けている。

ただ、本文でも述べているように、衣類は殆ど紡績糸が使用されていることから、その摩擦係数の測定に問題が残ることと、編物Tシャツの衣服圧の結果は、実測とシミュレーションの誤差は

衣服圧が小さいこともあって、実測と解析が誤差は無視できると述べているが、その誤差は着心地に影響していないかの検証が必要と考える。

本文類の2件目は衣料の質感に関する研究で、金貝屋氏(信州大学)らによる、「3D 装着シミュレーションにおけるスポーツ衣料の質感の評価基準」である。

スポーツ衣料の質感は、運動のし易さ、対戦競技については相手に与える影響にも関与し、シミュレーションできれば、スポーツ衣料の設計に大きく寄与するものと考ええる。

本論文では、衣料の3D装着シミュレーション画像と実物画像の質感の類似性と相違性および印象に関する比較実験を行っている。シミュレーションに関して、生地テクスチャーデータを得るために、テクスチャーデータ作成システムxTexを用いている。3D衣服モデルはアパレル装着シミュレーションソフトCLOで作成している。又、画像評価時の視線追跡も行っている。これらから、シミュレーション画像と実物画像について、生地風合いとテクスチャーの印象、衣服全体の印象、類似度評価、及び、評価時の視線滞留時間を比較して、当シミュレーションの妥当性を検討している。それぞれの項目について、シミュレーション画像で代替できるものでできないものを明らかにしている。さらにシミュレーションの精度を上げる必要、さらには、実物とシミュレーション画像との対比実験の必要性にも言及しており、今後の進展に期待する。

衣服内関連研究の1件目は、水谷千代美（大妻女子大学）らによる、「発汗による機能性スポーツインナーのパフォーマンスへの影響」である。

近年冬季スポーツ用インナーに様々な吸湿発熱繊維が利用されている。本研究は、代表的な吸湿発熱合成繊維を混紡した試料布3種類と綿の布の4種類の試料布の吸湿発熱特性を測定するとともに、それぞれの試料布を用いたインナーウェアを作成し、サーマルマネキンおよび被験者による着用実験を行っている。

4種類の試料布について、目付、厚さ、および水分率を測定するとともに、吸湿発熱特性については、JISに基づいたチャンバー中で測定した吸湿発熱温度曲線をもとに、最大吸熱発熱温度、熱保持指数および半減期を算出し、結果を用いて着用実験の解析を行っている。

サーマルマネキンの着用実験については、発汗しないため4種の試料間の熱抵抗値の差は認められていない。健康成人についての測定では、3種の吸湿発熱繊維布では、皮膚から出る水分である不感蒸泄と発汗などから得る布の水分率に比例して、良いパフォーマンスを示すこと、また、綿布については、水分率は大きいものの、発熱繊維ではないため衣服内温度は最も低いという結果を得ている。

吸湿発熱繊維の有用性を定量的に明らかにしていることは評価できる。さらに天然の吸湿発熱繊維の羊毛との比較も含めた、吸湿発熱繊維の開発に向けた提案を期待したい。

本文類の2件目は、佐藤真理子氏（文化学園大学）らによる、「衣服と皮膚の接触に伴う皮膚振動に関する基礎研究」である。

本研究は衣服の着心地の構成要素の中の肌触りや擦れなどに関連し、衣服と肌が接触した場合に生じる皮膚上の振動を計測し、着心地に関連する衣服設計に結びつけようとするものである。そのためにも、身体のいかなる部位で衣服との接触

が生じているかを、上肢運動時の体幹部を対象に検討している。次に、この実験をもとに皮膚振動は皮膚が対象物と接触することで発現することから、着用評価に適した皮膚振動測定位置を設定して、綿TシャツとポリエステルTシャツで振動強度の違いが明確に出る位置を特定した。次にその位置で4種類の異なった衣料を着用し、皮膚振動を測定し、衣料による着用感の違いを検討し、衣服のサイズやゆとり、生地の高さや特性等、総合的な要因が、接触時の皮膚振動特性に影響する可能性を示している。今後研究を進展させ具体的な衣料設計に利用できる提案を期待したい。

衣料装着下での運動解析では、工藤慎太郎氏（森ノ宮医療大学）らによる、「Foot wear 装着下での足部運動解析手法の確立」である。

本研究は距舟関節の障害発生機序の解明の手段の提案である。運動時の足の関節の動きを観測するのは通常反射マーカーを添付する方法や、靴を履いたままでは、x線による方法などが用いられている。ここでは靴を履いたままで測定可能な伸縮性ひずみセンサーを用いて足部のアーチに加わるストレインをアーチストレインとして測定する方法を提案している。この場合には貼付位置の影響が大きく影響する。そのため、まずx線による方法と比較しながら、貼付位置および貼付方法を検討し決定し、その上で、座位および立位でのアーチストレインの測定、さらに裸足および靴を履いた状態でもランニング中での測定も行い、伸縮性ひずみセンサーを用いた方法の有効性を検討している。ここでは一応の結果は得ているが、記述にもあるように、走行中の挙動に対する対応が不十分など、さらなる実験の積み重ねが実用に向っては必要であるように思える。

クールダウン関連は、小崎恵生氏（筑波大学）らによる、「野球投手の血行障害予防に向けたクールダウン手法の開発」である。

本論文はピッチング前後の主観的疲労、肩関節

外旋・内旋筋力、および、上腕血行動態を評価してクールダウン手法の開発を検討したものである。測定項目として、血管内皮機能、上腕血行動態、血圧および心拍数、主観的疲労感、および、肩関節筋力を、氷水を入れた布製の氷嚢でのアイシングと、アイシングなしでの双方について1日後、2日後で測定している。血管内皮機能の指標である、**Reactive Hyperemia index** を用いて評価した結果、時間の主効果は確認されなかった一方で条件の主効果が確認されたことから、アイシングが血管内皮機能には影響を及ぼしていると言及している。ただ論文中でも述べられているように

血行障害の予防の上での有用性を示すには、さらなる追加実験が必要と考えられ、その結果が待たれる。

ここでは、衣服関連の4件の論文があった。糸を平面上に織編した布は引っ張りには強く、変形は自由自在で通気性があるなど特殊な材料である。そのため、衣類など物を包むことなどへの利用に対しての設計は、経験によるところが多い材料である。しかしその困難さを解決していけば大いに有用な材料であることは間違いない。今後ともその方向の研究が進むことを期待したい。

## 入選研究者成果報告書講評

学術委員  
 パラスポーツ学会 理事長  
 日本福祉大学 客員教授  
 ちゅうざん病院 理事長・院長 田島文博

一般女性において、妊娠中と出産後の運動についての是非が1950年代まで議論があった。その当時の社会通念では、妊娠中は安静に努めるべきだとされていた。しかし、今日では、妊娠中の女性のスポーツや運動への参加、特にハイレベルなスポーツやフィットネスプログラムへの参加が当然となっている<sup>1)</sup>。

1985年、米国産科婦人科学会(ACOG)は、妊娠中の運動についてガイドラインを発表し、有酸素運動が推奨されるようになった。1992年に米国に留学した際、妊娠した日本人女性から、「主治医から運動を強く勧められたが、本当に良いのか」と相談を受けた事がある。その時点で、米国では母体と胎児健康維持増進のため積極的な有酸素運動のみならず、筋力強化も推奨されていた。妊婦と胎児が有酸素運動にどのように反応するかについて、a) 運動に対する母親の反応、b) 母親の運動に対する胎児の反応、c) 動物研究モデル、d) 妊娠と身体的調整などについて様々な研究がなされ、妊娠中の運動遂行に対して否定的な見解は見当たらなかった<sup>2)</sup>。

疫学的な研究の例をあげる。7,305件の単胎出産のデータに貢献した6,921人の白人妊婦を対象として、出身地などを加味した上で、妊娠26～28週目に、非活動的/やや活動的/中程度に活動的/活動的)、に分類し、体組成と血液生化学的検査が実施された。その結果、より活動的な被験者は脂肪が少ない傾向があり、空腹時および負荷後の血糖値が低く、トリグリセリド濃度が低く、

その子供の脂肪が少ないことが明らかになった。つまり、妊娠中期に行われた身体活動は、在胎期間や出生体重に影響を与えることなく、母体の心臓代謝の健康と新生児の肥満に有益な関連性が示唆された<sup>3)</sup>。

妊娠中に起こる多くの生理学的、代謝的、内分泌的变化は安静時であっても明らかに生じる一方、運動中に見られるそれらの変化はそれぞれの妊婦で異なる可能性がある。しかし、運動によって引き起こされる心肺応答は、妊娠中であっても基本的に非妊娠時と変わらないか、少し過剰な反応を示す<sup>4)</sup>。例をあげれば、自転車エルゴメーターエクササイズ時のエネルギーコストは妊娠中も変化しない。ただし、特に妊娠後期に明らかな体重増加により、ウォーキング、登山、ジョギング中の運動量は増加する。有酸素運動能力は妊娠中も変化せず、妊娠後期には脂質の供給が過剰になるにもかかわらず、妊婦の運動中に低血糖が起こりやすくなる。母親の運動が胎児に及ぼす影響は、胎児の心拍リズムと呼吸パターンの変化に明らかで、子宮胎盤機能不全のある妊娠中の患者は、運動中にこのような胎児の変化が起こる可能性が高くなる。特に体温に関しては注意が必要で、妊娠中の運動は重度の高体温にならないようにすべきである。動物研究では、激しい運動中に見られる子宮血流の減少が生じ、胎児は母親の運動によって影響を受けることが示唆されている。健康で栄養状態の良い母親が妊娠中に軽度から中程度の運動を行えば、出生体重は影響を受けないが、激し

い運動プログラムを行うと、胎児の発育や産子の数に変化が生じる可能性がある。

妊娠中の有酸素トレーニングやレジスタンストレーニングは母親と子供に与える影響について様々な研究が行われている<sup>5)</sup>。母親の心肺機能の強化と尿失禁の予防に対しては、有酸素運動と筋力強化運動の組み合わせが有益である。

エリートスポーツに参加する女性の数は増加しており、東京オリンピックに出場した女性の数は過去最高となっている。重要なのは、パフォーマンスのピークと生殖能力の年齢が一致する可能性が非常に高いということである。そのため、トレーニング中や試合中に妊娠が起こることは避けられない。妊娠中の定期的な運動を促進することには、高血圧障害、妊娠糖尿病の軽減、産後うつ病の発生率の低下などの利点があるというかなりの証拠がある一方で、エリートアスリートを対象とした研究はほとんど行われていない。実際、高強度の運動は、妊娠関連の合併症の中でも特に、流産や早産の発生率の増加につながる可能性があるとの懸念がある。エリートアスリートの産前、産中、産後の結果に関しては、一般に妊娠中のアスリートがトレーニングを継続できることがほぼ実証されている<sup>6)</sup>。

しかし、障害をもったパラアスリートが妊娠した際に、どのような身体的変化があるのか、運動を継続することが影響するのかどうか等について詳細に検討された事はほとんど無かった。本研究は、妊娠パラアスリートの身体的変化について、特に体組成について詳細に観察した内容である。そもそも競技人口が少ないパラアスリートを対象にこのような研究が行われ得たという機会はきわ

めて少ないと考えられる。1例報告なため、内容については、論文をみていただいた方が良いと考えここでは触れない。非常に貴重なデータであり、研究に協力した被験者と、この様に長期にわたり研究を遂行した研究者に対して敬意を表する。

## 文 献

- 1) Kehler A.K., Heinrich K.M., (A selective review of prenatal exercise guidelines since the 1950s until present: Written for women, health care professionals, and female athletes., *Women Birth.*, Dec;28(4) :e93-8. (2015)
- 2) McMurray R.G., Mottola M.F., Wolfe L.A., Artal R., Millar L., Pivarnik J.M., Recent advances in understanding maternal and fetal responses to exercise., *Med. Sci. Sports Exerc.*, Dec;25(12) :1305-21(1993)
- 3) Collings P.J., Farrar D., Gibson J., West J., Barber S.E., Wright J., Associations of Pregnancy Physical Activity with Maternal Cardiometabolic Health, Neonatal Delivery Outcomes and Body Composition in a Biethnic Cohort of 7305 Mother-Child Pairs: The Born in Bradford Study., *Sports Med.*, Mar;50(3) :615-628(2020)
- 4) Gorski J., Exercise during pregnancy: maternal and fetal responses. A brief review., *Med. Sci. Sports Exerc.*, Aug;17(4) :407-16(1985)
- 5) Perales M., Santos-Lozano A., Ruiz J.R., Lucia A., Barakat R., Benefits of aerobic or resistance training during pregnancy on maternal health and perinatal outcomes: A systematic review., *Early. Hum. Dev.*, Mar;94:43-8(2016)
- 6) L'Heveder A., Chan M., Mitra A., Kasaven L., Saso S., Prior T., Pollock N., Dooley M., Joash K., Jones B.P., Sports Obstetrics: Implications of Pregnancy in Elite Sportswomen, a Narrative Review., *J. Clin. Med.*, Aug 25;11 (17) :4977(2022)

## 事業内容

わが国の体育・スポーツに関する学術研究の振興と健全なスポーツ活動の発展に資するため、次の事業を行う。

### I. 健康の増進と体力の向上およびスポーツ科学に関する調査・研究に対する援助

#### (1) 研究委託：

財団において研究課題を定め、適当と思われる関係機関等に対し研究を委託する。

#### (2) 研究助成：

体育学，健康科学，人間工学，被服科学，運動施設工学等健康の増進と体力の向上に関する学術，およびその他スポーツ振興に寄与する学術研究に関する講座をもった大学，およびこれらの分野において教育，または研究・調査活動を積極的に行っている個人，またはグループより広く課題をつのり，その調査・研究の飛躍的発展・充実が期待されるものに対し助成金を交付する。

### II. わが国スポーツの振興・発展と充実に寄与する団体に資金援助を行い，トップレベルの選手育成・強化，競技力の向上を図る。

### III. スポーツの施設，用具，衣服に関する学術的資料および関連文献の収集・保存・公開を行う。

## 理 事・監 事

理 事 長	石 本 和 之	
常務理事	川 原 貴	一般社団法人大学スポーツ協会 副会長
理 事	押 田 芳 治	名古屋大学 名誉教授
理 事	梶 原 莞 爾	信州大学 繊維学部 繊維学部コーディネータ
理 事	島 崎 恒 藏	日本女子大学 名誉教授
理 事	杉 浦 剛	デサントアパレル株式会社 代表取締役社長
監 事	篠 原 祥 哲	篠原祥哲公認会計士事務所 公認会計士
監 事	高 木 茂 太 市	檜垣・鎌倉・寺廣法律事務所 弁護士

## 評 議 員

評 議 員	小 関 秀 一	株式会社デサント 代表取締役社長
評 議 員	下 村 吉 治	中部大学 応用生物学部 食品栄養科学科 教授
評 議 員	永 富 良 一	東北大学 大学院 医工学研究科 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	デサントジャパン株式会社 執行役員 スタッフユニット長

特別顧問

特別顧問 猪 谷 千 春

国際オリンピック委員会 名誉委員

特別顧問 山 下 泰 裕

公益財団法人日本オリンピック委員会 会長

## 訃 報

### 檜 垣 誠 次 氏 逝 去

令和5年4月26日 当財団監事 檜垣誠次氏（檜垣・鎌倉・寺廣法律事務所 弁護士）が逝去されました。

檜垣氏は令和元年6月より令和5年4月まで監事をつとめられました。

謹んで哀悼の意を表します。

### 馬 詰 良 樹 氏 逝 去

令和5年11月17日 元当財団理事 馬詰良樹氏（東京慈恵会医科大学名誉教授）が逝去されました。

馬詰氏は平成9年6月より平成24年6月まで理事・選考委員をつとめられました。

謹んで哀悼の意を表します。

## 活 動 報 告

- (1) 第 45 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 5 年 3 月 22 日
- (2) 公益財団法人日本オリンピック委員会，公益財団法人日本スポーツ協会，公益財団法人日本パラ  
スポーツ協会，一般社団法人日本体力医学会，一般社団法人日本臨床スポーツ医学会，ならびに一般  
社団法人女性アスリート健康支援委員会への寄付金交付  
令和 5 年 3 月 31 日
- (3) 臨時書面理事会（決議の省略）  
開催日：令和 5 年 5 月 15 日  
議 題：① 評議員会招集の件
- (4) 第 46 回学術研究公募開始  
令和 5 年 6 月 6 日
- (5) 定時理事会  
開催日： 令和 5 年 6 月 9 日  
議 題：① 令和 4 年度事業報告承認の件  
② 令和 4 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 学術委員選任の件  
⑤ 株主権の行使の件  
⑥ 評議員会招集の件
- (6) 定時書面評議員会（決議の省略）  
開催日：令和 5 年 6 月 19 日  
議 題：① 令和 4 年度事業報告承認の件  
② 令和 4 年度決算報告書承認の件  
③ 評議員・理事・監事選任の件
- (7) 臨時書面理事会（決議の省略）  
開催日：令和 5 年 6 月 20 日  
議 題：① 代表理事（理事長），業務執行理事（常務理事）選任の件

- (8) 第 45 回学術研究成果報告書提出締切  
令和 5 年 6 月 30 日
- (9) 第 46 回学術研究公募締切  
令和 5 年 8 月 4 日
- (10) 第 46 回学術研究公募申請書審査  
令和 5 年 8 月 5 日～令和 5 年 11 月 16 日
- (11) 学術委員会  
開催日：令和 5 年 11 月 16 日  
議 題：① 第 46 回学術研究公募審査の件  
② その他
- (12) 臨時書面理事会（決議の省略）  
開催日：令和 6 年 1 月 19 日  
議 題：① 評議員会招集の件
- (13) 定時理事会, 定時評議員会（同時開催）  
開催日：令和 6 年 2 月 22 日  
議 題：① 令和 5 年度事業計画承認の件  
② 令和 5 年度収支予算承認の件  
③ 基本財産充当の件
- (14) 助成金目録贈呈式  
開催日：令和 6 年 2 月 22 日
- (15) 機関誌「デサントスポーツ科学」第 45 巻発行  
令和 6 年 2 月 22 日

以 上

## 一 編 集 後 記 一

機関誌「デサントスポーツ科学 45 巻」を無事に発行できましたことに感謝いたします。

ひとえに関係者の皆様、学術委員の皆様、編集会社様、そして何よりも厳しい環境下におきまして果敢に挑戦し、工夫し、目的を完遂されました研究者の皆様のおかげでございます。

機関誌 45 巻には 21 件の報告書を掲載することができました。コロナ禍の混乱は落ち着きを見せ始めたとは言うものの、研究を進める上ではまだまだ多くの困難があり、当初に設定した研究計画の通りには進められない状況が多く発生したこと、皆様の研究成果報告書を拝読して強く感じました。そのような研究環境下におきまして、目的とした成果に到達するために手法を再検討し、結果を考察し、期間内に報告を完成させることは、本当に大変なご苦労があったと思います。査読が完了し、本機関誌への掲載が決まったご研究の掲出をお知らせすることは、編集者としてうれしい瞬間でした。査読をいただいた学術委員の皆様にもこのような状況をふまえ、これまでとは違った目線でのコメントをいただき、ご苦労をおかけしました。

厳しい研究環境を反映していることとして、研究助成の応募件数の伸び悩みも発生しています。当財団としましては「体力医学」、「被服・工学」、「パラスポーツ」の3つの領域それぞれの学術研究がしっかりと行われ、その成果を広く公開することを目的としております。今後ともより多くのご応募をいただき、皆様の研究成果をご報告いただくことが当財団の目指す「スポーツ科学」領域の発展に寄与するために必要です。皆様のご理解、ご協力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 45 巻 DESCENTE SPORTS SCIENCE Vol. 45

(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 6 年 2 月 22 日  
Feb. 22, 2024  
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](mailto:zaidan@descente.co.jp)

「デサントスポーツ科学」編集局  
〒 567-0086 大阪府茨木市彩都やまぶき 2 丁目 3 番 2 号  
Tel. 080-4027-4058, 080-1499-1719  
E-mail [zaidan@descente.co.jp](mailto:zaidan@descente.co.jp)

製作所 株式会社 色染社  
〒 541-0041 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/>