

デサントスポーツ科学

DESCENTE SPORTS SCIENCE

Vol.44

目 次

巻 頭 言

紙媒体から電子媒体へ

信州大学繊維学部・リサーチフェロー
石本記念デサントスポーツ科学振興財団 理事 梶原 莞爾 (1)

第 44 回助成金研究報告

【最優秀入選】

〈障がい者スポーツ系〉

バドミントン競技用車いす開発のための片手チェアワークによる駆動特性評価

For the Development of Wheelchairs for Badminton Competition Evaluation of
Driving Characteristics by One-Handed Chairwork

長岡技術科学大学 大橋 智志 (3)

〈体力医学系〉

汗中の乳酸に反応して図柄が変化するスポーツウェアの開発

Development of a New Sportswear with a Pattern That Changes in Response to
Lactic Acid in Sweat

北見工業大学 兼清 泰正 (16)

【優秀入選】

片側大腿切断者におけるランニング時の着地衝撃に関連する障害リスク評価

The Effects of Running Speeds on Loading Rates in Individuals with Unilateral
Transfemoral Amputation

東京理科大学 安間 亮 (28)

高強度運動後の筋血流・酸素化動態からみたクールダウンの効果：MRI を用いた検討

Effects of Cool Down on Muscle Blood Flow after High-Intensity Exercise:
A Magnetic Resonance Imaging Study

北里大学 堀田 一樹 (36)

屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱が身体冷却リカバリー時の体温動態に及ぼす影響

The effects of High Solar Radiation during Exercise on Body Temperature Responses during Body Cooling Recovery in Hot Outdoor Environments

北海学園大学 内藤 貴司 (46)

環境条件の違いにおける発汗による衣服の張り付き不快感の評価

Evaluation of Clothing Discomfort Sensation Caused by Perspiration in Different Environmental Conditions

信州大学大学院 唐沢 悠綺 (56)

CPX に基づいた運動療法によるうつ病の個別化治療

Cardiopulmonary Exercise Test (CPX)-based Exercise Program for Depressive Disorders

山口大学大学院 中川 伸 (67)

仮想現実サイクリング運動時の競争他者が心血管応答

および運動パフォーマンスに及ぼす影響

～自律神経生理尺度を活用したメンタルバイオマーカーの開発

The Effects of Competitors on the Cardiovascular Response and Performance during Virtual Reality Cycling Exercise – the Development of a Mental Biomarker Utilizing Physiological Parameters

順天堂大学大学院 山中 航 (76)

若年成人における歩行および同等速度のジョギングによる座位行動ブレイクが

食後血糖・脂質動態に及ぼす急性影響

Acute Effects of Breaking up Prolonged Sitting with Walking and Slow-speed Jogging on Postprandial Glycaemia and Lipid Responses in Young Adults

中村学園大学 熊原 秀晃 (85)

生体内における生理的環境下での関節接触面解析手法を用いた肩関節疾患の病態解明

Evaluation of Shoulder Joint Diseases Using Joint Contact Area Analysis in Vivo

北海道大学病院 門間 太輔 (94)

求心性および遠心性収縮運動による運動単位動員特性の変化

～高密度表面筋電図を用いた解析～

Acute Changes in Motor Unit Discharge Property After Concentric Versus Eccentric Contraction Exercise in Knee Extensor

中京大学 廣野 哲也 (98)

運動が炎症誘発性筋力低下を抑制する分子機構の解明

Mechanisms of Exercise-Induced Improvement of Muscle Dysfunction in Polymyositis

名古屋市立大学大学院 檜森 弘一 (104)

アイシングに伴う骨格筋再生の阻害は筋代謝機能をも低下させてしまうのか？

Does Icing Therapy Decrease Both Regenerative and Metabolic Capacities Following Skeletal Muscle Injury?

金沢大学 芝口 翼 (112)

身体活動による骨格筋の形態学的変化は脳の健康増進に寄与するか？

：認知機能と情動の改善を目指した戦略の構築

Do Physical Activity Induced Morphological Changes in Skeletal Muscle Contribute to Improvement in Brain Health: Development of Strategic Measures Towards Improvement of Cognitive Function and Mood

公益財団法人明治安田厚生事業団体力医学研究所 須藤 みず紀 (120)

ヒト身体がもつ冗長自由度は目標指向性運動の学習を難しくしているのか？

：効果的な運動学習方法論の確立を見据えて

Does The Redundancy in Human Body Make Learning Goal-Directed Motor Tasks More Difficult?

: Insights into Establishing an Effective Motor Learning Program

筑波大学 佐渡 夏紀 (128)

日本外傷データベースを用いたスポーツ関連外傷の疫学データの推移と予後関連因子に関する研究

Epidemiological Study in Sports-Related Trauma Using The Japan Trauma Data Bank

大阪大学 中尾 俊一郎 (137)

運動による白色脂肪組織の量的・機能的適応を制御する因子としての骨格筋 AMP キナーゼの可能性

Effect of Skeletal Muscle-Specific AMP Kinase Inhibition on Exercise-Induced Quantitative and Functional Adaptations of White Adipose Tissue

京都大学大学院 横川 拓海 (147)

深度センサを用いた Scapular dyskinesis 検出手法の確立

Establishment of Scapular Dyskinesis Detection Method Using a Depth Sensor

東京医科歯科大学大学院 井原 拓哉 (156)

全身振動刺激トレーニングの神経生理学的効果の検証

Study on Neural Effects of Whole-Body Vibration Training

東京国際大学 一寸木 洋平 (164)

坂ダッシュトレーニングによる下肢筋活動への影響

Effects of The Lower Limb Muscle Activity During Uphill Sprint Training

東京大学・早稲田大学 欠畑 岳 (174)

ランニング中の足部アーチ変化および足底荷重分布パターンの定量化
Quantitative Analysis of Foot Arch Deformation and Plantar Load Distribution
Pattern During Running
国士舘大学大学院 木内 聖 (184)

マスク着用が運動時の呼吸筋活動, 呼吸循環応答および有酸素能力に及ぼす影響
Effect of Cloth Face Mask Wearing on Exhaustive Incremental Running Among
Young Men
大阪教育大学 小川 剛 司 (192)

運動前の食事摂取の違いが動脈スティフネスと有酸素性運動パフォーマンスに及ぼす影響
—植物性ベース食品と動物性ベース食品の比較—
Effects of Differences in Pre-Exercise Dietary Intake on Arterial Stiffness and
Aerobic Exercise Performance
-Comparison of Vegetable and Animal Based-Foods-
日本体育大学 岡本 孝 信 (201)

スポーツとアートとテクノロジーを融合した新しいスポーツ参画システムによる
若者の運動継続モデルの検証
Study of A Model for Youth Exercise Continuity Through A New Sports Participation
System that Integrates Sports, Art, and Technology
順天堂大学 鈴木 大 地 (210)

講 評

学術委員 緒 方 徹 (221)

学術委員 島 崎 恒 藏 (223)

学術委員 田 畑 泉 (226)

学術委員 押 田 芳 治 (228)

財団ニュース

事業内容 (230)

役員名簿 (231)

活動報告 (234)

紙媒体から電子媒体へ

信州大学繊維学部・リサーチフェロー

石本記念デサントスポーツ科学振興財団 理事 梶原 莞爾

欧州をはじめ世界各国は、DX（デジタル化）とGX（グリーン化）を成長戦略の要として促進している。2015年9月には国連サミットで「持続可能なための2030アジェンダ」、いわゆるSDGsが採択され、企業・自治体は17のゴールを達成することが求められる。2015年12月の「国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）」（パリ協定）で「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」ことが決議され、温室効果ガス（グリーンハウスガス；GHG）排出量を、EU（欧州連合）は2030年に40%減（1990年比）/再エネ比率を32%まで増加/エネルギー消費量をBAU32.5%削減、日本は2030年度に2013年度比26%減（2005年度比25.4%）を目標に掲げた。米国は2025年に28%削減（2005年比）に向けて最大限に取り組むという目標に掲げたものの、2019年当時のトランプ大統領がパリ協定脱退を表明し、足並みはそろわない。EUはコロナ禍の欧州経済の脆弱性を払拭するべく2020年3月にグリーン経済とデジタル経済への双子転換を後押しする産業戦略の基礎を策定した。2020年日本では10月末に当時の菅首相がカーボンニュートラル宣言をして以来、企業や自治体などがDX、GXという言葉をしきりに使うようになってきている。持続可能な社会の構築にはGXが不可欠であり、GXを促進するためには再生可能エネルギーの有効利用を賢く制御するDXが必要だとされている。

学術誌のDXは紙媒体から電子媒体への転換から始まった。これまで木材から生産された紙を媒体として大量消費してきたが、電子化することにより再生可能資源である木材の消費を抑制することが当初の目的であろう。学術誌が紙であった時代は、その輸送にもエネルギーが必要で、GHGの大量排出の一翼を担っていた。電子化により学術誌はSDGs（特にゴール12「作る責任、使う責任」、ゴール13「気候変動に具体的な対策を」）に貢献した。

果たして学術誌の媒体変化はSDGsの目標達成だけなのだろうか。1970年代後半、マクルーハンは活版印刷後の文明を媒体（メディア）と定義し、媒体は人間の身体の拡張であり、メッセージであるとした。まだPCが普及していない時代であり、マクルーハンが考えた媒体とは「実媒体（リアル）」であり「メタ媒体（リアル+バーチャル）」は考慮されていない。紙媒体では一方的な個人（あるいは共同執筆者）が「語る物語」であったが、電子化されるとそのメタ性（双方向性）から「語る物語」がデータベースとして整理・蓄積され、キーワード（コンピュータゲ

ームにおけるキャラクターに相当する)を通して「語り語られる物語」へと変貌する。つまり、コンピュータゲームのように脱文脈化され、多様な物語へと発展する潜在性を持つことになる。

このように考えると、人間はすべてのものを「遊び」に変える能力を持っているがゆえに、電子媒体への移行は学术论文の独自性が安易に流出 (appropriation) する危険性を孕んでいるように思える。キーワードを与えればデータベースから AI が学术论文を作る時代が来るかもしれない。学术论文誌の電子媒体化は研究者倫理に新たな課題を科すことになる。

バドミントン競技用車いす開発のための 片手チェアワークによる駆動特性評価

長岡技術科学大学 大橋 智志
(共同研究者) 同 塩野 谷明
同 永森 正仁
同 内山 尚志
株式会社パルメソ 監物 勇介

For the Development of Wheelchairs for Badminton Competition Evaluation of Driving Characteristics by One-Handed Chairwork

by

Satoshi Ohashi, Akira Shionoya,
Masahito Nagamori, Hisashi Uchiyama
*Information and Management Systems Engineering,
Nagaoka University of Technology*
Yusuke Kenmotsu
Palmeso Co., Ltd.

ABSTRACT

For this study, we used a competition wheelchair that can drive straight ahead with one arm and a badminton competition wheelchair, taking surface electromyogram (sEMG) data during forward and backward driving: the primary movement of wheelchair badminton. Research participants in the experiment were ten healthy men (22.2 ± 0.4 yr age; 173.7 ± 1.4 cm height; 64.5 ± 2.4 kg weight). The sEMG measurement locations were the flexor digitorum profundus, biceps brachii,

triceps brachii, deltoid, and pectoralis major. Muscle activity was evaluated using integrated electromyograms (iEMGs) obtained from the collected sEMG data. The experimentally obtained results showed that straight-line driving by one-arm increased muscle activity in all muscle regions during both forward and backward motion. Non-parametric multiple comparisons by muscle site were found to have significant differences ($p<0.05$) in the flexor digitorum profundus, biceps brachii, triceps brachii, and pectoralis major muscles forward driving. During backward driving, significant differences ($p<0.05$) were observed in the flexor digitorum profundus, triceps brachii, and deltoid muscles. In conclusion, results show that the flexor digitorum profundus and triceps brachii play important role in the maintenance and repetition of propulsive force during one-handed chairwork (wheelchair control techniques), which is unique to badminton.

キーワード

競技用車いす, バドミントン, ハンドリム, 表面筋電図, 積分筋電図

Keyword

competitive wheelchair, badminton, hand-rim, sEMG, iEMG

要 旨

本研究では、片手駆動で直進可能な競技用車いすとバドミントン競技用車いすを対象として、車いすバドミントン競技の基本動作でもある前進と後退駆動時の筋活動を、表面筋電図 (sEMG) から算出した積分筋電図 (iEMG) をもとに評価した。測定対象の筋部位は、深指屈筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋、三角筋、大胸筋とした。研究協力者は、神経および筋疾患の無い健康成人男性10名 (22.2 ± 0.4 歳, 173.7 ± 1.4 cm, 64.5 ± 2.4 kg) であった。実験結果より、片手直進駆動では前進と後退ともにすべての筋部位にて筋活動がバドミントン競技用車いす使用時と比べて増加する傾向を示した。また、筋部位別の多重比較結果より、前進駆動では深指屈筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋および大胸筋に有意差 ($p<0.05$) が観察された。一方、後退駆動では深指屈筋、上腕三頭筋および三

角筋に有意差 ($p<0.05$) が観察された。以上より、バドミントン競技特有の片手チェアワークにおける推進力の維持とその繰り返しには、特に深指屈筋と上腕三頭筋が重要な役割を担うことを明らかにした。

緒 言

日本国内では2011年のスポーツ基本法施行、2013年の東京オリンピック・パラリンピック開催決定を契機に、障がい者スポーツに対する社会的な注目度が高まっている。昨年の2020東京パラリンピック競技大会では、22競技539種目に163団体4,403名の選手が参加するまで大きく発展したが、日本国内における障がい者スポーツの環境整備は道半ばの現状である。パラリンピックに代表される競技スポーツは、リハビリテーションスポーツやレクリエーションスポーツとは異なり、種々の競技力向上に基づく記録更新やより良

い成績を目指したアスリートスポーツに位置づけられており、世界の競技レベルが急速に向上している。また、アスリートの競技力や身体能力の向上はもちろんのこと、競技に使用する用具の性能・機能の進化も貢献している¹⁻³⁾。パラリンピック競技等で多く使用されている競技用車いすに着目すると、素材の多様性や加工技術の進歩により高性能化が進展している^{4,5)}。バドミントン競技用車いすについては、テニス競技用車いすを転用していた背景があり開発が遅れていたが、地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター、株式会社オーエックスエンジニアリング、国立大学法人長岡技術科学大学による「障害者スポーツ研究開発事業」によって、東京大会に向けて開発されたマグネシウム合金とCFPR（炭素繊維強化プラスチック）を用いたバドミントン競技用車いすはパラリンピック競技大会に採用され、金メダル3個、銅メダル2個の獲得に貢献した。しかしながら、競技者と用具の相性については、競技者自身の感覚的な基準にて判断されている部分も多く、フルオーダーメイドで製作されたとしても、選手の競技力や競技技術への影響について未解明な部分が多く存在している。さらに、競技の特殊性、競技者それぞれによって障がいの部位やその程度に応じた機能実装が必要となるため、同一条件での定量的な評価が難しい問題を有している。

我々は、片腕のみ残存機能を有する競技者やラケット等を片手で扱う競技を対象とした「片手駆動で直進可能な競技用車いす（以降、片手直進駆動車いす）」の開発とその評価に取り組んでいる⁶⁻⁹⁾。この片手直進駆動車いすは、スポーツ競技用車いすのフレームを基に改良したものである。開発した片手直進駆動車いすの駆動機構には、ダブルリング式を採用した。この駆動機構は、片方の駆動輪側に設けた二つのハンドリムを同時に操作することで直進走行を実現している。そのため、片手によるハンドリム操作により、前進と後退、

旋回、停止が可能なこと、スポーツ競技特有の急発進・急停止といった動作も既存の両手駆動と同じく実現できる利点を有している。片腕・片手の欠損または機能不全による上肢障害では、両腕・両手によるハンドリム操作ができないケースも考えられるが、片手直進駆動車いすでは両腕・両手でのハンドリム操作と同様の走行が片腕・片手によるハンドリム操作で実現できることから、車いすを使用する競技への参加にチャレンジできる可能性を有している。しかしながら、片腕・片手によるハンドリム操作の実用化事例では、病院や介護施設での使用を想定したりハビリテーション用¹⁰⁾、日常生活での利用を想定するパワーアシスト機構を有した方式^{11,12)}やレバー駆動方式^{13,14)}など報告されているが、使用者が十分な筋力と器用さを備える必要もある。そのため、車いすが必要かつ片手または片腕に問題がある場合には電動車いすを選択する。これらの背景により、競技用途での研究開発まで踏み込んだ事例はなく、ハンドリム操作時の身体的負荷や筋活動への影響については未解明なままとなっている。

本研究の目的は、車いすバドミントン競技に必須とされる前進と後退駆動時の筋活動評価から、片手直進駆動車いすの実用化につなげるための知見を得ることにある。車いすバドミントン競技（WH1・WH2クラス）では、俊敏かつ正確なチェアワークが要求される。バドミントン競技用車いすにおけるチェアワークでは片手にラケットを持ち、左右両方のハンドリムを操作しながらラケットワークも同時に行うことになる。さらに、他の車いす競技と比べ特徴的な動作として、シャトルを打ち返す際には車いすを後退させる動作も重要となり、前進と後退を繰り返すハンドリム操作が求められる。以上のことから、我々は片手直進駆動車いすの利点を活かしたバドミントン競技への適用や普及拡大への可能性があると考えている。

本論文では、我々が開発した片手直進駆動車い



(a) 片手直進駆動用



(b) バドミントン競技用

図1 競技用車いすの外観

すとバドミントン競技用車いすについて、前進および後退駆動時における筋活動量を表面筋電図から算出した積分筋電図にて比較し、車いすバドミントンの競技動作に応じた駆動筋の筋活動を定量的に評価した結果を報告する。

1. 実験方法

1.1 競技用車いす

本実験で使用した競技用車いすは、図1 (a) に示す片手直進駆動車いす、図1 (b) に示すバドミントン競技用車いすBDZ (株式会社オーエックスエンジニアリング製) とした。表1に使用した競技用車いすの仕様を示す。図1 (a) に示す片手直進駆動車いすは、駆動機構にダブルリング方式を採用し、右側の駆動輪に二つのハンドリムを取り付けている (図2)。図3に示すダブルリング方式の駆動機構は、右側二つのハンドリムを同時にグリップ操作した場合、車軸内に設置された右側のユニバーサルジョイントから駆動伝達軸を通じて

左側のユニバーサルジョイントへ駆動力が伝達されることによって左側ホイールが回転し、片側ハンドリム操作のみでの直進走行を実現する。内側



図2 ダブルリング方式のハンドリム

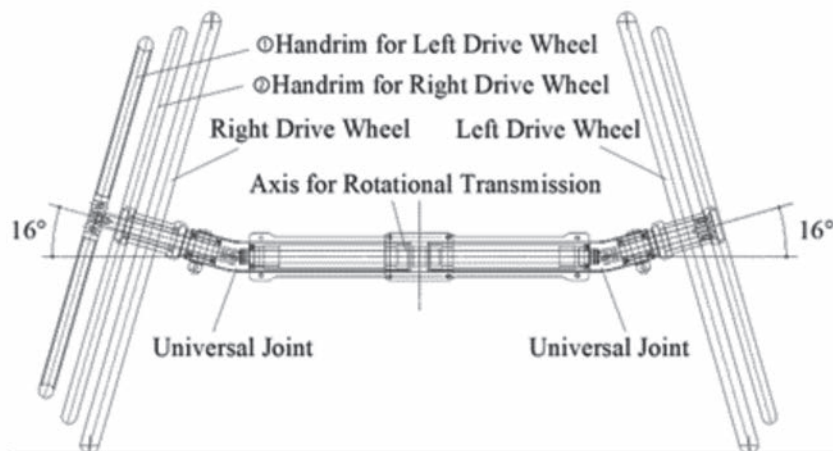


図3 ダブルリング方式の駆動力伝達軸構造

表1 実験に使用した競技用車いすの仕様

項目	片手直進駆動車いす	バドミントン競技用車いす
重量	15.7 kg	10.81 kg
シート長	350 mm	350 mm
シート幅	400 mm	400 mm
キャンバ角	16°	18°
前出し量	60 mm	140 mm
駆動輪径	590 mm	590 mm
ハンドリム径(右駆動用)	531 mm	500 mm
ハンドリム径(左駆動用)	500 mm	500 mm
ハンドリムパイプ径	19 mm	19 mm
フレーム材料	アルミニウム	アルミニウム・スカンジウム合金

(ホイール側)に取り付けられたハンドリムのみを操作した場合は、通常の車いすと同様に右側の駆動輪のみに駆動力が伝達する。なお、部品の組換えによってハンドリムを含めたホイールの取外しと取付けが可能のため、右側駆動だけではなく、左側駆動に変更することも可能である。なお、本実験では右側駆動用に設定した。

1. 2 研究協力者

本研究の研究協力者は、神経および筋疾患の無い健常成人男性10名(右利き9名, 左利き1名)とした。研究協力者の年齢, 身長および体重の平均値とその標準偏差は, 22.2 ± 0.4 歳, 173.7 ± 1.4 cm, 64.5 ± 2.4 kgであった。各研究協力者には、

本研究の目的と実験内容および安全性と可能性のあるリスク等について説明を行い、書面による承諾を得た。なお、本実験は国立大学法人長岡技術科学大学倫理審査委員会にて承認を得て実施された。

1. 3 実験装置と測定環境

実験で測定する表面筋電図(sEMG: Surface Electromyogram, 以降sEMG)は、ハンドリム操作に重要な役割を担う駆動筋の部位¹⁵⁾とし、図4に示すハンドリム操作側(右側)の深指屈筋(flexor digitorum profundus)、上腕二頭筋(biceps brachii)、上腕三頭筋(triceps brachii)、三角筋(deltoid)、大胸筋(pectoralis major)を選択した。図4に示す各測定部位に対し、直径 30×24 mmのケンドールTM電極アルボH124(CardinalHealth)を貼り付け、1.5 mのディスプレイケーブルを介して表面筋電図をDCアンプ内蔵の生体信号収録装置ポリメイトプロMP6000(株式会社ミュキ技研)を用いて記録した。各筋に貼り付けた電極は、双極誘導法を用いており、貼り付け前にはアルコール除菌シートにて研磨し、皮膚表面の油分や汗等を除去後、電極の間隔を25

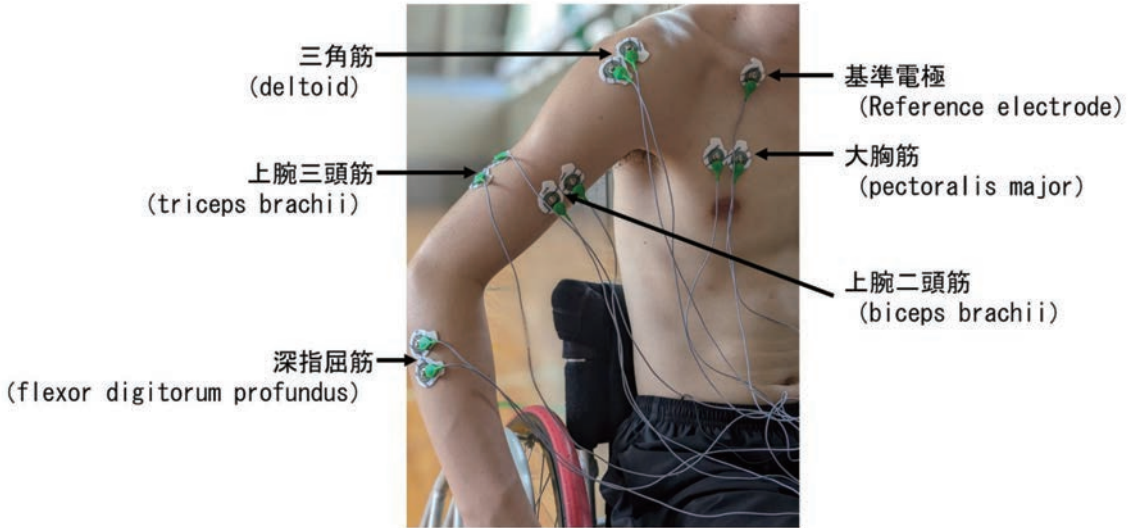


図4 表面筋電図の測定部位

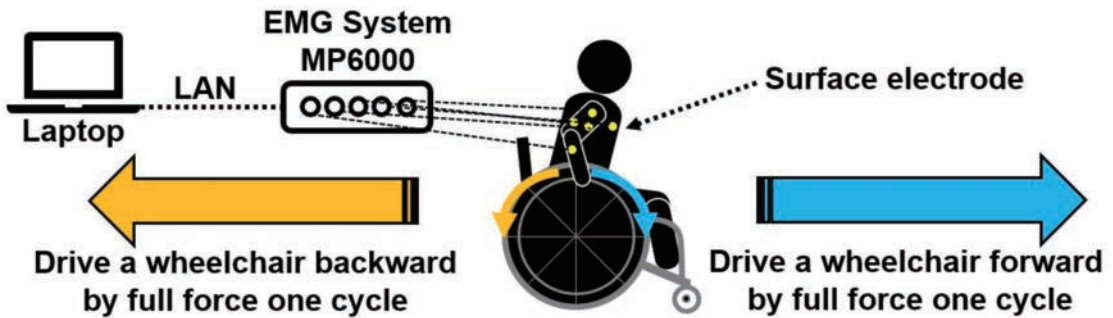


図5 測定環境の概要図

mmとして貼り付けた。なお、データ記録時は、1 kHzのサンプリング周波数にてA/D変換(24 bit)し、接続先のノートPCに取り込んだ。記録したsEMGの波形データは、多用途生体情報解析プログラムBIMUTAS II(キッセイコムテック株式会社)を用いて、10-500 Hzのバンドパスフィルタを適用し、ハンドリム操作による前進および後退駆動時における各筋部位のsEMGをそれぞれ12試行分全波整流化した積分筋電図(iEMG: integrated electromyogram, 以降iEMG)を算出した。図5に測定環境の概要図を示す。

本実験の測定場所は、実際の競技環境を想定し、長岡技術科学大学体育館内のバドミントンコート

とした、図6に示す車いすバドミントン競技のシングル用コートサイズ(縦6.70 m×横3.07 m)内にて測定を行った。

1. 4 実験手順

すべての研究協力者は、各競技用車いすを使用した表面筋電図の測定に関する条件や注意事項について十分な説明を受け、前進駆動と後退駆動のチェアワークトレーニング後に測定を開始した。研究協力者には、静止状態からハンドリムを強く握った後、最大努力にて1駆動のみのハンドリム操作を行うよう指示した。右側のハンドリム操作を基準とした場合、前進時におけるグリップの初

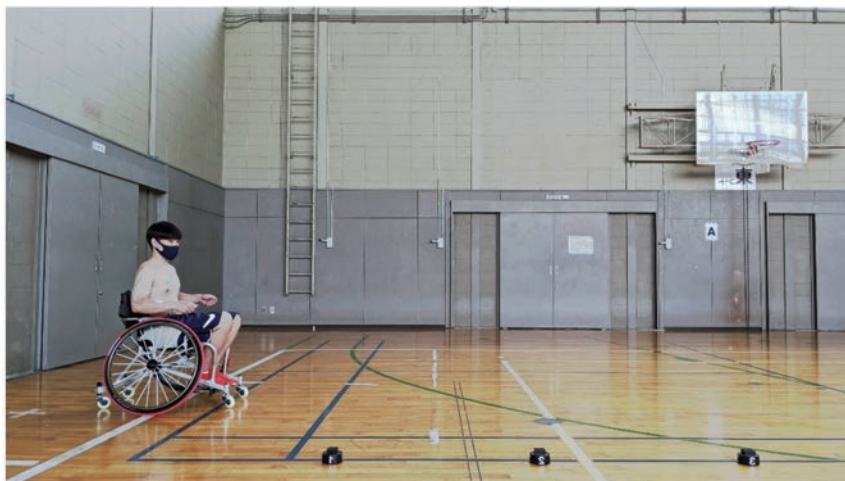


図6 バドミントンコートでの測定

期位置は12時方向とし、3時方向までグリップを維持することとした。後退時の初期位置は2時方向とし、11時方向までグリップを維持することとした。なお、初期位置でハンドリムをグリップした際の肘関節の角度は約90°に保つようとした。試行回数は、前進と後退ともに12回とし、各試行の間には十分な休息時間を設けて筋疲労の回復にも考慮した。

1. 5 解析方法

実験で測定した表面筋電図のデータ（以降、sEMGデータ）は、右側ハンドリムのグリップが確認された後のタイミングを基準とし、1駆動分が収集可能であった1,500 msec間のsEMGデータを使用した。このsEMGデータに対し、10-500 Hzのバンドパスフィルタを適用し、iEMGを算出した。このiEMGの値は、等尺性収縮において筋の発揮張力との対応が成り立つことから、ハンドリム操作時における筋活動の推定値として利用する¹⁶⁾。さらに、研究協力者によって筋電位の生理的応答の個人差やセンサー感度の違いなどが生じることから、研究協力者別に各筋部位の最大iEMGに対する割合（以降、%iEMG）を算出した。

統計処理には統計解析ソフト IBM SPSS

Statistics 28 (IBM社)を用いた。事前に各種iEMGデータの等分散検定による有意差判定結果が $p < 0.05$ (有意水準5%)となったため、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択し、各群の母分散が異なることを確認した。

はじめに、バドミントン競技に使用される競技用車いす（図1 (b)）での前進駆動と後退駆動時の筋活動を表す%iEMGを基準として、片手直進駆動車いす（図1 (a)）の%iEMGにて割合を求め、この割合から筋部位別の筋活動を評価する。この評価は、同一の研究協力者が片手駆動車いすを使用した際に、両手駆動のバドミントン競技用車いすと比べ、どの程度の割合で筋活動を発揮しているのかを意味している。

次に、片手直進駆動車いすとバドミントン競技用車いすにおける前進駆動と後退駆動の筋活動の差を評価するため、解析対象となる右側の深指屈筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋、三角筋、大胸筋の%iEMGに対し、独立サンプルによるKruskal Wallis検定を行った。なお、有意水準は5%とし、有意確率はBonferroni訂正¹⁷⁾により、複数のテストに対して有意確率の値が調整された結果を採用した。

2. 実験結果

2.1 片手直進駆動による筋活動の評価

対象となる各筋部位のiEMGデータから算出された%iEMGは、研究協力者1名あたり12試行×4パターン（片手直進駆動車いすの前進と後退、バドミントン競技用車いすの前進と後退）となる。はじめに、各パターン12試行分の%iEMGデータから上限と下限の値を除外した10試行分の平均値を各パターンの%iEMGとして採用した。次

に、片手直進駆動時の%iEMGに対し、バドミントン競技用車いすを用いた両手駆動時の%iEMGにて除算した割合を前進駆動と後退駆動に分けて算出した。

図7は、前進駆動時における筋部位別の%iEMGの割合を研究協力者別（A~Jまでの10名分）に算出した結果を示している。図8は後退駆動時の結果を示している。

図7に示す前進駆動時の筋部位別比較を確認すると、全研究協力者の平均値では、増加割合が高

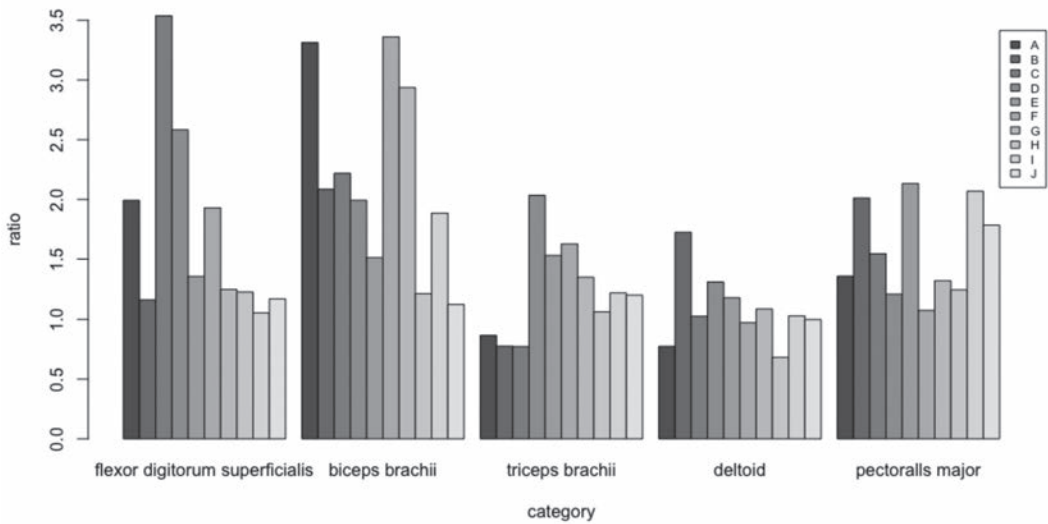


図7 前進駆動時における筋部位別の比較

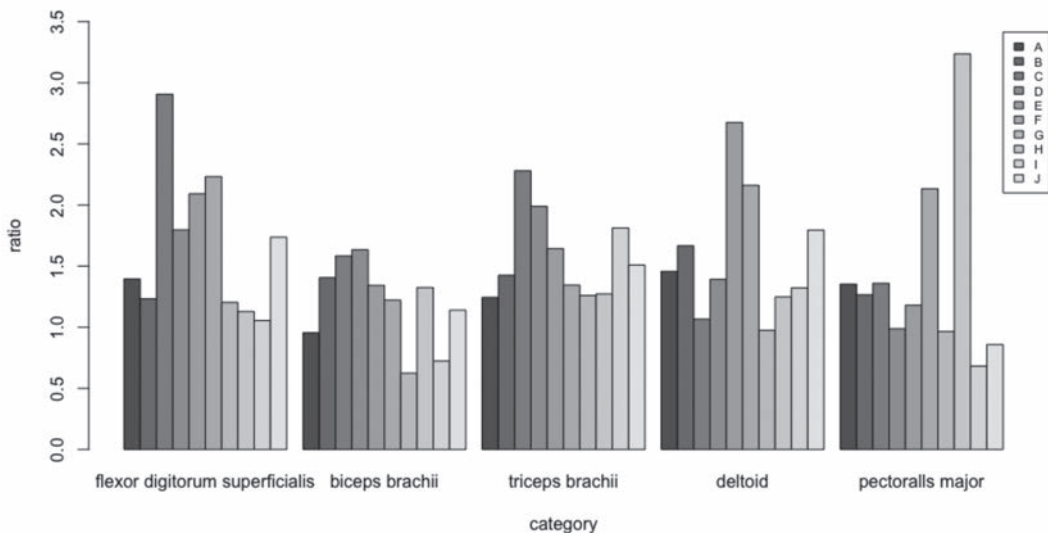


図8 後退駆動時における筋部位別の比較

い順に上腕二頭筋2.16倍、深指屈筋1.73倍、大胸筋1.58倍、上腕三頭筋1.24倍、三角筋1.08倍であった。一方、図8に示す後退駆動時の筋部位比較を確認すると、深指屈筋1.68倍、上腕三頭筋1.58倍、三角筋1.58倍、大胸筋1.40倍、上腕二頭筋1.20倍であった。

2. 2 各筋部位に対する多重比較

片手直進駆動車いすとバドミントン競技用車いすを対象に、前進駆動と後退駆動の差を評価するため、解析対象となる右側の各筋部位（深指屈筋、上腕二頭、上腕三頭筋、三角筋、大胸筋）に区分し、①前進駆動-片手直進駆動車いす (Forward-OneArm), ②前進駆動-バドミントン競技用車いす (Forward-Badminton), ③後退駆動-片手直進駆動車いす (Backward-OneArm), ④後退駆動-バドミントン競技用車いす (Backward-Badminton) の4群を設定し、多重比較を行った。①から④の4群を対象とした駆動別の2群間検定では、Dunn test¹⁸⁾を用いた。なお、有意水準5%とし、その有意確率はBonferroni訂正後¹⁷⁾の値を採用した。表2には片手直進駆動車いすとバドミントン競技用車いすを使用した前進駆動と後退駆動時の%iEMGに対する有意確率 (p-Value) を筋部位別にまとめた結果を示す。図9は、片手直進駆動車いすとバドミントン競技用車いすにおける前進駆動と後退駆動に分けて2群間検定した結果を筋部位別にまとめた結果である。

表2および図9より、片手直進駆動車いすとバドミントン競技用車いすにおける%iEMGの間に有意差が認められなかった筋部位は、前進駆動で三角筋 (図9 (d))、後退駆動で上腕二頭筋 (図9 (b)) と大胸筋 (図9 (e)) であった。

3. 考 察

3. 1 片手直進駆動における筋活動への影響

前進駆動のハンドリム操作における運動力学的プロセスでは、ハンドリムをグリップする瞬間、手関節の屈筋によって指を屈曲させ、上腕二頭筋と上腕三頭筋は肘を屈曲、三角筋と大胸筋が肩を屈曲させた状態となる。ハンドリムをグリップした後、その握り手が体幹より前へ押し出す方向へ移動するため、肘の伸展が車いすへの推進力を担うことになる。この推進力は、上腕二頭筋、三角筋および大胸筋がハンドリムに力を伝えることで車いすへの推進力を発揮し、上肢を前方へ傾けるように働く役目も担う。この推進力を維持するために最も重要なのが上腕三頭筋と手関節の屈筋である¹⁵⁾。そのため、深指屈筋がハンドリムへ伝達する力を逃がさようにハンドリムを強くグリップし続ける役割を担い、上腕三頭筋がハンドリムを回し終えるまで力を伝達する役割を担うことで車いすの推進力が維持される。一方、後退駆動のハンドリム操作においても前進駆動と同様に、後方への推進力を上腕二頭筋、三角筋および大胸筋がハンドリムに力を伝えることで推進力を発揮す

表2 筋部位別による多重比較

Category	Comparison	Test static	p-Value*
flexor digitorum profundus	Forward	8.308	0
	Backward	7.691	0
biceps brachii	Forward	9.932	0
	Backward	1.985	0.283
triceps brachii	Forward	2.889	0.023
	Backward	8.976	0
deltoid	Forward	0.816	1
	Backward	7.515	0
pectoralis major	Forward	5.033	0
	Backward	2.352	0.112

*Significance level $p < 0.050$

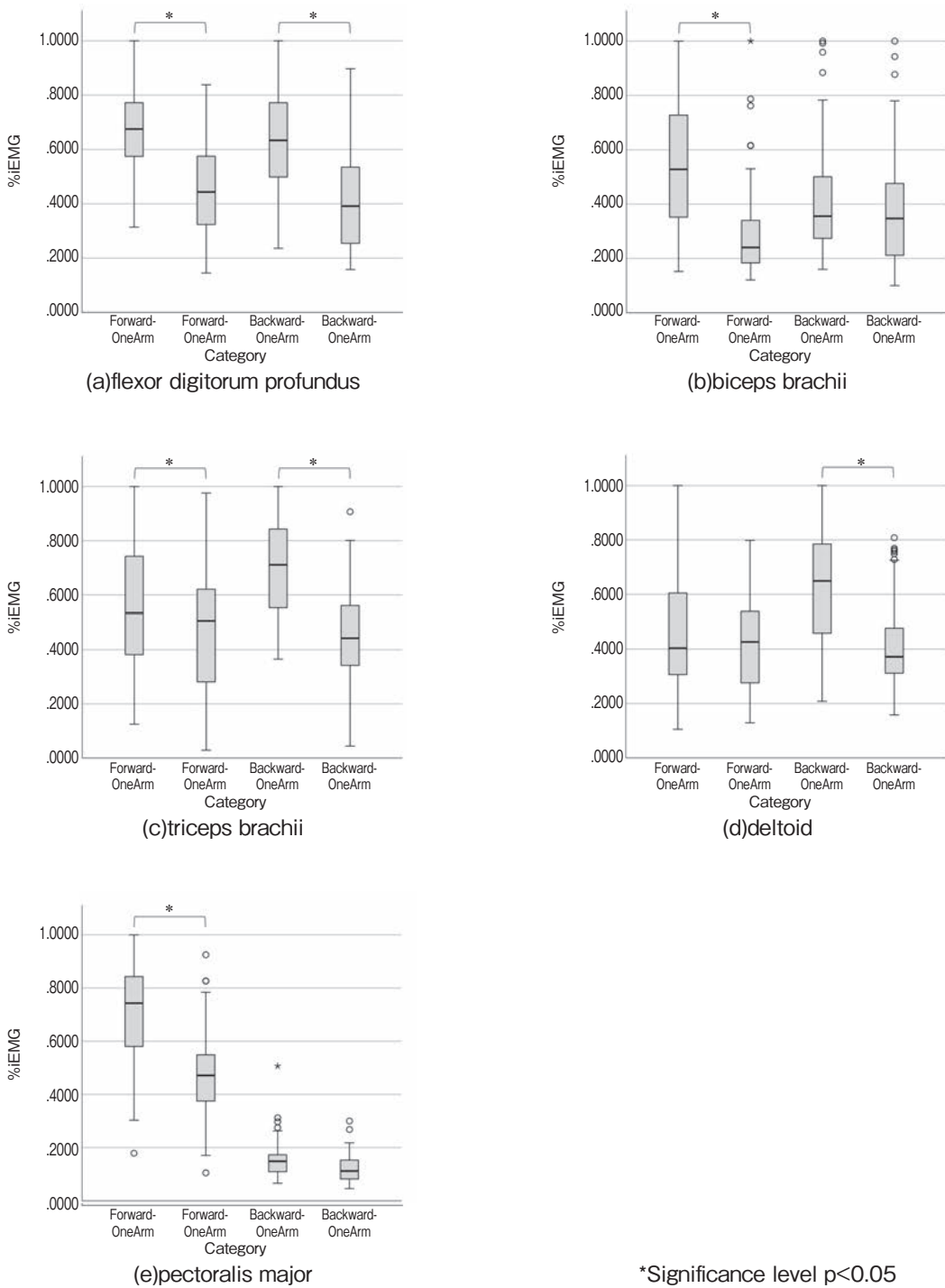


図9 前進・後退別の2群間検定

るが、ハンドリムを最後まで後方へ回す際には肘も体軸よりも後方へ伸ばす方向に動作させる必要があることから、肘関節を伸ばす伸筋として最も

重要な役割を担う上腕三頭筋が前進駆動時よりも大きな力を発揮することになる¹⁵⁾。

図7に示す前進駆動および図8に示す後退駆動

時に片手直進駆動車いすにおける%iEMGの割合が大幅に増加する傾向を示した深指屈筋に着目する。片手直進駆動では2つのハンドリムをグリップしながらの操作が必要となることから、個人差はあるものの全ての研究協力者にてバドミントン競技用車いすよりも%iEMGの割合が増加した。全体平均では前進駆動1.73倍、後退駆動1.68倍となった。一つのハンドリムをグリップする両手駆動に比べ、片手直進駆動時には2つのハンドリムをグリップする必要が生じる。2つのハンドリムをグリップする際には、親指を内側のハンドリムに掛け、その他4本の指を外側のハンドリムに掛けながら操作することから、一つのハンドリムをグリップする場合よりも深指屈筋の筋活動が重要な役割を担うことが推察できる。先行研究⁸⁾の結果では、研究協力者10名に対し、片手直進駆動可能な競技用車いす1台を用いて、片手駆動と両手駆動における前進1駆動分(3試行)のiEMGデータの比較を行った。その結果、深指屈筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋および大胸筋について1.5~1.8倍の増加を確認した。本実験ではバドミントン競技用車いすを用いた両手駆動時との比較となるが、これらの筋部位にて1.24~2.16倍の差が生じたことから妥当性のある結果だと考える。

図7に示す前進駆動の結果では、個人差によるばらつきが生じているが、バドミントン競技用車いすに比べて片手直進駆動車いすによる上腕二頭筋の筋活動が2.16倍と増加し、駆動筋の活動の中では最も大きな影響を与えていた。この結果についても、先行研究⁸⁾の結果と一致した。一方、図8に示す後退駆動の結果では、上腕二頭筋の筋活動が1.20倍、上腕三頭筋が1.58倍となり、上腕二頭筋が最も小さい差となった。これは、前述する後退駆動時における運動学的プロセスで示したように、後退駆動のハンドリム操作では、ハンドリムへの力の伝達および肘関節を体軸より後方へ伸展するために重要な役割を担う上腕三頭筋

の筋活動が大きく影響していると考えられる。図8に示す後退駆動時の上腕三頭筋の筋活動の割合は、図7に示す前進駆動時と比べ研究協力者全体で約27%上昇しており、後退駆動時の推進力には上腕三頭筋が影響を与えていることを示唆できる。

バドミントン競技用車いすを使用した両手駆動に比べ片手直進駆動車いすでは、右側2つのハンドリムをグリップしながら左右両方の駆動輪に駆動力を伝達する必要があり、各筋部位への負荷は両手駆動よりも増大する。内山¹⁹⁾らの研究報告でも示されているように、筋群への負荷増加および車いすへの推進力を伝達する為に必要な肘関節の伸展は、iEMGの増加にもつながることが本実験結果からも明らかになった。

3. 2 車いすと駆動区分の違いによる筋活動の差

図9に示す筋部位別に分けた前進・後退別の2群間検定結果より、片手直進駆動車いすとバドミントン競技用車いすにおける筋活動の特徴を比較する。片手直進駆動では、(a)深指屈筋と(c)上腕三頭筋に特徴的な筋活動の差を確認した。前進および後退駆動ともに、バドミントン競技用車いすとの有意差があり、%iEMGも双方で増加した。この結果は3.1節でも述べたように、ダブルリング方式によって2つのハンドリムをグリップする必要が生じる場合、深指屈筋の筋活動が増加する。また、片手直進駆動では両手駆動に比べて片手・片腕のみで推進力を維持する必要が生じると共に駆動時の負荷も増大することから上腕三頭筋の筋活動も増加することを示唆している。

片手直進駆動による前進では三角筋への影響が小さいことから、深指屈筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋および大胸筋が両手駆動よりも筋活動を増大させ、推進力を維持する傾向を示唆している。一方、後退駆動では上腕二頭筋と大胸筋への影響が小さいことから、深指屈筋、上腕三頭筋および三角筋が後退駆動の推進力を維持させるように働く

傾向を示唆している。

以上より、片手直進駆動車いすを使用したハンドリム操作では、前進駆動また後退駆動の違いにより両手駆動と比べて筋活動を増大させる筋部位が異なり、車いすの推進力を維持させる役割を担うことが明らかとなった。

4. 結 論

本研究では、我々が開発した片手駆動で直進可能な競技用車いすとバドミントン競技用車いすを対象として、前進および後退駆動時における各駆動筋のiEMGをもとに筋活動を定量的に評価した。片手直進駆動による前進と後退時のハンドリム操作では、両手駆動よりも駆動筋群への負荷が増加することから、対象とした全ての筋部位にてiEMGが増加する傾向を示した。バドミントン競技特有の片手チェアワークにおける推進力の維持とその繰り返しには、特にハンドリムをグリップする作用に影響を与える深指屈筋と推進力の維持に影響を与える上腕三頭筋が重要な役割を担うことを明らかにした。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施にあたり多大なご協力を頂きました地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター、株式会社オーエックスエンジニアリングならびに研究協力者の皆様に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Burkett B., Technology in Paralympic sport: performance enhancement or essential for performance?. *Br. J. Sports Med.*, **44** (3), 215-20 (2010)
- 2) Tang S.Q., Li K.H.H., Lim S.L.D., Design enhancement of overall Paralympics wheelchair

for para table tennis competition. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, **233** (3), 342-350 (2019)

- 3) Nagamatsu A., Current Situation and Challenges of Technological Development for Para-Sports Equipment. *Journal of Paralympic Research Group.*, **12**, 69-82 (2019)
- 4) Chénier F., Aissaoui R., Effect of wheelchair frame material on users' mechanical work and transmitted vibration. *Biomed Research International*, 2014, 609369 (2014)
- 5) Gebrosky B., Grindle G., Cooper R., Cooper R., Comparison of carbon fibre and aluminium materials in the construction of ultralight wheelchairs. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, **15** (4), 432-441 (2020)
- 6) 塩野谷明, 監物勇介. 片手・両手切り替え駆動型競技用車いすの開発と評価. *デサントスポーツ科学*, **33**, 93-103 (2012)
- 7) Shionoya A., Kenmotsu Y., Development of New Wheel-Chair for Sports Competition. *In the Proceedings of The 12th Conference of the International Sports Engineering Association*, **2** (257), 1-6 (2018)
- 8) 監物勇介, 大橋智志, 近井学, 塩野谷明. 片手による直進走行が可能なスポーツ競技用車いすの駆動特性に関する実験的評価. *日本福祉工学会誌*, **23** (2), 23-30 (2021)
- 9) Ohashi S., Shionoya A., Harada K., Nagamori M., Uchiyama H., Posture Estimation Using Surface Electromyography during Wheelchair Hand-Rim Operations. *Sensors*, **22** (9), 3296 (2022)
- 10) Hwa S.J., Gemus P., Young-Shim K., Hyung-Shik J., Development and evaluation of one-hand drivable manual wheelchair device for hemiplegic patients, *Applied Ergonomics*, **48**, 11-21 (2015)
- 11) Yasuda T., Furikado D., Tanaka K., One hand drive wheelchair with new manipulation mechanism and assist functions. *Proc. of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2833-2838 (2006)
- 12) Sakai K., Yasuda T., Tanaka K., Improvement of manipulation torque transfer mechanism and assist unit for one hand drive wheelchair with a triple ring. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 196-201 (2009)

- 13) van der Woude L.H., Botden E., Vriend I., Veeger D., Mechanical advantage in wheelchair lever propulsion: effect on physical strain and efficiency. *J. Rehabil Res. Dev.*, 34 (3), 286-94 (1997)
- 14) Kirby R.L., Ethans K.D., Duggan R.E., Saunders-Green L.A., Lugar J.A., Harrison E.R., Wheelchair propulsion: descriptive comparison of hemiplegic and 2 hand patterns during selected activities. *Am. J. Phys. Med. Rehab.*, 78 (2), 131-135 (1999)
- 15) Davis R., Ferrara M., Byrnes D., Sports Performance Series, The competitive wheelchair stroke. *Nat. Streng. Condit. Assoc. J.*, 10, 4-11 (1988)
- 16) 原良昭, 吉田正樹, 松村雅史, 市橋則明. 積分筋電図による筋活動の評価. 電気学会論文誌 C, 124 (2), 431-435 (2004)
- 17) Cabin R.J., Mitchell R.J., To Bonferroni or not to Bonferroni: when and how are the questions. *E.S.A. Bull&I.*, 246-248 (2000)
- 18) Dunn, O.J., Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, 6, 241-252 (1964)
- 19) 内山孝憲, 赤澤堅造; ヒト肘関節伸筋の筋活動度-角度-等尺性トルク関係と-負荷トルク-速度関係, バイオメカニズム, 14 (0), pp.27-37 (1998)

汗中の乳酸に反応して図柄が変化する スポーツウェアの開発

北見工業大学 兼 清 泰 正

Development of a New Sportswear with a Pattern That Changes in Response to Lactic Acid in Sweat

by

Yasumasa Kanekiyo
Kitami Institute of Technology

ABSTRACT

In this study, we succeeded in compositing fabrics and lactate-responsive polymers with various patterns developed by the principal investigator with the hope of creating sportswear with a pattern that changes in accordance with the concentration of lactic acid in sweat. First of all, we composited the polymers with the fabrics by the following steps: impregnating a cotton cloth with a monomer solution and polymerizing it by UV irradiation through a photomask with a predetermined shape of light-transmitting area. Then, after coloring the obtained samples with an anionic dye and immersing it in a lactic acid solution, we observed the pattern on the cloth changing with desorption of the dye in response to lactic acid. Additionally, we examined the dependence of the response on the concentration of lactic acid and its change over time and it was found that the pattern changed from a "smiling face" to a "crying face" within 30 minutes within the concentration range of lactic acid present in sweat.

キーワード

乳酸, 汗, 図柄, ボロン酸, 布

Keyword

Lactic acid, Sweat, Pattern, Boronic acid, Fabric

要 旨

本研究では、研究代表者がこれまでに開発した乳酸応答性ポリマーを、様々な模様を描いて布地と複合化することにより、汗中の乳酸濃度に依存して図柄が変化するスポーツウェアの創製に向けた基礎的検討を行った。乳酸応答性ポリマーと布地との複合化は、モノマー溶液を木綿布に含浸させ、所定の形状の光透過部を有するフォトマスクを介して紫外線を照射し、重合させる方法により行った。得られたサンプルをアニオン色素で着色した後、乳酸水溶液に浸漬したところ、乳酸に反応した色素の脱離が生じ、布上の図柄が変化していった。反応の乳酸濃度依存性と経時変化を検討した結果、汗中に存在する乳酸の濃度範囲内で、30分以内に図柄が「笑顔」から「泣き顔」へ変化することが明らかになった。

緒 言

人々が心身ともに健康でQOL（クオリティ・オブ・ライフ）の高い人生を送るためには、個々人の体力に見合った適度な運動を継続的に実践することが欠かせない。また、温暖化の進行により夏場の気候は過酷さを増しており、熱中症の予防など体調管理の必要性が高まっている。現在のところ、一般の人々が肉体的疲労度を定量的に把握する手法は限られており、多くの場合は勘に頼っているのが実情である。本研究では、研究代表者がこれまでに開発した乳酸応答性ポリマー¹⁾を、様々な模様を描いて布地と複合化することにより、汗中の乳酸濃度に依存して図柄が変化するスポーツウェアの創製に向けた基礎的検討を行った。本法の第一の特徴は、乳酸の濃度に応じた図柄の変化

により、汗中の乳酸濃度を一目で知ることができるところにある。第二の特徴としては、酵素のような不安定で高価な物質を用いず、一般的な材料のみを用いて作製できるため、高い耐久性を有する製品を低コストで大量生産可能である点が挙げられる。本研究が実用的な製品に結びつけば、誰もが手軽に自身の（あるいは他人の）疲労度を知ることができるようになり、世界中の人々の心身の健康増進を通じた平和な社会作りへ貢献できるものと期待される。

1. 実験方法

1. 1 乳酸応答性ポリマーの木綿布への複合化

1. 1. 1 作製パターン1 (モノマー溶液B0+B2)

サンプルの作製手順を図1に示す。市販の木綿布を6 cm四方に切断し、水とアセトンで洗浄した後、ドライヤーで乾燥させた。この布を、裏面にフォトマスク1 (図2) を貼り付けたアクリル板上に固定し、モノマー溶液B0を150 μ L滴下した。モノマー溶液の組成と化合物の分子構造を、それぞれ表1と図3に示す。モノマー溶液B0には、アニオン性色素の吸着部位となる第四級アンモニウムモノマー (Q)、ポリマーの主成分となるアクリルアミド (AAm)、架橋剤 (Bis)、および重合開始剤 (AAPH) を含む。上記のサンプルにフォトマスク側から紫外線 (365 nm) を照射し、1時間後に木綿布を取り出して、純水を満たしたスクリーン管に加え、1時間攪拌した。その後、0.9 mMのアシッドレッド18 (AR18, 図3参照) を含む水溶液 (10 mM HEPES緩衝液によりpH 7.4に設定) に浸漬して1時間攪拌し、純水で2~3秒間洗浄した後、ドライヤーで乾燥させた。この木綿布を、裏面に別のフォトマスク2 (図2) を貼り

付けたアクリル板上に固定し、モノマー溶液B2を100 μ L滴下した。モノマー溶液B2には、乳酸応答部位となるボロン酸モノマー (B) がアクリルアミドの代わりに含まれている。このサンプルにフォトマスク側から紫外線 (365 nm) を照射し、1時間後に木綿布を取り出して、純水を満たしたスクリー管に加え、1時間攪拌した。最後に、先ほどと同一組成のAR18水溶液に浸漬して1時間攪拌し、純水で2~3秒間洗浄した後、ドライヤーで乾燥させた。

ここで、モノマー溶液B0を用いて作製した部分を“B0領域”，モノマー溶液B2を用いて作製した部分を“B2領域”と定義し、以降用いる。

1. 1. 2 作製パターン1 (モノマー溶液B0+B2')
モノマー溶液B2の代わりに、モノマーQの濃度を高くしたモノマー溶液B2'を用いて“B2'領域”を作製した(表1)。それ以外は上述の方法と同様にサンプル作製を行った。

1. 1. 3 作製パターン2

サンプルの作製手順を図4に示す。パターン2では、パターン1の場合と異なる形状のフォトマスク(フォトマスク1'とフォトマスク2'、図5)を用いた。最初に、モノマー溶液B2とフォトマスク1'を用いてB2領域の作製を行い、AR18により着色した。次に、モノマー溶液B0とフォトマスク2'を用いてB0領域の作製を行った。B0領域は未着色のまま測定に用いた。

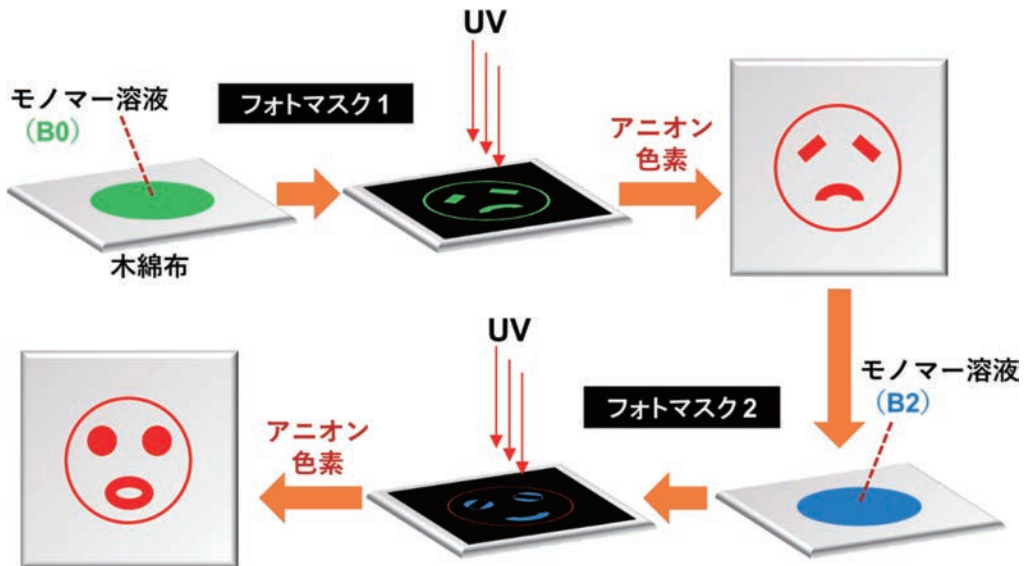


図1 サンプルの作製手順 (パターン1)



図2 作製パターン1におけるフォトマスクの形状

表 1 モノマー溶液の組成 (単位:mM)*

モノマー溶液	B	Q	AAM	Bis	AAPH
B0	0	300	700	400	90
B2	600	300	0	400	90
B2'	600	400	0	400	90

*溶媒: メタノール/水 = 2 : 1 (vol/vol)

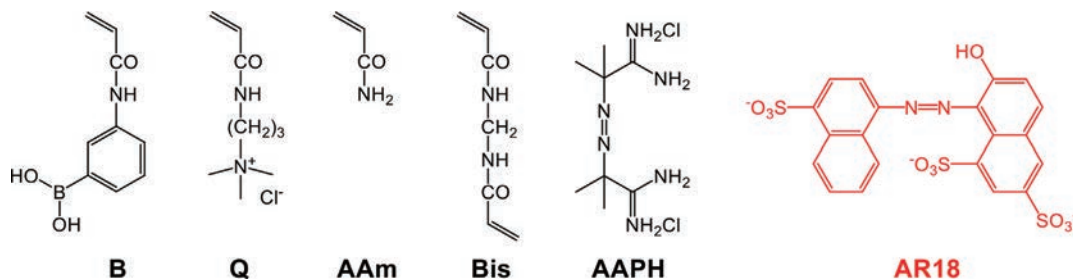


図3 実験に用いた化合物の分子構造

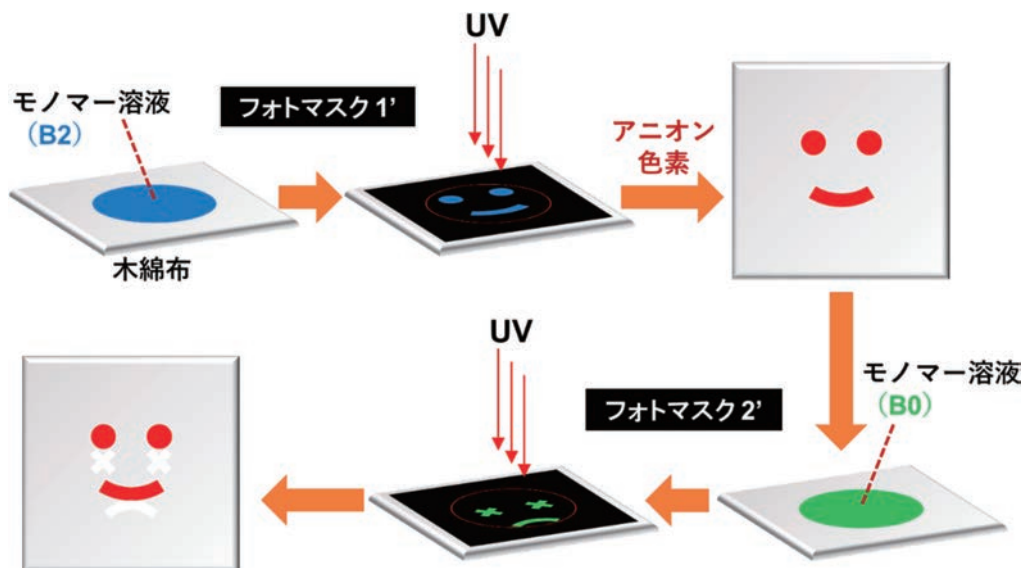


図4 サンプルの作製手順 (パターン2)

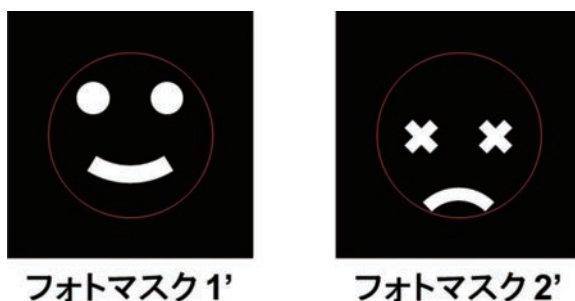


図5 作製パターン2におけるフォトマスクの形状

2. 乳酸に対する応答測定

濃度0, 3, 10, 30, および100 mMの乳酸ナトリウムを含有する水溶液を調製した. 溶液には10 mMのHEPESを緩衝剤として添加し, pHを7.4に設定した. この溶液に, 作製した布地サンプルを浸漬し, 25℃において一定時間 (0 ~ 90 min) 攪拌した. その後, 布地を溶液から取り出して純水で2~3秒間洗浄し, サンプルの写真を撮影した後, ドライヤーで乾燥させた.

3. 実験結果

3. 1 作製パターン1 (モノマー溶液B0 + B2)

の乳酸応答

モノマー溶液B0とB2を用いて作製したサン

プルの, 乳酸 (Lactate) 濃度0, 3, 10, 30, 100 mMそれぞれに応答した図柄の変化挙動を図6に示す. 乳酸濃度が100および30 mMの場合, 時間と共にB2領域からアニオン色素が脱離し, 図柄が「笑顔」から「泣き顔」へ変化していった. 100 mMでは, 10分後にはほぼ完全な泣き顔へ変化した, 全体的に色が薄くなる傾向が見られた. 乳酸濃度が10および3 mMの場合, 図柄はある程度変化した, 30分経過後もB2領域に色素が残存し, 表情の変化は不完全であった. 乳酸を含まない場合 (0 mM) は, B2領域からの色素の脱離はほとんど見られなかったが, B0領域の濃さが増加する傾向が見られた.

サンプルの色調変化を数値的に評価するため, RGB取得ソフト「色採り」を用いてサンプル写

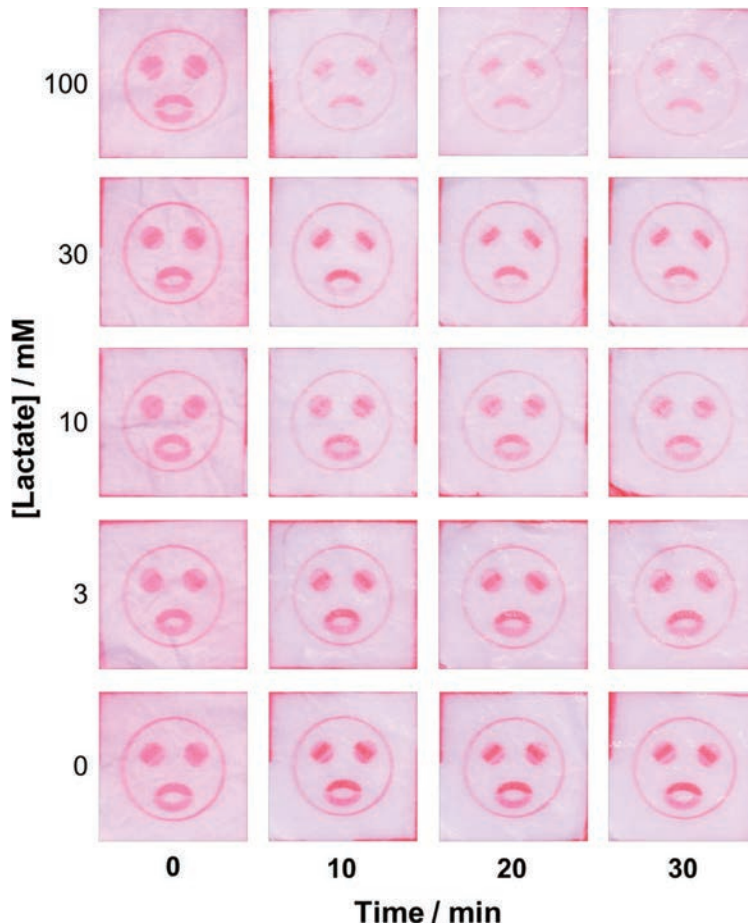


図6 モノマー溶液B0とB2を用いて作製したサンプル (作製パターン1) の応答挙動

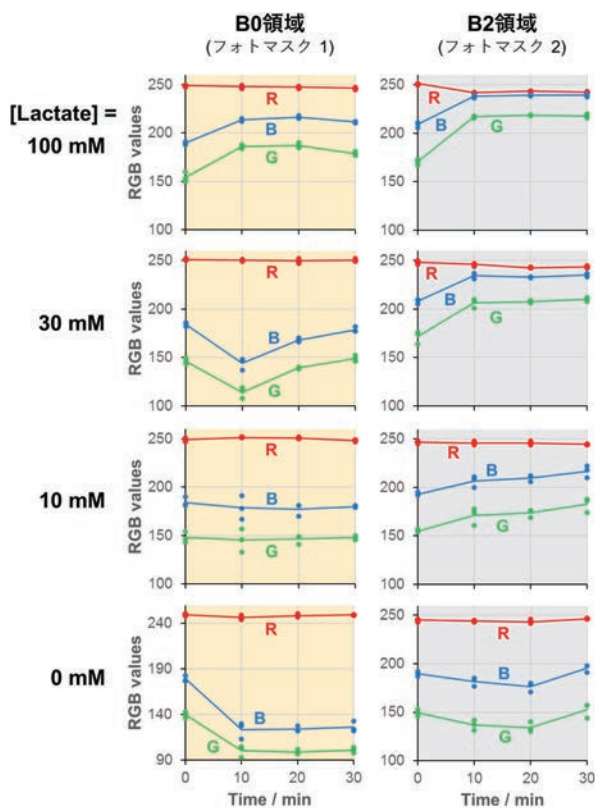


図7 モノマー溶液B0とB2を用いて作製したサンプル (作製パターン1) のRGB値

真のB0領域 (上唇の部分) と B2領域 (下唇の部分) のRGB 値を求め、横軸に時間をとってグラフにプロットした (図7)。B0領域のRGB 値は、乳酸濃度が100および30 mMの条件では若干の変動が見られたが、10 mMではほぼ一定の値を示した。乳酸を含まない場合は、B 値やG 値が低下していった。一方、B2領域に関しては、乳酸濃度が10 mM以下では大きな変化は見られなかったが、30 mM以上ではB 値やG 値が大きく上昇していった。なお、完全な白色では、RGB すべての値が255となる。

3. 2 作製パターン1 (モノマー溶液B0 + B2') の乳酸応答

モノマー溶液B2の代わりにB2'を用いて作製したサンプルの、乳酸濃度0, 10, 30, および100 mMに応答した図柄の変化挙動を図8に示す。

乳酸濃度が100 mMの場合、3分後にはB2'領域 (下唇の部分など) から大部分のアニオン色素が脱離し、30分後には完全な泣き顔へ変化した。30 mMでは、100 mMの場合に近い挙動を示したが、30分後にもB2'領域に僅かな色素の残存が見られた。乳酸濃度が10 mMの場合、多少の図柄の変化が認められたが、乳酸を含まない場合 (0 mM) には、目立った図柄の変化は生じなかった。B0領域 (上唇の部分など) に関しては、どの条件においても目立った変化は見られなかった。

サンプルの色調変化を数値的に評価するため、サンプル写真のB0領域とB2'領域のRGB 値を求め、横軸に時間をとってグラフにプロットした (図9)。B0領域のRGB 値は、乳酸濃度に関わらず僅かな変動しか示さなかった。一方、B2'領域に関しては、乳酸濃度30 mM以上ではB 値やG 値が大きく上昇していった。10 mMではある程

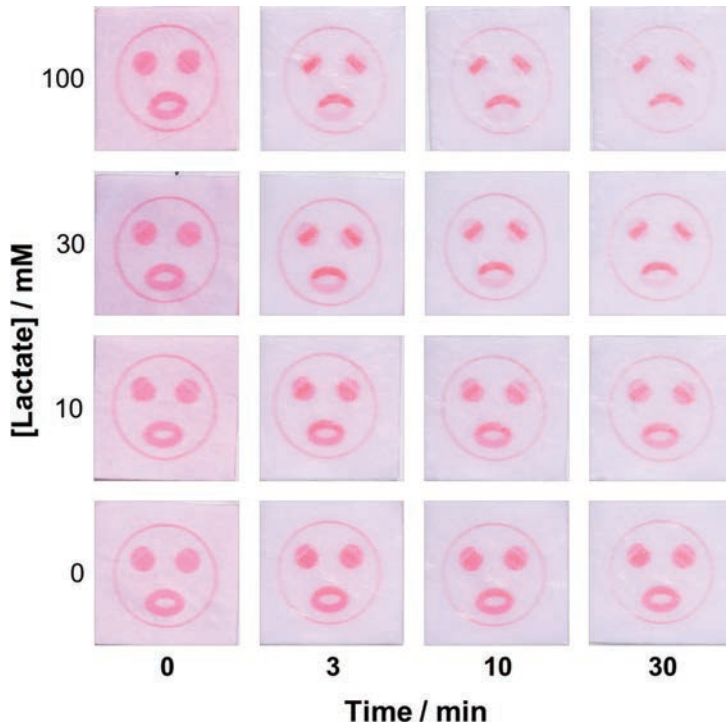


図8 モノマー溶液B0とB2を用いて作製したサンプル（作製パターン1）の応答挙動

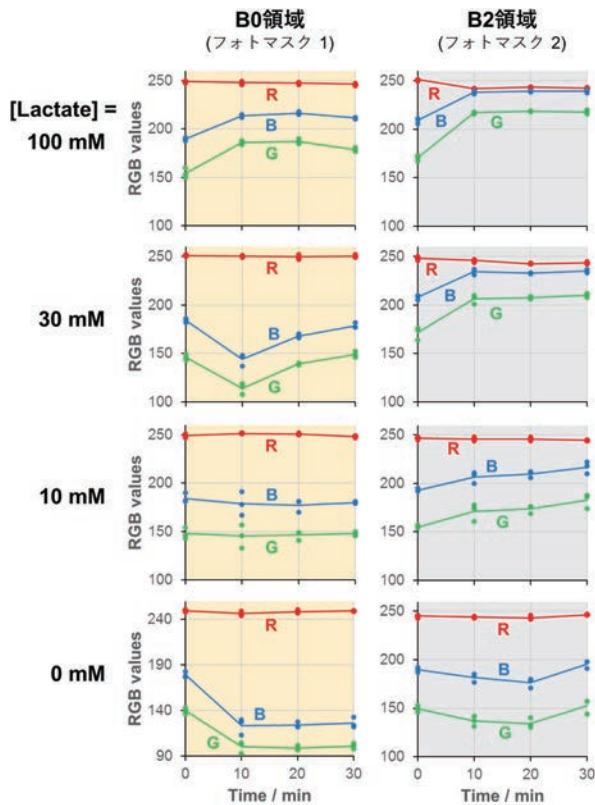


図9 モノマー溶液B0とB2を用いて作製したサンプル（作製パターン1）のRGB値

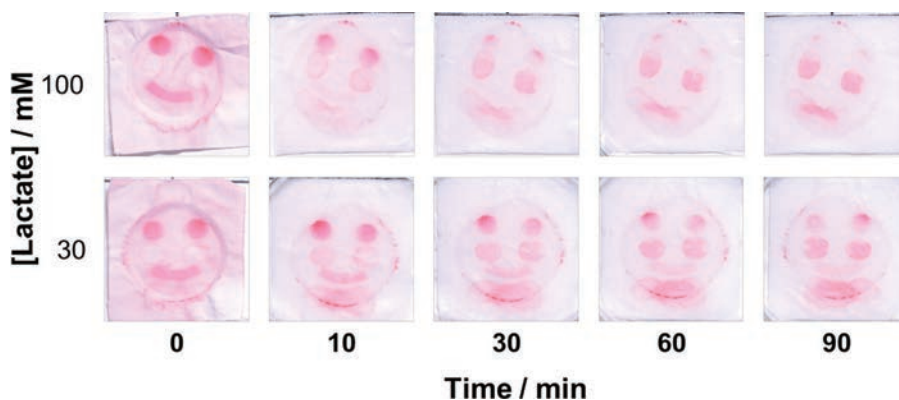


図10 モノマー溶液B0とB2を用いて作製したサンプル（作製パターン2）の応答挙動

度の数値上昇が見られたが、0 mMではほぼ一定の値を示した。

3. 3 作製パターン2（モノマー溶液B0 + B2）の乳酸応答

作製パターン2は、モノマー溶液B2（フォトマスク1'）の領域のみを着色し、B0（フォトマスク2'）の領域は未着色のまま用いたサンプルである。この布地の、乳酸濃度30および100 mMに応答した図柄の変化挙動を図10に示す。乳酸濃度が100 mMの場合、初期状態では図柄が「笑顔」であったが、時間と共に図柄が変化し、60分後には明らかな表情の変化が現れた。ただし、図柄の精細度は不十分であり、フォトマスク通りの表情には至らなかった。乳酸濃度が30 mMの場合、図柄はある程度変化したが、90分経過後もB2領域に色素が残存し、表情の変化は不完全であった。

4. 考 察

4. 1 作製パターン1（モノマー溶液B0 + B2）の乳酸応答

このサンプルは、図6に示すように、乳酸濃度が30 mM以上の水溶液に浸漬すると、時間と共にB2領域からアニオン色素が脱離し、図柄が笑顔から泣き顔へ変化していった。B2領域は、ボロン酸モノマーと第四級アンモニウムモノマーを

含むモノマー溶液を用いて作製されたものであるが、図11に示すようにボロン酸は乳酸と可逆的に結合して、負電荷を有する錯体を形成することが知られている²⁾。したがって、本サンプルにおいては、ボロン酸と乳酸との相互作用によりアニオン色素の脱離が引き起こされたものと考えられる（図12）。ボロン酸基とカチオン基（第四級アンモニウムモノマー由来）を有するB2領域は、カチオン基との静電的相互作用によりアニオン色素が吸着されている。ボロン酸基は、乳酸との結合により負電荷を帯びて、カチオン基と静電的に相互作用するようになる。その結果、アニオン色素は相互作用部位を失い、B2領域から脱離する。一方、ボロン酸基を含有しないB0領域には、乳酸と直接的に相互作用可能な部位が存在しない。そのため、乳酸存在下でも、アニオン色素はカチオン基との静電的相互作用によりポリマーに吸着されたままであり、B0領域からの脱離は基本的には生じない。

図13には、乳酸濃度に依存した図柄の変化挙動を示す（応答時間30分）。これを見ると、乳酸濃度が0から10 mMにかけては、一部に濃淡の変化は見られるものの、表情は「笑顔」のままである。さらに乳酸濃度が30 mMまで上昇すると、明らかな図柄の変化が現れ、表情は「泣き顔」と識別可能な状態となっている。そして100 mMでは、

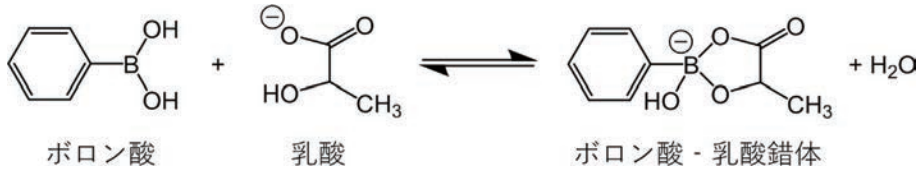


図11 ポロン酸と乳酸との相互作用

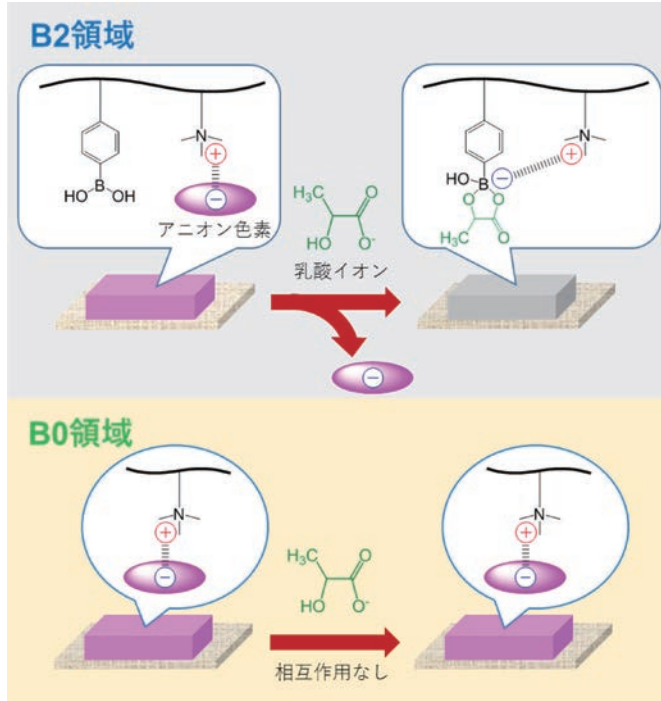


図12 応答メカニズム (作製パターン1)

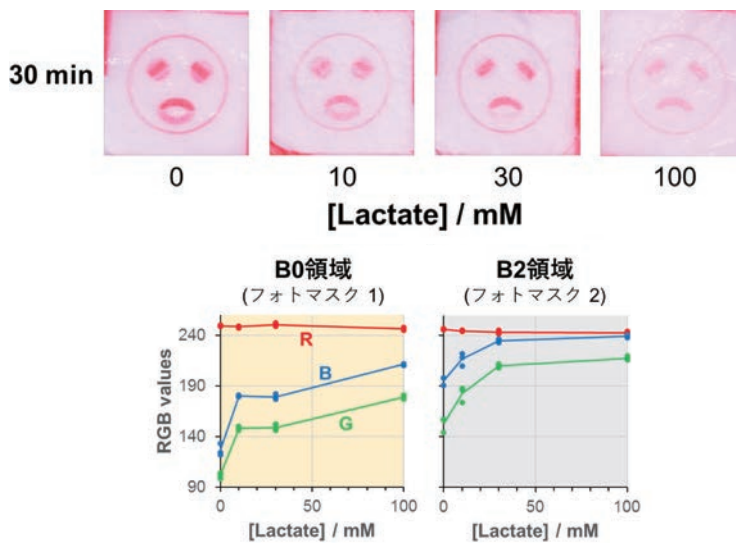


図13 乳酸濃度に依存した図柄の変化 (モノマー溶液B0+B2, 作製パターン1)

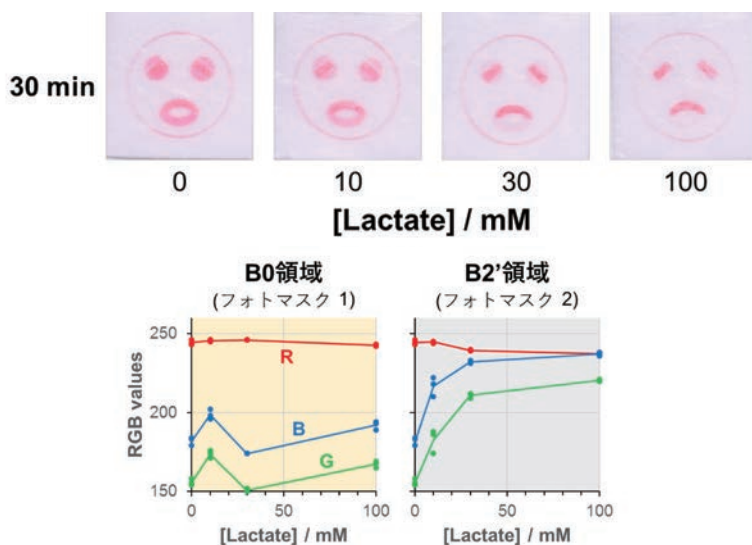


図14 乳酸濃度に依存した図柄の変化 (モノマー溶液B0+B2', 作製パターン1)

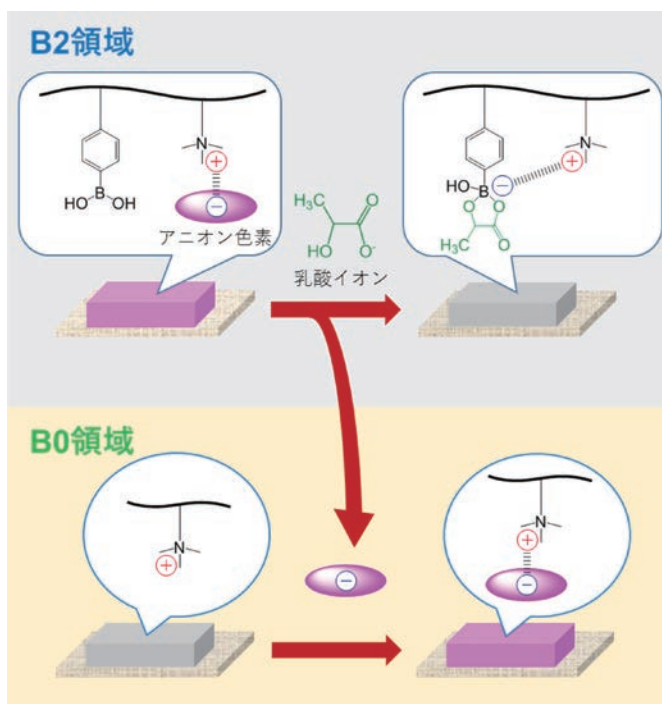


図15 応答メカニズム (作製パターン2)

表情は完全に変化したと言える。以上のように、乳酸濃度に応答した図柄の変化を実現できたが、いくつかの問題点が同時に浮上した。一つ目は、乳酸濃度ゼロにおいてB0領域とB2領域で濃さが異なり、表情が不自然である点である。このこと

は、乳酸濃度ゼロにおいて、B0領域とB2領域とでG値やB値が大きく異なっていることから明らかである。二つ目は、B0領域においても乳酸濃度の上昇とともにある程度の色素脱離が生じ、全体的に色が薄くなる点である。これも、B0領

域において、乳酸濃度の上昇と共にG値やB値が増大していることに現れている。一つ目の点については、応答前の段階から二つの領域で色の濃さに差 ($B_0 > B_2$) があったことに加え、木綿布の周辺部に非特異的に形成されたポリマーに吸着していた色素が、応答段階でB0領域に色移りを起こし、濃さの差を拡大させたことが原因と考えられる。そこで、第四級アンモニウムモノマーの含有量を高めたモノマー溶液B2'を用いてサンプルを作製し、応答前の色ムラを低減すると共に、布の周辺を切断して非特異領域からの色移りの影響を解消すべく検討を進めた。二つ目の点は、乳酸濃度が高まるにつれて、アニオン色素が同じくアニオン性の乳酸イオンによって置換され、脱離していくことが原因と推測される。この点については、カチオンモノマーの含有量を高めたり、より価数の高いアニオン色素を用いたりするなどの対応策が考えられるので、今後検討を行っていく予定である。

4. 2 作製パターン1 (モノマー溶液B0 + B2') の乳酸応答

このサンプルは、モノマー溶液B2の代わりにモノマー溶液B2'を用いて作製したものである。図8に示すように、乳酸濃度が30 mM以上の水溶液に浸漬すると、時間と共にB2'領域(下唇の部分など)からアニオン色素が脱離し、図柄が笑顔から泣き顔へ変化していった。本サンプルにおいても、既述のサンプルと同様にボロン酸と乳酸との相互作用によりアニオン色素の脱離が引き起こされたものと考えられる(図12)。図14には、乳酸濃度に依存した図柄の変化挙動を示す(応答時間30 min)。このサンプルも、既述のサンプルと同様の応答挙動を示し、乳酸濃度が30 mM以上の場合に「笑顔」から「泣き顔」への明瞭な図柄の変化が生じた。一方、乳酸濃度ゼロにおける色ムラは比較的少なく、B0領域の変色も無視で

きる程度である。このことから、モノマー組成の変更や布地の周辺部の切除といった対応策が奏功し、より好ましい図柄の変化挙動を示す布地を作製できたものと言える。

4. 3 作製パターン2 (モノマー溶液B0 + B2) の乳酸応答

このサンプルは、これまでに述べたものとは異なる着色手順とフォトマスク形状を用いて作製したものである。すなわち、モノマー溶液B2の領域をフォトマスク1'(笑顔)を用いて作製し、着色後、B0領域をフォトマスク2'(泣き顔)を用いて作製した。B0領域は未着色のまま測定に用いたため、応答前の図柄はフォトマスク1'の形状に基づく「笑顔」である。このサンプルを100 mMの乳酸水溶液に浸漬すると、時間と共にB2領域が無色へと変化し、代わってB0領域が無色から赤色へ変化していった。このような図柄の変化は、ボロン酸基と乳酸との相互作用によりB2領域のアニオン色素が脱離すると同時に、脱離した色素がB0領域に移行することにより生じたと考えられる(図15)。すでに述べた作製パターン1は、着色済みの領域の一部から色素が脱離して図柄の変化をもたらすタイプであったが、パターン2は“色移り”現象を利用したタイプであり、より大きな図柄の変化をもたらす可能性をもった方法論である。現在のところ、色移り後の図柄の精細度が十分ではなく、期待した変化は得られていないが、今後作製条件を最適化することにより、乳酸に応答した顕著な図柄の変化を実現したいと考えている。

5. 結 論

ボロン酸モノマーや第四級アンモニウムモノマーを含むモノマー溶液を木綿布に滴下し、フォトマスクを介して紫外線照射を行うことにより、乳酸応答性ポリマーを木綿布と複合化することに

成功した。この木綿布をアニオン色素で着色し、乳酸応答に用いたところ、乳酸濃度が高まるにつれて図柄が笑顔から泣き顔に変化していった。当初の作製条件では色ムラが見られたため、モノマー組成やサンプルの処理を最適化した結果、より好ましい図柄の変化を実現できた³⁾。より大きな図柄の変化を目指して、色素の色移り現象を利用した方法論も試み、原理的に機能し得ることを明らかにしたが、図柄の精細度の向上などの課題が残った。当初の計画では、インクジェットプリンターを用いて図柄を作製し、精細度の向上を図る予定であったが、インクタンクが機能しないなど装置上のトラブルへの対処に時間を要したため、予備的な検討の段階に止まった。これに伴い、計画していたアイロンプリント紙を用いた検討や、サンプルの耐久性試験も未実施である。しかしその後、必要な部品が調達でき、インクジェットプリンターを使用した検討を進められる状況は整っている。今後は、インクジェットプリンターとアイロンプリント紙を組み合わせた新たな作製手法により、図柄の精細度向上を図る。さらに、ポリエステルなど種々の布地素材への複合化や、人工汗液を用いた応答実験および耐久性試験など、実用化を念頭に置いた検討を進め、スポーツ

ウェア等への応用を実現していきたいと考えている。

謝 辞

この研究は、2022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。

本研究の実務を担っていただいた北見工業大学の松原静香さん、佐藤里咲さん、茂垣寿美麗さん、阿部亜季紗さん、東達彦さんに心から感謝いたします。

文 献

- 1) 兼清泰正, 藤村祐大, 三谷裕, 「ボロン酸をベースとした色調変化型乳酸センサーの様々な基材への複合化」, 第80回分析化学討論会, 2020年5月.
- 2) Y. Kanekiyo, S. Shinkai, "Supramolecular Chemistry in Boronic Acids" in *Boron: Sensing, Synthesis and Supramolecular Self-Assembly*, ed. by J. S. Fossey, T. D. James, *RSC Publishing*, Cambridge, Chapter 1. (2016)
- 3) 兼清泰正, 松原静香, 藤村祐大, 茂垣寿美麗, 「汗中の乳酸に応答して図柄が変化する衣類の開発」, 2022年繊維学会年次大会, 2022年6月.

片側大腿切断者におけるランニング時の 着地衝撃に関連する障害リスク評価

東京理科大学 安間 亮
(共同研究者) 同 竹村 裕
産業技術総合研究所 保原 浩明

The Effects of Running Speeds on Loading Rates in Individuals with Unilateral Transfemoral Amputation

by

Ryo Amma, Hiroshi Takemura

Tokyo university of science

Hiroaki Hobara

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

ABSTRACT

For individuals with lower limb amputation, participating in physical activities such as running is expected to positively impact their quality of life. However, individuals with lower limb amputation, especially unilateral transfemoral amputation, may be exposed to a higher risk for musculoskeletal injury during running. Although the loading rate is one of the indicators to estimate the risk of musculoskeletal injury, the loading rate in individuals with unilateral transfemoral amputation at various running speeds remains unclear. This study aimed to evaluate the risk of musculoskeletal injury across a range of running speeds in individuals with unilateral transfemoral amputation by using the loading rate. Fourteen individuals with unilateral transfemoral amputation and 10 non-amputees ran on a split-belt force-instrumented treadmill at 4 running speeds (30%, 40%, 50%, and 60% of each subject's maximum speed). Loading rates

were calculated as the average and instantaneous slopes of the ground reaction force from touchdown to 50 ms. We found the loading rates in the unaffected limb were significantly greater than those in the affected and control limbs at all running speeds. In addition, the loading rates in the unaffected and affected limbs significantly increased with increasing running speed. The results of this study suggested that the risk for musculoskeletal injury during running in individuals with unilateral transfemoral amputation increased with increasing running speeds, especially in the unaffected limb.

キーワード

下肢切断者, 義足, 走動作, 地面反力, トレッドミル

Keyword

Amputees, Loading rate, Prostheses, Ground reaction force, Amputee locomotion

要 旨

本研究の目的は、片側大腿切断者におけるランニング動作を対象に、Loading rate を様々な速度で算出し、着地に伴って生じる筋骨格障害リスクを定量的に評価することであった。被験者は片側大腿切断者14名および健常者10名を動員し、4速度条件(30%, 40%, 50%, 60%)で、フォースプレート内蔵型トレッドミル上を走行させた。実験速度は、100 m走のベストタイムから算出された平均走速度を100%と定義し、これを基準に算出した。計測した鉛直地面反力から、健側肢、義足肢および健常者の脚におけるLoading rateを算出した。本研究の結果として、健側肢におけるLoading rateは、全ての速度で義足肢および健常者の脚よりも有意に大きかった。また健側肢および義足肢におけるLoading rateは、走速度漸増に伴って増加する傾向にあった。以上より、片側大腿切断者の健側肢では着地に伴って生じる筋骨格障害リスクが大きいこと、速度漸増に伴って健側肢および義足肢における筋骨格障害リスクが増大することが示唆された。

緒 言

下肢切断後におけるQOLは、モビリティレベルと強い相関があり¹⁻³⁾、また運動参加によって向上することが報告されている⁴⁾。近年、炭素繊維製の競技用義足の普及によって、下肢切断者の運動参加が活発化している。2021年には東京2020オリンピック・パラリンピックが開催され、下肢切断者の運動参加が国内外を問わず注目を集めた。こうした下肢切断者の運動参加が盛り上がりを見せる一方で、運動に伴う筋骨格障害の発生が問題視されている。

下肢切断者は、日常生活下の歩行に伴う負荷蓄積によって、腰痛や膝の痛みが頻発していることが報告されている⁵⁻¹⁰⁾。そして下肢切断者の中でも、一側肢を膝関節より上位で切断した片側大腿切断者は、特にその傾向が顕著である⁵⁻¹⁰⁾。こうした二次的な筋骨格障害は、下肢への繰り返し荷重や^{6, 10-12)}、健側肢への過荷重¹³⁾が誘因であると示唆されている。そしてランニング動作は、歩行よりも大きな荷重が下肢に加わると考えられる。実際に、片側大腿切断者の健側肢および義足肢の両方において、ランニング中の鉛直地面反力の最大値は、歩行中の2倍の大きさになるという

報告もある¹⁴⁾。また、片側大腿切断者を対象にしたランニング研究によると、健側肢の鉛直地面反力は義足肢よりも大きくなることが報告されている^{15,16)}。また、下肢切断者の運動強度が増加することは、義足肢における褥瘡をはじめとした肌トラブルに繋がると考えられている¹⁷⁾。したがって、ランニング動作において、片側大腿切断者は高い筋骨格障害リスクに晒されていることが予想される。

筋骨格障害リスクを評価する指標の1つとして、接地初期における鉛直地面反力の時間変化率で定義される Loading rate が用いられている^{18,19)}。一般的に、Loading rate の値が大きくなると、下肢に蓄積する力学的な負荷蓄積に繋がり、腰痛や膝の痛みなどをはじめとした筋骨格障害の潜在的なリスクが高まると考えられている^{20,21)}。また健常者のランニングを対象にした研究において、Loading rate は脛骨へのストレスと関係があると示唆されている¹⁹⁾。

片側大腿切断者における筋骨格障害リスクを評価することは、臨床現場におけるリハビリテーションの改善や²²⁾、最適な義足設計の一助となりうる²³⁾。しかしながら、片側大腿切断者における Loading rate については、不明な点が多い。

そこで本研究は、片側大腿切断者におけるランニング動作を対象に、Loading rate を様々な速度で算出し、着地に伴って生じる筋骨格障害リスクを定量的に評価することを目的とする。一側肢を膝関節より下位で切断した片側下腿切断者のランニング研究によると、健側肢における Loading rate は義足肢や健常者の脚よりも大きいことが報告されている¹⁸⁾。したがって本研究は、「片側大腿切断者の健側肢における Loading rate は、義足肢および健常者の脚よりも大きい」という仮説を検証した。

1. 方法

1.1 被験者

本実験には、日常的に走動作を行う片側大腿切断者14名(男性9名/女性5名)および健常者10名(男性6名/女性4名)が参加した(表1)。また片側大腿切断者の実験において、全ての被験者は普段から使用している運動靴、競技用義足を用いて実験を行った。実験に先立ち、被験者に対して本研究の目的、方法および計測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。尚、本研究は国立研究開発法人産業技術総合研究人間工学実験委員会の承認を得て行われた(人2013-450)。

1.2 実験概要

本研究におけるランニング動作は、フォースプレート内蔵型トレッドミル(FTMH-1244WA, テック技販社製; 図1)上で行った。本装置に内蔵されたフォースプレート(TF-40120-CL, TF-40120-CR, テック技販社製)を用いて、走動作中の鉛直地面反力を1000 Hz で記録した。計測に先立ち、全ての被験者はトレッドミル上での走動作に適応することを目的とした練習時間を設けた²⁴⁾。さらに、全ての被験者は、転倒防止を目的とした装着型の安全ハーネス(MESH HARNESS, ミドリ安全社製)を着用した状態でランニングを行った。

実験速度は、各被験者における100 m走のベストタイム(表1)から算出された平均走速度を100%と定義し、これを基準に30%から60%まで10%ずつ漸増させた。これに対し、対照群である健常者では、各人の性別・年齢・身長・体重に最も近い片側大腿切断者と同じ走速度で実験を行った。そのため、両群における実験時走速度に有意差は認められなかった。

各試行において、走動作が安定した状態で計測

表 1 被験者特性

Participant	Sex	Age (years)	Height (m)	Mass (kg)	Time since amputation (years)	100-m Personal records(s)	Prosthetic knee unit	RSP model	Amputated limb	Cause of amputation
Individual with UTFA										
1	M	54	1.70	65.8	31	16.25	3S80	KATANA- β	Left	Trauma
2	M	34	1.61	58.6	21	17.82	3S80	1E91 Runner	Left	Sarcoma
3	M	23	1.68	55.7	20	17.24	3S80	1E90 Sprinter	Left	Cancer
4	M	42	1.67	57.2	6	17.66	3S80	1E90 Sprinter	Left	Cancer
5	M	17	1.77	84.0	3	14.59	3S80	1E90 Sprinter	Left	Congenital
6	M	26	1.75	66.0	5	14.08	3S80	1E90 Sprinter	Right	Trauma
7	F	21	1.49	44.3	9	20.66	3S80	1E90 Sprinter	Right	Sarcoma
8	F	21	1.52	51.5	5	21.05	3R95	1E90 Sprinter	Left	Sarcoma
9	F	19	1.56	58.8	13	16.86	3S80	1E91 Runncr	Right	Trauma
10	F	27	1.54	45.9	1	22.40	3S80	Flex-Run	Right	Trauma
11	M	36	1.61	60.1	18	18.86	3S80	1E91 Runncr	Right	Trauma
12	M	26	1.71	65.6	4	16.02	3S80	1E91 Runncr	Left	Trauma
13	F	29	1.64	63.2	12	14.61	3S80	1E91 Runncr	Left	Trauma
14	M	24	1.60	61.1	6	16.13	3S80	1E91 Runncr	Right	Trauma
Mean		28.5	1.63	59.8	11					
SD		10.1	0.09	9.7	9					
Control										
1	M	51	1.67	65.3						
2	M	33	1.80	71.6						
3	M	24	1.64	59.0						
4	M	41	1.71	73.2						
5	M	22	1.70	63.1						
6	M	26	1.72	71.6						
7	F	21	1.57	62.5						
8	F	23	1.59	54.2						
9	F	21	1.59	58.3						
10	F	27	1.63	52.9						
Mean		28.9	1.66	63.2						
SD		10.0	0.07	7.3						

各群における被験者番号は性別・年齢・身長・体重が対応するように記載されており、当該番号同士は同じ走速度で測定したことを意味している。

を開始し、片側大腿切断者の健側肢、義足肢および健常者の脚について、トレッドミル上でそれぞれ連続した5歩を計測した。尚、健常者の脚の解析には、健常者の右脚のデータを用いた。また疲労の影響を排除するため、各試行の間には十分な休憩時間を設けた。

1. 3 データ収集および解析

計測した鉛直地面反力は、カットオフ周波数 25 Hz の fourth-order Butterworth low-pass filter を用いて平滑化した。そして平滑化した鉛直地面反力に対して 40 N の閾値を設定し、閾値以上であれば立脚期であると判断した。そして、平滑化した鉛直地面反力を各被験者の体重で除すことで正規化し、Vertical average loading rate (VALR) および Vertical instantaneous loading rate (VILR) という2つの方法で Loading rate を算出した。VALR

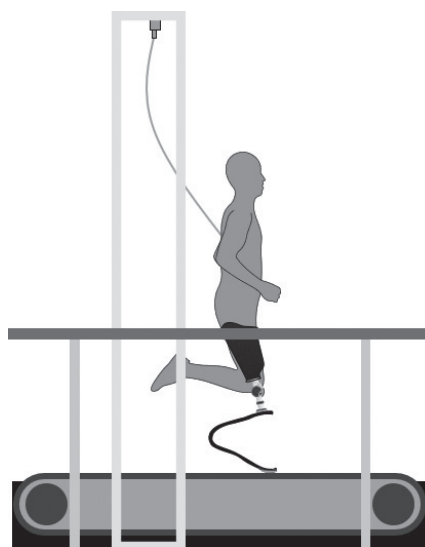


図1 フォースプレート内蔵型トレッドミルを用いた実験の概略図

の定義は、脚の接地から 50 ms までの鉛直地面反力の平均の傾きとした²⁵⁾。また、VILR の定義は、

脚の接地から 50 ms までにおける、鉛直地面反力の最大の傾きとした²⁶⁾。

VALR および VILR について、被験者全体の平均値および標準偏差を算出した。また Shapiro-Wilk の正規性検定を用いて、各変数の正規性を確かめた。その結果 VALR および VILR ともに正規性が認められたため、脚 (3水準：健側肢、義足肢、健常者の脚) を対応のない要因、速度 (4水準：30%、40%、50%、60%) を対応のある要因として、二元配置分散分析を行った。分散分析の結果について、速度については Mauchly の球面性検定を行い、球面性の仮定が棄却された場合 Greenhouse-Geisser のイプシロンを利用して自由度を修正した。二元配置分散分析の結果、脚もしくは速度の主効果、また脚と速度の交互作用が有意であった場合、事後検定として Bonferroni 法を用いて、多重比較を行なった。全ての統計解析には SPSS for Windows ソフトウェア (Version 26.0, IBM 社製) を用いた。また多重比較検定には Bonferroni の調整を用い、全ての解析について危険率 5% 水準を統計的に有意とした。

2. 結果

図2に走速度変化に対する VALR および VILR

の変化を示す。先ず VALR について、二元配置分散分析の結果、脚および速度の両要因について、有意な主効果が認められた (脚: $F(2.000, 18.000) = 40.423, P < 0.001$, 速度: $F(3.000, 27.000) = 75.858, P < 0.001$)。さらに、脚と速度の有意な交互作用が認められた ($F(2.766, 24.898) = 4.176, P = 0.018$)。多重比較検定の結果、全ての走速度において、健側肢における VALR は義足肢および健常者の脚よりも有意に大きかった ($P \leq 0.021$)。また、全ての走速度において、義足肢における VALR は健常者の脚よりも有意に大きかった ($P \leq 0.032$)。さらに、健側肢の VALR は、走速度漸増に伴い増加する傾向にあった。同様に、義足肢および健常者の脚における VALR も、それぞれ増加する傾向にあった。

次に VILR について、二元配置分散分析の結果、脚および速度の両要因について、有意な主効果が認められた (脚: $F(1.295, 11.655) = 7.212, P < 0.001$, 速度: $F(1.446, 13.011) = 60.622, P < 0.001$)。しかしながら、脚と速度に有意な交互作用は認められなかった ($F(1.877, 16.893) = 1.406, P = 0.271$)。多重比較検定の結果、全ての走速度において、健側肢における VILR は義足肢および健常者の脚よりも高値を示したが、統計的有意差を有していたのは 30% の速度のみであった ($P < 0.05$)。一方、全て

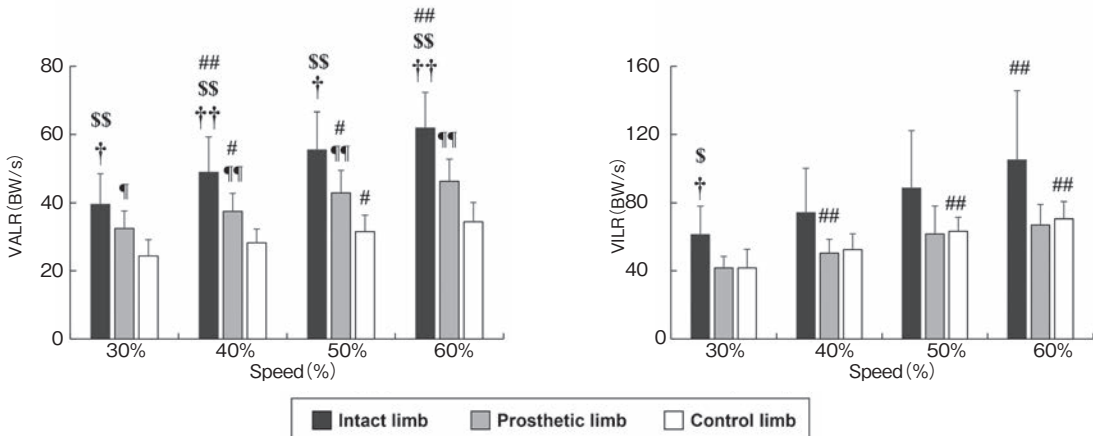


図2 30%から60%までの走速度における VALR (左図) および VILR (右図) の結果

黒色、灰色および白色はそれぞれ健側肢、義足肢および健常者の脚の値を表す。† 健側肢と義足肢の有意差について、\$は健側肢と健常者の脚の有意差について、‡は義足肢と健常者の脚の有意差について表している。#はある速度における値と直前の速度との有意差について表す。いずれの場合も、記号1つは $P < 0.05$ を、2つは $P < 0.01$ を表す。

の走速度において、義足肢と健常者の脚におけるVILRに有意差は認められなかった。また、健側肢、義足肢および健常者の脚において、VILRが走速度漸増に伴い増加する傾向にあった。

3. 考 察

本研究の目的は、片側大腿切断者におけるランニング動作を対象に、Loading rateを様々な速度で算出し、着地に伴って生じる筋骨格障害リスクを定量的に評価することであった。ランニング動作中におけるLoading rateを比較した結果、健側肢および義足肢におけるVALRは、全ての速度において健常者の脚よりも大きかった。また、健側肢におけるVILRは、低速域(30%)において義足肢および健常者の脚よりも有意に大きかった。同様の傾向は走速度漸増下でも観察されたが、統計的に有意な差はなかった。これらの結果は、「片側大腿切断者の健側肢におけるLoading rateは、義足肢および健常者の脚よりも大きい」という仮説を概ね支持するものであった。

図2に示すように、全ての走速度において、健側肢におけるVALRは義足肢および健常者の脚よりも大きかった。一方、健側肢におけるVILRは、全速度域で義足肢および健常者の脚よりも大きい値を示す傾向にあったが、統計的有意差を確認できたのは30%速度のみであった。健側肢におけるLoading rateが他の脚よりも大きくなる傾向は、膝よりも下で下肢を切断した片側下腿切断者の傾向と同様であった¹⁸⁾。Loading rateが大きいことは、脛骨疲労骨折や足底筋膜炎といった筋骨格障害リスクの誘因となると考えられている^{19, 27)}。したがって本研究の結果は、健側肢における着地に伴って生じる筋骨格障害リスクが他の脚よりも大きいことを示唆している。

健側肢におけるLoading rateが大きくなる原因の1つとして、義足肢における筋萎縮が考えられる。実際に、大腿切断後の大腿部は、健側肢と比

べて筋断面積が約72%小さいことが報告されている²⁸⁾。加えて、片側大腿切断者の全力疾走時における鉛直地面半力は、義足肢の方が健側肢よりも小さいことが知られている¹⁵⁾。このような形態・機能的な左右脚差が、結果として健側肢におけるLoading rateを増大させ、着地に伴って生じる筋骨格障害リスクの増大に関与しているかもしれない。

義足肢におけるVILRは健常者の脚と差がなかった一方、VALRでは全ての速度で有意差が観察された(図2)。この結果は、同等の運動強度でランニングを行った場合、義足肢における着地に伴って生じる筋骨格障害リスクが、健常者と同等もしくは相対的に高い状態にあることを示唆している。前述したように、本研究では健側肢におけるLoading rateが、全速度域で、義足側および健常者の脚よりも高値を示していた(図2)。したがって、片側大腿切断者は、相対的に健常者以上に筋骨格系障害リスクにさらされている可能性が高く、ランニング実施時の障害予防策とケアがより必要だと考えるべきであろう。

また、図2に示すように、走速度漸増に伴い、全ての脚におけるVALRおよびVILRは増加する傾向にあった。走速度増加に伴ってLoading rateが増加する傾向は、健常者や下腿切断者で観察された先行研究の結果と一致するものであった^{18, 29, 30)}。こうした結果は、スポーツ用義足を装着した片側大腿切断者に関して、健側肢および義足肢のいずれにおいても、走速度漸増に伴って着地に伴って生じる筋骨格障害リスクが増大していく可能性が示唆された。

現在まで、スポーツ用義足を装着した下肢切断者に関する生体力学研究の多くは走パフォーマンス向上に主眼が置かれており、その障害発生リスクを定量評価した研究は極めて少ない。そのため、障害予防に必要な手立てを論じることは難しいが、片側大腿切断者がランニングを行う際には、

運動強度をコントロールすることと、運動後のケアを健常者以上に重要視することかもしれない。

4. 結 論

本研究の目的は、片側大腿切断者におけるランニング動作を対象に、Loading rate を様々な速度で算出し、着地に伴って生じる筋骨格障害リスクを定量的に評価することであった。本研究の結果から、片側大腿切断者の健側肢における筋骨格障害リスクは、義足肢や健常者よりも大きいことが明らかになった。また、走速度漸増に伴い、片側大腿切断者の健側肢および義足肢における着地に伴って生じる筋骨格障害リスクは増大することが明らかになった。

謝 辞

本研究の実施にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心より御礼申し上げます。また、実験にご協力いただいた被験者の皆様、産業技術総合研究所の関係者様にも感謝申し上げます。

文 献

- 1) Asano M., Rushton P., Miller W.C., Deathe B.A. Predictors of quality of life among individuals who have a lower limb amputation. *Prosthet. Orthot. Int.* 32 (2) :231-43 (2008)
- 2) Pell J.P., Donnan P.T., Fowkes F.G., Ruckley C.V. Quality of life following lower limb amputation for peripheral arterial disease. *Eur. J. Vasc. Surg.* 7 (4) :448-451 (1993)
- 3) Wurdeman S.R., Stevens P.M., Campbell J.H. Mobility Analysis of Amputees (MAAT I) : Quality of life and satisfaction are strongly related to mobility for patients with a lower limb prosthesis. *Prosthet. Orthot. Int.* 42 (5) :498-503 (2018)
- 4) Asken, M. J. The challenge of the physically challenged: Delivering sport psychology services to physically disabled athletes. *The sport psychologist* 5 (4) : 370-381 (1991) .

- 5) Struyf P.A., van Heugten C.M., Hitters M.W., Smeets R.J. The prevalence of osteoarthritis of the intact hip and knee among traumatic leg amputees. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 90 (3) :440-446 (2009)
- 6) Norvell D.C., Czerniecki J.M., Reiber G.E., Maynard C., Pecoraro J.A., Weiss N.S. The prevalence of knee pain and symptomatic knee osteoarthritis among veteran traumatic amputees and nonamputees. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 86 (3) :487-493 (2005)
- 7) Smith D.G., Ehde D.M., Legro M.W., Reiber G.E., del Aguila M., Boone D.A. Phantom limb, residual limb, and back pain after lower extremity amputations. *Clin. Orthop. Relat. Res.* (361) :29-38 (1999)
- 8) Ehde D.M., Smith D.G., Czerniecki J.M., Campbell K.M., Malchow D.M., Robinson L.R. Back pain as a secondary disability in persons with lower limb amputations. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 82 (6) :731-734 (2001)
- 9) Hammarlund C.S., Carlström M., Melchior R., Persson B.M. Prevalence of back pain, its effect on functional ability and health-related quality of life in lower limb amputees secondary to trauma or tumour: a comparison across three levels of amputation. *Prosthet. Orthot. Int.* 35 (1) :97-105 (2011)
- 10) Highsmith M.J., Goff L.M., Lewandowski A.L., et al. Low back pain in persons with lower extremity amputation: a systematic review of the literature. *Spine J.* 19 (3) :552-563 (2019)
- 11) Radin E.L., Paul I.L., Rose R.M. Role of mechanical factors in pathogenesis of primary osteoarthritis. *Lancet.* 1 (7749) :519-522 (1972)
- 12) Kerin A.J., Coleman A., Wisnom M.R., Adams M.A. Propagation of surface fissures in articular cartilage in response to cyclic loading in vitro. *Clin. Biomech.* ;18 (10) :960-968 (2003)
- 13) Nolan L., Wit A., Dudziński K., Lees A., Lake M., Wychowański M. Adjustments in gait symmetry with walking speed in trans-femoral and trans-tibial amputees. *Gait Posture.* 17 (2) :142-151 (2003)
- 14) Burkett B., Smeathers J., Barker T. Walking and running inter-limb asymmetry for Paralympic trans-femoral amputees, a biomechanical analysis. *Prosthet. Orthot. Int.* 27 (1) :36-47 (2003)
- 15) Makimoto A., Sano Y., Hashizume S., et al. Ground

- Reaction Forces During Sprinting in Unilateral Transfemoral Amputees. *J. Appl. Biomech.* **33** (6) :406-409 (2017)
- 16) Sakata H., Hashizume S., Takemura H., Hobara H. A Limb-specific Strategy across a Range of Running Speeds in Transfemoral Amputees. *Med. Sci. Sports Exerc.* **52** (4) :892-899 (2020)
 - 17) Dudek N.L., Marks M.B., Marshall S.C., Chardon J.P. Dermatologic conditions associated with use of a lower-extremity prosthesis. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* **86** (4) :659-663 (2005)
 - 18) Hobara H., Baum B.S., Kwon H.J., et al. Amputee locomotion: lower extremity loading using running-specific prostheses. *Gait Posture.* **39** (1) :386-390 (2014)
 - 19) Milner C.E., Ferber R., Pollard C.D., Hamill J., Davis I.S. Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* **38** (2) :323-328 (2006)
 - 20) Mündermann A., Dyrby C.O., Andriacchi T.P. Secondary gait changes in patients with medial compartment knee osteoarthritis: increased load at the ankle, knee, and hip during walking. *Arthritis Rheum.* **52** (9) :2835-2844 (2005)
 - 21) Russell Esposito E., Aldridge Whitehead J.M., Wilken J.M. Sound limb loading in individuals with unilateral transfemoral amputation across a range of walking velocities. *Clin. Biomech.* **30** (10) :1049-1055 (2015)
 - 22) Gailey R., Allen K., Castles J., Kucharik J., Roeder M. Review of secondary physical conditions associated with lower-limb amputation and long-term prosthesis use. *J. Rehabil. Res. Dev.* **45** (1) :15-29 (2008)
 - 23) Price M.A., Beckerle P., Sup F.C. Design Optimization in Lower Limb Prostheses: A Review. *IEEE Trans Neural Syst. Rehabil. Eng.* **27** (8) :1574-1588 (2019)
 - 24) Zeni J.A. Jr., Higginson J.S. Gait parameters and stride-to-stride variability during familiarization to walking on a split-belt treadmill. *Clin. Biomech.* **25** (4) :383-386 (2010)
 - 25) Giandolini M., Arnal P.J., Millet G.Y., et al. Impact reduction during running: efficiency of simple acute interventions in recreational runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* **113** (3) :599-609 (2013)
 - 26) Strike S.C., Wickett O., Schoeman M., Diss C.E. Mechanisms to absorb load in amputee running. *Prosthet. Orthot. Int.* **36** (3) :318-323 (2012)
 - 27) Pohl M.B., Hamill J., Davis I.S. Biomechanical and anatomic factors associated with a history of plantar fasciitis in female runners. *Clin. J. Sport Med.* **19** (5) :372-376 (2009)
 - 28) Sherk V.D., Bembem M.G., Bembem D.A. Interlimb muscle and fat comparisons in persons with lower-limb amputation. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* **91** (7) :1077-1081 (2010)
 - 29) Keller T.S., Weisberger A.M., Ray J.L., Hasan S.S., Shiavi R.G., Spengler D.M. Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running. *Clin. Biomech.* **11** (5) :253-259 (1996)
 - 30) Munro C.F., Miller D.I., Fuglevand A.J. Ground reaction forces in running: a reexamination. *J. Biomech.* **20** (2) :147-155 (1987)

高強度運動後の筋血流・酸素化動態からみた クールダウンの効果：MRI を用いた検討

北里大学 堀田 一樹
(共同研究者) 新潟医療福祉大学 児玉 直樹
福島県立医科大学 森下 慎一郎
新潟医療福祉大学 椿 淳裕

Effects of Cool Down on Muscle Blood Flow after High-Intensity Exercise: A Magnetic Resonance Imaging Study

by

Kazuki Hotta

*Kitasato University School of Allied Health Sciences
Kitasato University Graduate School of Medical Sciences*

Naoki Kodama

*Department of Radiological Technology, Niigata University of Health and Welfare
Institute for Human Movement and Medical Sciences,
Niigata University of Health and Welfare*

Shinichiro Morishita

*Department of Physical Therapy, School of Health Sciences,
Fukushima Medical University*

Atsuhiko Tsubaki

*Department of Physical Therapy, Niigata University of Health and Welfare
Institute for Human Movement and Medical Sciences,
Niigata University of Health and Welfare*

ABSTRACT

This study aimed to noninvasively image blood flow in the active limb using

magnetic resonance imaging (MRI) and to measure blood flow recovery after maximal voluntary muscle contractions. Twenty healthy adult male subjects (21 ± 1 years of age) underwent arterial spin labeling (ASL) to map blood flow in the proximal right forearm. Subjects performed 2 minutes of maximum intensity handgrip exercise in the MRI gantry. MRI imaging was performed three times: baseline, immediately after exercise, and 20 minutes after exercise. The obtained images were divided into the whole forearm, wrist flexor and extensor muscle groups, and radial bone, respectively. The signal intensity of the ASL was determined in each area. The three-dimensional (x, y-t) data were analyzed by combining the two-dimensional blood flow map with the time. Compared to the baseline level, blood flow in the whole forearm, wrist flexor and extensor muscles increased 1.4 ± 0.2 , 2.7 ± 1.0 and 2.1 ± 0.6 times; however, radial bone blood flow decreased 13 % on average immediately after 2 minutes of maximum intensity grip exercise. The whole forearm, extensor and flexor muscle blood flow measured 20 min after handgrip exercise returned to the baseline level; however, radial bone blood flow was significantly higher than the baseline level. These results suggest heterogeneity in the recovery of blood flow after maximal-intensity handgrip exercise among different tissues.

キーワード

磁気共鳴画像法, 動脈スピラベリング, ハンドグリップ, 筋血流, 骨血流

Keyword

magnetic resonance imaging, arterial spin labeling, handgrip, skeletal muscle blood flow, bone blood flow

要旨

本研究の目的は、磁気共鳴画像法 (MRI) を用いて非侵襲的に活動肢の血流を画像化し、運動後の血流回復を測定することである。健康成人男性 20 名 (21 ± 1 歳) を対象とし、動脈スピラベリング (ASL) 法により右前腕近位部の血流マップを作成した。被験者は MRI のガントリー内で最大強度のハンドグリップ運動を 2 分間実施した。運動後の 20 分間の回復期間を設けた。MRI での撮像は運動前、収縮直後、運動 20 分後の計 3 回実施した。得られた画像を前腕全体、手関節屈筋群お

よび伸筋群に分けて ASL のシグナル強度を求め、2 次元の血流マップに時間の要因を合わせた 3 次元 (x, y-t) のデータを分析した。その結果、運動前の安静時と比較して前腕全体、手関節屈筋群および伸筋群の血流量は、2 分間の最大強度のハンドグリップ運動直後にそれぞれ 1.5 ± 0.2 倍、 2.6 ± 1.0 倍および 2.0 ± 0.6 倍に増加した (それぞれ $p < 0.05$)。20 分間の回復期により、屈筋群および伸筋群の血流量は安静時と同等の値まで回復した。尺骨の血流量は運動に伴う変化を認めなかった。運動前の安静時と比較して、橈骨の血流量はハンドグリップ運動直後に安静時と比べて低下し、20

分後には逆に有意な増加を認めた(それぞれ $p < 0.05$)。以上のことから、最大強度のハンドグリップ運動後の前腕の血流回復には不均一性が存在し、骨血流の増加と筋血流の回復が示された。

緒言

骨格筋の酸素需要は運動開始直後から劇的に増加する¹⁾。この酸素需要の増大に 대응するために、骨格筋の血流量は運動開始時に増加するが、酸素需要の増大に対して遅延する²⁾。この不足分の酸素は酸素借と呼ばれ、運動後のクールダウン時に返済される³⁾。特に、低強度と比べて高強度運動時においては酸素借が高く⁴⁾、運動後の安静によるクールダウン時(回復期)の酸素消費量は運動前の安静時($\dot{V}O_2 = 3.5 \text{ mL/kg/min}$)より高値となる²⁾。この活動筋への酸素輸送の決定因子は、心拍出量をはじめとした左室ポンプ機能に加えて、臓器内の毛細血管における赤血球数と赤血球移動速度、ならびにミトコンドリア機能が知られている。種々の病態モデル動物において、微小循環およびミトコンドリア機能の低下が報告されているが⁵⁻⁷⁾、ヒトでこれらを非侵襲的に評価する方法は現時点で存在していない。

Gliemannらの総説で述べられた通り、骨格筋血流の計測方法として複数報告されているが、それぞれ一長一短があり現時点で非侵襲的かつ高分解な方法は存在しない⁸⁾。最も一般的な血流評価法の一つに近赤外分光法(NIRS)による酸素化・脱酸素化ヘモグロビン計測が知られている。生体透過性の高い近赤外光を照射することで、光路の酸素動態に関する情報が得られるため、NIRSは非侵襲的かつ時間分解能の高い方法である。筋血流・酸素供給の指標としてNIRSが用いられているが⁹⁾、臨床現場で一般化していない。その理由として、NIRSは一過性の駆血を要すること⁹⁾、深層筋の情報が得られないこと、および皮膚血流の影響を受けることなどが考えられる¹⁰⁾。以

上のことから、筋機能低下の原因探索において、NIRS単独の情報では微小循環障害を判定に十分な可能性がある。

近年、磁気共鳴画像法(MRI)が脳などの血流測定に用いられている¹¹⁾。動脈スピラベリング(ASL)法は、血液中にある水素イオン(H^+)を磁化的にラベリングすることにより、血漿成分の90%を占める水分子そのものを内因性のトレーサーとして使用することで血流画像を得る方法である¹²⁾。造影CTやPET検査などと比較して、MRIは放射線被ばくやトレーサー血中投与による侵襲がなく、2次元の血流分布のイメージング(血流マッピング)が可能である。以上のことから、骨格筋血流を定量化するうえで、ASL法を用いることで、骨格筋の血流マップを作成できる可能性がある。そこで、本研究では健康成人男性を対象に、まず初めに、MRIのASL法を用いて健康成人男性の前腕の血流マップの妥当性について上腕駆血により検討した。次に、安静時、最大強度のハンドグリップ運動直後、および20分間の回復期の後にASL法による血流イメージングを実施し、骨格筋血流マップの時間的変化を明らかにした。

1. 方法

1.1 対象者の選定と倫理的配慮

実験内容について十分説明を行い、同意を得られた右利きの健康成人男性22名を対象とした。対象者の年齢は 21 ± 1 歳、身長 171 ± 5 cm、体重 66 ± 7 kg、右手の最大握力 41 ± 3 kg(mean \pm SD)であった。なお、本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、新潟医療福祉大学研究倫理委員会の承認を受けたうえで実施した(承認番号18221-190705)。

1.2 測定プロトコル

被験者は新潟医療福祉大学のメディカルイメー

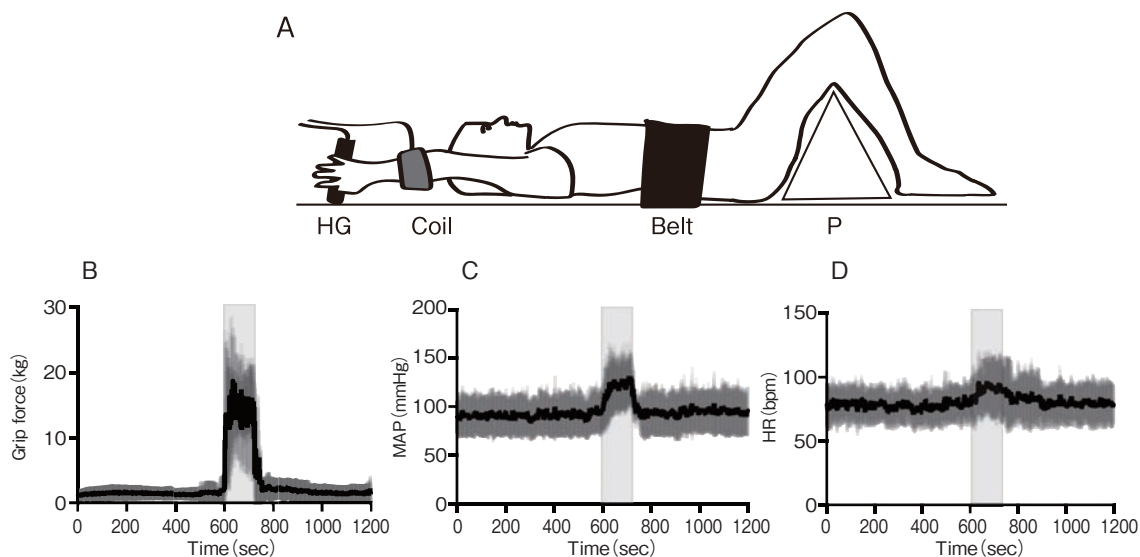


図1 ハンドグリップ運動時の被験者の姿勢(A), 握力(B), 平均血圧(C), および心拍数(D)

背臥位, 膝屈曲位とし, 右上肢を挙上してハンドグリップダイナモメーター(HG)を握った姿勢で計測した。4チャンネルコイル(Coil)は前腕近位部に装着し, ベルト(Belt)と枕(P)で体幹と下肢を固定した。ハンドグリップ運動は600秒に開始し720秒に終了した。

ジグセンターに来院した。実験室の環境として, 室温は24.0℃, 湿度30-50%に統制された環境とした。握力計(T.K.K.5001グリップ-A, 竹井機器工業株式会社)を用いて右の最大握力を立位, 上肢下垂位で2回測定した。2回のうち最高値を握力として定義した。続いて, 磁性体を一切身に付けていないことを確認したうえでMRI室に入室した。MRIガントリー内での姿勢は両膝関節屈曲位の背臥位とし, 右上肢を挙上した姿勢を保持した(図1A)。右肩関節屈曲150度, 右手関節掌屈15度とし(図1A), 被験者は右手に非磁性体のハンドグリップダイナモメーターを把持した。ASLによる前腕筋血流の妥当性を検証するための予備実験として, 2名の被験者を対象に, 上述の姿勢で上腕駆血前および200 mmHgで駆血中の2時点でASLの画像を取得した。駆血圧は2名の被験者の収縮期血圧(123, 126 mmHg)を超えていることを事前に確認した。次に, 本実験として20名の被験者を対象に, ASLの画像取得は, 10分間の安静時, 2分間の最大グリップ運動の終了直後, ならびに運動終了から20分間の安

静後の計3回実施した。撮像部位が変化しないよう, MRIガントリー内では被験者にハンドグリップ以外の体動を可能な限り避けるよう指示した。実験中はこちらが指示する運動以外の体動を避けるために, 体幹および下肢をベルトと枕で固定した(図1A)。

1. 3 ハンドグリップ運動

被験者は右手のグリップ運動を行った。グリップ運動の強度は本人が実施可能な最大強度とし, 収縮と弛緩のサイクルは1秒/1秒のサイクルとし, 2分間繰り返した。また, 被験者がハンドグリップ運動を実施していることを確認するために, 非磁性体のハンドグリップダイナモメーターを介して張力をモニタリングした。MRI室のスピーカーから1 Hzのピッチ音を流し, 被験者にはその音に合わせて収縮と弛緩を反復するよう指示した。こちらの指示通りにハンドグリップ運動が実施できない場合や, 被験者から休憩の要請があった場合には一度実験を中止し, 再び安静から開始した。

1. 4 ASL法による血流イメージング

前腕の血流イメージングは、3テスラのMRI装置 (Vantage Galan 3T, キヤノンメディカルシステムズ株式会社) に4チャンネルフレックスコイルを組み合わせて実施した。MRI装置の操作は、操作に習熟した2名の診療放射線技師が実施した。まず初めに、被験者の右前腕全体の冠状断面のT2強調画像を撮像して、肘関節の橈骨頭を撮像開始位置として決定した。この撮像開始位置は、全3回のASL画像取得において同じ位置で撮像するために用いた。次に、体軸断面のT2強調画像を橈骨頭から遠位方向に向かって5mm間隔で合計8スライス撮像した。T2強調画像は、血流マッピングで解剖学的な位置を同定するための参照として用いた。続いて、pulsed continuous ASLでH⁺を標識し、血流画像を3D fast spin echoで取得した。ASLの撮像条件として、post labeling delay 2600 msec, 撮像範囲は170×170mm, スライス厚は5mmとし合計8枚撮影した。

1. 5 画像解析方法

測定終了後、前腕の血流マッピング画像はDICOM形式でMRIから出力し、医療画像閲覧ソフトウェア (OsiriX MD 12.5.2, Pixmeo, Switzerland) で血流マップを示す画像を表示した。続いて、画像を1920×1080ピクセルの解像度でtiff形式に変換した。画像解析ソフトウェア (ImageJ, NIH) にtiff画像を取り込み、関心領域のピクセル強度を解析した。関心領域として、前腕全体、屈筋群 (橈側手根屈筋, 尺側手根屈筋, 浅指屈筋), 伸筋群 (長橈側手根伸筋, 短橈側手根伸筋, 尺側手根伸筋), 尺骨, および橈骨をそれぞれ関心領域として定義した。屈筋, 伸筋, 尺骨, および橈骨の解剖学的な位置を同定するために、ASLと同じ部位で撮像したT2強調画像を参照した。T2強調画像の屈筋群, 伸筋群, 尺骨, 橈骨はT2強調画像から明瞭に描出された。これらの

ランドマークを元に、ASL画像の画像解析の関心領域を設定した。ImageJを用いて関心領域のピクセル強度 (0-255) の平均値を算出した。合計8スライス分の血流画像のピクセル強度の平均値を算出した。本研究では、ピクセル強度から血流量の絶対値への換算を行わず、グリップ運動前の安静時の血流量からの相対的な変化率として算出し、解析値として用いた。

1. 6 循環応答

MRIの測定終了から48時間以上経過した後、被験者は新潟医療福祉大学運動生理学実験室を再訪し、ハンドグリップ時の循環応答および握力を同時計測した。実験室の環境として、室温は24.0℃, 湿度30-50%に統制された静音な環境とした。前述のMRIガントリー内の姿勢 (図1A) と同様に被験者はベッド上で背臥位となり、まず10分間の安静をとった後、右上肢挙上位で2分間の最大グリップ運動を実施し、運動後20分間の回復期を設けた。循環応答の指標として、平均血圧 (MAP) と心拍数 (HR) およびハンドグリップ発揮張力を実験中連続的に計測した。MAP計測には非侵襲的な連続指尖脈波容積測定器 (Finometer, FMS) を用いて、1心拍毎の血圧を連続的に計測し、平均血圧を算出した。HR計測には、非侵襲インピーダンス式心拍出量測定システム装置 (Physio Flow Q-Link, モンテシステム社) を用いた。ハンドグリップダイナモメーター (G200, Biometrics, VA, USA) を用いて、上述のMAPおよびHRと同時に握力をモニタリングした。サンプリング周波数は1000 Hzとし、MAPおよびHRは1秒毎の平均値を解析値として出力した。運動前の安静開始から9分30秒後、運動直後、および運動終の回復期開始から19分30秒後の時点から30秒間の平均値をそれぞれ算出し、後述の統計解析に用いた。なお、これらの解析区間を用いた理由は、MRIイメージングのタイミングと同期

させるためである。

1. 7 統計処理

ASL画像から得られた血流の相対変化、MAP、HRおよび握力について、GraphPad Prism Version 8を使用し、統計処理を行った。安静時、運動直後、20分間の回復期の時系列の変化を解析するために、フリードマンの検定を行った。時間要因に有意な主効果を認めた場合には、事後検定としてDunn法による多重比較を行った。有意水準はいずれも5%とした。得られた指標はすべて平均値±標準偏差で記載した。

2. 結果

予備実験において、上腕駆血前と駆血中に上述の撮像条件でASL画像を取得した結果、駆血前に認められた橈骨動脈および尺骨動脈の高輝度が駆血中に完全に消失したことを確認した。

ハンドグリップ運動時の握力(図1B)は、事前に計測された被験者の最大握力の50%程度であった。運動中および直後の平均血圧は安静時と比べて有意に高値を示した(図1C; 91 ± 20 vs. 121 ± 21 vs. 103 ± 26 mmHg; 運動前 vs. 運動直後 vs. 運動20分後; $p < 0.05$)。運動前の安静時と比較し運動直後の心拍数は増加傾向を示した(図1D; $p < 0.10$)。

前腕のT2強調画像およびASL画像の代表例を

図2に示す。T2強調画像(図2A)と安静時、ハンドグリップ運動直後、および安静20分後の血流マップ(図2B-D)をそれぞれ示す。安静時のASL画像をみると、前腕全体においてシグナル強度は低いが、T2強調画像で橈骨動脈および尺骨動脈に相当する位置において、他の領域と比べて高いシグナル強度が得られた(図2B)。一方で、最大グリップ運動直後に得られた画像をみると、T2強調画像において手関節屈筋群と伸筋群に相当する領域において、血流マップのシグナル強度の増加が認められた(図2C)。20分間の回復期後に得られた画像では、ほぼ運動前の安静時と同程度のシグナル強度へ回復していた(図2D)。

22名の被験者のうち、2名の被験者では明瞭な血流マップを得ることができなかったため、解析対象から除いた。明瞭な画像が得られた20名の被験者を解析対象とした。図3に安静時を1とした相対的な血流変化を示す。前腕全体(図3A)、手関節屈筋群(図3B)および伸筋群(図3C)それぞれの領域において、時間の要因に有意な主効果を認めた(それぞれ $p < 0.05$)。多重比較の結果、前腕全体の血流量は、安静時と比較して運動直後に有意に増加した($p < 0.05$, 図3A)。また、20分間の回復期の直後に得られた前腕全体の血流量をみると、安静時と同等の値まで回復した(図3A)。手関節屈筋群(図3B)および伸筋群(図3C)の血流量をみると、安静時と比べてグリップ

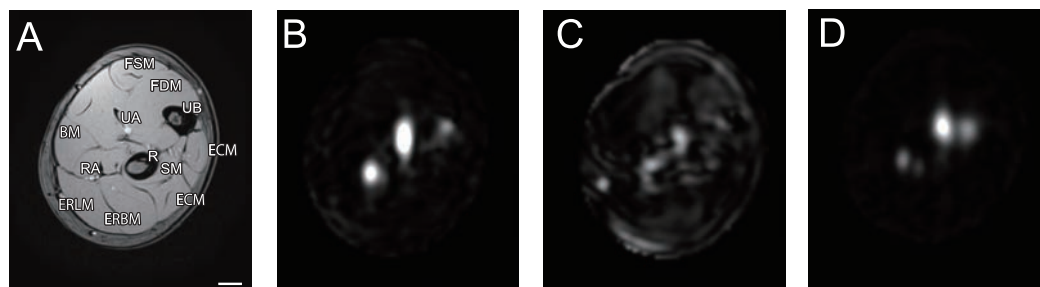


図2 前腕のT2強調画像(A)およびハンドグリップ前(B)、直後(C)、および20分後(D)に取得されたASL画像の代表例 BM, 腕橈骨筋; ECM, 尺側手根伸筋; EDM, 総指伸筋; ERBM, 短橈側手根伸筋; ERLM, 長橈側主根伸筋; FDM, 深手屈筋; FSM, 浅指屈筋; R, 橈骨; RA, 橈骨動脈; SM, 回外筋; UA, 尺骨動脈; UB, 尺骨. Scale bar 10mm

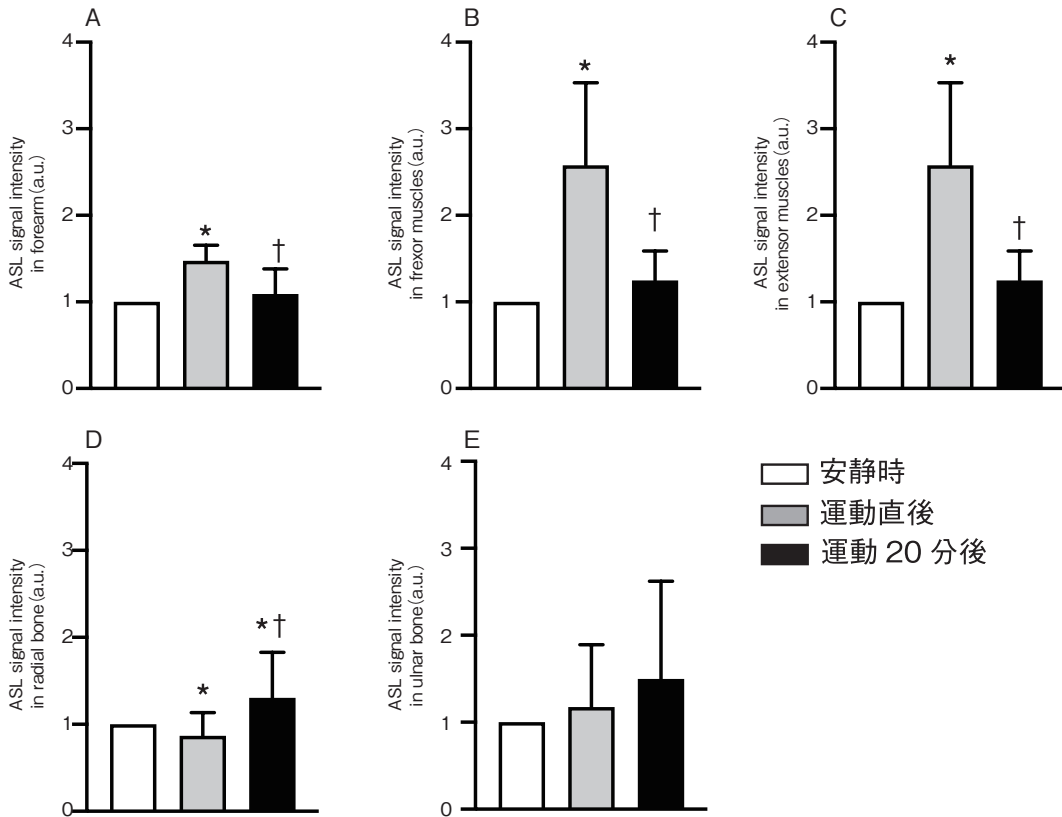


図3 ASLにより計測された前腕全体(A), 手屈筋群(B), 伸筋群(C), 橈骨(D) および尺骨(E) の血流
* $p < 0.05$ vs. 安静時 . † $p < 0.05$ vs. 運動直後

ブ運動直後に有意に増加し (それぞれ $p < 0.05$), 20分間の回復期の後には安静時と同等まで回復した. 尺骨の血流量は, 運動による変化を認めなかったが (図3E), 橈骨の血流量は運動直後で有意に減少し, 逆に回復期の後には有意な増加を認めた (図3D; それぞれ $p < 0.05$).

3. 考 察

本研究は健康成人男性を対象に, 3テスラ MRI を用いた筋血流の計測を試みた. 高い空間的分解能を活かしたASL法を用いることで, 前腕の血流のマッピングを試みた. ASL法は血液中の H^+ を磁化的に標識することで画像取得を行っている. その為, 血流が多い部分では標識された H^+ が多く存在しており, シグナル強度が高値を示す. 一方で, 血流に乏しい部分ではシグナル強度は低

値を示す. この技術を用いて, 高強度のグリップ運動時, 運動直後および20分間の回復期後に前腕の血流変化を計測した. ASL法により得られた安静時のシグナル強度をみても, 橈骨動脈および尺骨動脈と思われる部位において高強度であったのに対し, 上腕駆血時には輝度が完全に消失した. また, 骨格筋および骨ではシグナル低強度であった. 橈骨動脈と尺骨動脈を含めた導管動脈においては, 血管径約2 mmの血管に毎分約20 mLの血流が存在している^{13, 14}. 一方で, 安静時の骨格筋に対する血流量は低く抑えられている. 本研究の予備実験で得られた駆血時の動脈内シグナルの消失, ならびに臓器毎のシグナル強度の不均一性は生理学的に妥当であり, 臓器毎の血流量を反映していると考えられる. 以上のことから, 本研究で実施したASL法と得られた血流マップ

は、健常成人男性の前腕における血流応答を反映していると考えられた。

運動時の筋血流については、安静時と比べて運動時に急増することがよく知られている。Behnkeらは、放射性マイクロスフィアを用いて中等度のトレッドミル歩行中のラット腓腹筋赤筋線維の血流量を計測した。その結果、安静時と比べて運動時にラット筋血流量は7-8倍に増加すること報告した¹⁵⁾。本研究においても、ASL法により血流マップを作成し、前腕全体の血流量を計測した結果、安静時と比べて平均1.48倍の増加を認めた。特に、手関節屈筋群および伸筋群においては、安静時と比べて平均2.6および2.0倍にそれぞれ増加していた。トレッドミル歩行のような全身運動は心拍出量の顕著な上昇を伴うため、筋血流の増加応答も顕著である¹⁵⁾。一方で、本研究のような局所の運動では大きな心拍出量の増加は生じない。以上のことから、ASL法による血流マップは健常成人男性で局所の運動に伴い血流変化を捉えることができると思われた。

反復するグリップ運動中の上腕動脈血流に関する先行研究をみると、律動的なグリップ運動では収縮と弛緩を繰り返すことで上腕動脈血流は増加することが示されている¹⁶⁾。プレチスモグラフィを使用した前腕血流測定においても、前腕血流の増加が報告されている¹⁷⁾。また、運動後の血流量が安静時の値に戻るには5分以上の時間がかかることも報告されている¹⁸⁾。本研究において運動後20分間の安静により、運動前の血流量に回復した。このような局所の循環動態が変動している一方で、HRは変化を認めなかった。過去の研究においても、背臥位のグリップ運動によるHRおよび心拍出量の変化は生じないことが報告されており¹⁹⁾、本研究の結果はこれを支持している。また、ハンドグリップ運動時の血圧上昇が報告されており、特に高強度の運動時に生ずる¹⁹⁾。本研究においても同様に、高強度のハン

ドグリップ運動時にMAP上昇が認められた。血圧は心拍出量と全身血管抵抗の2つで決定される。心拍出量が変わらないと仮定した場合、ハンドグリップ運動時に全身血管抵抗が上昇したことが血圧上昇の要因と考えられる。ハンドグリップ時に上腕動脈の血管コンダクタンスが増加することが報告されており、血圧上昇には活動肢以外の動脈の血管抵抗が増加していると思われる¹⁹⁾。このような全身の血管抵抗の調節が、本研究で観察された骨格筋の血流増加に関与しているだろう。

本研究では、ASLを用いた血流イメージングにより、骨血流を評価した。骨組織は骨格筋と同様に血管が密に分布する臓器である。Draghiciらは、等尺性のハンドグリップ時の下腿脛骨の酸素動態を近赤外分光法によって計測した²⁰⁾。脛骨の脱酸素化ヘモグロビンは不変であったが、持続的ハンドグリップ運動中に酸素化ヘモグロビンが減少したことから、脛骨血流の減少が考えられた²⁰⁾。本研究においても、橈骨血流の減少を確認したことから、過去の研究を支持する結果である。ただし、Draghiciらは非活動肢である下腿骨の酸素動態を評価しているのに対し、我々は活動肢である前腕の骨血流を評価している。活動肢の骨血流をPETを用いて計測した過去の研究においては、片脚の動的運動時の大腿骨血流の増加を報告した²¹⁾。興味深いことに、高強度の下肢運動時には大腿骨血流の増加を認めなかった²¹⁾。したがって、運動時の骨血流には運動強度が影響する可能性が考えられた。我々の報告では、最大努力の筋収縮時に橈骨血流の有意な減少を認めた。この背景には運動時に筋へ血流を再配分するために、骨の細動脈の血管抵抗を増やすような機序が考えられるが²²⁾、詳細は不明である。動物実験では、大腿骨と脛骨の皮質骨と比較して骨髄の血流が潤沢であることが示されている^{23, 24)}。本研究では詳細を示していないが、骨髄領域のシグナルを反映している可能性がある。Stanbleyらは、

ラットの後肢の骨血流を計測した。その結果、ラット大腿骨および脛骨の血流が増加することを示したが、特に骨髄の血流が増加することを明らかにした²³⁾。一方で近位部あるいは遠位部の骨端部血流は運動による変化を認めないことが報告されている。本研究では、橈骨および尺骨の近位部をMRIで撮像していることから、尺骨血流に変化を認めなかった理由の一つには部位の影響が考えられた。

最後にMRIとASLを利用した血流測定の実臨床応用と限界について考える。従来の血流測定と比較して空間的分解能が高く、測定部位の血流をマッピングできるため血流障害の生じている部位の特定に有用であると考えられる。また、非侵襲的であり、対象者への負担も少ないため、臨床応用に繋がる可能性がある。例えば、2型糖尿病や末梢動脈疾患で生ずる骨格筋血流低下について、非侵襲的に捉えることが可能と考えられる。運動耐容能の低下の原因検索をするうえで、運動時の血流応答は重要な要因と考えられる。ASLによる血流マップの作成は、運動耐容能の低下の原因探索として、血流低下の寄与やどの筋で顕著な血流低下を生じているのかを明らかにするうえで有用なツールと考えられる。

4. 結 語

本研究結果から、ハンドグリップ運動によって増加した前腕の筋血流は、運動後の回復期に減少し、運動後20分で運動前と同等のレベルまで回復することがわかった。この応答は手関節屈筋群と伸筋群の両方で生じていた。以上のことから、MRIのASL技術を使用した前腕の血流測定が可能であることが明らかとなった。MRIの非侵襲的な特徴から、血流障害などの疾患に対する臨床応用も期待できるのではないかと考える。

謝 辞

本研究に際し、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。さらにMRIの撮像にご協力頂いた新潟医療福祉大学医療技術学部診療放射線学科の櫻井典子先生、山梨大学医学部附属病院の市川美華先生に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Mahler M. First-order kinetics of muscle oxygen consumption, and an equivalent proportionality between $\dot{V}O_2$ and phosphorylcreatine level. Implications for the control of respiration. *J. Gen. Physiol.* **86** (1) :135-65(1985)
- 2) Poole D.C., Jones A.M. Oxygen uptake kinetics. *Compr. Physiol.* **2** (2) :933-96(2012)
- 3) Margaria R., Cerretelli P., Diprampero P.E., Massari C., Torelli G. Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. *J. Appl. Physiol.* **18**:371-7 (1963)
- 4) Wilkerson D.P., Koppo K., Barstow T.J., Jones A.M. Effect of work rate on the functional 'gain' of Phase II pulmonary O_2 uptake response to exercise. *Respir. Physiol. Neurobiol.* **142** (2-3) :211-23(2004)
- 5) Schulze K.M., Weber R.E., Horn A.G., Colburn T.D., Ade C.J., Poole D.C., et al. Effects of pulmonary hypertension on microcirculatory hemodynamics in rat skeletal muscle. *Microvasc Res.* **141**:104334(2022)
- 6) Richardson T.E., Kindig C.A., Musch T.I., Poole D.C. Effects of chronic heart failure on skeletal muscle capillary hemodynamics at rest and during contractions. *J. Appl. Physiol.* (1985). **95** (3) :1055-62(2003)
- 7) Kumar A.A., Kelly D.P., Chirinos J.A. Mitochondrial Dysfunction in Heart Failure With Preserved Ejection Fraction. *Circulation.* **139** (11) :1435-50(2019)
- 8) Gliemann L., Mortensen S.P., Hellsten Y. Methods for the determination of skeletal muscle blood flow: development, strengths and limitations. *European Journal of Applied Physiology.* **118** (6) :1081-94 (2018)

- 9) Homma S., Eda H., Ogasawara S., Kagaya A. Near-infrared estimation of O₂ supply and consumption in forearm muscles working at varying intensity. *J. Appl. Physiol (1985)*. **80** (4) :1279-84(1996)
- 10) Davis S.L., Fadel P.J., Cui J., Thomas G.D., Crandall C.G. Skin blood flow influences near-infrared spectroscopy-derived measurements of tissue oxygenation during heat stress. *J. Appl. Physiol (1985)*. **100** (1) :221-4(2006)
- 11) Logothetis N.K. What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature*. **453** (7197) :869-78 (2008)
- 12) Wang J., Licht D.J. Pediatric perfusion MR imaging using arterial spin labeling. *Neuroimaging Clin. N. Am.* **16** (1) :149-67, ix(2006)
- 13) Tucker W.J., Rosenberry R., Trojacek D., Sanchez B., Bentley R.F., Haykowsky M.J., et al. Near-infrared diffuse correlation spectroscopy tracks changes in oxygen delivery and utilization during exercise with and without isolated arterial compression. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. **318** (1) :R81-R8(2020)
- 14) Kim S.Y., Lee J.S., Kim W.O., Sun J.M., Kwon M.K., Kil H.K. Evaluation of radial and ulnar blood flow after radial artery cannulation with 20- and 22-gauge cannulae using duplex Doppler ultrasound. *Anaesthesia*. **67** (10) :1138-45(2012)
- 15) Behnke B.J., Ramsey M.W., Stabley J.N., Dominguez J.M., 2nd, Davis R.T., 3rd, McCullough D.J., et al. Effects of aging and exercise training on skeletal muscle blood flow and resistance artery morphology. *J. Appl. Physiol (1985)*. **113** (11) :1699-708(2012)
- 16) Cook M., Smart N.A., Van der Touw T. Predicting blood flow responses to rhythmic handgrip exercise from one second isometric contractions. *Physiol. Res*. **65** (4) :581-9(2016)
- 17) Sartori T.E., Nunes R.A., da Silva G.T., da Silva S.C., Rondon M.U., Negrao C.E., et al. Influence of demographic and metabolic variables on forearm blood flow and vascular conductance in individuals without overt heart disease. *Vasc. Health Risk Manag.* **6**:431-7(2010)
- 18) Bystrom S.E., Kilbom A. Physiological response in the forearm during and after isometric intermittent handgrip. *Eur J. Appl. Physiol Occup Physiol*. **60** (6) :457-66(1990)
- 19) Ratchford S.M., Clifton H.L., La Salle D.T., Broxterman R.M., Lee J.F., Ryan J.J., et al. Cardiovascular responses to rhythmic handgrip exercise in heart failure with preserved ejection fraction. *J. Appl. Physiol (1985)*. **129** (6) :1267-76 (2020)
- 20) Draghici A.E., Taylor J.A. Mechanisms of bone blood flow regulation in humans. *J. Appl. Physiol (1985)*. **130** (3) :772-80(2021)
- 21) Heinonen I., Kempainen J., Kaskinoro K., Langberg H., Knuuti J., Boushel R., et al. Bone blood flow and metabolism in humans: effect of muscular exercise and other physiological perturbations. *J. Bone Miner Res*. **28** (5) :1068-74 (2013)
- 22) Noh S., Lee S., Green S., Prisby R. Myogenic autoregulation in bone marrow arterioles and in vivo intramedullary pressure in femora of conscious, female Long Evans rats. *Microcirculation*. **28** (7) (2021)
- 23) Stabley J.N., Moningga N.C., Behnke B.J., Delp M.D. Exercise training augments regional bone and marrow blood flow during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc*. **46** (11) :2107-12(2014)
- 24) Tondevold E., Bulow J. Bone blood flow in conscious dogs at rest and during exercise. *Acta. Orthop. Scand*. **54** (1) :53-7(1983)

屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱が 身体冷却リカバリ一時の体温動態に及ぼす影響

北海学園大学 内藤 貴司
(共同研究者) 福山市立大学 林 聡太郎
鳥取大学 斎藤 辰哉
久留米大学 大橋 充典
姫路獨協大学 大谷 秀憲

The effects of High Solar Radiation during Exercise on Body Temperature Responses during Body Cooling Recovery in Hot Outdoor Environments

by

Takashi Naito
Hokkai-Gakuen University
Sotaro Hayashi
Fukuyama City University
Tatsuya Saito
Tottori University
Mitsunori Ohhashi
Kurume University
Hidenori Otani
Himeji Dokkyo University

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effect of body cooling with the fan cooling jacket on body temperature responses during recovery after exercise when exposed to high solar radiation in an outdoor hot environment. Nine healthy male

subjects cycled using ergometer until their rectal temperature increased to 38.5°C in hot outdoor environments (31-35°C, 48-65% relative humidity, and 950-1150 W/m² solar radiation), followed by body cooling recovery in warm indoor environments (28-31°C room temperature and 50-60% relative humidity). Subjects repeatedly performed the cycling exercise protocol, which consisted of one set of 5 min at a load of 1.5 watt/kg body weight and 15 min at a load of 2.0 watt/kg body weight at 60 rpm. Body cooling recovery consisted of cold water ingestion (10°C : CON) or cold water ingestion + the use of the fan cooling jacket (FAN) in random order until the rectal temperature decreased to 37.75°C. The time for the rectal temperature to reach 38.5°C did not differ between the two trials. The rate of decrease in rectal temperature at recovery tended to be higher in FAN trial than in CON trial (P = 0.082). The rate of decrease in ear canal temperature was higher in FAN trials than in CON trials (P = 0.002). The rate of decrease in mean skin temperature at the first 20 min of recovery was higher in FAN than in CON trial (P = 0.013). Body cooling recovery with the fan cooling jacket in addition to cold water ingestion may be effective in reducing elevated ear canal and skin temperatures during exercise in the heat under a clear sky, but may be difficult to decrease rectal temperature.

キーワード

送風冷却, 晴天, 直腸温, 外耳道温, 高体温

Keyword

fan cooling condition, clear sky, rectal temperature, ear canal temperature, hyperthermia

要 旨

本研究の目的は屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、ファン付きジャケットによる身体冷却がリカバリー時の体温動態に及ぼす影響を検討することであった。健康男性9名が気温31-35°C、相対湿度48-65%、日射量950-1150 W/m²の環境下で直腸温が38.5°Cに上昇するまで自転車運動を行い、その後室温28-31°C、相対湿度50-60%の環境下で身体冷却リカバリーを実施した。自転車運動のプロトコルは回転数60 rpmで体重1 kg当たり1.5 wattの負荷で5分、2.0 wattの負荷で15分を1セットとし、これを反復した。身

体冷却リカバリーは冷水摂取(10°C : CON)もしくは冷水摂取+ファン付きジャケット(FAN)をランダムな順で用い、直腸温が37.75°Cに低下するまで実施した。リカバリー時の直腸温における1分毎の低下率は、FAN試行がCON試行よりも高い傾向にあった。外耳道温における低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高く、平均皮膚温では冷却開始20分間の低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高かった。冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーは、運動中の高輻射熱によって上昇した外耳道温や平均皮膚温を低下させるのには有効であるが、直腸温の低下を導くのは難しいかもしれない。

緒 言

暑さを決定する要因は、気温や湿度に加えて屋外では気流や日射量（以下：輻射熱）がある。日本スポーツ協会¹⁾は湿球黒球温度（Wet-Bulb Globe Temperature, 以下：WBGT）を暑さ指数として発表しており、WBGTは「WBGT (°C) = 0.7 × 湿球温度（湿度の指標）+ 0.2 × 黒球温度（輻射熱の指標）+ 0.1 × 乾球温度（気温）」で算出されている。この公式から輻射熱は気温よりも係数が2倍あり、暑さを決める重要な要因の一つと考えられるが、屋外で輻射熱の要因を含んだ検討はあまりなされてこなかった。

これまでに運動中の高輻射熱は深部体温の上昇に加えて皮膚温の上昇も惹起し、持久性運動能力の低下を明らかにしている^{2,3)}。過度な皮膚温の上昇は深部体温との温度較差を狭くするため、熱が体外へ逃げづらくなり、運動終了後も高体温が維持される⁴⁾。運動後に体温低下のリカバリーを行わずに、過度な体温上昇を放置しておくこと熱中症を誘発する可能性もある。したがって、高輻射熱を含む暑熱環境下での運動後はそれを抑えるための暑熱対策を講じる必要があり、その方法の一つに身体冷却がある。

運動後の身体冷却リカバリーにおいて、体温低下の観点から最も有用な方法は冷水浸水である⁵⁾。冷水浸水は急速に深部体温および皮膚温を冷却でき、多くのシステムティックレビューにおいて冷却効果が明らかにされている。しかし、この方法には多量の冷水や氷が必要であり、大規模な大会以外での使用は難しい。一般のスポーツ愛好家では、簡便な方法である冷水摂取が広く用いられている。この方法は深部体温の低下には有効であるが、皮膚温の低下への影響は小さいことが示されている⁶⁾。そこで本研究では、高輻射熱を伴う運動後の身体冷却リカバリーでは冷水摂取による体内冷却に加えて、簡便に皮膚温を低下させ

る送風による体外冷却を組み合わせる方法を考えてきた。送風冷却は気流によって蒸発性熱放散を促進し、深部体温や皮膚温の上昇を抑制する有効な方略と示されている⁷⁾。近年は、背部にファンが搭載された外気通風式の衣服（以下：ファン付きジャケット）が市販され、生涯スポーツ分野においても簡便に送風冷却を取り入れることができる。ファン付きジャケットの運動中や運動間の使用は鼓膜温や平均皮膚温の上昇を抑制すると報告されている^{8,9)}。しかし、高体温からのリカバリーでは検討されておらず、高輻射熱下での運動によって過度に上昇した深部体温や皮膚温をより急速に低下させるかは不明である。

本研究の目的は、屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却がリカバリー時の体温動態に及ぼす影響を検討することであった。

1. 方 法

1. 1 被験者

被験者は、健康男性9名（年齢 = 21 ± 1 歳, 身長 = 1.709 ± 0.045 m, 体重 = 64.73 ± 6.38 kg）であった。彼らはアスリートでは無かったが、日常的に運動習慣のある被験者であった。また、いずれの被験者も常用薬を服用しておらず、何ら心臓血管系及び呼吸器系の疾病歴を有していなかった。彼らには本研究の目的、方法、危険性等を十分に説明し、被験者全員から実験に参加することに同意を得た。本研究は、福山市立大学（承認番号：2021003）および久留米大学研究倫理審査委員会（承認番号：2021429）の承認を得て実施した。

1. 2 実験デザイン

本研究では、屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、リカバリー時のファン付きジャケットの着用が種々の体温関連項目の低下に寄与するか否かを検討するため、ランダム化比較

試験を行った。全ての被験者は、運動後のリカバリー時において1) 冷水 (10℃) を摂取する試行 (CON) と2) 冷水に加えてファン付きジャケットを着用する試行 (FAN) の2試行を行った。

1. 3 実験プロトコル

本実験は各試行4日以上の間隔をあげ、ランダムで実施した。また、全ての実験は体温調節応答に対する太陽高度角¹⁰⁾と日内変動を考慮し、8月中の午前10時から開始された。各被験者は実験前日より激しい運動やアルコール、カフェイン等の栄養サプリメント摂取が制限された。彼らは実験の2時間前に500 mLの水分を摂取し、それ以降は絶食をした。実験室 (25℃, 相対湿度50%) に到着し30分以上安静後、半袖シャツ、短パンと運動靴 (総重量は約1.3 kgであり、衣服面積比 (着衣と裸体の体表面積比率) は1.12, 衣服熱抵抗は $0.063 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ または 0.405 clo , 衣服蒸発性熱抵抗は $0.010 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$) に着替えた¹¹⁾。採尿、身長および体重を測定した後、測定器具を装着した。その後被験者は屋外暑熱下 (表1) に移動し、太陽に向かって方位角 (太陽に対する身体の向き) を0°に設定された自転車エルゴメーターの上で5分間の安静をとった¹²⁾。自転車運動は回転数を60 rpmとし、体重1 kg当たり

1.5 kpの強度で5分、2.0 kpの強度で15分を1セットとし、直腸温が38.50℃に到達するまでセットを反復した。試験中に半径100 m以内に太陽光を遮るものはなかった。運動終了後、日陰を想定した屋内温暖環境下 (表1) に移動し、リカバリーとして座位安静にて直腸温が37.75℃に達するまで身体冷却介入を行なった。リカバリー終了後は汗を十分拭き取り、体重測定および採尿を行った。

1. 4 身体冷却介入

冷水摂取は10℃の市販のスポーツ飲料 (Aquarius, 日本コカ・コーラ社製) を用い、体重1 kg当たり2.0 gの量を10分毎に摂取した。ファン付きジャケットは先行研究において使用された市販のジャケット (エアコンディショニングウェア, アシックス社製) を用いた。このジャケットはポリエステル (100%) でできており、背中下部にある2つの小型ファンから外気を取り込み、袖口および頸部から排気する仕組みである。FAN試行においてジャケットは運動終了後半袖シャツの上から着用された。

1. 5 測定項目

尿比重は実験前後に採尿を行い、デジタル尿比重屈折計 (PAL-09S, アタゴ社製) を用いて測

表1 Body heat gain from the sun (SHG), heat loss, the projected area and environmental conditions at the end of exercise in outdoor and during recovery period in indoor

	Outdoor (Exercise)		Indoor (Recovery)	
	CON	FAN	CON	FAN
SHG (W/m ²)	93.6 ± 17.8	102.4 ± 19.8		
Dry heat loss (W/m ²)	-81.6 ± 23.5	-82.8 ± 19.1		
Evaporative heat loss (W/m ²)	179.9 ± 29.3	182.4 ± 34.8		
Total heat loss (W/m ²)	98.5 ± 38.3	99.5 ± 43.1		
Project area (%)	22.4 ± 1.4	22.6 ± 1.3		
Global solar radiation (W/m ²)	1101 ± 40	1107 ± 22		
Mean radiant temperature (℃)	67.9 ± 6.8	68.5 ± 5.5		
Ambient temperature (℃)	32.9 ± 1.8	33.1 ± 1.8	30.0 ± 1.7	30.1 ± 1.8
Relative humidity (%)	50.0 ± 8.0	49.9 ± 8.1	57.6 ± 6.9	57.2 ± 7.1
Air velocity (m/sec)	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1
WBGT (℃)	30.0 ± 0.9	30.2 ± 1.0	26.6 ± 0.7	26.6 ± 0.8

Values are means ± SD. CON, no-cooling condition, FAN, wearing fan cooling jacket, WBGT, wet-buld globe temperature
*CON vs. FAN (P < 0.05)

定した。体重は、市販の体重計 (BC-316, タニタ社製) を使用した。直腸温は、潤滑剤を塗ったサーミスタカテーテル (ITP010-11: 日機装サーモ社製) を直腸内に 15 cm 挿入した。上腕部, 胸部, 大腿部および下腿部の 4 点にボタン型温度記録計 (ITP082-24: 日機装サーモ社製) を装着し, その上をサージカルテープで覆った。外耳道温は耳栓型サーミスタ温度プローブ (400EP23: 日機装サーモ社製) を用いて測定した。心拍数は無線式携帯型心拍計 (H-10, Polar 社製) を胸部に装着し, 30 秒毎に記録した。温熱感覚は 9 段階スケール¹³⁾ で 5 分毎に記録した。主観的運動強度 (Rating of perceived exertion: RPE) は Borg (1982)¹⁴⁾ の 15 段階スケールを用いて 5 分毎に記録した。

1. 6 算出項目

本研究では熱吸収量や熱放散量を算出するため, 下記の公式を用いた。

日射による熱吸収量 (W) = 体表照射面積 × 皮膚の日射吸収率 × $\frac{\text{全天日射量}}{\sin \text{日射角度}} - \frac{\text{散乱日射量}}{2 \sin \text{日射角度}}$ + 有効放射面積 (体表面積 - 着衣面積) × 皮膚の日射吸収率 × $\frac{\text{散乱日射量}}{2}$ ¹⁵⁾

有効放射面積は座位のため 0.7 とした¹⁶⁾。着衣面積は体表面積の 14% と仮定した¹²⁾。

体表照射面積 (nr^2) = $0.043 \sin \text{日射角度} + 2.997 \cos \text{日射角度} \sqrt{0.02133 \cos^2 \text{方位角} + 0.0091 \sin^2 \text{方位角}}$ ¹²⁾

体表面積 = $0.202 \text{体重} \times 0.425 \times \text{身長} \text{ (m)}^{0.725}$ ¹⁷⁾

対流移動係数 = $8.3 \times \text{風速} \text{ (m/sec)}^{0.6}$ ¹⁶⁾

放射熱移動係数 = 4×0.95 ¹⁵⁾ × ステファン-ボルツマン定数 × 有効放射面積 ($237.2 + (\text{平均衣服表面温} + \text{平均放射温}) / 2$)³¹⁶⁾

ステファン-ボルツマン定数は 5.67×10^{-8} とした。平均衣服表面温は iteration 法で算出した¹⁶⁾。

平均放射温 (°C) = $[(\text{黒球温} + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times \text{風速}^{0.6} (\text{黒球温} - \text{気温})]^{0.25} - 273$ ¹⁸⁾

乾性熱移動係数 = 対流熱移動係数 + 放射熱移動係数¹⁶⁾

非蒸発性熱放散量 = $(\text{平均皮膚温} - \text{作用温度}) / (\text{衣服性熱抵抗} + (1 / \text{衣服面積比} + \text{乾性熱移動係数}))$ ¹⁶⁾

作用温度 = $(\text{放射熱移動係数} \times \text{平均放射温} + \text{対流の移動係数} \times \text{気温}) / (\text{放射熱移動係数} + \text{対流熱移動係数})$ ¹⁶⁾

蒸発性熱移動係数 = $16.5 \times \text{対流熱移動係数}$ ¹⁶⁾

蒸発性熱放散量 = $(\text{皮膚の濡れ率} (\text{皮膚の水蒸気圧} - \text{空気の飽和水蒸気圧})) / (\text{衣服蒸発性熱抵抗} + (1 / \text{衣服面積比} \times \text{蒸発性熱移動係数}))$ ¹⁶⁾

飽和水蒸気圧 = $0.1 \exp (18.956 - 4030.18 / (\text{乾球温度} + 235))$ ¹⁶⁾

空気の水蒸気圧 = 飽和水蒸気圧 × 相対湿度¹⁶⁾

総熱放散量 = 非蒸発性熱放散量 + 蒸発性熱放散量¹⁶⁾

加えて平均皮膚温, 直腸温および各体温の冷却率, 総発汗量を算出するために, 下記の公式を用いた。

平均皮膚温 (°C) = $0.3 \times \text{胸部皮膚温} + 0.3 \times \text{上腕部皮膚温} + 0.2 \times \text{大腿部皮膚温} + 0.2 \times \text{下腿部皮膚温}$ ¹⁹⁾

直腸温の冷却率 (°C / min) = $(\text{運動終了時の直腸温} - 37.75^\circ\text{C}) / \text{時間} \text{ (分)}$

各体温の冷却率 (°C / min) = $(\text{運動終了時の温度} - \text{リカバリー終了時の温度}) / \text{直腸温冷却率の時間} \text{ (分)}$

各体温の前半 20 分の冷却率 (°C / min) = $(\text{運動終了時の温度} - \text{リカバリー終了時の温度}) / 20$

総発汗量 (kg) = 運動後の体重 - 運動前の体重 - 飲水量

1. 7 統計処理

結果は, 全て平均値 ± 標準偏差値で示した。全ての統計処理は, SPSS のバージョン 28 (Statistical package for social science: IBM 社製) を用いて行った。データの正規性と試行間の等分散性は, それぞれ Shapiro-Wilk の検定と Levene の検定を用

いて検定した。Shapiro-Wilkの検定またはLeveneの検定の結果が有意水準より低い場合、データはノンパラメトリック検定を使用して分析された。ノンパラメトリックデータ(主観的指標)は、Friedmanの二元配置分散分析を用いて分析した。有意差が認められた場合および環境データは、Wilcoxonの符号付順位検定を用いて比較した。運動前後の体重および尿比重、体温や心拍数などの生理学的指標は繰り返しのある2要因(試行×時間)分散分析(Two-way repeated ANOVA)を用いた。有意な交互作用が認められた場合および運動時間、直腸温や各体温の冷却率、総発汗量は対応のあるt検定によって比較した。多重比較検定にはBonferroni法を用いた。

2. 結果

運動時間はCON試行で36分42秒±12分31秒、FAN試行で34分34秒±13分29秒で有意な差は

なかった($P = 0.677$)。リカバリー時における冷却時間はCON試行で43分54秒±5分43秒、FAN試行で40分02秒±10分53秒で有意な差はなかった($P = 0.145$)。

2. 1 環境条件

各試行の運動およびリカバリー時の環境条件は表1に示した。環境条件指標、日射による熱吸収および熱放散において2試行間で有意な差は認められなかった。

2. 2 体温調節指標

各試行の運動終了時における直腸温、外耳道温および平均皮膚温に有意な差は認められなかった。リカバリー時における直腸温は2試行間で有意な差は認められなかった(図1A)。一方で、外耳道温はリカバリー開始10-20分目(図1B)、平均皮膚温は15および20分目でFAN試行がCON

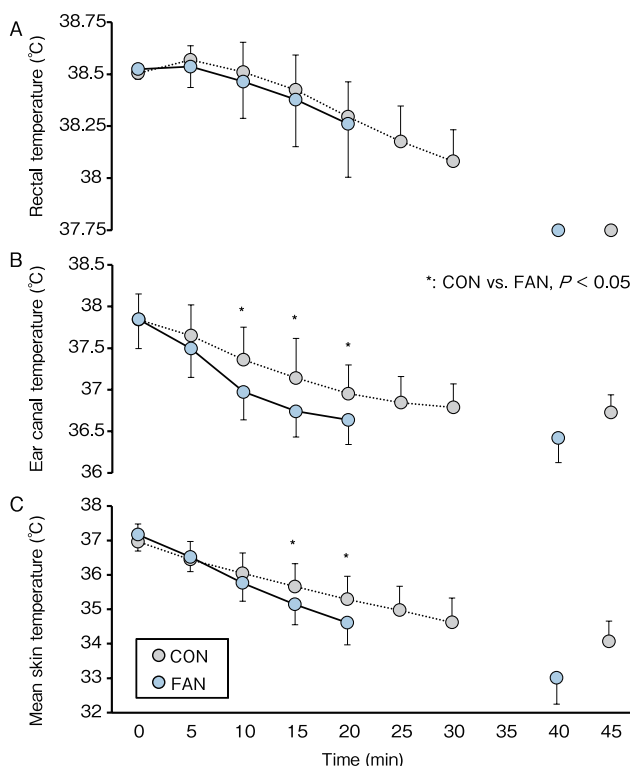


図1 The rectal (A), ear canal (B), and mean skin temperatures (C) during recovery period

試行よりも有意に低い値を示した ((図1C; $P < 0.05$)).

2. 3 各体温の冷却率

リカバリー時における直腸温, 外耳道温および平均皮膚温の冷却率は表2に示した. リカバリー時における直腸温の低下率はFAN試行がCON試行よりも高い傾向があった ($P = 0.082$) が, 前半20分の冷却率は2試行間で有意な差はなかった. 外耳道温の低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高く ($P = 0.001$), 前半20分の冷却率も同様であった ($P = 0.002$). 平均皮膚温の低下率は2試行間で有意な差はなかったが, 前半20分の冷却率FAN試行がCON試行よりも有意に高かった ($P = 0.013$).

2. 4 体水分状態

各試行における運動前後の体重および尿比重には, 有意な差はなかった. リカバリー中の飲料摂取量, 脱水率および総発汗量も2試行間で差は認められなかった (表3).

2. 5 主観的指標

各試行の運動終了時における温熱感覚および主観的運動強度に有意な差は認められなかった. 温熱感覚は, リカバリー開始5-20分目においてFAN試行がCON試行よりも有意に低い値を示した (図2A; $P < 0.05$). 主観的運動強度は, リカバリー開始10-15分目においてFAN試行がCON試行よりも有意に低い値を示した (図2B; $P < 0.05$).

2. 6 心拍数

各試行におけるリカバリー時の心拍数は, 2試行間で有意な差は認められなかった.

3. 考 察

本研究の主な知見は, 屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後, 冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却はリカバリー時の①直腸温の冷却率を高める傾向にあったが, 着用しない場合と有意な差はなかった. 一方で, ②外耳道温および平均皮膚温の冷却率を向上させた. 加えて, ③主観的指標はファン付きジャケット

表2 Cooling rate in each body temperature variable during recovery period

		Time to achieve Tre of 37.75°C	First 20 min of recovery period
Rectal temperature (°C/min)	CON	0.017 ± 0.002	0.010 ± 0.003
	FAN	0.021 ± 0.005	0.013 ± 0.004
Ear canal temperature (°C/min)	CON	0.024 ± 0.010	0.044 ± 0.017
	FAN	0.037 ± 0.013*	0.060 ± 0.014*
Mean skin temperature (°C/min)	CON	0.061 ± 0.014	0.084 ± 0.033
	FAN	0.170 ± 0.193	0.128 ± 0.033*

Values are means ± SD. CON, no-cooling condition, FAN, wearing fan cooling jacket, Tre, rectal temperature

*CON vs. FAN ($P < 0.05$)

表3 Body composition during experimental trials

		CON	FAN
Body mass (kg)	PRE	64.73 ± 6.5	65.01 ± 6.1
	POST	64.14 ± 6.3	64.44 ± 6.0
Urine specific gravity	PRE	1.018 ± 0.009	1.023 ± 0.009
	POST	1.025 ± 0.009	1.024 ± 0.006
Ingestion volume (kg)		0.532 ± 0.101	0.508 ± 0.143
Dydration (%)		0.89 ± 0.64	0.88 ± 0.85
Total sweating volume (kg)		-1.12 ± 0.49	-1.08 ± 0.50

Values are means ± SD. CON, no-cooling condition, FAN, wearing fan cooling jacket, PRE, pre-exercise, POST, post-exercise

*CON vs. FAN ($P < 0.05$)

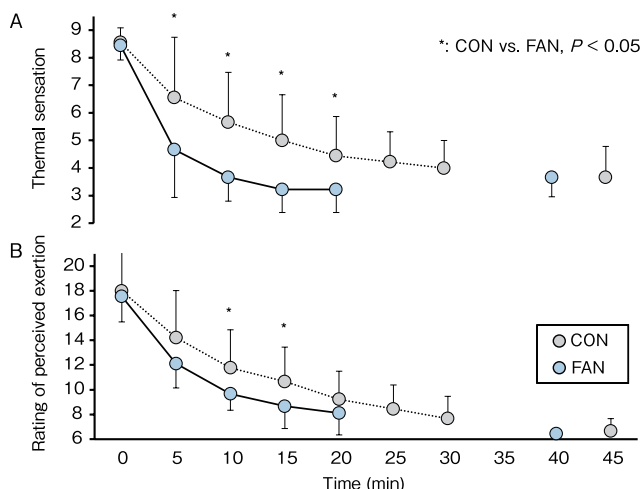


図2 The thermal sensation (A) and rating of perceived exertion (B) during recovery period

トの使用によって早期に改善されたことが明らかとなった。

気温、湿度、風速や輻射熱は深部体温や平均皮膚温などの体温動態を変容させ、持久性運動能力に影響を及ぼす。また、これらの環境条件指標が複合的に合わさった場合も、相乗・相加効果で体温動態を変容させ、持久性運動能力の悪化を誘発する²⁰⁾。本研究の日射からの熱吸収や環境条件指標において2試行間で有意な差はなかった。したがって、本研究は2試行ともに同条件で行えたため、運動時間や運動終了時の種々の体温には差が生まれなかったと考えられる。

本研究ではリカバリー時の身体冷却として有用である冷水浸水ではなく、スポーツ愛好家でも使用しやすい市販のファン付きジャケットを用いた。その中で、FAN試行におけるリカバリー時の直腸温の低下率は $0.021 \pm 0.002^{\circ}\text{C} / \text{min}$ でCON試行と差はなかった。この値は労作性熱中症への治療として推奨されている $0.15^{\circ}\text{C} / \text{min}$ やクーリングベストによる冷却の $0.06 \pm 0.02^{\circ}\text{C} / \text{min}$ ²¹⁾よりも低値となった。上記の推奨値や先行研究の結果とは異なる要因として、リカバリー時の気温と皮膚温の関係や熱移動が関連していると考えられ

る。リカバリー時の気温が皮膚温よりも低く、気温と皮膚温の温度較差が大きいほど対流によって熱放散が増加するが、本研究の気温は日陰でのリカバリーを想定し、室内は約 30°C あった。平均皮膚温が運動中の高輻射熱暴露によって上昇したに加えて、冷房の効いた環境下ではなく温暖な環境下でリカバリーを実施したため、低下率は低かったと考えられる。加えて、Barwood et al. (2009)⁷⁾は、ファン付きジャケットは全身送風よりも冷却される表面積が小さいため冷却力の乏しさを指摘している。実際に、上記の先行研究ではリカバリー時の全身送風は送風なしと比較して有意に直腸温を低下させる、一方でファン付きジャケットでは差がなかった。ファン付きジャケットは簡便な冷却装置であるが、輻射熱を含む屋外暑熱下での運動後、リカバリーとして直腸温を低下させることは冷却力の点では困難かもしれない。

外耳道温では、FAN試行がCON試行よりもリカバリー時に有意に高い冷却率であった。これは運動間や短時間のリカバリー時に鼓膜温を指標とし、ファン付きジャケットを用いた先行研究⁹⁾と同様の結果となった。深部体温において鼓

膜温は直腸温よりも低値を示すことや応答が早いことが知られている²²⁾。本研究ではファン付きジャケットによる冷却の効果が鼓膜に近い外耳領域で早期に反映されたことによる可能性が考えられる。加えて、ファン付きジャケットによる送風は頸部の前後を通過する⁹⁾ことから、外耳領域や頸部などが冷却され、その領域から伝導熱によって低下した可能性がある。

平均皮膚温はFAN試行ではリカバリー前半20分時にCON試行に比べて有意に高い冷却率であったが、リカバリー全体では差はなかった。ファンにおける身体冷却は皮膚表面に分泌された汗を空気の動きを高めることで蒸発させ、熱放散を促進させる²³⁾。本研究では局所発汗量の測定は行っていないが、リカバリー前半20分時には汗が皮膚表面に分布した(湿潤度が高い)が、後半はそれがなくなったため熱放散の促進に至らなかったことが要因の一つとして考えられる。加えて、ファン付きジャケットはファンから外気を取り入れ、対流を起こすことで着衣と皮膚の間に空気の層を作る²⁴⁾。本研究では衣服内温度を測定していないが、衣服内の高温・多湿の空気が衣服外へ排出され、平均皮膚温の低下に寄与したことが推察された。一方でリカバリー全体の皮膚温の冷却率は個人差が大きかった。汗の分泌がリカバリー後半時にも起こっていた被験者もいた可能性があり、今後は局所発汗量の測定を併用し、行う必要があろう。我が国の夏季は高温多湿下であり、汗は蒸発せずに皮膚に多く分布する。その中で、ファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーは熱放散を促進し、輻射熱暴露によって上昇した皮膚温を低下させるのに有用な方略であることを示した。

本研究の結果はリカバリー時のファン付きジャケット着用は屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、早期に熱負荷を減らし、心拍数は同程度であったが疲労感や温熱感の低下を誘発す

るのに効果的な方法であることを示した。ファン付きジャケットや送風冷却の研究はラボ研究がほとんどであり、高輻射熱下での検討は先行研究で課題として挙げられていた^{9, 23)}。本研究の知見はアスリートに限らず、特別な機器を有していないスポーツ愛好家においても高輻射熱暴露後の主観的指標の改善により良い選択肢をもたらした。

4. 結 論

本研究ではファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーに着目し、屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後にジャケットの有無によって種々の体温関連項目に及ぼす影響を検討した。その結果、ファン付きジャケットの使用はリカバリー時の直腸温における1分毎の低下率は、FAN試行がCON試行よりも高い傾向にあったが有意な差は認められなかった。外耳道温における低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高く、平均皮膚温では冷却開始20分間の低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高かった。したがって、冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーは、運動中の高輻射熱によって上昇した外耳道温や平均皮膚温、主観的感覚を低下させるのには有効であるが、直腸温の低下を導くのは難しいかもしれない。

謝 辞

実験に協力してくださった久留米大学の学生の皆様に感謝申し上げます。

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

文 献

- 1) 日本スポーツ協会. スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック. 1-56(2019)
- 2) Otani H., Kaya M., Tamaki A., Watson P., Maughan R.J. Effects of solar radiation on endurance exercise

- capacity in a hot environment. *Eur. J. Appl. Physiol.* 116 (4) :769-79(2016)
- 3) Naito T., Saito T., Muraishi K., Takahashi H. Comparison of the effects of high and low levels of solar radiations on exercise capacity in hot outdoor environments. *J. Sports Med. Phys. Fitness.* (2022)
 - 4) Seeley A.D., Sherman R.A. An Ice Vest, but Not Single-Hand Cooling, Is Effective at Reducing Thermo-Physiological Strain During Exercise Recovery in the Heat. *Front Sports Act Living.* 3:660910(2021)
 - 5) Douma M.J., Aves T., Allan K.S., Bendall J.C., Berry D.C., Chang W.T., et al. First aid cooling techniques for heat stroke and exertional hyperthermia: A systematic review and meta-analysis. *Resuscitation.* 148:173-90(2020)
 - 6) Nakamura D., Muraishi K., Hasegawa H., Yasumatsu M., Takahashi H. Effect of a cooling strategy combining forearm water immersion and a low dose of ice slurry ingestion on physiological response and subsequent exercise performance in the heat. *J. Therm. Biol.* 89:102530(2020)
 - 7) Barwood M.J., Davey S., House J.R., Tipton M.J. Post-exercise cooling techniques in hot, humid conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 107 (4) :385-96 (2009)
 - 8) Hashimoto K., Horie S., Nagano C., Hibino H., Mori K., Fukuzawa K., et al. A fan-attached jacket worn in an environment exceeding body temperature suppresses an increase in core temperature. *Sci. Rep.* 11 (1) :21269(2021)
 - 9) Otani H., Fukuda M., Tagawa T. Cooling Between Exercise Bouts and Post-exercise With the Fan Cooling Jacket on Thermal Strain in Hot-Humid Environments. *Front Physiol.* 12:640400(2021)
 - 10) Otani H., Goto T., Goto H., Shirato M. Time-of-day effects of exposure to solar radiation on thermoregulation during outdoor exercise in the heat. *Chronobiol. Int.* 34 (9) :1224-38(2017)
 - 11) Zuo J.M., E. A. Heat Transfer Characteristics of Sports Apparel. *Journal of ASTM International.* 1 (10) :10(2004)
 - 12) Underwood C.R., Ward E.J. The solar radiation area of man. *Ergonomics.* 9 (2) :155-68(1966)
 - 13) ISO. Ergonomics of the physical environment — Subjective judgement scales for assessing physical environments. ISO 10551. 28(2019)
 - 14) Borg G.A. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 14 (5) :377-81 (1982)
 - 15) Nielsen B., Kassow K., Aschengreen F.E. Heat balance during exercise in the sun. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 58 (1-2) :189-96(1988)
 - 16) Parsons K. Human thermal environments. *Taylor & Francis.* (2014)
 - 17) DuBois DDEF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Archives of Internal Medicine.* 17:9(1916)
 - 18) ISO. Ergonomics of the thermal environment— Instruments for measuring physical quantities ISO 7226. (1998)
 - 19) Ramanathan N.L. A New Weighting System for Mean Surface Temperature of the Human Body. *J. Appl. Physiol.* 19:531-3(1964)
 - 20) Otani H., Kaya M., Tamaki A., Goto H., Tokizawa K., Maughan R.J. Combined effects of solar radiation and airflow on endurance exercise capacity in the heat. *Physiol. Behav.* 229:113264(2021)
 - 21) Hosokawa Y., Belval L.N, Adams WM, Vandermark LW, Casa DJ. Chemically Activated Cooling Vest's Effect on Cooling Rate Following Exercise-Induced Hyperthermia: A Randomized Counter-Balanced Crossover Study. *Medicina (Kaunas).* 56 (10) (2020)
 - 22) Huggins R., Glaviano N., Negishi N., Casa D.J., Hertel J. Comparison of rectal and aural core body temperature thermometry in hyperthermic, exercising individuals: a meta-analysis. *J. Athl. Train.* 47 (3) :329-38(2012)
 - 23) Lynch G.P., Periard J.D., Plum B.M., Brotherhood J.R., Jay O. Optimal cooling strategies for players in Australian Tennis Open conditions. *J. Sci. Med. Sport.* 21 (3) :232-7(2018)
 - 24) 鈴木英悟, 櫻村修生, 高橋弘彦, 南和広, 中井誠一. 衣服内空気循環が夏季暑熱環境下農作業時の体温調節反応に及ぼす影響. *日気誌.* 49 (2) :83-92(2012)

環境条件の違いにおける発汗による 衣服の張り付き不快感の評価

信州大学大学院 唐 沢 悠 綺
(共同研究者) 同 藤 原 聖 也
同 北 島 暉 己

Evaluation of Clothing Discomfort Sensation Caused by Perspiration in Different Environmental Conditions

by

Yuki Karasawa, Seiya Fujiwara, Teruki Kitajima
Shinshu University

ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify the effects of environmental thermal stimuli on clothing discomfort sensation under different environmental temperature and humidity conditions by investigating changes in physiological and psychological states and fabric conditions when the fabrics get wet and sticks to the human skin. To achieve this purpose, a wearing experiment conducted to investigate the physiological and psychological state of participants after perspiration by exercising for 20 minutes in five environments with different environmental temperatures and humidity levels. Additionally, measurements of fabrics were also conducted to investigate the state of the fabrics in the same environments. The results revealed the following: (1) In a low-humidity environment, the discomfort sensation caused by the cold and wet sensation was observed due to the thermal transfer rate from the fabric was fast; (2) In the thermo-neutral environment, it took longer for the wet fabric to slide, and the sliding resistance of fabric was greater. The physical phenomena of the fabric and the

weak thermal stimulation by the environment caused discomfort sensation related to the mechanical elements on skin contact; (3) In the high temperature and humidity environment, the discomfort sensation was expressed by the sensations of stuffiness and stickiness due to the high humidity within the cloths. These results concluded the need to consider the effects of environmental stimuli when examining the clothing discomfort sensation associated with wet and sticky clothing.

キーワード

着衣不快感, 濡れ感, 蒸れ感, べたつき感, 暑熱環境

Keyword

clothing discomfort sensation, sensation of stuffiness, sensation of stickiness, feeling wet, high temperature and humidity environment

要 旨

本研究の目的は、異なる環境温湿度条件において、衣服が濡れて張り付いた際の生理・心理状態及び生地状態の変化を調査し、環境刺激が不快感に与える影響を明らかにすることである。このために、20分間運動することで発汗を促した後に、環境温湿度が異なる5つの環境で人の生理・心理状態を調査した。加えて、同環境での生地状態を調査した。その結果、以下のことが明らかとなった。(1) 低湿度の環境では、生地からの熱移動速度が速いため、冷感や濡れ感が生じ、不快感が発現する。(2) 人体にとって中立的な温度環境では、濡れた生地がすべるまでに時間がかかり、生地の抵抗力が大きい物理状態であることと、環境による温熱刺激が弱いことから、接触時の力学的な要素による不快感が発現する。(3) 高温湿度の環境では、衣服内湿度が高くなり蒸れ感やべたつき感が生じ、不快感が発現する。以上の結果から、衣服が濡れて張り付くことに伴う衣服の快適感を検討する際に、環境刺激の影響を考慮することの必要性が示された。

緒 言

運動時や暑熱環境下において、体温調節のために発汗することは避けられない。これは、環境温が平均皮膚温に接近してくると、やがて伝導と放射による熱放散が限界に達し、発汗による蒸発性熱放散が主要な手段となるからである¹⁾。特に、激しい運動時は発汗量が増大するため、衣服には汗を速やかに吸収し、発散する機能が求められている²⁾。しかし、衣服の汗処理機能を超越する発汗が起こった場合は、皮膚上の汗により、衣服が肌に張り付く。鈴木による肌着試料を用いた人の感覚調査実験において、湿潤生地の水分率の増加に伴って、べたつき感と力学的な抵抗感が増加し、不快感が生じることが報告されている³⁾。また、丹羽らは、肌着材料を通しての水分移動と着用感について報告し、肌着材料の水分移動特性は湿潤感と快適感に影響を及ぼし、発汗量の比較的大きい実験参加者においては、皮膚上に残留する水分量の少ない状態ほど快適感が高いことを報告している⁴⁾。これらの報告から、発汗によって衣服が濡れることで、衣服と肌の接触状態が変化し、着衣不快感が増加することが明らかになってきた。

発汗によって衣服が張り付いた際の着衣不快感を検討する際には、着衣環境の刺激を考慮する必要があると考える。これは、衣服が汗によって濡れると衣服と皮膚の間の空気が汗に置き換わり、衣服の熱伝導が20倍近くに増大するため⁵⁾、衣服の熱伝導の増加に伴い、環境による温熱刺激の影響も増加するからである。衣服が濡れた場合には、衣服に対する温冷感や濡れ感、蒸れ感は衣服着用時の環境の温熱刺激によって、異なる印象になると考えられる。例えば、冬のように環境温湿度が低い環境下では、衣服が濡れた際の熱伝導の増大に起因する「汗冷え」がある。夏のように環境温湿度が高い環境下では、身体の熱放散が起きにくいことに伴う「蒸れ」などが、衣服着用時の不快感として挙げられる。また、夏期の蒸し暑さの指標として用いられる不快指数が環境温湿度から算出されることから⁶⁾、不快感に環境温湿度が与える影響は大きいと考えられる。これらのことから、発汗によって、衣服が濡れて張り付いた状況下における不快感は環境からの刺激によって異なると考えられるため、環境刺激を変化させた条件下で着衣不快感を評価する必要がある。

不快感と環境温湿度の関係を調査した研究も報告されているが、安静時における評価であり、運動による多量の発汗が想定されていない^{7,8)}。着衣不快感は、衣服が濡れた際の張り付きや濡れの影響が高いことから、発汗を想定した不快感を調査する必要がある。また、運動を加えた場合の研究例においても裸体（ビキニ着用）を想定しており⁹⁾、吸汗し、張り付いた衣服の影響が考慮されていないため、実生活での発汗が促されたシーンでの着衣不快感の評価とは異なる。以上より、発汗により衣服が濡れた際の温熱的な不快感や張り付きによる接触的な不快感を考慮した着衣不快感と環境温湿度の関係を調査した研究例は少ない。

そこで、本研究では、発汗により濡れた衣服の張り付く不快感と環境条件の関係性を検討するた

めに、衣服が濡れた状態で張り付きに伴う不快感が起こりやすいYシャツ生地での実験を計画した。異なる環境条件において、衣服が濡れて張り付いた際の生理・心理状態及び生地状態の変化を調査し、環境刺激が不快感に与える影響を明らかにすることを目的とした。目的の達成のために、環境刺激が、着衣時の生理・心理状態に与える影響を調査した後に、環境刺激の違いによって、心理状態が異なった原因を生地状態変化の結果を基に考察した。本研究結果から、スポーツウェアの設計指針の一助となるような、不快感を低減する生地特性の解明に貢献する基礎データの収集を目指した。

1. 実験

1.1 実験環境

本研究の実験実施環境の温湿度条件は5種類：18℃・42%RH、28℃・24%RH、38℃・14%RH、28℃・48%RH、28℃・72%RHとした。田村らの研究では、全身の湿り感と環境の相対湿度、絶対湿度との関係を見た場合、絶対湿度との相関が高いことが報告されていたため¹⁰⁾、温度条件比較のための環境条件（18℃ 42%RH、28℃ 24%RH、38℃ 14%RH）の設定は、相対湿度ではなく絶対湿度を $6.50 \pm 0.05\text{g}/\text{m}^3$ に固定した。湿度条件比較（28℃・24%RH、28℃・48%RH、28℃・72%RH）においては、最も絶対湿度が低い環境を基準（ $6.50 \pm 0.05\text{g}/\text{m}^3$ ）に、絶対湿度が2倍（ $13.10\text{g}/\text{m}^3$ ）、3倍（ $19.60\text{g}/\text{m}^3$ ）になるように相対湿度を設定した。以下では温度条件比較の際には18℃・42%RHを（18℃）、28℃・24%RHを（28℃）、38℃・14%RHを（38℃）、湿度条件比較の際には28℃・24%RHを（24%RH）、28℃・48%RHを（48%RH）、28℃・72%RHを（72%RH）と省略して表記する。

1. 2 吸汗した衣服着用時の生理・心理状態調査

実験は2つの恒温恒湿室で行われた。はじめに、実験参加者は温度24℃、相対湿度55%RHに設定された恒温恒湿室に入室し、実験着に着替えた後、10分間座位安静とした。その後、サウナスーツを着用し、20分間運動することで発汗を促した。最後に、5つの環境条件のうちのいずれかに設定された別の恒温恒湿室に移動し、サウナスーツを脱いだ後、再び15分間座位安静とした。実験参加者は健康な若年男性10名（年齢24.5 ± 2.5歳、身長173.5 ± 10.5cm、体重64 ± 16kg）で、実験着は長袖Yシャツとハーフパンツに統一した。Yシャツを実験着として用いた理由は、衣服が濡れた状態の不快感が起りやすい衣服の一つと考えたためである。用いたYシャツ生地仕様を表1に示す。

表1 用いたYシャツ生地の仕様

織物名(組織)	ブロード(平織)
繊維素材	ポリエステル(55%), 綿(45%)
目付	100g/m ²
布厚さ	0.234mm
糸密度	経糸110本/2.54cm, 緯76本/2.54cm
糸の太さ	45番手

最初の安静時と運動時は10分おき、再安静時は5分おきに実験参加者の心理状態をSD (Semantic differential) 法によって評価した。評価は7段階(どちらでもない-やや-普通に-非常に)で、評価項目は「冷たい-温かい」「寒い-暑い」「乾いている-濡れている」「ベタツとする-サラツとする」「カラツとしている-ムシムシしている」「滑りにくい-滑りやすい」「ざらざらな-なめらかな」「粗い-細かい」「張り付いている-ゆとりがある」「重い-軽い」「肌当たりが悪い-よい」「ごわついている-しなやかな」「着心地が悪い-よい」「不快-快」の14項目とした。SD法のデータは-3~+3で評点化し、集計した。なお、SD法により評点化した値は本質的には順序尺度を構成す
デサントスポーツ科学 Vol. 44

るものであるが、各評価容語対の意味的な対称性が高く、7つの副詞の段階が等間隔であると仮定し、本研究では間隔尺度として扱い、各種統計処理を行った。

実験参加者の温熱性発汗の程度を調査するために、温湿度センサ(ハイグロクロン: KNラボラトリーズ)を皮膚上の7点(額部、左胸部、前腕部、手甲部、大腿部、下腿部、足先部)に貼付し、皮膚表面温度と衣服内湿度を計測した。皮膚温度に関しては、Hardy & DuBoisの7点法に従い⁶⁾、実験参加者の平均皮膚温を算出した。衣服内湿度に関しては、発汗状態は環境の相対湿度よりも絶対湿度である空気中の水蒸気圧に左右されるという報告から¹¹⁾、本研究においても絶対湿度を算出した。加えて、ウェアラブル発汗センサ(SKW-1000: スキノス)を頸部背面に貼付し、発汗量を計測した。

実験参加者には事前に研究の趣旨と内容について説明を行い、参加の同意を得た。本研究は信州大学の「ヒトを対象とした研究に関する倫理委員会」の承認を受けて実施した(承認番号第312号)。

1. 2 生地状態調査

1. 2. 1 湿潤試料の熱・水分移動状態調査

Yシャツ生地を50mm × 50mmで切り取り、7枚用意した。はじめにこれらの試料の質量を、電子天秤(GX-400: エー・アンド・デイ)を用いて計測した。次に、試料を実験中の参加者の皮膚を再現するために32℃~36℃に加温した人工皮膚上(バイオスキンプレート: ビューラックス)に静置させた。その際の試料の表面温度を小型熱画像カメラ(CPA-E60: チノー)で計測した。その後、人工皮膚と試料の間に発汗を想定し32℃~34℃に加温した蒸留水をマイクロピペット(Finnpipette F1 Multichannel: Thermo Fisher Scientific)により、試料の含水状態が最大含水率になる水分量を滴下した。滴下した蒸留水が試料

全体に濡れ広がったことを確認した後、小型熱画像カメラにより試料の表面温度を計測した。この計測から5分後、10分後、15分後の試料の表面温度を計測し、乾燥状態を含め、計5回の計測を行った。最後に、試料が蒸留水を含んでから15分後の生地が保持している水分量を調査するために試料の質量を、電子天秤を用いて測定した。

1. 2. 2 湿潤試料のすべり抵抗力調査

すべり抵抗力評価装置の写真を図1に、実験概要図を図2に示す。Yシャツ生地を100mm×50mmで切り取り、7枚用意した。はじめにこれらの試料の質量を、電子天秤を用いて測定した。次に、試料を糸がつけられたクリップに挟んだ後、糸の一端を引張試験機のフックに取り付け、試料は人工皮膚上に静置させた。その後、試料の後端を持ち上げ、試料下の人工皮膚上に、蒸留水をマイクロピペットにより滴下し、吸汗状態を模した。

蒸留水の温度は32℃～34℃であった。滴下した水分量は、試料の含水率が10%、60%、110%になる3条件に設定した。蒸留水滴下後、試料を人工皮膚上に接触させ、試料に蒸留水を拡散させた。最後に、試料台を移動させた際の引張試験機に加わる力のセンシングを行い、すべり抵抗力を計測した。実験によって得られたすべり抵抗力データから3つの特徴量を抽出した。特徴量は以下のように定義した。(1) 最大静止抵抗力：計測を始めてから1.0秒までのすべり抵抗力の最大値、(2) 動作時抵抗力：計測を始めて1.5秒後から2.5秒までのすべり抵抗力の平均値、(3) 立ち上がり時間：計測を始めてから試料台が動く瞬間（最大静止抵抗力を観測する）までの時間。

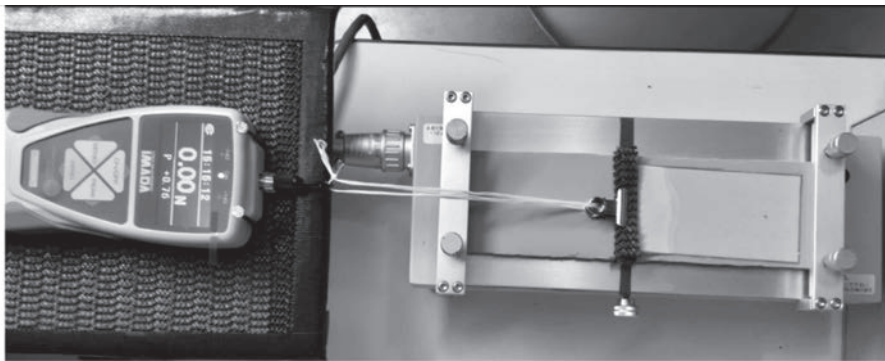


図1 すべり抵抗力評価装置の写真

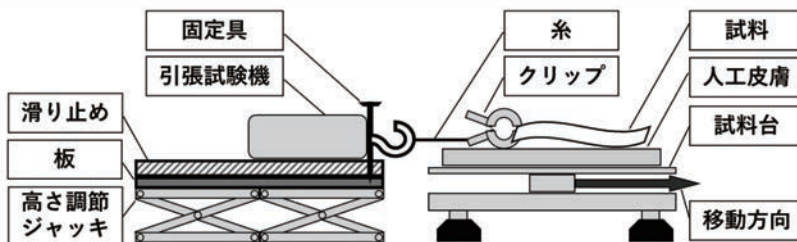


図2 すべり抵抗力評価装置の実験概要図

2. 結果

2. 1 吸汗した衣服着用時の生理・心理状態調査

2. 1. 1 衣服内湿度

温湿度センサを取り付けた7点の内、左胸部で計測した温湿度データから衣服内湿度を算出した。各環境条件に設定された人工気象室に移動してから5分ごとの衣服内湿度が環境条件の違いによって異なるのか検証した。各温度条件の左胸部の衣服内湿度を図3、各湿度条件の左胸部の衣服内湿度を図4にそれぞれ示す。計測結果は実験参加者10名分のデータの平均値を表したものである。また得られた結果に対して、各時間帯における環境温度条件要因の3水準(18℃, 28℃, 38℃)において、有意水準を5%に設定しTukey法による多重比較検定を行い、環境温度条件間の衣服内湿度の差を検討した。環境湿度条件間の3水準(24%RH, 48%RH, 72%RH)においても、同様の手順で多重比較検定を行い、衣服内湿度の差を検討した。有意水準5%で有意差が認められた場合は「*」を記す。

図3より、再安静10分後から、18℃ - 28℃, 18℃ - 38℃間の衣服内湿度に有意な差が認めら

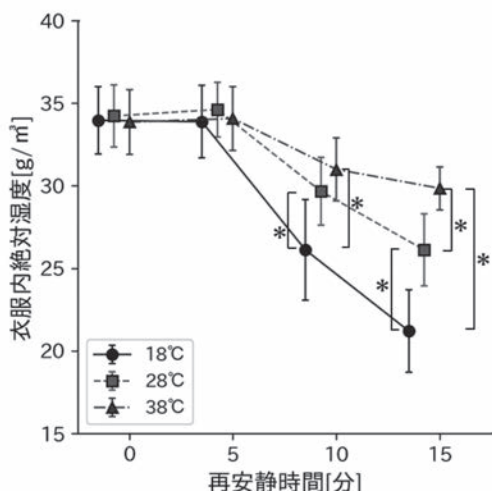


図3 各温度条件の衣服内湿度の時間変化

れた。また、再安静15分後は、環境温度条件の違いによって衣服内湿度に有意な差が認められた。各再安静10分後の衣服内湿度は18℃の環境は他の環境温度条件に比べて低く、再安静15分後は18℃, 28℃, 38℃の順に低かった。

図4より、再安静15分後は、全環境湿度条件間に衣服内湿度の有意な差が認められた。再安静15分後の衣服内湿度は、24%RH, 48%RH, 72%RHの順に低かった。

2. 1. 2 各環境条件の不快感に影響を与える心理的な感覚調査

不快感に影響を与える心理的な感覚を調査するために、環境条件毎に評価項目「不快-快」とその他の評価項目の相関係数を算出した。表2に各環境条件の評価項目「不快-快」とその他の評価項目の相関係数を示す。相関係数の算出後、有意水準を5%に設定し、無相関検定を行った。有意水準5%で有意差が認められた場合は「*」を記す。

表2より、全ての環境条件において、不快感と着心地の悪さには非常に強い相関関係がみられた。各環境条件の評価項目「不快-快」とその他の評価項目の相関係数に注目すると、18℃の環境と28℃・24%RHの環境では、冷たさ、濡れ感、

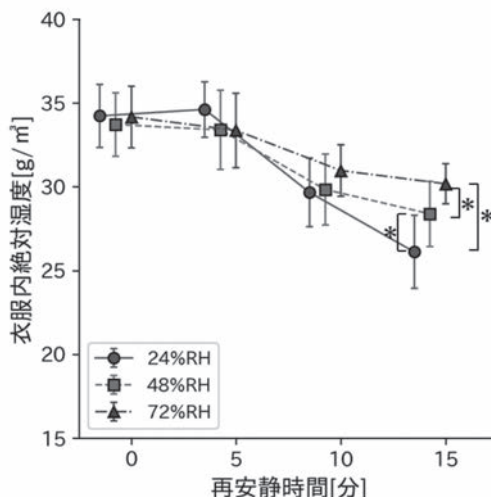


図4 各湿度条件の衣服内湿度の時間変化

表2 各環境条件の評価項目「不快-快」とその他の評価項目の相関係数

不快-快	18℃・42%RH	28℃・24%RH	38℃・14%RH	28℃・48%RH	28℃・72%RH
冷たい-温かい	0.70*	0.77*	-0.12	0.12	-0.05
寒い-暑い	0.12	-0.02	-0.52*	-0.23*	-0.49*
乾いている-濡れている	-0.84*	-0.78*	-0.77*	-0.54*	-0.76*
ベタツとする-サラツとする	0.80*	0.83*	0.74*	0.68*	0.76*
カラツとしている-ムシムシしている	-0.26*	-0.48*	-0.56*	-0.40*	-0.66*
滑りにくい-滑りやすい	0.77*	0.87*	0.70*	0.73*	0.75*
ざらざらな-なめらかな	0.23*	0.01	0.08	0.24*	0.04
粗い-細かい	0.30*	0.06	0.15	0.28*	0.10
張り付いてる-ゆとりがある	0.76*	0.79*	0.72*	0.55*	0.73*
重い-軽い	0.73*	0.71*	0.70*	0.65*	0.67*
肌当たりが悪い-よい	0.83*	0.74*	0.66*	0.78*	0.69*
ごわついている-しなやかな	0.48*	0.33*	0.36*	0.25*	0.32*
着心地が悪い-よい	0.96*	0.96*	0.93*	0.91*	0.92*

* : p<0.05

べたつき、滑りにくさ、張り付き感、重さ、肌当たりの悪さと不快感の間に強い相関関係がみられた。38℃の環境では、濡れ感、べたつき、滑りにくさ、張り付き感、重さと不快感の間に強い相関関係がみられ、暑さと蒸れ感と不快感の間に相関関係がみられた。48%RHの環境では、滑りにくさと肌当たりの悪さと不快感の間に強い相関関係がみられ、濡れ感、べたつき、張り付き感、重さと不快感の間に相関関係がみられた。72%RHの環境では、濡れ感、べたつき、滑りにくさ、張り付きと不快感の間に強い相関関係がみられ、蒸れ感、重さ、肌当たりの悪さと不快感の間に相関関係がみられた。これらの結果から、相関係数の大小に違いはあるものの、全ての環境条件において、多量の発汗によって、衣服が濡れて皮膚に張り付くことによる接触状態の悪化が不快感と大きく関係していることが示唆された。また、冷たさ、暑さ、蒸れ感などは環境条件によって、不快感との相関係数が異なり、低湿度環境内かつ低温な環境と人体にとって中立な温度環境では冷たさが不快感と関係すること、高温環境では、暑さと蒸れ感、高湿度環境では、蒸れ感が不快感に影響を及ぼすことが示唆された。

次に、各環境条件の官能検査評点から不快感の予測モデルを作成し、不快感に影響を与える心理的な感覚を検討するために重回帰分析を行った。

各環境条件内で評価項目「不快-快」を目的変数、「不快-快」と相関の高い評価項目「着心地が悪い-よい」と心理的な感覚としての意味が抽象的な「肌当たりが悪い-よい」を除くその他の評価項目を説明変数とし、変数増減法による重回帰分析を行った。帰無仮説の棄却域は有意水準5%とした。重回帰分析の結果を表3に示す。表3より、全ての環境条件で、発汗によって衣服が濡れたことで感じる衣服の滑りにくさや重さなどの力学的な感覚が共通して不快感の説明変数に挙げられた。また、低湿度環境では濡れ感や冷感などが不快感の説明変数に挙げられた。また、38℃・48%RH、72%RHの衣服内湿度が高い環境では、べたつきが不快感の説明変数に挙げられた。このように各環境条件で共通して説明変数に選定される心理的な感覚が存在したが、環境条件の違いによって、その標準偏回帰係数の大きさが異なっていた。

2. 2 生地状態調査

2. 1. 2で行った重回帰分析の結果において、不快感に影響を与える心理的な感覚として選定された生地特性に関係する項目（冷たさ、濡れ感、滑りにくさ、重さ）に関係が深いと考えられる湿潤試料の熱・水分移動特性と表面の滑り抵抗特性を調査した。

表3 重回帰分析の結果

目的変数	説明変数	標準偏回帰係数	p値
【18℃・42%RH】 不快-快 (修正 R2=0.75)	乾いている-濡れている	-0.58	0.00**
	滑りにくい-滑りやすい	0.26	0.00**
	ごわついている-しなやかな	0.16	0.00**
	定数項		0.00**
【28℃・24%RH】 不快-快 (修正 R2=0.84)	滑りにくい-滑りやすい	0.45	0.00**
	冷たい-温かい	0.25	0.00**
	乾いている-濡れている	-0.19	0.00**
	重い-軽い	0.17	0.00**
	寒い-暑い	-0.12	0.00**
定数項		0.00**	
【38℃・14%RH】 不快-快 (修正 R2=0.70)	乾いている-濡れている	-0.40	0.00**
	ベタッとする-サラッとする	0.22	0.01*
	重い-軽い	0.18	0.02*
	寒い-暑い	-0.22	0.00**
定数項		0.00**	
【28℃・48%RH】 不快-快 (修正 R2=0.60)	滑りにくい-滑りやすい	0.38	0.00**
	重い-軽い	0.28	0.00*
	ベタッとする-サラッとする	0.22	0.02*
	定数項		0.00**
【28℃・72%RH】 不快-快 (修正 R2=0.65)	ベタッとする-サラッとする	0.37	0.00**
	滑りにくい-滑りやすい	0.31	0.00**
	重い-軽い	0.22	0.00*
	定数項		0.00*

(** : p<0.01, * : p<0.05)

2. 2. 1 湿潤試料の熱・水分移動状態調査

各環境条件の湿潤試料の温度変化を比較するために、乾燥状態と湿潤状態の試料の表面温度の比を算出した。各温度条件の試料の表面温度の相対値の時間変化を図5、各湿度条件の試料の表面温度の相対値の時間変化を図6に示す。計測結果は算出した値から最大値と最小値を除く5試料の平均値と標準偏差を表したものである。また得られた結果に対して、各時間帯における環境温度条件要因の3水準(18℃, 28℃, 38℃)において、有意水準を5%に設定しTukey法による多重比較検定を行い、環境温度条件間の試料の表面温度、及び表面温度の相対値の差を検討した。環境湿度条件間の3水準(24%RH, 48%RH, 72%RH)においても、同様の手順で多重比較検定を行い、試料の表面温度、及び表面温度の相対値の差を検討した。有意水準5%で有意差が認められた場合は「*」を記す。

図5より、38℃の環境は表面温度の低下速度が

デサントスポーツ科学 Vol. 44

速かった。図6より、24%RH, 48%RH, 72%RHの環境内で表面温度の低下速度を比較すると、環境湿度が低いほど、試料の表面温度の低下速度が速い傾向がみられた。

2. 2. 2 湿潤試料のすべり抵抗力調査

各温度及び、湿度条件における各含水試料の2つの特徴量(最大静止抵抗力、立ち上がり時間)を図7~図10に示す。計測結果は算出した最大静止抵抗力、立ち上がり時間の値から、最大値と最小値を除く5試料の平均値と標準偏差を表したものである。また得られた結果に対して、各時間帯における環境温度条件要因の3水準(18℃, 28℃, 38℃)において、有意水準を5%に設定しTukey法による多重比較検定を行い、環境温度条件間の最大静止抵抗力、動作時抵抗力、立ち上がり時間の差を検討した。環境湿度条件間の3水準(24%RH, 48%RH, 72%RH)においても、同様の手順で多重比較検定を行い、最大静止抵抗力、立ち上がり時間の差を検討した。有意水準5%で

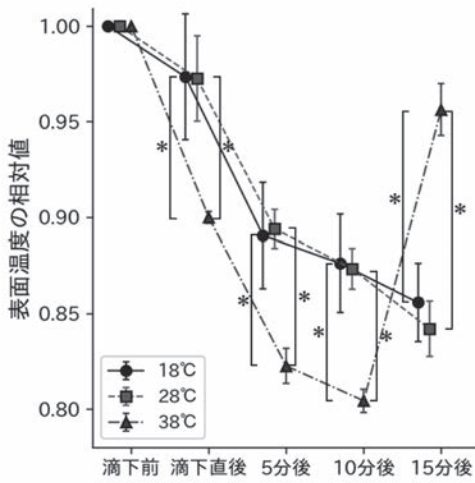


図5 各温度条件の試料の表面温度の相対値の時間変化

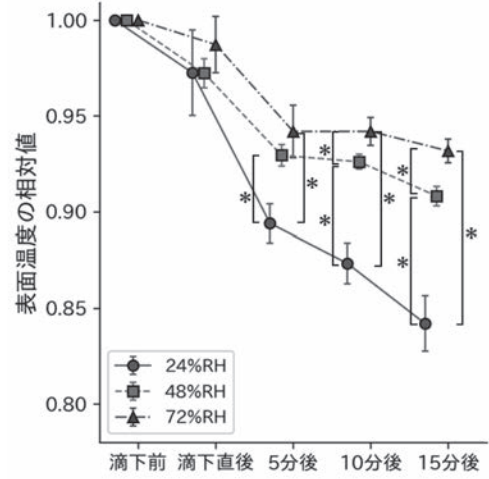


図6 各湿度条件の試料の表面温度の相対値の時間変化

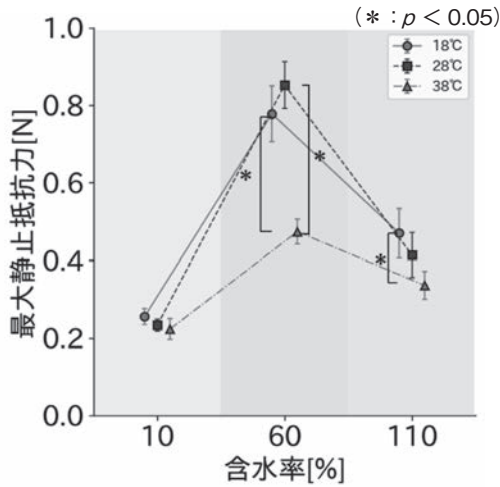


図7 各温度条件の最大静止抵抗力

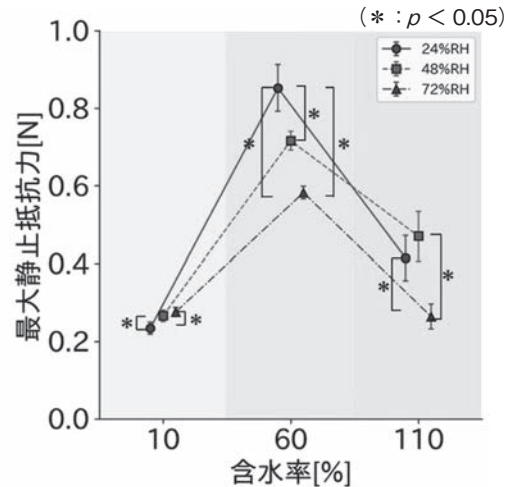


図8 各湿度条件の最大静止抵抗力

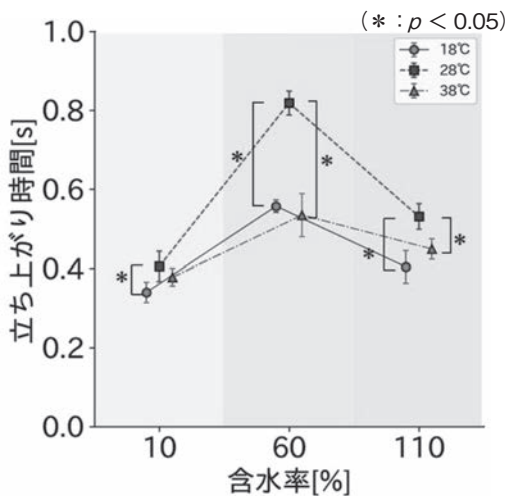


図9 各温度条件の立ち上がり時間

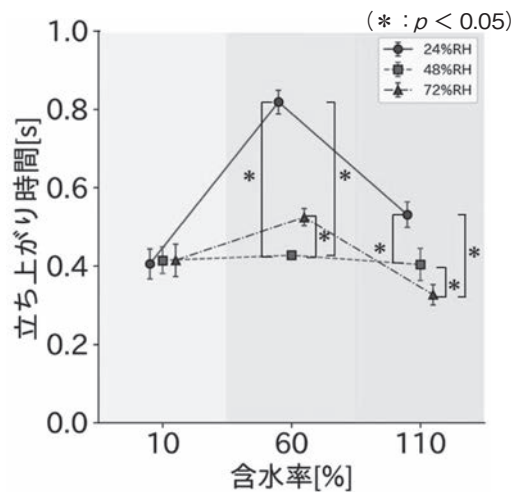


図10 各湿度条件の立ち上がり時間

有意差が認められた場合は「*」を記す。

図7より、38℃の環境は最大静止抵抗力が小さくなる傾向がみられた。図8より、環境湿度が高いほど、最大静止抵抗力は小さくなる傾向がみられた。図9、10より、28℃・24%RHの環境は他の環境に比べて、立ち上がり時間が長くなる傾向がみられた。

3. 考 察

吸汗し濡れた衣服が皮膚に張り付いた状況で、異なる環境温湿度に暴露された際の心理状態を調査した結果、環境条件の違いにより、不快感に影響を与える心理的な感覚やその影響の大きさが異なることが示唆された。これは、着用環境の違いによって、人の生理状態や衣服生地の状態が変化することが原因だと考えられる。低湿度環境(18℃, 28℃, 38℃)では濡れ感や冷感などが不快感の説明変数に挙げられた。これは、低湿度環境は生地からの熱移動速度が速かったことが原因であると考えられる。田村らによると、皮膚濡れ感覚の外的支配要因は、温度・熱流量の変化が第一要因で、次いで触感覚が関係すると報告されている¹²⁾。また、柴原らによると、皮膚温度より冷たい乾燥した試料布に静的に触れた際に、皮膚の温度変化が湿った試料布に触れた場合と同等であれば、湿り感を錯覚することが報告されている¹³⁾。上記のことから、低湿度の環境は熱の移動が起りやすかったため、中湿度や高湿度環境(48%RH, 72%RH)に比べ、濡れ感を強く感じる環境であり、濡れ感が不快感に大きく影響したと考察した。

また、28℃・24%RH, 48%RH, 72%RHの中立的な温度環境では生地の滑りにくさ、重さ、べたつきなどの力学的な感覚が不快感の説明変数に挙げられた。これは、28℃・24%RHの環境においては他の環境条件に比べ、生地の最大静止抵抗力、立ち上がり時間が長いことが影響していると考え

られる。また、48%RH, 72%RHの環境は衣服からの熱移動速度が遅いため低湿度環境に比べ、衣服からの熱的な刺激が小さい環境下であるため、接触時の力学的な不快感をより顕著に知覚すると考察した。

また、38℃, 48%RH, 72%RHの環境では、べたつきが不快感の説明変数に挙げられた。これは、38℃・48%RH, 72%RHの環境は18℃, 28℃の環境に比べ、衣服内湿度が高い環境であったことが原因だと考察した。

このように、本研究結果から、環境刺激の変化によって、衣服や人の生理状態が変化することにより、不快感に影響を与える心理的な感覚が異なることを確認した。

4. 結 論

本研究では、衣服が濡れて張り付きに伴う不快感が起りやすいYシャツを対象とし、吸汗し濡れたYシャツ生地が皮膚に張り付いた状況で、異なる環境温湿度に暴露された際の人の生理・心理状態とその衣服の生地状態を調査した。その結果、以下のことが明らかとなった。(1) 低湿度の環境では、生地からの熱移動速度が速いため、冷感や濡れ感が生じ、不快感が発現する。(2) 人体にとって中立的な温度環境では、濡れた生地がすべるまでに時間がかかり、生地の抵抗力が大きい物理状態であることと、環境による温熱刺激が弱いことから、接触時の力学的な要素による不快感が発現する。(3) 高温湿度の環境では、衣服内湿度が高くなり蒸れ感やべたつき感が生じ、不快感が発現する。以上の結果は、着衣快適感の高い衣服の開発を検討する際に、環境刺激の影響による不快感の発現要因の違いを考慮することの必要性を示すものである。

今後は、実験試料を変更しての追実験により、着衣快適感の高い衣服開発へ資するデータ集積が求められる。さらに、多量発汗時の着用が想定さ

れているスポーツウェアを実験試料とした実験が必要だと考えられる。最後に、本研究結果が各季節に応じた衣服開発をする際に重視する生地特性への指針となることを期待する。

謝 辞

本研究に対して、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また実験参加者として協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

文 献

- 1) 入来正躬, “生理学テキスト～分かりやすい体温のおはなし～”, 文光堂(2003)
- 2) 丹羽氏輝, “吸汗・速乾性素材”, 繊維製品消費科学会誌, 36, No.1, pp.185-188(1995)
- 3) 鈴木淳, “ぬれと着ごち”, 繊維製品消費科学会誌, 18, no.5, pp.166-169(1977)
- 4) 丹羽雅子, 内野政子, 森下文子, “肌着材料を通しての水分移動と着用感”, 繊維製品消費科学会誌, 8, No.5, pp.249-263(1967)
- 5) 薩本弥生, “暑熱環境時の着衣の熱水分移動と温熱的快適性”, 繊維製品消費科学会誌, 58, No.1, pp.26-33(2017)
- 6) 渡邊正勝, 加藤象二郎, 大久保堯夫, “初学者のための生体機能機能の測り方 第2版”, 日本出版サービス(2006)
- 7) 牛草貞雄, “環境湿度の生体負加に関する実験的研究-とくに蒸暑感に関連して-” 日本衛生学雑誌, 21, No.2, pp.6-28(1966)
- 8) 張清風, 田村照子, “環境湿度が人体に与える温熱ストレスに関する基礎研究-生理・心理・自立神経・唾液アミラーゼ反応から-”, 繊維製品消費科学会誌, 55, No.14, pp.756-765(2014)
- 9) 早川和代, 幾田憲生, 梁瀬度子, “夏期における気温と湿度が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究”, 日本建築学会計画系論文報告集, 405, pp.47-55(1989)
- 10) 田村照子, 小柴朋子, “人体の湿り感覚(第1報)-全身の湿り感覚感受性-”, 繊維製品消費科学会誌, 36, No.1, pp.125-131(1995)
- 11) 潮田ひとみ 中島利誠“ぬれ感覚に及ぼす天然繊維布の影響”, 繊維製品消費科学会誌, 36, No.1, pp.44-52(1995)
- 12) 田村照子, 小柴朋子, “皮膚濡れ感覚の支配要因”, 繊維製品消費科学会誌, 36, No.1, pp.119-124(1995)
- 13) 柴原舞, 佐藤克成, “布の温度制御による湿り錯覚”, 繊維製品消費科学会誌, 56, No.12, pp.41-48(2015)

CPX に基づいた運動療法によるうつ病の個別化治療

山口大学大学院	中 川 伸
(共同研究者) 同	陳 冲
同	萩 原 康 輔
同	平 田 圭 子
同	藤 井 優 子

Cardiopulmonary Exercise Test (CPX)-based Exercise Program for Depressive Disorders

by

Shin Nakagawa, Chong Chen, Kosuke Hagiwara,
Keiko Hirata, Yuko Fujii
*Division of Neuropsychiatry, Department of Neuroscience,
Yamaguchi University Graduate School of Medicine*

ABSTRACT

Current clinical treatments for depressive disorders are insufficient such that a substantial proportion of patients do not respond despite various treatment endeavors and the improvement in functional impairments in essential skills for everyday and social life is inadequate. Consequently, the development of add-on therapies is an important clinical challenge. The purpose of the present study was to test the effects of an exercise program designed based on the Cardiopulmonary Exercise Test (CPX) with exercise frequencies and intensities lower than those employed in previous studies. Subjects were eight depressed patients with chronic or recurrent episodes of depression or persistent depressive disorder. It was found that after eight weeks of exercise,

subjects' depressive symptoms were significantly reduced to a level close to remission. Their anxiety symptoms and social functioning were also significantly improved. Although the sample size was relatively small, our results suggest that even a brief, low load exercise program may exert therapeutic effects for depression. If these results can be replicated with large-scale clinical trials, exercise may be a promising add-on treatment strategy for depression.

キーワード

運動療法, 心肺運動負荷検査, うつ病, 持続性抑うつ障害, 不安

Keyword

exercise therapy, Cardiopulmonary Exercise Test, major depressive disorder, persistent depressive disorder, anxiety

要 旨

うつ病の薬物療法, 精神療法などが進歩し一定の効果を示してきている. しかし, 無効な患者が多く存在し, 日常生活や社会生活の障害を改善するためには未だ不十分であるため, 実臨床では補完療法などの開発, 改良が重要になってきている. 本研究では, 心肺運動負荷検査 (Cardiopulmonary Exercise Test, CPX) の客観的な指標により運動量を明確化し, 既報に比較して運動強度・時間・回数が大きく軽減化された運動プログラムのうつ病に対する有効性を検討することを目的とした. 慢性または反復性うつ病患者8名(うつ病6名, 持続性抑うつ障害2名)を対象に8週間の運動プログラムを行い, その前後に抑うつ症状, 不安症状などの臨床評価を実施した. その結果, 介入後に抑うつ症状が寛解に近い状態になり, 状態不安および社会適応度の改善もみられた. 少数の被験者ながら既報に比較して運動強度・時間・回数が大きく軽減化され, それでも効果が見られることから, これらの結果が今後大規模臨床試験において確認されれば, うつ病の補完療法の大きな進歩になると思われる.

緒 言

うつ病の薬物療法, 精神療法などが進歩し一定の効果を収めてきた. しかし, 無効な患者も多く存在し, さらには日常生活や社会生活の障害を改善するためには未だ不十分である^{1,2)}. そのため, 実臨床では補完療法の開発, 改良が重要になってきている. 運動療法には一定の効果があることは従来から報告されている³⁻⁶⁾が, 運動強度・時間・回数に決まったものではなく, 運動能力や意欲が低下している患者⁷⁻⁹⁾にとって全般的に負荷が大きいため, 日本うつ病学会による2016年大うつ病性障害の治療ガイドラインにおいては, うつ病に対する運動療法は「まだ確立された治療法とはいえない」¹⁰⁾とされている. 申請者の研究チームは心血管病患者を対象とした心臓リハビリテーションで用いられている, 運動量を客観的に明確化する心肺運動負荷検査 (Cardiopulmonary Exercise Test, CPX) に着目した. 本研究では, CPXの客観的な指標により運動量を明確化し, 既報に比較して運動強度・時間・回数が大きく軽減化された運動療法のうつ病に対する有効性を検討することを目的とした.

1. 研究方法

1. 1 被験者

慢性または反復性うつ病患者8名（うつ病6名、持続性抑うつ障害2名）を対象とした。患者の平均年齢は44.6歳（標準偏差12.8歳）で、うち女性7名、男性1名であった。全例、期間中の投薬変更はなかった。本研究は山口大学医学部附属病院治験及び人を対象とする医学系研究等倫理審査委員会に承認されている。選択基準は精神疾患の診断・統計マニュアル（DSM-5）によってうつ病または持続性抑うつ障害と診断され、年齢が20歳以上61歳未満などとし、除外基準は自殺念慮が強い、すでに定期的運動を行っているなどとした。

1. 2 運動プログラム

運動プログラムとして、嫌気性代謝閾値（Anaerobic Threshold, AT）レベル以下の強度で週2回、1回30分間のエアロバイクによる運動を8週間実施した。ATレベル以下の有酸素運動は、運動能力と意欲が低下しているうつ病患者にとって受け入れやすく、長時間持続することが可能である。

まずはCPXを行い、被験者ごとのATを算出した。CPXでは、心電図・血圧・脈拍などをモニタリングしながら、呼気ガス分析装置を用いて運動中の酸素摂取量や二酸化炭素産生量を測定し、嫌気性代謝閾値（AT）を計測した。CPXのプロトコルについては、3分間の安静および3分間のウォーミングアップ（0ワット）後、1分間に15～25ワットの漸増負荷（ランプ負荷）を行い、症候限界あるいは心電図上の有意なST変化・過度の血圧上昇または下降を認めた場合に運動を中止とした。

実際にATレベル以下の強度でエアロバイクによる運動を30分間実施する際に、例えば、ATレベルの負荷強度が60ワット・心拍数が100拍/分

であった場合、10～20ワットの軽めの負荷強度で約5分間ウォーミングアップした後、負荷強度を60ワットに上げ、25分間運動を行う。但し、運動中は片側の耳に心拍数を検知するセンサーを装着し、ATレベルの心拍数である100拍/分を超えた場合、負荷強度を5～10ワットずつ軽くする。同時に、自覚症状の指標であるBorgスケールを用いて、13（ややきつい）を超えないように負荷強度を適宜調整する。4週間を1クールとして週2回×4週間、合計8回の運動介入になるが、最低でも7回参加することが条件であった。運動療法全体は2クールで合計8週間実施した。

1. 3 臨床評価・自記式心理尺度

運動療法を実施前と実施後の1週間以内に以下の評価を実施した。主要評価項目としてハミルトンうつ病評価尺度-17項目版（HAMD）の構造化面接を用いた。具体的に、医師または臨床心理士が構造化インタビューを行い、被験者の過去2週間の抑うつ状態を評価した。HAMDの合計得点が7点以下が寛解状態とされている。先行研究¹¹⁾を参考し、HAMDの項目を気分、認知症状、自律神経症状の3つの因子にカテゴリー化し、それぞれの合計得点を算出した。気分には、抑うつ気分、仕事と活動、精神運動抑制、激越、精神的不安、身体的不安、身体症状（一般）と心気症の合計8つの症状が含まれる。認知症状には、罪悪感と自殺の2つの症状が含まれる。自律神経症状として、入眠困難、熟眠障害、早朝覚醒、身体症状（消化器）、生殖器症状、体重減少の合計6つの症状が含まれる。

副次評価項目として、自記式心理尺度Beckうつ病評価尺度（BDI-II）、状態-特性不安検査（STAI）、社会適応度評価尺度（SASS）を実施した。BDI-IIは過去2週間の抑うつ状態、STAIは状態不安と特性不安の評価である。SASSは仕事や家事への興味、家族や他人との関わり、社会へ

の関心、適応度に関する主観的な評価である。

1. 4 統計解析

IBM SPSS Statistics 26を用いた。正規性の検定はShapiro-Wilk検定を用い、運動プログラム前後の比較は対応のある2標本t検定またはウィルコクソンの符号順位検定を用いた。有意性の検定には $p < 0.05$ を採用した。

2. 研究結果

主要評価項目であるうつ病の臨床評価HAMDは、介入前と比較して運動プログラムによる介入後に有意に減少した(表1, 図1)。介入前の平均値12.87点から8.62点まで4点以上減少し、その効果量(Cohen's d)が3.06であった。図1に示したように、被験者ごとのデータでは、8名全員

のHAMD点数が減少した。さらに、具体的にどのような項目に影響があったかを調べるために、HAMDの下位構成因子ごとの比較をしたところ、気分の合計得点は介入によって有意に減少した一方、認知症状と自律神経症状の変化は認めなかった(表1, 図2)。

副次評価項目とした自記式抑うつ症状評価(BDI-II)も介入前と比較して介入後に有意に減少した(表1)。その効果量1.22であった。BDI-II点数については8名のうち7名が減少した(図3)。

不安症状について、介入前と比較して運動プログラムによる介入後に状態不安(STAI-Y1)が有意に低下する($d=0.97$)一方、特性不安(STAI-Y2)は変化しなかった(表1, 図4, 図5)。被験者ごとのデータでは、8名のうち7名のSTAI-Y1点数が減少した(図4)。

表1 運動プログラムによる介入前後の評価

評価時期	HAMD (うつ病の臨床評価)	HAMD:気分	HAMD:認知症状	HAMD:自律神経症状
介入前	12.87 ± 4.12	8.00 ± 2.78	2.13 ± 1.55	2.00 ± 0.76
介入後	8.62 ± 3.62 ***	5.25 ± 1.83 **	1.50 ± 1.20	1.50 ± 1.07
効果量	d=3.06	d=1.26	d=0.42	d=0.66
評価時期	BDI-II (自記式抑うつ症状)	STAI-Y1 (状態不安)	STAI-Y2 (特性不安)	SASS (社会適応度)
介入前	24.50 ± 6.57	57.00 ± 8.33	63.13 ± 8.44	25.50 ± 6.68
介入後	18.00 ± 5.21 *	51.88 ± 8.68 *	57.50 ± 10.82	32.25 ± 7.78 ***
効果量	d=1.22	d=0.97	d=0.73	d=2.24

介入前との比較: * $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

HAMD (うつ病の構造化面接)

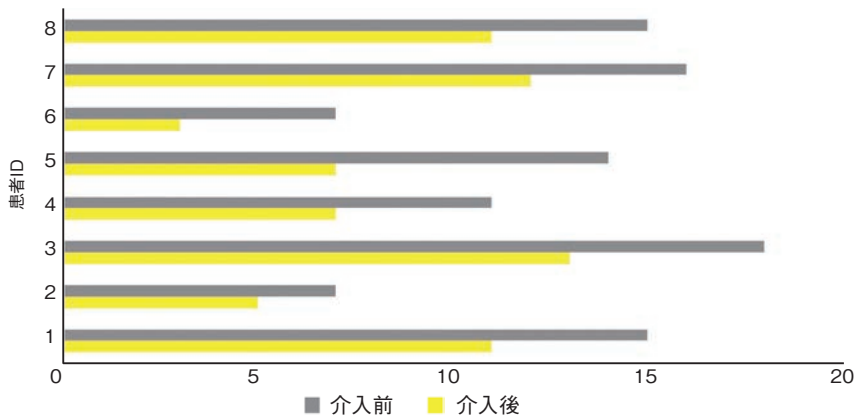


図1 運動プログラムによる介入前後のうつ病臨床評価: HAMD

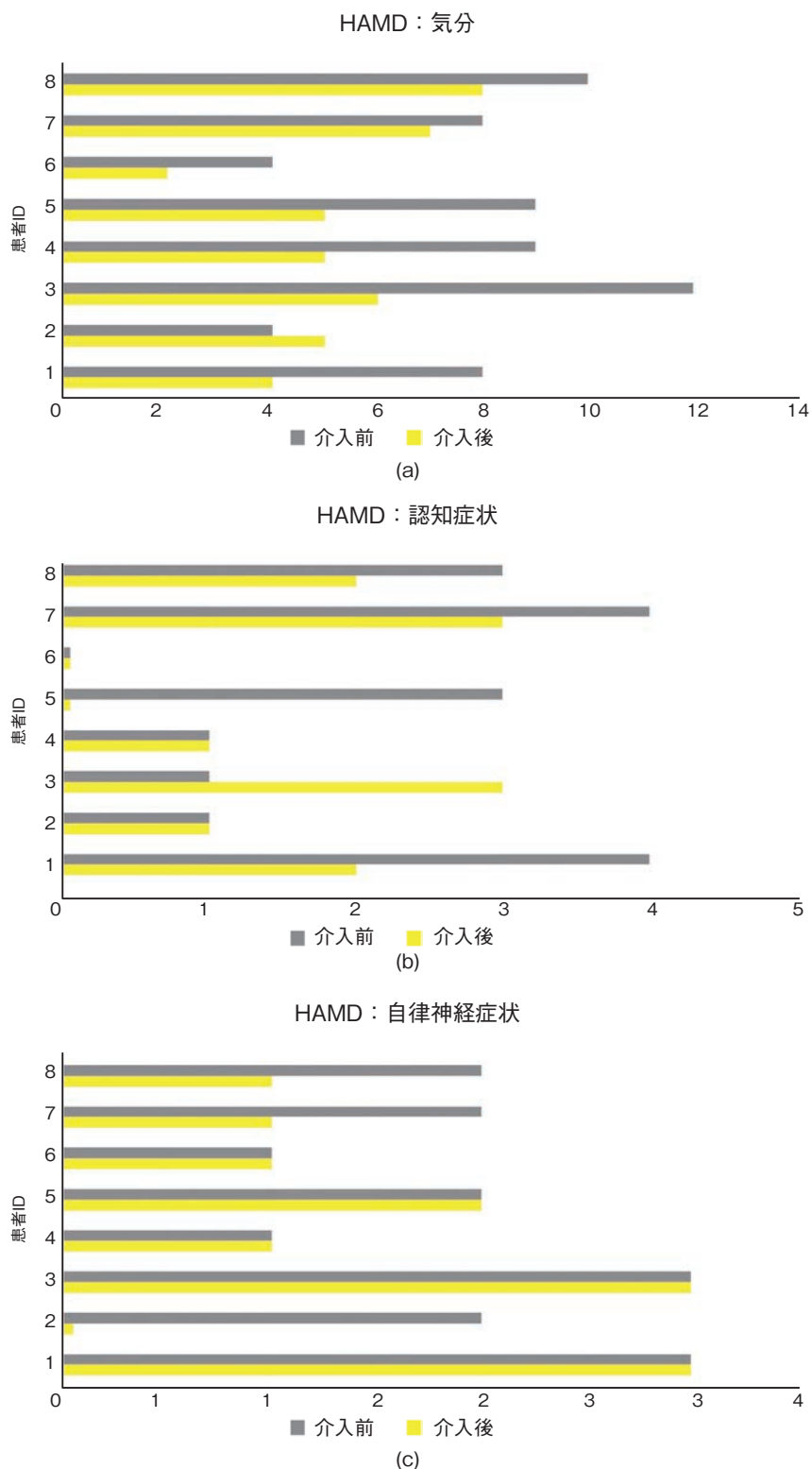


図2 運動プログラムによる介入前後のうつ病臨床評価：HAMD下位因子。(a) 気分；(b) 認知症状；(c) 自律神経症状
得点が0の場合、0.05として表示している

BDI - II (自記式抑うつ症状)

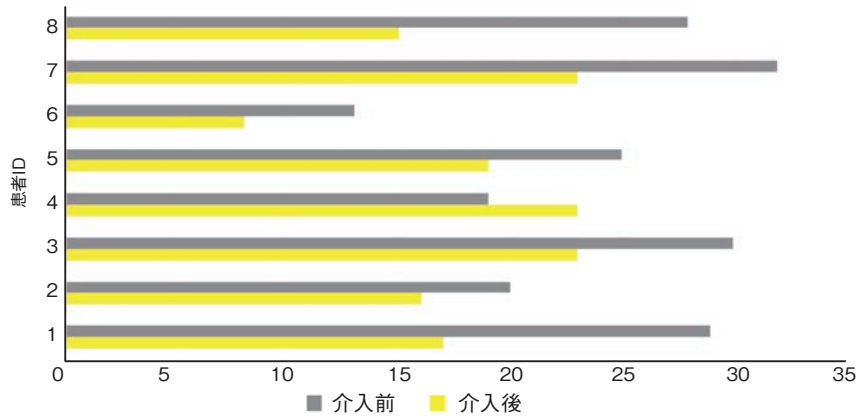


図3 運動プログラムによる介入前後の自記式抑うつ症状: BDI-II

STAI-Y1 (状態不安)

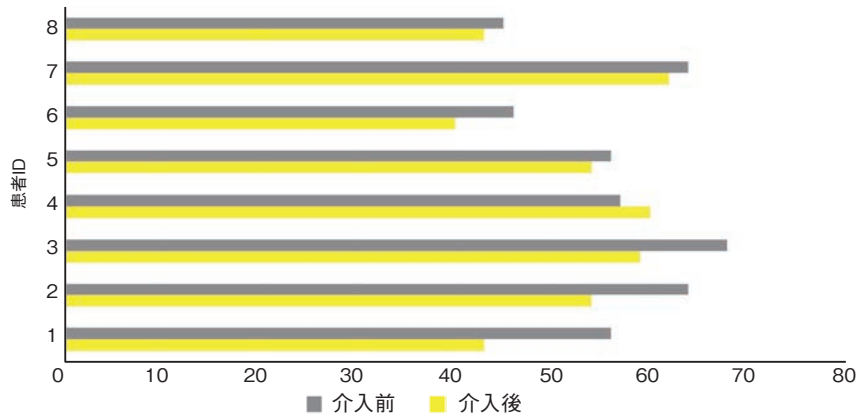


図4 運動プログラムによる介入前後の状態不安: STAI-Y1

STAI-Y2 (特性不安)

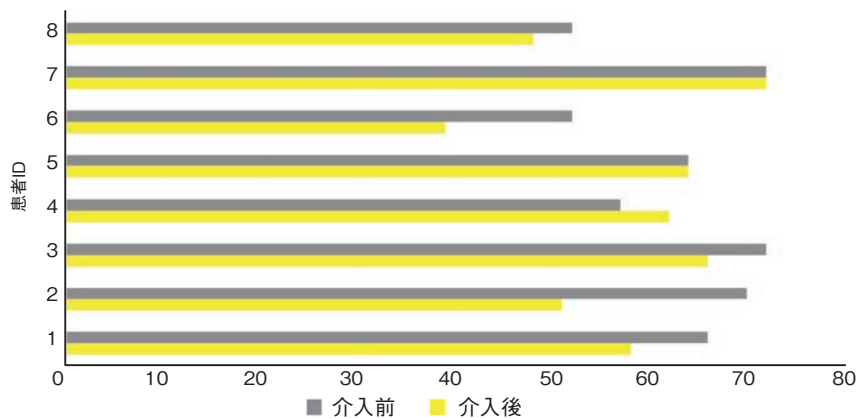


図5 運動プログラムによる介入前後の特性不安: STAI-Y2

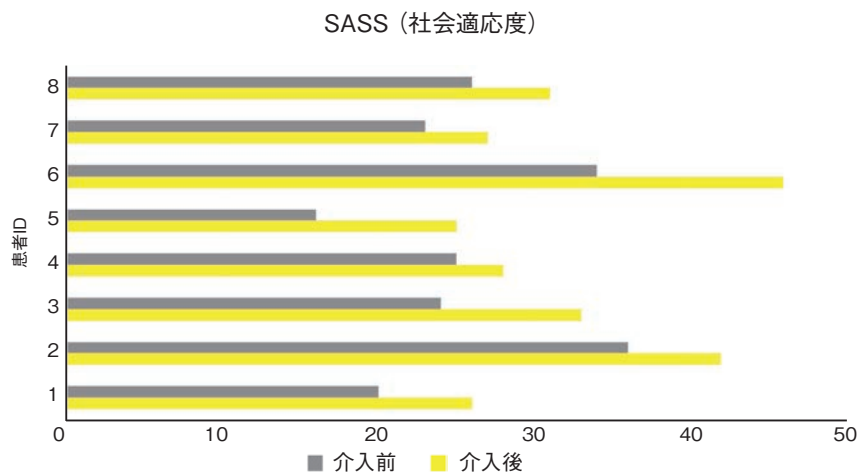


図6 運動プログラムによる介入前後の社会適応度: SASS

社会機能について、介入前と比較して運動プログラムによる介入後に社会適応度 (SASS) が有意に向上した ($d=2.24$, 表1)。被験者ごとのデータでは、8名全員のSASS点数が上昇した (図6)。

3. 考察

ATレベル以下の強度で週2回、1回30分間のエアロバイクによる運動を8週間実施することで、慢性または反復性うつ病患者8名の抑うつ症状が医師や臨床心理士による構造化面接 (HAMD) と自記式質問紙 (BDI-II) の両方において有意に減少した。慢性または反復性うつ病の場合、うつ病のエピソードが2年以上と長期化することや繰り返し再発することから、社会復帰・就職が困難となり、心理社会的障害の危険性が大きい。慢性または反復性うつ病に対して通常の抗うつ治療や精神療法などの効果が不十分である背景のなか、通常の治療に加えて8週間の運動プログラムを行うことで、HAMD 17項目版の得点が約4点程度減少し、寛解に近い状態 (HAMD得点が7点以下) に回復することができ、臨床の観点からかなり大きな改善度と言える。

具体的にどういった項目に影響があったかを調べたところ、HAMDの項目を気分、認知症状、

自律神経症状の3つの因子にカテゴリー化し、それぞれの合計得点を用いて比較したところ、気分において統計学的に有意な減少が認められた一方、認知症状や自律神経症状の変化が認めなかった。気分という因子には、抑うつ気分 (悲しみ、絶望的など)、仕事と活動 (興味や関心の喪失、生産性の低下)、精神運動抑制 (会話の遅鈍、集中困難)、精神運動興奮 (激越、落ち着かなさ)、精神的不安 (緊張、焦燥感)、身体的不安 (口渇、発汗、動悸、下痢)、一般的身体症状 (頭の重苦しさ、体の痛み、易疲労性) と心気症 (重篤な病気にかかっているとの思い込み) が含まれている。つまり、運動プログラムによって改善されるのが認知や自律神経系の症状ではなく、抑うつと不安などの気分とそれらによる身体症状である。これらの結果と一致し、自記式質問紙を用いて評価では、うつ症状 (BDI-II) と状態不安 (STAI-Y1) の低下が同時に見られ、運動プログラムによる抗うつ効果のメカニズムとして、抑うつや不安症状から改善していく可能性がある^{1,2)}と唆された。さらに、社会機能の指標である社会適応度の自己評価が向上し、通常の薬物療法、精神療法などが日常生活や社会生活の障害を改善するために未だ不十分である^{1,2)}ことから、運動プログラムが付加療法とした臨床

応用が期待される。

運動プログラムによる抗うつ効果や抗不安効果、社会機能向上効果がこれまで健常者やうつ病・不安障害患者を対象とした運動研究の既報^{3-6, 12)}と一致する。なお、今回の運動プログラムの強度が中等度のものを1時間、週に3回以上としている既報に比較して運動強度・時間・回数が大きく軽減化されているにもかかわらず、抗うつ効果などを有することが示され、運動能力や意欲が低下しているうつ病患者⁷⁻⁹⁾にとってメリットが大きいと考えられる。患者の特性を考え運動プログラムの負荷を下げることで、継続的な運動が可能となり持続的な寛解や社会復帰へと繋げていくことが臨床的には必要であると考えられる。本研究の結果が今後大規模臨床試験において確認されれば、うつ病の補完療法の大きな進歩になると思われる。尚、本研究の限界としてサンプルサイズが小さいこと、比較対象を置いていないことが挙げられる。

4. 結 論

本研究では、心肺運動負荷検査 (CPX) の客観的な指標により運動量を明確化し、既報に比較して運動強度・時間・回数が大きく軽減化された運動プログラムのうつ病に対する有効性を検討した。慢性または反復性うつ病患者8名を対象に8週間の運動プログラムを行い、介入前と比較して運動プログラムによる介入後に抑うつ症状が寛解に近い状態に有意に減少し、状態不安および社会適応度の有意な改善も見られた。少数の被験者ながら既報に比較して運動強度・時間・回数が大きく軽減化され運動療法の有効性が示されており、これらの結果が今後大規模臨床試験において確認されれば、うつ病の補完療法の大きな進歩になると思われる。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、被験者のリクルートや臨床評価、運動療法の実施に際し、ご協力いただきました山口大学医学部附属病院精神科神経科の医師、臨床心理士、研究補佐員の皆様に心より感謝いたします。最後に、本研究の被験者としてご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

文 献

- 1) Rush, A.J., Trivedi, M.H., Wisniewski, S.R., Nierenberg, A.A., Stewart, J.W., Warden, D., ... & Fava, M. Acute and longer-term outcomes in depressed outpatients requiring one or several treatment steps: a STAR* D report. *American Journal of Psychiatry*, 163 (11), 1905-1917(2006)
- 2) Saris, I. M. J., Aghajani, M., Van Der Werff, S. J. A., Van Der Wee, N. J. A., & Penninx, B. W. J. H. Social functioning in patients with depressive and anxiety disorders. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 136 (4), 352-361(2017)
- 3) Rimer, J., Dwan, K., Da, L., Ca, G., Mcmurdo, M., Morley, W., & Ge, M. Exercise for depression (Review), (7) *Cochrane Library*, 7, 1-84(2012)
- 4) Bridle, C., Spanjers, K., Patel, S., Atherton, N. M., & Lamb, S. E. Effect of exercise on depression severity in older people: systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *The British Journal of Psychiatry*, 201 (3), 180-185(2012)
- 5) Cooney, G.M., Dwan, K., Greig, C.A., Lawlor, D.A., Rimer, J., Waugh, F.R., et al. Exercise for depression. *Cochrane Database Syst. Rev.* 9:CD004366(2013)
- 6) Silveira, H., Moraes, H., Oliveira, N., Coutinho, E. S. F., Laks, J., & Deslandes, A. Physical exercise and clinically depressed patients: a systematic review and meta-analysis. *Neuropsychobiology*, 67 (2), 61-68(2013)
- 7) Roshanaei-Moghaddam, B., Katon, W.J., & Russo, J. The longitudinal effects of depression on physical activity. *General hospital psychiatry*, 31 (4), 306-315(2009)

- 8) Searle, A., Calnan, M., Lewis, G., Campbell, J., Taylor, A., & Turner, K. Patients' views of physical activity as treatment for depression: a qualitative study. *British Journal of General Practice*, **61** (585), e149-e156(2011)
- 9) Sener, U., Ucok, K., Ulasli, A.M., Genc, A., Karabacak, H., Coban, N.F., ... & Cevik, H. Evaluation of health-related physical fitness parameters and association analysis with depression, anxiety, and quality of life in patients with fibromyalgia. *International journal of rheumatic diseases*, **19** (8), 763-772(2016)
- 10) 日本うつ病学会. 大うつ病性障害の治療ガイドライン. <https://www.secretariat.ne.jp/jsmd/iinkai/katsudou/data/160731.pdf>(2016)
- 11) Uher, R., Farmer, A., Maier, W., Rietschel, M., Hauser, J., Marusic, A., ... & Aitchison, K. J. Measuring depression: comparison and integration of three scales in the GENDEP study. *Psychological medicine*, **38** (2), 289-300(2008)
- 12) Ikenouchi-Sugita, A., Yoshimura, R., Sugita, K., Hori, H., Yamada, K., Sakaue, M., & Nakamura, J. The effects of a walking intervention on depressive feelings and social adaptation in healthy workers. *Journal of UOEH*, **35** (1), 1-8(2013)

**仮想現実サイクリング運動時の競争他者が心血管応答
および運動パフォーマンスに及ぼす影響
～自律神経生理尺度を活用したメンタルバイオマーカーの開発**

順天堂大学大学院 山 中 航
(共同研究者) 同 香 月 翔 太
同 河 村 剛 光
同 和 氣 秀 文

**The Effects of Competitors on the Cardiovascular Response and
Performance during Virtual Reality Cycling Exercise – the Development of a
Mental Biomarker Utilizing Physiological Parameters**

by

Ko Yamanaka, Shouta Katsuki
Yoshimitsu Kohmura, Hidefumi Waki
*Graduate School of Health and Sports Science,
Juntendo University*

ABSTRACT

In sports, dealing with the pressure of competition determines winning or losing. Interacting with others while competing affects one's athletic performance, but the associated physiological mechanisms are unclear. This study included 14 healthy adult male participants. We developed a competition that included interacting with other competitors and was simulated using virtual reality (VR). The pedal speed, cardiovascular responses (blood pressure and heart rate), and respiratory responses were recorded during cycling exercise tasks at a constant speed (60 rpm). We observed a significant decrease in cadence (non-competitive = 59.0 ± 4.2 rpm versus

competitive = 56.5 ± 6.0 rpm, $p = 0.0067$) and significant increase in heart rates (non-competitive = 82.5 ± 9.0 bpm versus competitive = 84.1 ± 9.9 bpm, $p = 0.04$) during the competitive condition (passing/being passed by a competitor) compared to the non-competitive condition (cycling exercise with no competitors). Participants were classified into two groups: those whose cadence was relatively decreased in competitive conditions (performance-decreased group) and those whose cadence was not (performance-maintained group). Intriguingly, the cross-correlation coefficient between interacting with others and the respiratory variability was significantly higher in the performance-maintained group ($r = 0.44 \pm 0.12$, $p = 0.01$) that sustained cadence during the competitive condition compared to the performance-decreased group ($r = 0.36 \pm 0.03$). These results suggest that exercise performance is affected by competitors but regulating respiratory movements may prevent the performance decline.

キーワード

バーチャルリアリティ, 競争他者, ペダル回転数, 呼吸, 相互相関解析

Keyword

virtual reality, competitor, cadence, respiration, cross correlation

要旨

スポーツ競技は他者と競い合うプレッシャーの中で勝ち負けや優劣が決まる。競技中における他者とのインタラクションは自己の運動パフォーマンスに影響を及ぼすが、その生理学的メカニズムの詳細は明らかでない。本研究は14名の成人男性を対象に、仮想現実(VR)技術を用いて他者との競争場面を作成し、一定速度でサイクリング運動を行う課題時のペダル回転数、心血管応答(血圧、心拍数)および呼吸応答を記録した。単独で走行する非競争条件と比較して、競争条件(競争他者を抜く/抜かれる)においてペダル回転数の有意な低下、心拍数の有意な上昇を観察した。興味深いことに、競争条件時にペダル回転数を維持できたパフォーマンス維持群において、他者とのインタラクションと呼吸変動の間で有意な相互相

関が観察された。これらの結果は、運動パフォーマンスは他者の影響を受けるが、呼吸運動を調節することによってそのパフォーマンス低下を防止する可能性を示唆する。

緒言

スポーツ競技の多くは他者とパフォーマンスを競い、勝ち負けや優劣を決める。サッカーやバレーボールといったオープンスキルが求められる競技はもとより、陸上競技のような主としてクローズドスキルが求められる競技であっても、異なるレーンを走るライバルの存在や競争相手との相対的比較によって情動が変化し、自律神経応答変化を介して、自己の運動パフォーマンスに影響を及ぼす可能性が考えられる。例えば、マラソン競技などで他者を追い抜くことによるモチベーションの向上、逆に疲労困憊時に他者に追い抜かれたと

きに急激なパフォーマンス低下（いわゆる「心が折れた」状態になる）が生じ得ることは想像に難くない。しかしながら、実際のスポーツ競技中では完全に同一の競技場面というのは起こり得ず、運動中の条件を統制して再現性高く測定することは困難である。したがって、このような「競争中の他者との優劣」がパフォーマンスに及ぼす影響について調べることは容易ではない。そのため、先行研究として、試合直前・直後の選手へのアンケート調査などの心理的尺度を用いた情動評価や心拍数などの自律神経尺度¹⁾、あるいは卓上で実施する競争課題²⁾やロールプレイを用いたゲームなどの競争課題³⁾を用いた研究は報告されているが、スポーツ競技場面における「運動実施中」において他者が自己の生理応答や運動パフォーマンスに与える影響について、その詳細な生理学的メカニズムは不明な点が多い。

本研究では、仮想現実 (Virtual Reality; VR) 技術を用いることで上記の問題について解決を試み、競争他者によって誘発される情動変化が自己の生理応答および運動パフォーマンスに影響を及ぼすという仮説の検証を目的とする。我々は同様の実験環境を用いて、サイクリング運動時の競争中の他者とのインタラクションがもたらす心血管応答について報告してきた⁴⁾が、非競争場面から競争場面に文脈が変わったときにパフォーマンス

および生理応答尺度がどのように変化するかは明らかでない。さらに、競争他者によってパフォーマンスに影響を受ける競技者とそうでない競技者の違いは何なのか、について生理学的な観点から新たな知見を提供する。将来的に、競争他者によって誘発される自律神経性応答をはじめとした生理学的応答尺度をメンタルコンディショニングのバイオマーカーとして活用することで新しいメンタルトレーニングの開発につなげることを目指す。

1. 研究方法

1.1 実験参加者

本研究には健康な男性14名（年齢：26.2 ± 5.7歳）が参加した。実験に先立って、実験参加者には実験内容、方法および安全性に関する十分な説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。実験は順天堂大学スポーツ健康科学部研究倫理委員会（順ス倫第31-27号）の承認を得た上で実施した。

1.2 仮想現実におけるサイクリング競争課題

直線コースをサイクリング運動するVR=空間をゲームエンジンUnity (Ver. 2018.4.15f1, Unity Technologies) を用いて作成した (図1A)。実験参加者はヘッドマウントディスプレイ (HTC Vive, HTC Corporation) を装着し、競争他者 (Cyclist Animations HD, Unity Asset Store) を抜く、また

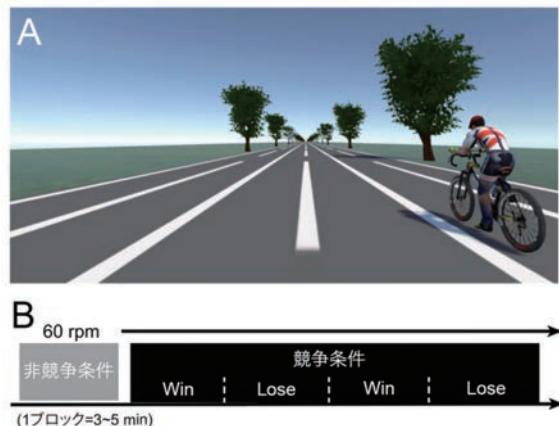


図1 (A) VR映像と(B)実験プロトコル

は競争他者に抜かれる状況を模したVR空間内で、「サイクリング運動を一定速度(60 rpm)で行う」よう教示された。サイクリング運動はVRと連動したバイクコントローラー(VirZoom)を用いて行われた。競争条件に先立って、「非競争条件」として、競争他者を配置せず単独でサイクリング運動(60 rpm)を行うベースラインブロックを実施した。その後、「競争条件」として、競争他者を抜く「Win」ブロック、競争他者に抜かれる「Lose」ブロックを交互に配置し、各ブロック(3~5分)として、交互に合計4ブロック実施した。競争条件における順序効果を考慮して、Winブロックから始めるか、それともLoseブロックから始めるかは実験参加者ごとに疑似ランダムとした(図1B)。

1.3 データ集録:パフォーマンス(ペダル運動)および血圧・心電図・呼吸運動の測定

VRサイクリング運動中のペダル回転数を赤外線センサーと接続したマイクロコンピュータ(Arduino)を用いて測定した。競争条件における他者の接近は、競争他者に割り当てられたキャラクターに音を付加して実験参加者に伝わるようにした(真横の接近で最大音となりその前後で音は減弱する)。血圧は非観血式連続血圧計(CNAP500, CNSystems)を用いて連続的に測定した。心電図電極ブルーセンサー(SP-00-S, メッツ)を胸部に貼付し、心電図データから心拍数を計算した。呼吸運動は上腹部に取り付けた圧トランスデューサーで胸腹部の容積変化に伴う圧変動を測定した。得られたアナログ信号は生体信号増幅器(MLV-2301, 日本光電)を介して増幅し、A/D変換器(PowerLab PL-3508, ADInstruments)を介して汎用コンピュータに取り込みの後、データ解析ソフトウェア(LabChart, ADInstruments; MATLAB, MathWorks)を用いてデータ集録および解析を行った。

1.4 データ解析

非競争条件および競争条件(Win, Loseブロック)間での運動パフォーマンス(ペダル回転数)、血圧、心拍数、および呼吸データの比較解析を行った。Win/Loseブロックは「競争条件」として統合してデータ解析を行った。ペダル回転数、呼吸率、血圧および心拍数について、ノンパラメトリック検定(Wilcoxon符号順位検定)を用いて、競争条件と非競争条件の2群間の差の検定を行った。

運動パフォーマンス(ペダル回転数)が大きく変動した実験参加者と比較的ペダル回転数を維持できた実験参加者を、それぞれ「パフォーマンス低下群(n=7)」と「パフォーマンス維持群(n=7)」に分類した。胸腹部に取り付けた呼吸センサーから得られた呼吸曲線から1分間の呼吸数(呼吸率)を計算した。また呼吸率の増減の方向に関わらず、呼吸運動の変動を定量化するため、以下の式を用いて呼吸変動と定義した。

呼吸変動

$$= | \text{競争条件における呼吸率} \\ - \text{非競争条件における呼吸率の平均値} |$$

競争条件におけるパフォーマンスの変化と生理学的指標との相関を調べるため、競争課題中の他者との接近度(X, 他者の自転車走行音)と上記の呼吸変動(Y)について、1秒毎のデータとして移動平均処理を行った後、相互相関(C_{XY})を以下の式を用いて計算した(MATLAB "xcorr" 関数)。

$$C_{XY}(\tau) = \sum_{t=1}^T X(t)Y(t+\tau)$$

X(t)は時刻tにおける他者とのインタラクションのタイミング、Y(t):時刻tにおける呼吸運動、 τ はXとYの間の時間差(time-lag)を示す。得られた2変数(他者とのインタラクションおよび呼吸変動)の相互相関係数について、競争条件での運動パフォーマンス維持群および低下群の間について、ノンパラメトリック検定(Wilcoxon順

位和検定)を用いて差の検定を行った。

2. 研究結果

2. 1 競争条件・非競争条件における運動パフォーマンスの比較

最初に競争条件において、非競争条件と比較して実験参加者の運動パフォーマンス(ペダル回転数)がどのように変化するか調べた。その結果、ペダル回転数の中央値±標準偏差が、非競争条件では 59.0 ± 4.2 rpm, 競争条件では 56.5 ± 6.0 rpm (Winブロック: 56.3 ± 6.2 rpm, Loseブロック: 56.7 ± 5.9 rpm)であった。非競争条件では教示した60 rpmに近い値でサイクリング運動ができていたが、競争条件(Win/Loseブロック)ではペダル回転数が有意に減少した(図2A; $p = 0.0067$, Wilcoxon符号順位検定)。

このようなパフォーマンス(ペダル回転数)の減少が競争条件に入ってからどのようなタイミングで生じたかを調べるために、競争条件における最初の1~5試行の他者とのインタラクション[抜く(Winブロック), または抜かれる(Loseブロック)]時点前後10秒間のペダル回転数を図2Bにプロットした(実験参加者14名のグループデータ)。その結果、競争条件に入ってから最初のインタラクション(図2B 1st試行, 矢印)に至るまでは非競争条件時のペダル回転数(図2B 点線; 約60 rpm)を維持できていたが、競争他者との最初のインタラクション以降は持続的にペダル回転数が減少した。

ラクシオン以降は持続的にペダル回転数が減少した。

2. 2 競争条件・非競争条件における生理学的パラメータの比較

次に、競争条件における他者とのインタラクションが生理学的応答に及ぼす影響について検討した。非競争条件と競争条件における呼吸率, 動脈血圧(収縮期血圧, 平均血圧, 拡張期血圧), 心拍数のブロックの平均値を計算し比較した。その結果, 呼吸率(非競争: 19.0 ± 2.9 回/分, 競争: 19.3 ± 1.5 回/分, $p = 0.76$), 収縮期血圧(非競争: 124.8 ± 11.9 mmHg, 競争: 124.0 ± 11.7 mmHg, $p = 0.39$), 平均血圧(非競争: 88.5 ± 10.9 mmHg, 競争: 87.4 ± 9.9 mmHg, $p = 0.50$), 拡張期血圧(非競争: 75.8 ± 8.4 mmHg, 競争: 73.2 ± 6.7 mmHg, $p = 0.06$)は条件間で有意な差は見られなかったが(図3A, B), 心拍数は競争条件において非競争条件よりも有意に高い値を示した(図3C; 非競争: 82.5 ± 9.0 bpm, 競争: 84.1 ± 9.9 bpm, $p = 0.04$, Wilcoxon符号順位検定)。

2. 3 競争条件における他者とのインタラクションと運動中の呼吸変動の相互相関

ここまで、非競争条件と競争条件における運動パフォーマンスと生理学的応答尺度について結果を示してきたが、競争場面においてもパフォーマンス

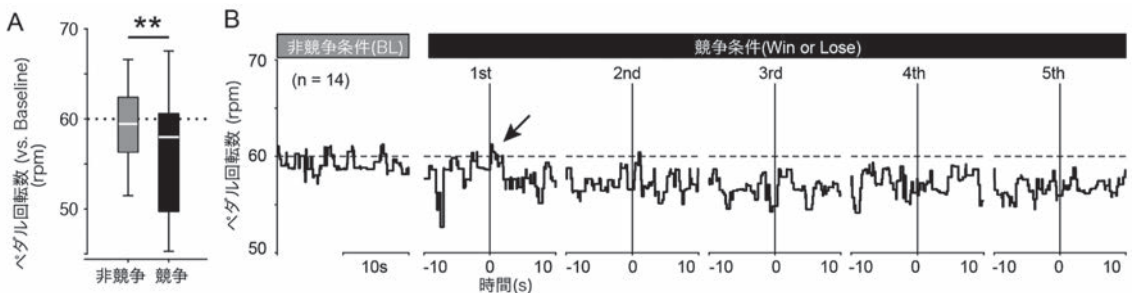


図2 競争条件と非競争条件におけるペダル回転数の比較

(A) 競争/非競争条件におけるペダル回転数, (B) 非競争条件から競争条件への切り替わりに伴うペダル回転数の推移. 条件の切り替わりから最初の他者とのインタラクションの後にペダル回転数が減少した(矢印). ** $p < 0.01$, Wilcoxon符号順位検定

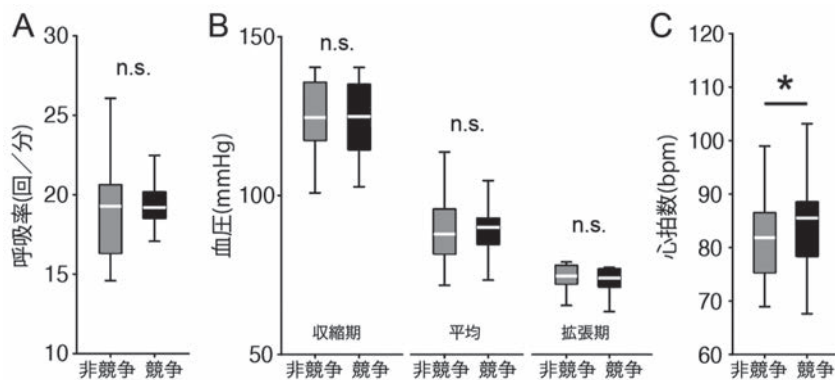


図3 競争条件と非競争条件における生理学的パラメータの比較
 (A) 呼吸率, (B) 血圧:収縮期血圧, 平均血圧, 拡張期血圧, (C) 心拍数
 * $p < 0.05$, Wilcoxon符号順位検定

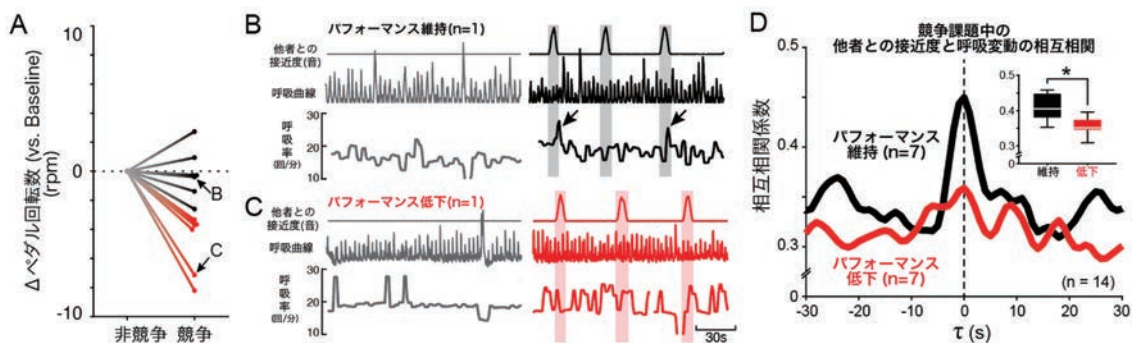


図4 競争条件におけるパフォーマンス低下の個体差と他者接近時の呼吸変動
 (A) 競争条件と非競争条件におけるペダル回転数変化の個人差. 競争条件においてもパフォーマンスを維持した群 (黒線: パフォーマンス維持群, $n=7$) とパフォーマンスが低下した群 (赤線: パフォーマンス低下群, $n=7$) に分類した. (B) パフォーマンス維持群 ($n=1$) の非競争条件 (左図) と競争条件 (右図) における他者との接近度, 呼吸曲線および呼吸率, (C) パフォーマンス低下群 ($n=1$) の非競争条件 (左図) と競争条件 (右図) における他者との接近度, 呼吸曲線および呼吸率, (D) 競争条件中の他者との接近度と呼吸変動の相互相関関数. タイムラグ (τ) 0 時点の相互相関関数のピーク値の比較. * $p < 0.05$, Wilcoxon 順位検定.

ンスを維持するにはどのようにしたら良いのであろうか. この問題に取り組むため, 競争条件においても比較的パフォーマンスを一定に維持することができた実験参加者 (図4A 黒線; パフォーマンス維持群, 7/14名) と, 競争条件においてペダル回転数が減少した実験参加者 (図4A 赤線; パフォーマンス低下群, 7/14名) に分類した.

図4BおよびCに, パフォーマンス維持群 (図4B) およびパフォーマンス低下群 (図4C) の非競争条件 (左図)・競争条件 (右図) における他者との接近度 (他者の自転車走行音), 呼吸曲線, 呼吸率データの一部 (競争条件: Winブロック, 2

分30秒間) を示した. 各群の実験参加者はともにこの競争条件の期間, 3回の他者追い抜き場面を経験したが, パフォーマンス維持群は3試行中2回の試行で顕著な呼吸率の増加が観察された (図4B右, 矢印). 一方で, パフォーマンス低下群の呼吸率はブロックの間で変動はしているものの他者とのインタラクションのタイミングにロックした顕著な呼吸率変動の頻度は低い傾向にあるように見られた (図4C右).

この競争他者とのインタラクションと呼吸応答の関係についてさらなる検討を行うため, 他者との接近度 (競争他者の自転車走行音) と競争条件

と非競争条件の呼吸率の差を絶対値に変換した「呼吸変動」の間の相互相関解析を行った(研究方法を参照)。その結果、パフォーマンス維持群はパフォーマンス低下群よりも有意に高い相互相関関数のピーク値を示した(パフォーマンス維持群： $r = 0.44 \pm 0.12$ ，パフォーマンス低下群： $r = 0.36 \pm 0.03$ ， $p = 0.01$ ，Wilcoxon順位和検定)。

3. 考 察

本研究課題において、VRを用いたサイクリング競争場面を作成し、競争他者の振る舞いを仮想的に完全にコントロールすることによって、競争他者が自己の運動パフォーマンスおよび自律神経性応答をはじめとした生理学的応答尺度にどのような影響を及ぼすか、について比較・検討可能な実験環境を開発した(図1)。

本研究における行動課題は、実験参加者に「一定速度(60 rpm)でサイクリング運動を行うこと」を要求しているため、どの程度60 rpmで一定にサイクリング運動できたかがパフォーマンスの尺度となる。その結果、非競争条件と比較して、競争条件においてペダル回転数の有意な低下が観察された(図2A)。このパフォーマンスの低下は運動持続時間の進行に伴って徐々に出現したというよりも、競争条件において他者と初めてのインタラクションを経験したタイミングで生じた(図2B 1st 試行)。このような結果は、ペダル回転数の減少が、単なる運動時間の増加に伴う運動性の疲労というよりも、競争他者とのインタラクションによって惹起されたものである可能性を示唆する。

また、課題中の心拍数は競争課題の方が非競争課題よりも有意に高い値を示した(図3C)。心拍数の値そのものは両条件ともに80~90 bpm程度であり、運動強度としては低強度であったと考えられる。このような低強度の一定運動実行において、運動出力(ペダル回転数)は一定あるいは低下し

ているのに対し、心拍数は上昇しているという結果は、一定強度の運動(ペダル回転数)を発揮するのに必要なコスト(心拍数)が増大したという事で運動効率が低下している(相対的な運動強度の上昇)と解釈することができる。このようなパフォーマンスに対するコストの増大は認知資源の消費に伴う中枢性疲労によって生じた可能性が考えられる。

「抜く」または「抜かれる」という視覚刺激は競争における優劣を決める要因の一つであり、先行研究においてこのような競争時の優劣がポジティブ(快情動)あるいはネガティブな感情(不快情動)の惹起、ならびに生理応答にも影響を及ぼすことが知られている^{2,5,6)}。したがって、競争する他者が存在するという事は、競争他者がどのような振る舞いをするのかという感覚情報の処理・注意制御に加え、情動反応の制御など、自己の認知資源(Cognitive resource)をより多く消費することによって中枢性疲労をもたらした可能性がある。感覚運動統合や注意の制御といった機能は大脳皮質の前頭前野をはじめとする脳領域によって実現されている実行機能の一つであり⁷⁾、一過性の運動によってこの実行機能に影響を受けることも報告されている⁸⁾。一方で、情動反応の制御については扁桃体など大脳辺縁系の脳領域が関与することが知られている。扁桃体は内側前頭皮質と相互的な機能接続を有し、社会的な刺激の処理にも関与する⁹⁾。このような大脳皮質および大脳辺縁系領域が、競争課題においてどのような役割を担っているのかについては今後のさらなる研究が必要である。

興味深いことに、競争条件時にペダル回転数を維持したパフォーマンス維持群において、他者とのインタラクションと呼吸変動の間で有意な相互相関が観察された(図4)。その一方で、運動パフォーマンス低下群はそのような競争他者とのインタラクションと呼吸変動の間に顕著な相互相関

ピークが検出されなかった。これらの結果は、運動パフォーマンスは他者の影響を受けるが、運動パフォーマンスを維持することができた実験参加者（運動パフォーマンス維持群）は、呼吸運動を調節することによってそのパフォーマンス低下を防止した可能性を示唆する。寝ている間も呼吸は止まらないように自律的な側面を持つ呼吸運動であるが、その神経支配は運動神経によってなされている¹⁰⁾。いわゆるメンタルが強い競技者は他者とのインタラクションの際に呼吸運動を調節している可能性があり、競技中の呼吸応答が競争条件におけるパフォーマンスの差異を生み出すバイオマーカーとしての応用的活用が可能かもしれない。さらには競争他者によって惹起されるネガティブな影響を呼吸運動で改善できるようになれば、新しいメンタルトレーニング法の開発につながる事が期待される。

4. まとめ

本研究において、VRを用いた比較的低運動強度の競争場面であっても競争他者が自己の運動パフォーマンス（ペダル回転数）および心拍数に影響を及ぼし得ること、また競争場面においてもパフォーマンスを維持できる競技者とパフォーマンスが低下してしまう競技者の違いとして呼吸運動がカギを握っている可能性を見出すことができた。

スポーツ競技はアスリート本人のみならず、競争相手、審判および観客まで含めて成り立っている。したがって、アスリートがベストパフォーマンスを発揮するためには、その要因は自己だけでは完結せず、他者も含めて検討する必要がある。本研究成果によって、競争他者が自己の生理応答およびパフォーマンスに及ぼす影響を特徴化することで、アスリートが他者から受ける影響の程度を定量的なバイオマーカーとして計測できる可能性がある。このバイオマーカーの活用は新しいメ

ンタルトレーニングの開発につながると期待される。

謝 辞

本研究に対して、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、また本実験に参加して下さった実験参加者、関係者の方々に心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) Oliveira-Silva I., Silva V.A., Cunha R.M., Foster C.: Autonomic changes induced by pre-competitive stress in cyclists in relation to physical fitness and anxiety. *PLoS One*, 13: e0209834 (2018)
- 2) Yamaguchi D., Tezuka Y., Suzuki N.: The differences between winners and losers in competition: the relation of cognitive and emotional aspects during a competition to hemodynamic responses. *Adapt. Hum. Behav. Physiol.*, 5: 31-47 (2019)
- 3) Ricarte J., Salvador A., Costa R., Torres M.J., Subirats M.: Heart rate and blood pressure responses to a competitive role-playing game. *Aggr. Behav.*, 27: 351-359 (2001)
- 4) 香月 翔太, 河村 剛光, 和気 秀文, 山中 航: VRサイクリング運動時の競争他者によって誘発される情動変化が運動パフォーマンスおよび自律神経応答に及ぼす影響. 映像メディア学会技術報告, 44: HI2020-2074 (2020)
- 5) Costa R., Salvador A.: Associations between success and failure in a face-to-face competition and psychobiological parameters in young women. *Psychoneuroendocrinology*, 37: 1780-1790 (2012)
- 6) Gonzalez-Bono E., Salvador A., Serrano M.A., Ricarte J.: Testosterone, cortisol, and mood in a sports team competition. *Horm. Behav.*, 35: 55-62 (1999)
- 7) Funahashi S.: Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neurosci. Res.*, 39: 147-165 (2001)
- 8) Hillman C.H., Snook E.M., Jerome G.J.: Acute cardiovascular exercise and executive control function. *Int. J. Psychophysiol.*, 48: 307-314 (2003)
- 9) Gangopadhyay P., Chawla M., Dal Monte O., Chang

S.W.C.: Prefrontal-amygdala circuits in social decision-making. *Nat. Neurosci.*, (2020)

10) 本間 生夫, 帯津 良一. 情動と呼吸 —自律系と呼吸法—: 朝倉書店, (2016)

若年成人における歩行および同等速度のジョギングによる 座位行動ブレイクが食後血糖・脂質動態に及ぼす急性影響

中村学園大学 熊原 秀 晃
(共同研究者) 同 阿具根 美 和
岡山県立大学 綾 部 誠 也
中村学園大学 一 田 木綿子
栄養クリニック
中村学園大学 加 藤 正 樹

Acute Effects of Breaking up Prolonged Sitting with Walking and Slow-speed Jogging on Postprandial Glycaemia and Lipid Responses in Young Adults

by

Hideaki Kumahara, Miwa Agune, Masaki Kato
Faculty of Nutritional Sciences, Nakamura Gakuen University
Makoto Ayabe
*Faculty of Computer Science and Systems Engineering,
Okayama Prefectural University*
Yuko Ichida
Nakamura Gakuen University Nutrition Clinic

ABSTRACT

This study aimed to determine the effects of sitting breaks with walking and slow-speed jogging on postprandial glycaemia and lipid responses in healthy young adults. Fourteen adults, aged 22 ± 2 yrs, randomly completed three different 180-min trials after consuming standardised test meals. These trials were as follows: 1) uninterrupted sitting on an office chair (control), 2) sitting with 3-min bouts of walking every 30 min and 3) sitting with 3-min bouts of slow-speed jogging every 30 min. Walking and

jogging speeds were fixed at 6.0 km/h with a pacesetter. Venous blood samples and blood glucose concentrations using a continuous subcutaneous interstitial fluid glucose monitoring system were obtained. Incremental areas under the curves (iAUC) for the blood sample responses were calculated. Both the glucose iAUC and insulin iAUC over 180 min were significantly lower during the walking and jogging trials than during uninterrupted sitting. The insulin reduction ratio during the jogging trial had significant correlations with the maximal oxygen consumption per body weight compared with the control trial. However, there was no significant effect of sitting breaks on postprandial triglyceride response. Our results indicated that breaking up prolonged sitting with 3 min of walking or slow-speed jogging every 30 min improved postprandial glycaemic and insulinemic responses compared with uninterrupted sitting in healthy young adults. The effect of jogging breaks on suppressing insulin secretion may be more effective in individuals with lower aerobic fitness levels.

キーワード

身体活動, 座位行動, 非運動性活動, 食後エネルギー代謝, 血糖値

Keyword

Physical activity, Sedentary behavior, Non-exercise activity thermogenesis, Postprandial energy metabolism, Blood glucose level

要 旨

本研究は、歩行および低速度ジョギング（ジョグ）による座位行動中断が、健常若年成人の食後血糖・脂質動態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。22 ± 2歳の男女14名を対象に次の3試験の食後180分間の血中指標を観察した：オフィスチェア座位継続（対照試験）、30分毎に3分間の6km/時の歩行およびジョグ。血中指標は肘静脈採血および持続血糖測定装置を用いて測定し、曲線下面積値（iAUC）にて評価した。グルコース値およびインスリン値のiAUCに有意な試験間差が認められ、歩行とジョグは対照試験に比して低値を示した。一方、トリグリセリド値iAUCは試験間差を認めなかった。ジョグにおける対照試験を基準としたインスリン値低減率は、最大酸素

摂取量との間に有意な相関関係を認めた。歩行またはジョグによる座位行動の中断は、健常若年成人の食後血糖動態に好影響を及ぼすことが示唆された。ジョグによるインスリン抑制効果は全身持久力が低い者で大きい可能性がある。

緒 言

近年、長時間に亘る座位や横臥状態といった座位行動が生活習慣病等のリスク因子となることがわかってきており^{1,2)}、WHOの身体活動指針³⁾では疾病予防のために、3METs以上の中等度強度以上の身体活動の促進に加えて、座位活動時間を少なくすることが推奨されている。日本人は、オフィスワーカーを代表として座位時間が長い国民であることが報告されているが⁴⁾、COVID-19感染拡大によるリモートワーク等の新しい生活様

式によって、座位行動の機会がさらに多くなっていることが危惧される。

肥満や糖尿病患者等の疾患を対象に、座位行動を中断・短縮することの健康効果を検討した先行研究が散見され、座位行動を20～30分毎に2～5分の低中強度の歩行で中断すると、血中グルコースやインスリン等の食後血糖代謝関連マーカーに好影響をもたらすことが報告されている⁵⁻⁸⁾。しかし、生活習慣病等の一次予防が重要視される働き盛り世代の若年成人を対象とした先行研究は限定的であり、座位行動を歩行で中断することによる食後血中グルコース値の低減効果を認めた報告⁹⁾がある一方で、認められないとの矛盾した報告¹⁰⁻¹²⁾もあり、未だ一定の見解は得られていない。したがって、将来へ向けた疾病予防が重要となる健常若年成人に対する座位行動中断の有効性や中断方法を明らかにする必要があると考えられる。

ところで、先行研究で検証されている座位行動の運動様式の主流は歩行である。歩行は、主要な日常生活活動として座位行動を中断する方法に比較的取り入れ易いと考えられる。一方、その速度すなわち運動強度は限定的である。近年、歩行と同等速度で行う低速度ジョギング（以下、ジョグ）が提唱されている。このジョグは、歩行と同等速度で実施するものの活動中のエネルギー消費量が歩行の約2倍となり、肥満予防・改善が期待できる運動様式であることが報告されている^{13,14)}。このジョグであれば、肥満者や疾患者に比して身体的体力の高い健常若年者においても好影響をもたらすだけの十分な負荷強度を与えられる可能性が考えられる。

以上の観点から、本研究は、健常若年成人を対象とし、歩行およびジョグによる2種の異なる座位行動の中断方法が、食後の血糖・血中脂質関連マーカーに及ぼす影響を急性影響の側面から明らかにすることを目的とした。

1. 研究方法

1.1 対象者

対象者は若年健常成人14名（女性7名, 男性7名, 年齢: 22.3 ± 1.5 歳, BMI: 20.5 ± 2.1 kg/m²）であった。対象者には事前に試験の趣旨、安全性について書面および口頭にて説明を行い、研究参加への同意を書面にて得た。なお、本研究のプロトコルは中村学園大学倫理審査委員会の承認を得た。

1.2 実験プロトコル

本試験事前に、トレッドミルを用い70m/分と100m/分の歩行および130m/分から15m/分で漸増する走行を行う1負荷4分間の間欠式多段階漸増運動負荷試験を行った。運動終了基準は、年齢推定最大心拍数の80%を超えた時点、または主観的運動強度で18（かなりきつい）を超えた時点とした。運動中の酸素摂取量は、質量分析装置（ARCO2000, アルコシステム社）を用い呼気ガスを連続して測定し、各負荷終了前1分間の平均値を評価した。心拍数は、心拍数計測装置（RS800, Polar社）にて各負荷終了前10秒間の平均値を採用した。

本試験の実験プロトコルを図1に示した。対象者は、各試験2日前から激しい運動を控え、各試験前日の夕食は、試験開始10時間前までに毎回同じものを喫食した。試験当日は早朝空腹状態にてベースラインとなる肘静脈採血を行うと共に、持続血糖測定装置（FreeStyleリブレ, Abbott社）にて間質液中グルコース（以下、グルコース値）を測定した。その後、対象者は実験食（身体活動レベル1.5の推定総エネルギー必要量の40%でPFC比=15:25:60%で構成）を規定時間内で喫食した。実験食の完食時を0分とし180分間に亘りオフィスチェアでの座位を基本とした次の3試験を無作為化クロスオーバー試験にて実施した。

①歩行試験：座位を30分毎に中断し6km/時で3

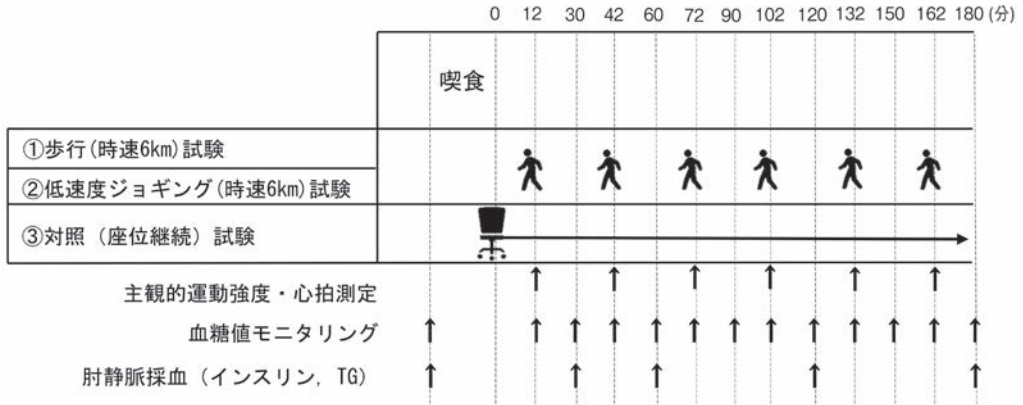


図1 本試験のプロトコル

分間の歩行, ②ジョグ試験: 30分毎に6km/時で3分間のジョグ, ③対照試験: オフィスチェアで座位継続 (座位中断なし). 歩行とジョグは, 15mの廊下を熟練ペースメーカー1名が対象者を先導し実施した. 肘静脈採血はベースラインに加え, 食後30分・60分・120分・180分後に行い, インスリンおよびトリグリセリド (TG) を測定した. 持続血糖測定装置によるグルコース値は15分毎に測定した. 歩行およびジョグ時の心拍数は, 活動終了前10秒間に心拍数計測装置より得られた平均値を採用した. 歩行とジョグの活動終了直後に Borgの主観的運動強度 (自覚的疲労度を示す6~20の数値) を聴取した.

1. 3 統計解析

単位体重当たりの最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) は, 運動負荷試験で得られた酸素摂取量と心拍数をプロットした一回帰式より, 年齢推定最大心拍数 ($206.9-0.67 \times \text{年齢}$)¹⁵⁾ に対する $\dot{V}O_2$ を算出し推定した. 歩行・ジョグ時の心拍数より相対的運動強度の指標となる心拍数予備能 (% Heart Rate Reserve: % HRR) 15を算出した: $[\text{活動中の心拍数}-\text{安静時心拍数}] \div [\text{推定最大心拍数}-\text{安静時心拍数}] \times 100$. %HRRは, 同一試験時に測定した6回の心拍数を個人ごとで平均化し代表値とした.

食後のグルコース値, インスリン値, TG値のデータは, Area Under the Curve (AUC) を算出し, ベースラインからの増加分を反映する Incremental AUC (iAUC)¹⁶⁾ にて評価した. iAUCは, 全180分間に亘る総面積値に加えて, 時間帯毎 (0~60分:60分値, 60~120分:120分値, 120~180分:180分値) に分けて評価した. また, 歩行とジョグの iAUC総面積値は, 座位継続試験を基準 (0%) とした比率 (低減率) を求めた: $([\text{各試験のiAUC}-\text{座位継続試験のiAUC}] \div \text{座位継続試験のiAUC}) \times 100$.

試験間の比較には一元配置分散分析および Tukeyの post hoc 検定を用いた. 歩行とジョグ時の % HRR は t検定, RPEは Wilcoxonの符号順位検定を用い比較した. 座位中断活動による糖・脂質パラメータの変化と全身持久力の関連性を検討するために, 各試験の iAUCの比率を従属変数とし $\dot{V}O_2\max$ を独立変数とした Pearsonの単相関分析を行なった. データは平均値 \pm 標準偏差または中央値 [四分位範囲] で示した. 統計解析には IBM SPSS Statistics 28を使用した. 有意水準は5%とした.

2. 研究結果

ジョグ時 ($53.2 \pm 15.0\%$), 歩行時 ($32.4 \pm 11.8\%$) の % HRR に有意差が認められ, ジョグ時

は歩行時より高値を示した。RPEも同様に両試験間に有意差が認められた(ジョグ:12.0[10.0-13.0] vs. 歩行:10.0[9.0-12.0])。

グルコース iAUC の総面積値は有意な試験間差を示し、歩行とジョグは座位継続と比較して低値を示した。時間帯毎でも同様に低値を示した(図2)。

インスリン iAUC の総面積値は有意な試験間差を示し、歩行とジョグは座位継続と比較して低値

を示した。時間毎の分析においても有意な試験間差が認められ、ジョグは60分値と120分値で座位継続より低値を示し、歩行は120分値と180分値で低値を示した(図3)。

TG の iAUC 総面積値および各時間毎のいずれも有意な試験間差を認めなかった(図4)。

ジョグに関して、 $\dot{V}O_2\max$ とインスリン iAUC の低減率の間に有意な正の相関関係 ($r=0.564$) が認められた。

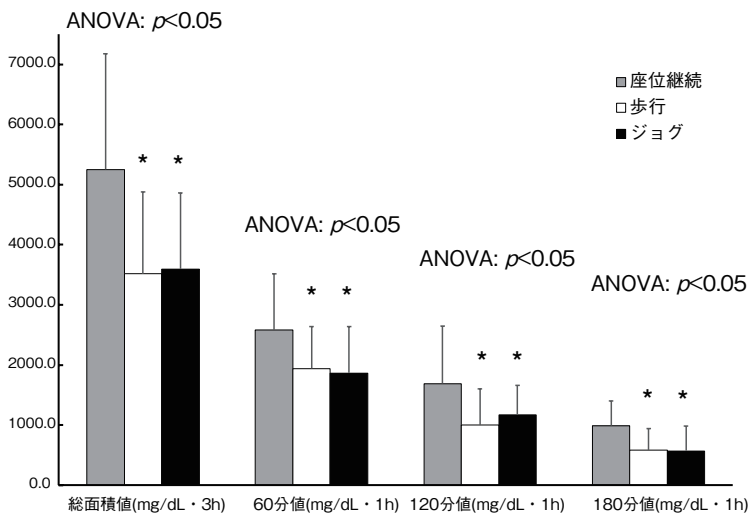


図2 グルコースiAUCの総面積値(180分間)および時間帯毎の面積値(0~60分:60分値, 60~120分:120分値, 120~180分:180分値)の比較
試験間の比較には一元配置分散分析(ANOVA)およびpost hoc検定を用いた。*: vs.座位継続 $p < 0.05$

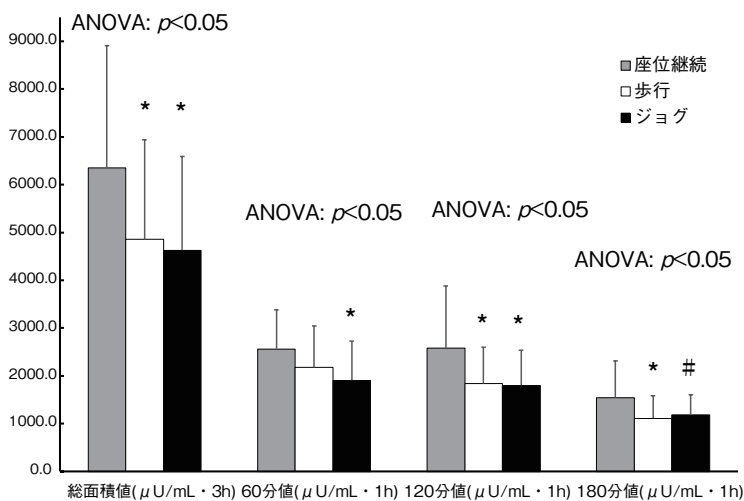


図3 インスリンiAUCの総面積値(180分間)および時間帯毎の面積値(0~60分:60分値, 60~120分:120分値, 120~180分:180分値)の比較
試験間の比較には一元配置分散分析(ANOVA)およびpost hoc検定を用いた。*: vs.座位継続 $p < 0.05$, #: vs.座位継続 $p < 0.1$

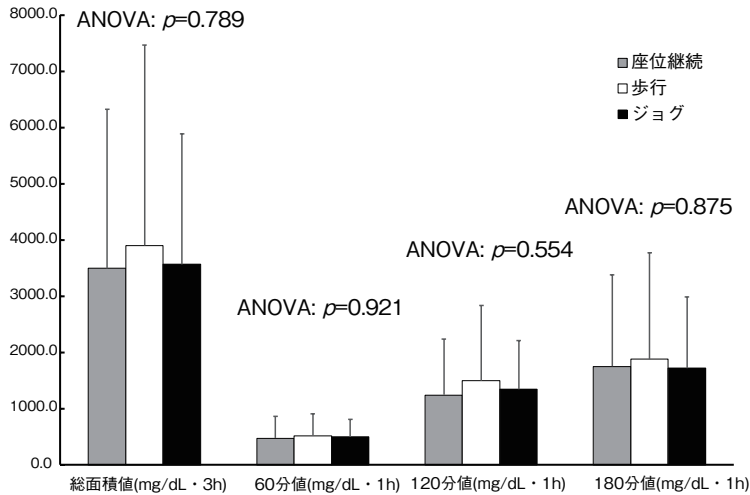


図4 トリグリセリドiAUCの総面積値 (180分間) および時間帯毎の面積値 (0~60分:60分値, 60~120分:120分値, 120~180分:180分値) の比較
試験間の比較には一元配置分散分析 (ANOVA) およびpost hoc検定を用いた

3. 考 察

本研究は、健常若年成人を対象に歩行および低速度ジョギングによる座位中断が、食後の血中糖・脂質関連マーカーに及ぼす影響性を検討した。その結果、座位を30分毎に3分間の歩行または低速度ジョギングにより中断することは、座位継続と比較して血中グルコース値とインスリン値を抑制することが示唆された。脂質代謝関連マーカーには、座位中断による明らかな効果はみられなかった。

同一速度で実施した歩行およびジョグの相対的運動強度は、それぞれ低強度 (約32%HRR) と中等度 (約53%HRR) に区分された。健常若年成人に対してこのような負荷強度の歩行とジョグによる座位中断は、食後グルコース値だけでなくインスリンの抑制にも効果があったことは本研究の注目すべき結果の一つである。推測の域を出ないが、比較的軽度な負荷強度かつ短時間の身体活動を断続的に実施することでもインスリン感受性あるいはインスリン非依存性の糖取込みが一過性に亢進され、インスリン分泌の抑制作用をもたらした可能性が考えられた。また、本研究結果は、近年注

目されている細切れ活動¹⁷⁾の有効性を支持する結果とも位置付けられるかもしれない。

健常若年成人に関して、座位行動中断による食後血糖代謝マーカーへの影響性については相反する結果が混在している^{9-12, 18, 19)}。これら先行研究における効果の有無と座位中断活動の強度や時間の関連に系統性は確認できない。しかし、先行研究の多くは、食事負荷に高糖質食・飲料、または高脂質食といった特定のエネルギー産生栄養素を過度に負荷した栄養素構成で検証されていることが結果の差異の要因の1つかもしれない。本研究では、一般的な日本人の食事²⁰⁾を想定したPFC比の食事を負荷した。一般的な栄養素構成とすることで、より現実的な食事による動態を観察できたことも本研究の特徴であった。

ところで、ジョグでは食後60分からインスリン値iAUCの低減が認められ、食後120分からの低減を示した歩行よりも早い段階でインスリン分泌抑制効果が認められた。しかし、iAUC総面積値の観点からは歩行とジョグの間に顕著な差異がなかったことは留意すべきであろう。ジョグは、歩行よりも相対的運動強度が高いことは認められたが、歩行よりも優れた影響をもたらすという仮

説は立証できなかった。この要因の一つとして、本研究で規定した歩行速度は6km/時とやや速い速歩に相当する速度であったことが考えられる。しかし興味深いことに、ジョグに関して $\dot{V}O_2\max$ とインスリンiAUC低減率の間に有意な相関関係が認められ、全身持久力が低い者ほど座位継続と比較した際のインスリンの低減率が大きくなっていた。つまり、ジョグは全身持久力が低い者にとってはインスリン分泌の抑制に有効な負荷強度となる個人差が考えられた。一般的に諸体力が低い肥満者や糖尿病疾患患者、あるいは高齢者などでは、ジョグによる座位中断の恩恵はより大きいと期待できる。

また、本研究で用いたジョグの特徴として、主観的疲労度は比較的小さく歩行と同様に日常生活に取り入れ易い活動であると考えられた。さらにジョグの%HRRは、生活習慣病の予防・改善に推奨される中等度の相対的運動強度の範囲であり、冠動脈疾患や一部の癌の予防にも関連する全身持久力の向上に資するものである^{21,22)}。以上のように、ジョグによる座位行動中断の利点として、食後血糖代謝関連マーカーへの効果に留まらず、健康増進に有効な活動様式であることが示唆された。

食後脂質代謝関連マーカーに関して、食後TG値に明らかな座位中断の効果を認めなかった。本結果は、座位中断は食後TGに影響しないことを報告した先行研究^{7,8,19,23)}を支持するものであった。しかし、若年健常者を対象に食後TGに改善を認めた先行研究¹²⁾も存在する。本研究で食後TG値に座位中断の影響が観察できなかった要因として、食事負荷に用いたエネルギー産生栄養素の構成が考えられた。先行研究¹²⁾では、TGの動態を観察するために脂質の多い食事を喫食させていた¹²⁾。日本人の一般的な食事に近似した本研究の試験食程度の脂質摂取量の範囲では、座位中断活動による効果は観察し難かったのかもしれない

い。加えて、TGの変化の観察期間が十分でなかった可能も考えられた。座位中断の翌日にTGの低下傾向を観察した研究²³⁾や、2日間に亘る座位中断介入試験において2日目のみで低値を示した研究¹²⁾が報告されている。以上のように、健常若年成人が座位を歩行およびジョグで中断することは、比較的短時間の日本人の一般的なPFC比による食事性脂質代謝へ及ぼす明らかな影響性は認められず、より長時間の介入あるいは観察期間での検討が今後の課題である。

4. 総括

健常若年成人の座位行動を30分毎に3分間の歩行またはジョグで中断することにより、食後グルコースとインスリンに好影響をもたらすことが示唆された。また、歩行とジョグでは改善効果に顕著な差は認められなかったものの、ジョグは過度な疲労感を感じずに行える活動でありながら、全身持久力の維持・向上が期待され、かつ食後の早い時間帯からのインスリン分泌抑制効果のある活動様式と考えられた。さらに、この効果は全身持久力が低い者でより効果が現れやすいことが示唆された。

本研究は急性影響を検討したため、長期の血糖・脂質動態の影響については不明である。より長期の介入期間を設けたうえでの血糖・脂質動態を観察することは今後の課題である。

謝辞

本研究にご協力頂いた対象者の皆様に深謝申し上げます。本研究の遂行にご助力頂いた中村学園大学大学院栄養科学研究科の石澤由夏氏、中村学園大学栄養科学部の川島聖矢氏、山下達也氏、澤菜々子氏、白濱亮子氏ほか研究室関係諸氏に感謝申し上げます。本研究の成果の一部は、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支援によるものです。

文 献

- 1) Grøntved A., Hu F.B. Television viewing and risk of type 2 diabetes, cardiovascular disease, and all-cause mortality: a meta-analysis. *JAMA*. 305: 2448-2455 (2011)
- 2) Matthews C.E., George S.M., Moore S.C., et al. Amount of time spent in sedentary behaviors and cause-specific mortality in US adults. *Am. J. Clin. Nutr.* 95:437-445(2012)
- 3) World Health Organization. WHO Guidelines on physical activity and sedentary behaviour(2020)
- 4) Bauman A., Ainsworth B.E., Sallis J.F., et al. The descriptive epidemiology of sitting. A 20-country comparison using the International Physical Activity Questionnaire (IPAQ). *Am. J. Prev. Med.* 41:228-235(2011)
- 5) McCarthy M., Edwardson C.L., Davies M.J., et al. Fitness moderates glycemic Responses to sitting and light activity breaks. *Med. Sci. Sports Exerc.* 49:2216-2222(2017)
- 6) Dunstan D.W., Kingwell B.A., Larsen R., et al. Breaking up prolonged sitting reduces postprandial glucose and insulin responses. *Diabetes Care.* 35:976-983(2012)
- 7) Larsen R.N., Kingwell B.A., Robinson C., et al. Breaking up of prolonged sitting over three days sustains, but does not enhance, lowering of postprandial plasma glucose and insulin in overweight and obese adults. *Clin. Sci. (Lond)*. 129:117-127(2015)
- 8) Freire Y.A., Macêdo G.A.D., Browne R.A.V., et al. Effect of breaks in prolonged sitting or low-volume high-intensity interval exercise on markers of metabolic syndrome in adults with excess body fat: A Crossover Trial. *J. Phys. Act. Health.* 16: 727-735 (2019)
- 9) Bailey D.P., Maylor B.D., Orton C.J., et al. Effects of breaking up prolonged sitting following low and high glycaemic index breakfast consumption on glucose and insulin concentrations. *Eur. J. Appl. Physiol.* 117: 1299-1307(2017)
- 10) Bailey D.P., Broom D.R., Christmas B.C., et al. Breaking up prolonged sitting time with walking does not affect appetite or gut hormone concentrations but does induce an energy deficit and suppresses postprandial glycaemia in sedentary adults. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 41: 324-331 (2016)
- 11) Peddie M.C., Kessell C., Bergen T., et al. The effects of prolonged sitting, prolonged standing, and activity breaks on vascular function, and postprandial glucose and insulin responses: A randomised crossover trial. *PLoS One.* 16: e0244841 (2021)
- 12) Homer A.R., Fenemor S.P., Perry T.L., et al. Regular activity breaks combined with physical activity improve postprandial plasma triglyceride, nonesterified fatty acid, and insulin responses in healthy, normal weight adults: A randomized crossover trial. *J. Clin. Lipidol.* 11: 1268-1279.e1261 (2017)
- 13) 田中宏暁. スロージョギングの効用と減量法. 日本スポーツ栄養研究誌. 10: 2-9(2017)
- 14) Tanaka H., Jackowska M. Slow jogging: lose weight, stay healthy, and have fun with science-based, natural running. New York : Skyhorse Publishing(2016)
- 15) American College of Sports Medicine. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription. Baltimore:Lippincott Williams & Wilkins(2010)
- 16) Le Floch J.P., Escuyer P., Baudin E., et al. Blood glucose area under the curve. Methodological aspects. *Diabetes Care.* 13: 172-175(1990)
- 17) Jakicic J.M., Kraus W.E., Powell K.E., et al. Association between bout duration of physical activity and health: Systematic review. *Med. Sci. Sports Exerc.* 51: 1213-1219(2019)
- 18) Ma S.X., Zhu Z., Zhang L., et al. Metabolic effects of three different activity bouts during sitting in inactive adults. *Med. Sci. Sports Exerc.* 52: 851-858 (2020)
- 19) Peddie M.C., Bone J.L., Rehrer N.J., et al. Breaking prolonged sitting reduces postprandial glycemia in healthy, normal-weight adults: a randomized crossover trial. *Am. J. Clin. Nutr.* 98: 358-366(2013)
- 20) 厚生労働省. 日本人の食事摂取基準2020版(2020)
- 21) Tanaka H., Shindo M. The benefits of the low intensity training. *Ann. Physiol. Anthropol.* 11: 365-368(1992)
- 22) Ayabe M., Ishii K. Intensity and amount of habitual physical activity for health: Special considerations in middle-aged and older Japanese adults. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine.* 3: 85-90

- (2014)
- 23) Henson J., Davies M.J., Bodicoat D.H., et al.
Breaking up prolonged sitting with standing or walking attenuates the postprandial metabolic response in postmenopausal women: A randomized acute study. *Diabetes Care*. **39**: 130-138 (2016)

生体内における生理的環境下での 関節接触面解析手法を用いた肩関節疾患の病態解明

北海道大学病院 門 間 太 輔
(共同研究者) 北海道大学大学院 岩 崎 倫 政
北海道大学病院 松 居 祐 樹
北海道大学大学院 塩 田 惇 喜
苫小牧王子病院 沼 口 京 介

Evaluation of Shoulder Joint Diseases Using Joint Contact Area Analysis in Vivo

by

Daisuke Momma, Yuki Matsui
Hokkaido University Hospital, Center for Sports Medicine
Norimasa Iwasaki, Junki Shiota
Faculty of Medicine and Graduate School of Medicine
Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University
Kyosuke Numaguchi
Department of Orthopaedic Surgery, Tomakomai Oji Hospital

ABSTRACT

Three-dimensional visualization of joint motion is an extremely significant attempt to provide important information for understanding pathological conditions and deciding on treatment plans. Especially in the shoulder joint, the support mechanism of the joint

by soft tissues such as tendons and ligaments, as well as hard tissues such as bones, is important. The purpose of this study was to develop a system to analyze the contact area of the shoulder joint under physiological conditions using 4D-CT, which has been difficult to understand the pathophysiology of shoulder joint diseases in vivo. Since these analysis methods can be widely applied to the analysis of joint motion throughout the body, they are expected to be highly practical not only for upper limb diseases, but also for lower limb and spinal diseases. The results are expected to be reported at international conferences and submitted to international journals in the future.

キーワード

生体内, 生理的環境下, 関節接触面, 肩関節疾患, 病態

Keyword

in vivo, physiological condition, joint contact area, shoulder joint diseases, pathology

要 旨

関節外科において関節動作を3次的に可視化することは、病態の把握、治療方針決定などに重要な情報を供給できる極めて意義のある試みである。とりわけ肩関節においては、骨などの硬組織を含め腱・靭帯などの軟部組織による関節の支持機構が重要であり、個々の構造が複雑にかつ相互的に作用することで有効な関節機能を果たすため、生体内における生理的な環境下における動作解析が重要である。本研究では、生体内における病態把握が困難であった肩関節疾患について、生理的な環境下における動作肩関節接触面を4D-CTを用いて解析し、そのシステムを構築することを目的とした。これらの解析手法は広く全身における関節運動の解析に応用することが可能であることから、上肢疾患に限らず下肢および脊椎疾患における解析まで、高い実用性が期待される。今後は国際学会での報告や、英文雑誌への投稿が見込まれる。

緒 言

関節外科において関節動作を3次的に可視化することは、病態の把握、治療方針決定などに重要な情報を供給できる極めて意義のある試みである。そのためこれまで、解剖検体を用いた解析¹⁾、体表マーカーを用いた解析²⁾、イメージマッチングの手法を用いた動作解析などが行われてきた³⁾。しかしながら、これらの解析手法には多くの限界点が存在する。すなわち、靭帯や筋肉および腱に作用する生体内の力学的負荷や、動作の再現が困難である点や、間接的な解析のため解析精度に問題があった。とりわけ肩関節においては、骨などの硬組織を含め腱・靭帯などの軟部組織による関節の支持機構が重要であり、個々の構造が複雑にかつ相互的に作用することで有効な関節機能を果たすため、生体内における生理的な環境下における動作解析が重要である。我々はこれまで、3次元骨モデルを用いた生体内における生理的な環境下での関節接触面の解析手法の有用性を報告している。さらに近年、4次元CT (4D-CT) により3次元骨表面情報を一定の範囲で撮像すること

が可能となり、この結果3次元骨モデルの連続撮影が可能となったことで、関節の動作解析の有用性が報告されている。そこで本研究では、生体内における病態把握が困難であった肩関節疾患について、生理的な環境下における動作肩関節接触面を4D-CTを用いて解析し、そのシステムを構築することを目的とした。

1. 研究方法

北海道大学病院倫理委員会の承認のもと患者からのインフォームドコンセントが得られた上腕骨骨欠損を有する反復性肩関節脱臼患者8名を対象とした。先行研究に準じて健側・患側とも、肩関節90°外転、水平伸展位で肩関節内外旋動作(3.3秒間, 31シーン)を行い、4D-CT撮影を行った(図1)⁴⁾。

CT画像において肩甲骨関節窩の骨欠損および上腕骨頭の骨欠損(Hill-Sachs Lesion)を計測した。得られた4D-CT画像から、3次元骨モデルを作成し独自に開発した解析ソフトを用いて、肩甲骨上腕関節接触面の解析を行った。肩甲骨上腕関節の接触面は骨モデル間の距離が4mm以下を関節接触面と定義した。最大外旋位および最大内旋位の関節接触面の平均値を比較検討した(図2)。

2. 研究結果

平均年齢は27.0歳(20-38歳)であり全て男性であった。Hill-Sachs Lesionの最大幅は平均20.5 ± 3.2mmであり、肩甲骨関節窩骨欠損幅は、13.5 ±

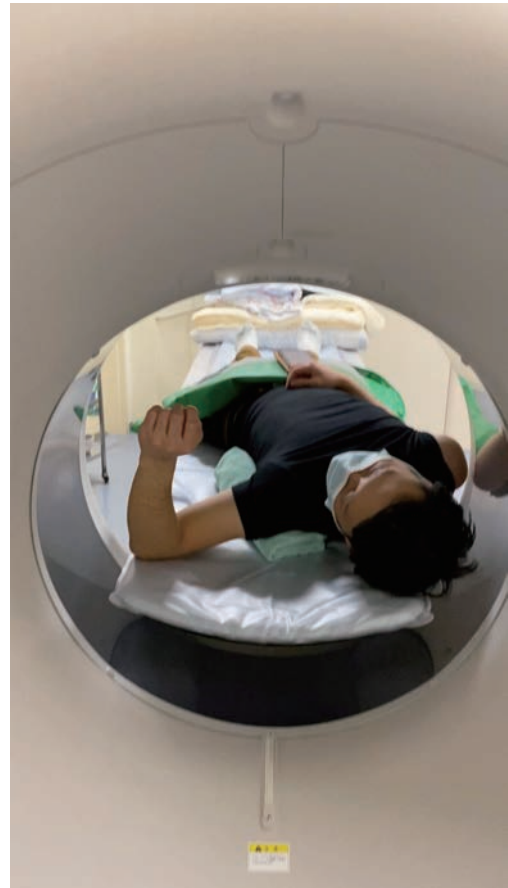


図1

5.9%であった。外旋時に上腕骨頭にプロットされた関節窩の関節接触面は、関節窩軌跡を視覚化したものであり、患側において、最大内旋位の平均関節接触面積は $678.5 \pm 140.6\text{mm}^2$ であり、最大外旋位の平均関節接触面積は $479.3 \pm 110.7\text{mm}^2$ と有意に小さい結果であった($p < 0.05$)。一方、健側では、内外旋における接触面積に有意な差を認

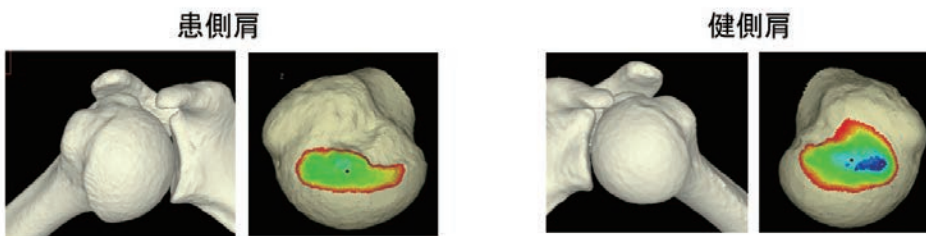


図2

表1

(mm ²)	最大外旋位	最大内旋位	p値
患側	479.3±110.7	678.5±140.6	<0.05
健側	689.3±124.6	694.9±123.8	>0.05

めない結果であった(表1)。

3. 考 察

4DCTを用いて反復性肩関節脱臼患者の生体内での関節窩軌跡を視覚化した。今回の研究では、最新の4DCTの技術を用いて、肩関節不安定症患者の関節接触面積の動的評価を行った。動的評価では、軟部組織バランスも考慮されるため、静的評価と比べより生理的である。また、最大外旋位での関節窩軌跡の幅は細く最大内旋位よりも有意に小さい結果であった。骨欠損の存在により、肩甲上腕関節の接触面積は、最大外旋で最大内旋と比較し有意に小さくなり、生体内における双極性骨欠損の新たな評価方法となる可能性が示唆された。これらの解析手法は広く全身における関節運動の解析に応用することが可能であることから、上肢疾患に限らず下肢および脊椎疾患における解析まで、高い実用性が期待される。また国際学会での報告や、英文雑誌への投稿が見込まれる。

4. 結 論

生体内における病態把握が困難であった肩関節

疾患について、生理的な環境下における動作肩関節接触面を4D-CTを用いて解析した。

謝 辞

本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ならびに対象患者に深謝いたします。

文 献

- 1) Momma D., Nimura A., Muro S., Fujishiro H., Miyamoto T., Funakoshi T., et al. Anatomic analysis of the whole articular capsule of the shoulder joint, with reference to the capsular attachment and thickness. *J. Exp. Orthop.* Jun 7;5 (1) :16. Epub 2018/06/09(2018)
- 2) Fleisig G.S., Kingsley D.S., Loftice J.W., Dinnen K.P., Ranganathan R., Dun S., et al. Kinetic comparison among the fastball, curveball, change-up, and slider in collegiate baseball pitchers. *Am. J. Sports Med.* Mar;34 (3) :423-30. Epub 2005/11/02 (2006)
- 3) Yang C., Goto A., Sahara W., Yoshikawa H., Sugamoto K. In vivo three-dimensional evaluation of the functional length of glenohumeral ligaments. *Clin. Biomech. (Bristol, Avon).* Feb;25 (2) :137-41. Epub 2009/11/28(2010)
- 4) Momma D., Espinoza Orias A.A., Irie T., Irie T., Kondo E., Iwasaki N., et al. Four-dimensional computed tomography evaluation of shoulder joint motion in collegiate baseball pitchers. *Sci. Rep.* Feb 25;12 (1) :3231. Epub 2022/02/27(2022)

求心性および遠心性収縮運動による
運動単位動員特性の変化
～高密度表面筋電図を用いた解析～

中京大学 廣野 哲也
(共同研究者) 愛知工業大学 功刀 峻
早稲田大学 吉村 茜

**Acute Changes in Motor Unit Discharge Property After Concentric Versus
Eccentric Contraction Exercise in Knee Extensor**

by

Tetsuya Hirono

*Laboratory of Neuromuscular Biomechanics,
School of Health and Sport Science, Chukyo University*

Shun Kunugi

Center for General Education, Aichi Institute of Technology

Akane Yoshimura

*Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences,
Waseda University*

ABSTRACT

The aim of this study is to compare motor unit discharge properties after exercise between concentric and eccentric contraction. Eighteen young healthy men performed repetitive concentric or eccentric isokinetic knee extension until they exerted less than 80% of the baseline strength. High-density surface electromyography was recorded during ramp-up isometric contraction to 50% of baseline strength and individual motor units were identified before and after the exercise. Motor units were tracked before and

after the exercise. Muscle cross-sectional area evaluated by ultrasound and electrically evoked torque were measured. Sixty-four and fifty-three motor units were analyzed in concentric and eccentric conditions, respectively. Motor units recruited with moderate to high recruitments thresholds significantly decreased recruitment thresholds under both conditions. Motor unit discharge rate significantly increased after concentric contraction compared to eccentric contraction. A significant greater increase in muscle cross sectional area was noted under concentric condition. The evoked torque was significantly decreased under both conditions, but no difference between the conditions. These findings suggested that concentric contraction to failure contributes to greater neural input to muscle and metabolic responses than eccentric contraction.

キーワード

高密度表面筋電図, 運動単位, 求心性収縮, 遠心性収縮, 疲労運動

Keyword

high-density surface EMG, motor unit, concentric contraction, eccentric contraction, fatiguing exercise

要 旨

本研究の目的は、求心性および遠心性収縮運動直後の運動単位動員特性を調べることである。最大等速性膝伸展運動を求心性条件、遠心性条件を開始前筋力の80%以下に疲労するまで反復して行った。疲労運動の前後に最大筋力の50%の漸増的筋力発揮を行い、高密度表面筋電図を外側広筋から取得し、個々の運動単位活動を記録した。運動前後に外側広筋の筋断面積を超音波診断装置にて計測し、電氣的誘発筋力も記録した。検出された運動単位数は求心性条件で64、遠心性条件で53であった。その結果、両条件ともに中高強度で動員される運動単位が有意に動員閾値を下げた。特に求心性条件後に有意に大きな発火頻度上昇と大きな筋断面積の即時増加が生じた。両条件で電気誘発筋力は低下し、条件間差はなかった。これら結果から、求心性収縮を疲労困憊まで行うと、遠心性収縮よりも大きな筋への神経入力が発

生し、代謝ストレスも大きくなることが示唆された。

緒 言

レジスタンス運動は様々な要素から成り立っており、それらは形態学的または神経学的適応を引き起こすが、神経学的適用については方法論的制約によって詳細に検証することが難しかった。近年、高密度表面筋電図を用いることで中枢神経系特性を計測できる新たな方法が開発された^{1,2)}。運動単位の動員閾値で階層分けを行い、異なる発揮筋力の強度ごとの発火頻度を評価することで、運動単位活動特性を中枢神経系から末梢の筋への神経入力指標として詳細に調べることが可能となり^{3,4)}、神経筋システムのより詳細な生理学的情報が明らかになってきた。

異なる収縮様式、つまり求心性収縮と遠心性収縮とでは発揮トルク、神経筋適応、代謝反応が異なる。遠心性収縮は求心性収縮よりも強い張力

を発揮でき、機械的ストレスが大きくなる⁵⁾が、神経活動は抑制される^{6,7)}。遠心性収縮は酸素消費量や乳酸蓄積量などに示されるように代謝コストを少なくし^{7,8)}、そのため遠心性収縮は求心性収縮よりもパフォーマンスコスト比が大きくなる⁹⁾。遠心性および求心性収縮中の運動単位発火特性を調べた先行研究では遠心性収縮よりも求心性収縮が高い発火頻度を有することを報告した¹⁰⁾。しかしながら、収縮様式が高閾値、低閾値動員の運動単位それぞれにどのような影響を与えるかについては不明な点も多い。動員閾値毎に運動単位には異なる特徴や、異なる変化を示すことが多くの研究で報告されている^{3,11)}。

レジスタンス運動後には、筋力が低下し、これは神経筋疲労と定義され¹²⁾、中枢と末梢の疲労を含んでいる¹³⁾。本研究の目的は、求心性または遠心性収縮による疲労運動課題直後の運動単位の発火特性、筋収縮特性、代謝反応の即時的変化を調べることとした。

1. 研究方法

下肢に神経学および整形外科的な既往のない18名の健常若年男性(平均±標準偏差, 年齢: 24.9 ± 5.3歳, 身長: 170.8 ± 5.6 cm, 体重: 67.2 ± 11.4 kg)が研究に参加し, 1週間の間隔を空けて2度実験室に訪れ, 求心性条件, 遠心性条件を実施した。参加者には事前に実験の目的および手順を書面と口頭で説明し, 同意を得た後に実施した。なお本研究は中京大学の「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施された。

参加者は膝伸展筋力計 (Takei Scientific Instruments Co., Ltd.) にて膝関節屈曲90度位の最大等尺性膝伸展筋力 (MVC) を計測した。50% MVCの漸増的筋力発揮中の外側広筋の活動電位を64の表面電極 (電極間距離8mm) からなる高密度表面筋電図 (GR08MM1305, OT

Bioelectronica, Torino, Italy) を用いて, デジタルアナログ変換器 (Quattrocento, OT Bioelectronica, Torino, Italy) にて2048Hzのサンプリング周波数で取得し, 10-500Hzのバンドパスフィルターで処理した。電極貼付位置は大転子と膝蓋骨外側上縁の midpoint とし, 剃毛とアルコールでの脱脂処理後に貼付した。得られた単極信号はソフトウェア上 (MATLAB R2019a, MathWorks GK, Tokyo, Japan; DEMUSE software ver. 5.0.1; The University of Maribor, Slovenia) で個々の運動単位に分解された。生理学的なエラーを含むものを除外し, 得られた個々の運動単位波形を元に疲労運動前後に同様の波形を追従できたものを解析に用いた^{14,15)}。個々の運動単位の発火頻度は, 漸増筋力発揮中の0-25%, 25-40%, 40-50% MVC中の発火頻度平均として算出した。さらに動員閾値毎に, 0-25%MVCで動員され始める運動単位群 (MU0-25), 25-40% MVCで動員され始める運動単位群 (MU25-40), 40-50%MVCで動員され始める運動単位群 (MU40-50) と仕分けた。

電気刺激装置 (DS7AH, Digitimer, Ltd., Hertfordshire, UK) を用いて, 大腿四頭筋近位部と遠位部に装着した表面電極から200マイクロ秒の単発矩形波を最大の誘発筋力が出力できる電流を流すことで誘発筋力を測定した。

超音波診断装置 (LOGIQ e Premium, GE Healthcare) の拡張モードを用いて, 臥位にて外側広筋の筋断面積を計測した。計測部位は, 大転子と外側上顆を結ぶ30%, 50%, 70%位にて計測し, その平均値を解析に用いた。

運動課題はダイナモメーター (CON-TREX; CMV AG, Dübendorf, Switzerland) を用いて実施し, 膝関節屈曲90度から20度までの範囲での求心性収縮または遠心性収縮を全力で実施する課題とした。角速度は毎秒30度とし, 10回を1セットとした。セット間休息は60秒間とし, セット間に膝関節屈曲90度での最大等尺性膝伸展筋力

を計測し、運動開始前の80%を下回るまでセットを繰り返し行った。

統計分析において、反復測定二元配置分散分析にて筋断面積と誘発筋力の変化を検討した。分割プロットデザインの二元配置または三元配置分散分析を用いて、各運動強度での運動単位発火頻度の変化、動員閾値の変化を検討した。各値は平均値±標準偏差で記載した。有意水準は5%とした。

2. 研究結果

求心性運動は6.6±3.6セット、遠心性運動は7.4±3.3セット実施された。得られた運動単位数は求心性条件で66、遠心性条件で53の運動単位が摘出された。

動員閾値の変化は表1に示す。三元配置分散分析の結果、有意な時期の主効果を認め(p<0.001)、動員閾値が疲労運動後に低下した。さらに収縮様式と時期の交互作用を認め(p=0.031)、遠心性収縮条件での動員閾値低下の程度が大きかった。

発火頻度の結果を表2に示す。0-25%MVC発揮中の発火頻度における二元配置分散分析および25-40%MVC発揮中の発火頻度における三元配置分散分析の結果、交互作用は認めず、時期の主効果を認めた(ともにp<0.001)。40-50%MVC発揮中の発火頻度における三元配置分散分析の結果、時期の主効果(p<0.001)と併せて収縮様式と時期の交互作用も認め(p=0.030)、求心性条件で大きな発火頻度上昇を認めた。

筋断面積および誘発筋力の結果を表3に示す。筋断面積における二元配置分散分析の結果、時期の主効果(p<0.001)と交互作用を認め(p=0.001)、求心性条件で大きな断面積上昇を認めた。誘発筋力の二元配置分散分析の結果、交互作用はなく(p=0.110)、時期の主効果のみ認めた(p<0.001)。

3. 考察

求心性収縮および遠心性収縮による疲労運動課題を実施し、その前後で運動単位活動、筋断面積、電気刺激による誘発筋力の評価を行った。両条件

表1 各運動単位群における動員閾値の変化(単位は%MVC)

	求心性条件		遠心性条件	
	運動前	運動後	運動前	運動後
MU0-25	18.8±4.3	18.5±4.3	19.2±4.3	17.6±5.1
MU25-40	33.5±4.1	29.6±4.4	33.6±4.2	28.1±4.8
MU40-50	43.8±3.0	37.1±4.5	43.4±3.2	34.8±3.9

表2 各運動単位群における発火頻度の変化(単位はpps)

		求心性条件		遠心性条件	
		Pre	Post	Pre	Post
0-25%MVC発揮中	MU0-25	8.9±1.7	9.6±2.6	7.7±1.5	8.8±2.1
	MU25-40	11.5±1.7	14.0±3.1	10.5±1.6	12.8±2.5
25-40%MVC発揮中	MU25-40	9.2±1.7	12.1±2.6	8.4±1.9	10.7±2.2
	MU0-25	13.8±2.1	17.6±3.6	12.5±2.0	15.3±2.9
40-50%MVC発揮中	MU25-40	11.9±2.2	15.4±2.9	10.8±2.0	13.6±2.3
	MU40-50	8.9±1.5	13.4±3.0	8.7±2.2	12.7±3.0

表3 筋断面積および誘発筋力の変化

	求心性条件		遠心性条件	
	運動前	運動後	運動前	運動後
筋断面積 (cm ²)	63.6±8.8	70.3±10.1	63.6±9.7	67.9±10.0
誘発筋力 (Nm)	51.2±8.9	30.7±8.0	52.3±6.8	35.1±10.1

ともに運動単位の発火頻度上昇と誘発筋力の減少が生じ、筋末梢性の疲労が生じたことで、中枢神経系が補間するようにはたらいたと考えられる。筋断面積も両条件で増加し、代謝性の反応が生じた。条件間の比較において、求心性運動後に筋断面積上昇が大きく、運動単位発火頻度も高強度筋力発揮中に顕著な上昇を認めた。

疲労運動課題後に発火頻度が上昇するのは、筋末梢性の疲労により筋の出力低下が生じたため、それを補うように中枢神経系の活動が上昇したと考えられる¹⁶⁾。本研究で用いた電気刺激による誘発筋力は、中枢神経系の活動を切り離し、筋末梢性の収縮特性のみを評価することができる。誘発筋力は両条件で有意に減少し(表3)、本研究課題で用いた運動開始前の80%以下に最大筋力が低下する疲労運動課題によって、筋末梢性の疲労を誘発したと考えられる。

40-50% MVC 発揮中において、求心性条件で顕著な発火頻度上昇を認めた(表2)。前脛骨筋で収縮様式ごとの運動単位発火特性を調べた先行研究⁶⁾では、求心性収縮中に大きな発火頻度を有することを示しており、これは求心性が大きなエネルギー消費を要することが原因と考えられる¹⁷⁾。実際に本研究においても、即時的な筋断面積増加で評価した代謝性変化は、求心性条件でより顕著な増加を示した(表3)。即時的な筋断面積の増加は、筋肥大に重要な代謝性ストレス指標であり^{18, 19)}、大きなエネルギーコストおよび代謝ストレスが、求心性条件での中枢性の変化を誘発した可能性がある。

本研究は即時的な神経筋の収縮特性を評価したにすぎないため、トレーニング介入における各特性の変化については明らかでなく、今後さらなる検討が必要である。

4. 結 論

求心性または遠心性収縮の運動を疲労するまで

実施した際の運動単位活動および筋収縮特性を評価した。疲労運動後に筋断面積の即時的な増加、誘発筋力の低下そして運動単位発火頻度の上昇が生じた。特に求心性収縮条件後には、筋断面積の増加と高強度筋力発揮時の運動単位発火頻度上昇が顕著であった。これら結果より、求心性収縮疲労運動は遠心性収縮と比較して、筋への大きな神経入力と代謝性ストレスを誘発することが示唆された。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。研究指導いただいた中京大学の渡邊航平教授に感謝申し上げます。解析手法についてご指導いただいたUniversity of MariborのAleš Holobar教授にも感謝申し上げます。また、本研究に参加していただいた参加者の皆様にも感謝申し上げます。

文 献

- 1) Holobar, A. and D. Zazula, On the selection of the cost function for gradient-based decomposition of surface electromyograms. *Annu Int Conf IEEE Eng Med. Biol. Soc.*, 2008: p. 4668-71 (2008)
- 2) Holobar, A. and D. Zazula, Correlation-based decomposition of surface electromyograms at low contraction forces. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 42 (4) : p. 487-95 (2004)
- 3) Watanabe, K., et al., Age-related changes in motor unit firing pattern of vastus lateralis muscle during low-moderate contraction. *Age (Dordr)*, 38 (3) : p. 48 (2016)
- 4) Watanabe, K., et al., Modulation of Neural and Muscular Adaptation Processes During Resistance Training by Fish Protein Ingestions in Older Adults. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, 75 (5) : p. 867-874 (2020)
- 5) Hanten, W.P. and C.L. Ramberg, Effect of stabilization on maximal isokinetic torque of the quadriceps femoris muscle during concentric and

- eccentric contractions. *Phys. Ther.*, **68** (2) : p. 219-22(1988)
- 6) Duchateau, J. and S. Baudry, Insights into the neural control of eccentric contractions. *J. Appl. Physiol.* (1985), **116** (11) : p. 1418-25(2014)
 - 7) Gonzalez-Izal, M., E. Lusa Cadore, and M. Izquierdo, Muscle conduction velocity, surface electromyography variables, and echo intensity during concentric and eccentric fatigue. *Muscle Nerve*, **49** (3) : p. 389-97(2014)
 - 8) Hoppeler, H., Moderate Load Eccentric Exercise; A Distinct Novel Training Modality. *Front Physiol.*, **7**: p. 483(2016)
 - 9) Nishikawa, K., Eccentric contraction: unraveling mechanisms of force enhancement and energy conservation. *J. Exp. Biol.*, **219** (Pt 2) : p. 189-96 (2016)
 - 10) Pasquet, B., A. Carpentier, and J. Duchateau, Specific modulation of motor unit discharge for a similar change in fascicle length during shortening and lengthening contractions in humans. *J. Physiol.*, **577** (Pt 2) : p. 753-65(2006)
 - 11) Watanabe, K. and A. Holobar, Quercetin ingestion modifies human motor unit firing patterns and muscle contractile properties. *Exp. Brain Res.*, **239** (5) : p. 1567-1579(2021)
 - 12) Gandevia, S.C., Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol. Rev.*, **81** (4) : p. 1725-89(2001)
 - 13) Siegler, J.C. and P. Marshall, The effect of metabolic alkalosis on central and peripheral mechanisms associated with exercise-induced muscle fatigue in humans. *Exp. Physiol.*, **100** (5) : p. 519-30(2015)
 - 14) Kunugi, S., et al., Motor unit firing patterns on increasing force during force and position tasks. *J. Neurophysiol.*, **126** (5) : p. 1653-1659(2021)
 - 15) Del Vecchio, A., et al., You are as fast as your motor neurons: speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans. *J. Physiol.*, **597** (9) : p. 2445-2456(2019)
 - 16) Contessa, P., A. Adam, and C.J. De Luca, Motor unit control and force fluctuation during fatigue. *J. Appl. Physiol.*(1985), **107** (1) : p. 235-43(2009)
 - 17) Pinniger, G.J., et al., Tension regulation during lengthening and shortening actions of the human soleus muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **81** (5) : p. 375-83(2000)
 - 18) Schoenfeld, B.J., Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Med.*, **43** (3) : p. 179-94 (2013)
 - 19) Hirono, T., et al., Relationship Between Muscle Swelling and Hypertrophy Induced by Resistance Training. *J. Strength Cond. Res.*, **36** (2) : p. 359-364 (2022)

運動が炎症誘発性筋力低下を抑制する 分子機構の解明

名古屋市立大学大学院 檜 森 弘 一

Mechanisms of Exercise-Induced Improvement of Muscle Dysfunction in Polymyositis

by

Koichi Himori

Graduate School of Sciences, Nagoya-City University

ABSTRACT

In the present study, we investigated the role of p62 in exercise-induced adaptation in muscle of experimental autoimmune myositis (EAM) mice, a widely used animal model for polymyositis. C57BL/6J mice were immunized with myosin to induce EAM and subjected to voluntary running exercise for 4 weeks. Voluntary running exercise increased the levels of phospho-p62 and improved endurance performance but not muscle mass and strength in EAM mice. Moreover, EAM was induced in muscle-specific p62 knockout and wild-type littermates mice. The induction of EAM resulted in significant decreases in muscle mass, strength, and endurance performance in wild-type and p62 knockout mice, without any difference between genotypes. These results suggest that voluntary running exercise improves endurance performance in EAM mice independent of p62 function.

キーワード

自発性走行運動, 多発性筋炎, オートファジー関連タンパク質, 持久性運動能力,
炎症誘発性筋力低下

Keyword

Voluntary running exercise, Polymyositis, Autophagy-related proteins, Endurance performance, Inflammation-induced muscle dysfunction

要 旨

本研究では、多発性筋炎のモデル動物である実験的自己免疫性筋炎 (experimental autoimmune myositis: EAM) マウスを用い、当該マウスに対する自発性走行運動の効果における p62 の役割を検討した。C57BL/6J マウスにミオシタンパクで免疫することで EAM を誘導し、4 週間の自発性走行運動を負荷したところ、p62 のリン酸化を増大し、EAM マウスの持久性運動能力を改善したが、筋量や筋力は改善しなかった。また、筋特異的 p62 欠損マウスと野生型マウスに EAM を誘導した結果、EAM マウスにおける筋量、筋力および持久性運動能力は、野生型と筋特異的 p62 欠損マウスの間に違いはなかった。これらの結果から、自発性走行運動は EAM による持久性運動能力を改善するが、その適応機序に p62 は関与しない可能性が示唆された。

緒 言

特発性炎症性筋疾患である多発性筋炎では、自己免疫機序により筋組織が傷害され、著しい筋量、筋力や筋持久力の低下が引き起こされる¹⁾。多発性筋炎患者におけるこれらの筋の退行性変化は、日常生活活動を制限し²⁾、生活の質の低下をもたらすため³⁾、そのメカニズムを解明し、有効な治療法を確立することは重要な課題である。多発性筋炎による筋の退行性変化には、酸化ストレスの増大が重要な役割を果たすことが報告されているが⁴⁾、その詳細なメカニズムは未だ十分には解明されておらず、有効な治療法も確立されていない。

近年、多発性筋炎患者に対する持久性運動が症

状を増悪させずに筋の退行性変化を改善することが複数報告されており、多発性筋炎患者に対する運動療法の有効性を示す知見が蓄積されつつある⁵⁻⁷⁾。ただし、持久性運動が多発性筋炎による筋の退行性変化を改善するメカニズムについては十分に理解されていない。一方、先行研究において、持久性運動はオートファジー関連タンパク質である p62 を介して骨格筋における抗酸化酵素を増加させることが報告されている⁸⁾。したがって、多発性筋炎による筋の退行性変化に酸化ストレスの増大が関与することから考えると、多発性筋炎患者に対する持久性運動の効果に p62 が重要な役割を果たす可能性が考えられる。

そこで本研究では、まず、多発性筋炎のモデル動物である実験的自己免疫性筋炎 (experimental autoimmune myositis: EAM) マウスにおける筋量、筋力や持久性運動能力の低下に対する持久性運動の効果と p62 の変動を検討した。次に、EAM による筋の退行性変化における p62 の役割を検証した。

1. 研究方法

1. 1 実験動物および多発性筋炎モデルマウスの作製方法

実験には 8 週齢の雌性 C57BL/6J マウス、筋特異的 p62 欠損マウスおよびその野生型マウスを使用した。筋特異的 p62 欠損は、ニューヨーク大学の Steven J. Burden 教授より供与された *mlc1f* Cre マウスと筑波大学の柳川徹教授より供与された *p62 flox* マウスを交配し作製した。餌と水は自由摂取とし、明暗サイクル、温度 (23 度) や湿度 (50%) が管理された名古屋市立大学実験動物研

究教育センターにてマウスを飼育した。すべての動物実験は、名古屋市立大学医学研究科動物実験委員会の承認を得て実施した。運動介入実験では、C57BL/6Jマウスを実験的自己免疫性筋炎 (EAM) 群と対照 (CNT) 群に分け、さらに安静群と運動群に分けた。遺伝子組換え実験では、筋特異的 p62 欠損 (p62mKO) マウスとその野生型 (WT) マウスを EAM 群と CNT 群に分けた。EAM は、抗原 (ラット由来ミオシン) とフロイント完全アジュバントを等量混合したエマルジョンを1週間毎に3回投与することで惹起した⁹⁾。

1. 2 運動方法

運動群は、エマルジョンの最終投与翌日からケージ内に回転ホイールを設置し、4週間の自発走行運動トレーニングを実施した。運動群はトレーニング期間中の走行距離を継続的に測定し、運動を十分に実施したマウスのみを解析に使用した。安静群は、運動群がトレーニングを実施する期間中、飼育ケージ内にて通常飼育した。

1. 3 四肢握力評価

四肢握力の測定には小動物用握力計 (GPM-101B, Melquest, Toyama, Japan) を用いた。グリップバーにマウスの四肢を把持させ、尾部を後方に牽引し、発揮されたピークの張力値 (g) を記録した。測定は5回3セット行い、最大値を各個体の四肢握力とした。

1. 4 持久性運動能力テスト

小動物用トレッドミルを用いて持久性運動能力を評価した。テスト前日までの3日間は、トレッドミル走行に馴化させるため、13.4 m/min の速度で10分間走行させた。持久性運動能力テストでは、傾斜5度とし、速度は13.4 m/min から開始して、30分ごとに2.7 m/min ずつ速度を漸増し、マウスが疲労困憊状態に至るまでの総走行距離を算出した。

1. 5 検体採取

運動介入実験では、運動期間最終日の一過性の運動の影響を取り除くため、運動期間終了24時間後に、遺伝子組換え実験では、エマルジョンの最終投与から2週後にマウスを解剖し検体を採取した。解剖はマウスを麻酔下で頸椎脱臼し安楽死させた後、腓腹筋および足底筋を採取し筋重量を測定した。その直後に液体窒素にて凍結し実験に使用するまで-80度にて凍結保存した。

1. 6 ウェスタンブロット

タンパク質の評価にはウェスタンブロット法を使用した。方法は、凍結保存した足底筋をウェスタンブロット用のサンプルバッファーに懸濁しタンパク濃度を測定した。測定後、アクリルアミドゲルを用いて電気泳動しタンパク質を分離した。分離後、タンパクはメンブレンに転写し、p-p62 Ser351 (PM074, MBL Life Science, Nagoya, Japan), p-p62 Ser403 (D343, MBL Life Science), p62 (p0067, MilliporeSigma, Burlington, MA, USA), Copper-Zinc superoxide dismutase (CuZnSOD) (ab16831, Abcam, Cambridge, United Kingdom), Manganese (Mn) SOD (ab13534, Abcam), および Extracellular (Ec) SOD (AF4817, R&D Systems, Minneapolis, MN, USA), Peroxisome proliferator-activated receptor- γ coactivator 1 α (PGC-1 α) (AB3242, MilliporeSigma), Cytochrome c oxidase subunit IV (COX IV) (4844, Cell Signaling Technology, Danvers, MA, USA), Myosin heavy chain (MHC) IIa (SC-71, DSHB, Iowa City, IA), MHC IIb (BF-F3, DSHB) の一次抗体と反応させた。反応後、各メンブレンは一次抗体に対応したHRPラベルした二次抗体と反応させ、検出試薬にて発色しイメージングアナライザー (LAS500, GE Healthcare, Chicago, IL, USA) で観察した。なお、タンパク発現量はPonceau-S染色によるバンド強

度で補正した。

1. 7 統計

統計は、EAMを誘導したWTマウスとp62mKOマウスにおける持久性運動能力の比較には対応のないt検定を使用した。その他の測定結果の比較には2元配置分散分析を使用し、有意差が認められた場合にはpost-hoc testとして多重比較 (Turkey法) を実施した。有意水準は5%とした。

2. 研究結果

2. 1 4週間の自発走行運動は、EAMによる持久性運動能力の低下を改善し、p62のリン酸化を増大させる

マウスの体重は、すべての群で違いはなかった (図1A)。腓腹筋の筋重量、四肢握力は、EAMにより低下し、これらの変化は安静群と運動群の間に違いはなかった (図1BC)。持久性運動能力テストにおける総走行距離は、EAMにより減少する傾向がみられた。また、EAMマウスにおける総走行距離は運動により増加した (図1D)。図2Aに足底筋におけるウェスタンプロットの代表的な撮影像を示した。EAMマウスにおけるp62

のSer351リン酸化は、運動により増加する傾向がみられ、p62のSer403リン酸化は、運動により増加した (図2B)。抗酸化酵素であるCuZnSODおよびEcSODの発現は、CNTおよびEAMマウスで運動により増加する傾向がみられ、MnSODの発現は、CNTおよびEAMマウスで運動により増加した (図2C)。ミトコンドリア生合成やミトコンドリア量の指標であるPGC-1 α の発現は、CNTマウスで運動により増加し、COX IVの発現は、運動により増加する傾向がみられた。また、EAMマウスにおけるPGC-1 α とCOX IVの発現は、運動により増加する傾向がみられた。MHC IIaの発現は、CNTマウスで運動により増加し、EAMマウスで運動により増加する傾向がみられた。MHC IIbの発現は、CNTおよびEAMマウスで運動により減少した (図2D)。

2. 2 p62の欠損は、EAMによる筋量、筋力および持久性運動能力の低下に影響を及ぼさない

マウスの体重は、すべての群で違いはなかった (図3A)。腓腹筋の筋重量、四肢握力は、EAMにより低下し、これらの変化に遺伝子型による違

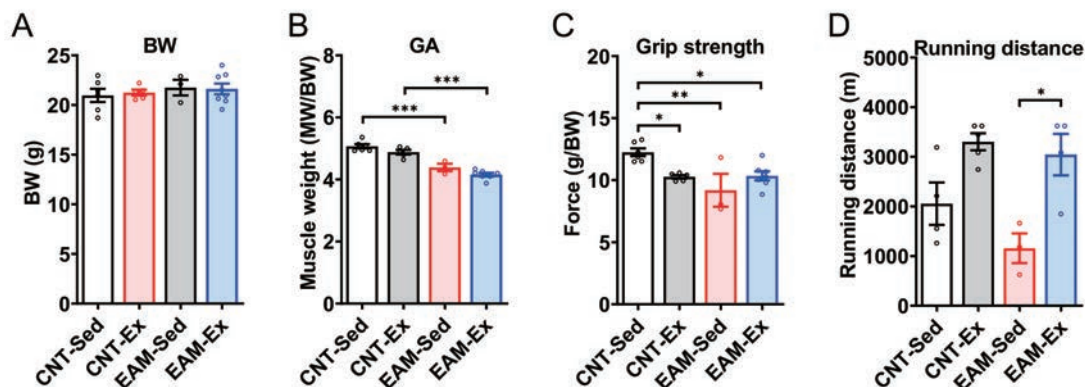


図1 自発性走行運動がEAMによる筋の退行性変化に及ぼす影響

A) 体重 (BW) ;B) 腓腹筋 (GA) の筋重量 (体重で補正) ;C) 四肢握力 (体重で補正) ;D) 持久性運動能力テストにおける総走行距離。CNT-Sed:安静対照群, CNT-Ex:運動対照群, EAM-Sed:安静実験的自己免疫性筋炎群, EAM-Ex:運動実験的自己免疫性筋炎群。*P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001。

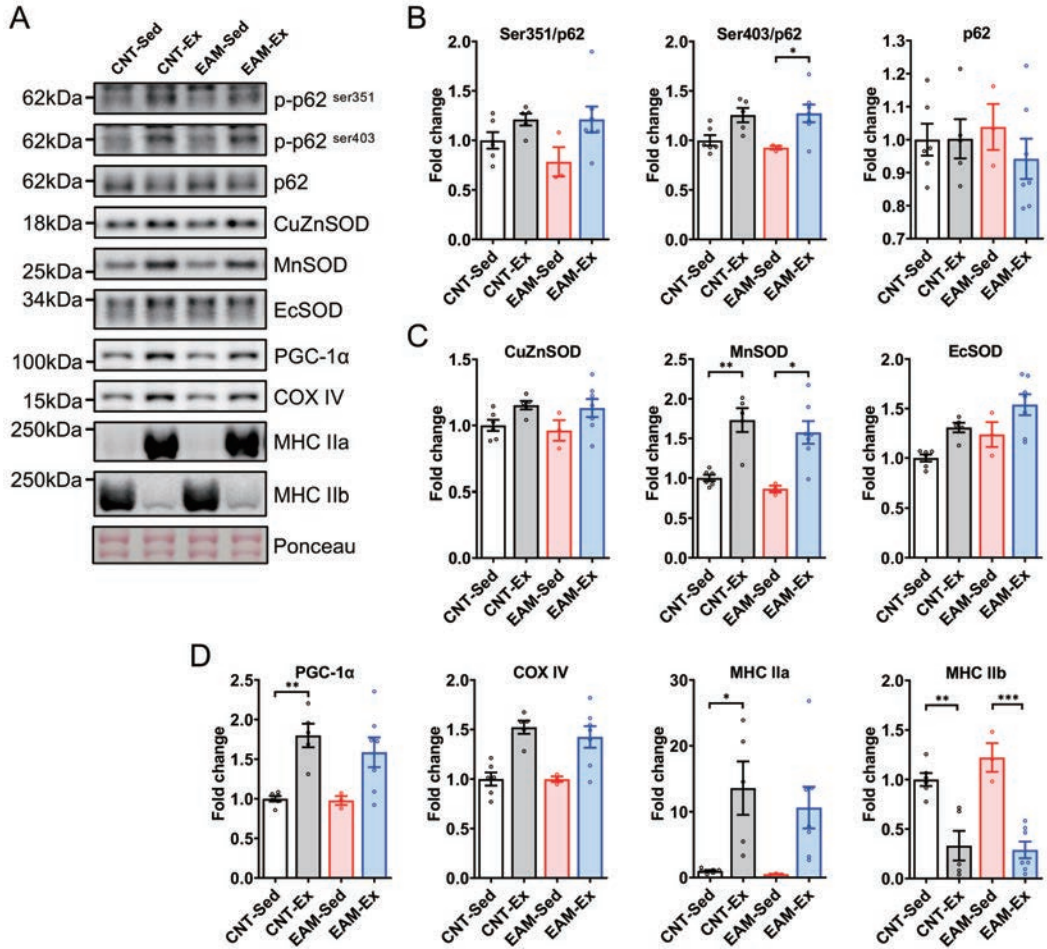


図2 自発性走行運動がEAMマウス骨格筋のタンパク発現に及ぼす影響

A) 足底筋におけるウェスタンブロットの代表的な撮画像; B) リン酸化p62およびp62の変動; C) 抗酸化酵素の変動; D) ミトコンドリア関連タンパク質およびミオシン重鎖の変動. CNT-Sed: 安静対照群, CNT-Ex: 運動対照群, EAM-Sed: 安静実験的自己免疫性筋炎群, EAM-Ex: 運動実験的自己免疫性筋炎群. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

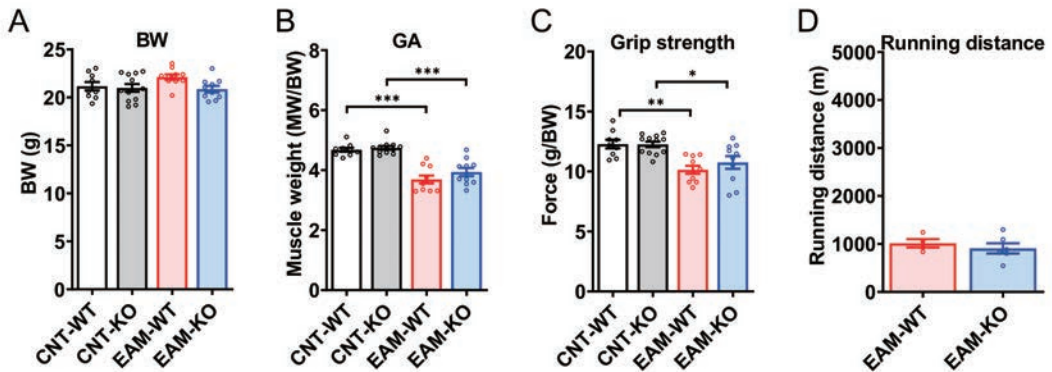


図3 筋特異的p62欠損がEAMによる筋の退行性変化に及ぼす影響

A) 体重 (BW); B) 腓腹筋 (GA) の筋重量 (体重で補正); C) 四肢握力 (体重で補正); D) 持久性運動能力テストにおける総走行距離. CNT-WT: 野生型対照群, CNT-KO: 筋特異的p62欠損対照群, EAM-WT: 野生型実験的自己免疫性筋炎群, EAM-KO: 筋特異的p62欠損実験的自己免疫性筋炎群. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

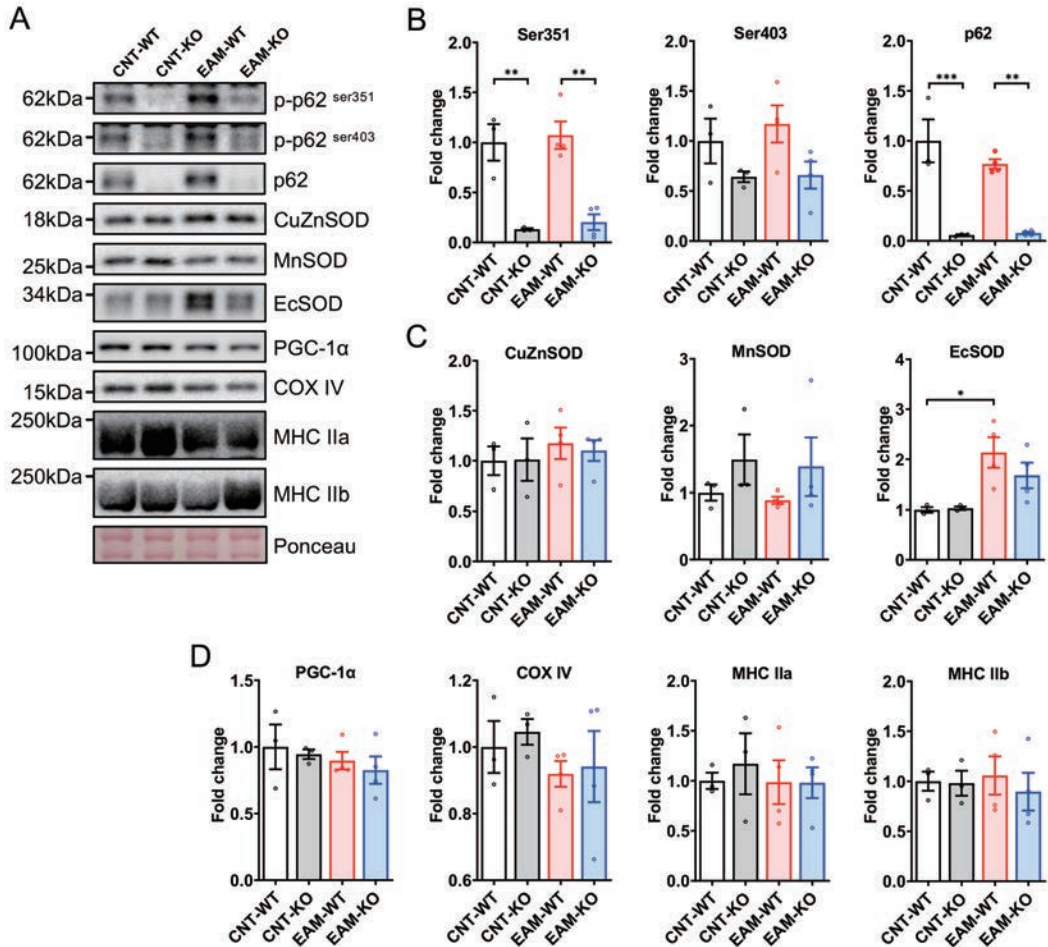


図4 筋特異的p62欠損がEAMマウス骨格筋のタンパク発現に及ぼす影響

A) 足底筋におけるウェスタンブロットの代表的な撮画像:B) リン酸化p62およびp62の変動:C) 抗酸化酵素の変動:D) ミトコンドリア関連タンパク質およびミオシン重鎖の変動. CNT-WT:野生型対照群, CNT-KO:筋特異的p62欠損対照群, EAM-WT:野生型実験的自己免疫性筋炎群, EAM-KO:筋特異的p62欠損実験的自己免疫性筋炎群. *P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

いはなかった (図3BC). EAM群における持久性運動能力は、遺伝子型による違いはなかった (図3D). 図4Aに足底筋におけるウェスタンブロットの代表的な撮画像を示した. p62およびp62のSer351リン酸化は、CNTおよびEAM群においてp62mKOマウスで低下した (図4B). p62のSer403リン酸化は、CNTおよびEAMマウスにおいてp62mKOマウスで低下する傾向がみられた. CuZnSOD, MnSOD, PGC-1 α , COX IV, MHC IIa, およびMHC IIbの発現は、すべての群で違いはなかった (図4CD). EcSODの発現は、WT

マウスにおいてEAMにより増加した (図4C).

3. 考察

EAMマウスの骨格筋におけるp62のリン酸化や抗酸化酵素の発現は、4週間の自発性走行運動により増加したものの、筋量や筋力の低下は改善しなかった. これらの結果から、筋量や筋力については、そもそも運動効果が得られず、自発性走行運動によるリン酸化p62の増加は筋量や筋力の改善に寄与しない可能性が高い. 自発性走行運動によりEAMマウスにおける筋量や筋力の低下が

改善されなかった理由について、抗酸化剤であるN-アセチルシステインの投与がEAMによる筋力の低下を改善することが報告されている一方で⁴⁾、EAMによる筋量や筋力の低下には複数の要因が関係することが指摘されていることから¹⁰⁾、走行運動が酸化ストレス以外の要因に作用しなかったか、あるいは、走行運動による抗酸化酵素の増大が、EAMによる筋量や筋力を改善するには不十分であった可能性が考えられる。

本研究における4週間の自発性走行運動は、p62のリン酸化を増大するとともにEAMによる持久性運動能力の低下を改善した。本研究では、EAMマウスにおけるCOX IVの低下が観察されなかったため、EAMによる持久性運動能力低下の要因をミトコンドリア量の減少では説明できず、明らかにすることはできなかった。一方、EAMマウスの骨格筋では、走行運動によりPGC-1 α とCOX IVの増加およびMHC IIaの増加とMHC IIbの減少が観察された。そのため、走行運動はEAMマウスの骨格筋におけるミトコンドリア合成の促進によるミトコンドリア量の増加やMHC IIb線維に比べて酸化的リン酸化能力に優れたMHC IIa線維の増加を介して持久性運動能力を改善したと推察される。ミトコンドリアとp62の関連性について、先行研究ではp62のリン酸化がParkin依存性マイトファジーにおけるポリユビキチン化されたミトコンドリアの分解に重要であることが示されており^{11,12)}、p62がミトコンドリアの品質維持に関与すると考えられている。しかしながら、PGC-1 α を介したミトコンドリア量の増加に対するp62の役割を直接検証した報告はなく、自発性走行運動によるp62のリン酸化が、ミトコンドリア量の増加に寄与するかどうかについてはさらなる検討が必要である。

さらに本研究では、EAMマウスに対する運動効果におけるp62の重要性を確認するため、p62mKOマウスにEAMを誘導した。その結果、

p62mKOマウスでもWTマウスと同様にEAMによる筋量、筋力、持久性運動能力の低下が引き起こされ、遺伝子型による違いはなかった。また、リン酸化p62の発現はp62mKOマウスで著しく低下するものの、PGC-1 α 、COX IVおよびMHCの発現は遺伝子型による違いがなかった。これらの結果から、自発性走行運動によって生じたEAMマウスの骨格筋における適応的变化にp62は関与しない可能性が示唆された。

3. 結 論

本研究では、EAMに対する自発性走行運動の適応的变化におけるp62の役割を検討した。自発性走行運動は、EAMマウスの骨格筋におけるp62のリン酸化を増加させるが、筋量や筋力を改善しないため、筋量や筋力については、運動効果にp62が関与しない可能性が高い。一方、自発性走行運動は、PGC-1 α 、ミトコンドリア酵素およびMHC IIa線維の発現を増大し、EAMマウスの持久性運動能力を改善した。しかしながら、EAMを誘導したWTとp62mKOマウスの間で、持久性運動能力や上記タンパクの発現に違いがなかったことから、持久性運動能力についても、運動効果はp62を介さないと考えられる。

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助成を受けて実施しました。深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Yazici Y., and Kagen L. J., Clinical presentation of the idiopathic inflammatory myopathies, *Rheum. Dis. Clin. North Am.*, **28**: 823-832 (2002)
- 2) Oldroyd A., Dixon W., Chinoy H., and Howells K., Patient insights on living with idiopathic inflammatory myopathy and the limitations of disease activity measurement methods - a qualitative

- study, *BMC Rheumatol*, **4**: 47 (2020)
- 3) Ponyi A., Borgulya G., Constantin T., Vancsa A., Gergely L., and Danko K., Functional outcome and quality of life in adult patients with idiopathic inflammatory myositis, *Rheumatology (Oxford)*, **44**: 83-88 (2005)
 - 4) Meyer A., Laverny G., Allenbach Y., Grelet E., Ueberschlag V., Echaniz-Laguna A., Lannes B., Alsaleh G., Charles A. L., Singh F., Zoll J., Lonsdorfer E., Maurier F., Boyer O., Gottenberg J. E., Nicot A. S., Laporte J., Benveniste O., Metzger D., Sibilia J., and Geny B., IFN-beta-induced reactive oxygen species and mitochondrial damage contribute to muscle impairment and inflammation maintenance in dermatomyositis, *Acta. Neuropathol*, **134**: 655-666 (2017)
 - 5) Alemo Munters L., Dastmalchi M., Katz A., Esbjornsson M., Loell I., Hanna B., Liden M., Westerblad H., Lundberg I. E., and Alexanderson H., Improved exercise performance and increased aerobic capacity after endurance training of patients with stable polymyositis and dermatomyositis, *Arthritis Res. Ther.*, **15**: R83 (2013)
 - 6) Alemo Munters L., Loell I., Ossipova E., Raouf J., Dastmalchi M., Lindroos E., Chen Y. W., Esbjornsson M., Korotkova M., Alexanderson H., Nagaraju K., Crofford L. J., Jakobsson P. J., and Lundberg I. E., Endurance Exercise Improves Molecular Pathways of Aerobic Metabolism in Patients With Myositis, *Arthritis Rheumatol.*, **68**: 1738-1750 (2016)
 - 7) de Oliveira D. S., Misse R. G., Lima F. R., and Shinjo S. K., Physical exercise among patients with systemic autoimmune myopathies, *Adv. Rheumatol.*, **58**: 5 (2018)
 - 8) Yamada M., Iwata M., Warabi E., Oishi H., Lira V. A., and Okutsu M., p62/SQSTM1 and Nrf2 are essential for exercise-mediated enhancement of antioxidant protein expression in oxidative muscle, *FASEB J.*, **33**: 8022-8032 (2019)
 - 9) Himori K., Ashida Y., Tatebayashi D., Abe M., Saito Y., Chikenji T., Westerblad H., Andersson D. C., and Yamada T., Eccentric resistance training ameliorates muscle weakness in a mouse model of idiopathic inflammatory myopathies, *Arthritis Rheumatol.*, **73**: 848-857 (2021)
 - 10) Rayavarapu S., Coley W., Kinder T. B., and Nagaraju K., Idiopathic inflammatory myopathies: pathogenic mechanisms of muscle weakness, *skelet. muscle*, **3**: 13 (2013)
 - 11) Matsumoto G., Shimogori T., Hattori N., and Nukina N., TBK1 controls autophagosomal engulfment of polyubiquitinated mitochondria through p62/SQSTM1 phosphorylation, *Hum. Mol. Genet.*, **24**: 4429-4442 (2015)
 - 12) Bartolome F., Esteras N., Martin-Requero A., Boutoleau-Bretonniere C., Vercelletto M., Gabelle A., Le Ber I., Honda T., Dinkova-Kostova A. T., Hardy J., Carro E., and Abramov A. Y., Pathogenic p62/SQSTM1 mutations impair energy metabolism through limitation of mitochondrial substrates, *Sci. Rep.*, **7**: 1666 (2017)

アイシングに伴う骨格筋再生の阻害は 筋代謝機能をも低下させてしまうのか？

金 沢 大 学 芝 口 翼
(共同研究者) 同 増 田 和 実
同 小 間 陸 嗣

Does Icing Therapy Decrease Both Regenerative and Metabolic Capacities Following Skeletal Muscle Injury?

by

Tsubasa Shibaguchi, Kazumi Masuda, Rikuhide Koma
Kanazawa University

ABSTRACT

Effects of icing treatment following skeletal muscle injury on mitochondrial biogenesis, pain marker, and fibrosis were investigated in male Wistar rats. We also examined the countermeasure for offsetting the negative impact of icing treatment. At 28 days after muscle injury, fibrotic area was increased and protein level of Voltage-dependent anion-selective channel 1 was decreased when an icing treatment (ice pack, 0°C for 20 min) was applied immediately following the injury. The icing treatment reduced mRNA expression levels of pain markers (bradykinin B2 receptor and microsomal prostaglandin E synthase 1) at 1 day after the injury. On the other hand, the icing-related promotion of fibrosis was significantly attenuated when intermittent heat stress was combined, especially from 1-day after the injury (42°C for 30 min on every other day until 14 days after the injury). Therefore, these results suggest that an icing treatment immediately after skeletal muscle injury attenuates muscle pain at early phase following the injury but impairs both muscle qualitative and mitochondrial recoveries

during the regeneration. Our findings also indicate that the negative impact of icing treatment on fibrosis could be rescued when hyperthermia is combined within 1-day after the injury.

キーワード

筋再生, ミトコンドリア, 筋痛, 線維化, アイシング

Keyword

Muscle regeneration, Mitochondria, Muscle pain, Fibrosis, Icing

要 旨

本研究では、筋損傷後のアイシング処置がミトコンドリアや痛み因子、線維化へ及ぼす影響を明らかにするとともに、アイシングの負の側面を相殺し得る介入法についてラットを対象に検討した。筋損傷後の単回のアイシング処置は、損傷28日後の線維化面積を増加させ、VDAC1タンパク質発現量を低下させた。痛み関連因子（ BKB_2R とmPGES-1）の損傷1日後のmRNA発現量は、アイシング処置によって減少した。一方、アイシング処置後に間欠的な温熱刺激を併用すると、特に損傷1日後から併用した条件で線維化が無処置と同程度まで軽減された。以上の結果から、筋損傷後のアイシング処置は単回であっても受傷後早期の筋痛を軽減できるが、その後の再生過程で筋の線維化を促進するだけでなく、ミトコンドリア量の回復も妨げることが示唆された。また、アイシング処置の線維化亢進作用は、アイシング後1日以内から温熱療法を併用することで相殺できることが示された。

緒 言

骨格筋損傷は筋挫傷や肉離れなどによって生じ、スポーツ現場では高頻度に発生する外傷の一つである。しかしながら、その損傷の程度によっては治癒までに数ヶ月を要する場合がある。治癒

期間には身体活動量が低下することから、治癒期間の延長や筋の再生不全はさらなる筋機能の低下を招くだけではなく、昨今問題視されるメタボリックシンドロームやロコモティブシンドロームの誘導因子にもなり得る。したがって、損傷後の筋再生を促進して治癒期間を短縮させる方策の確立は、アスリートの早期現場復帰や競技力向上はもとより、一般人の健康の維持・増進の観点からも我が国における喫緊の課題であると言える。

スポーツの現場では、筋損傷を含むスポーツ外傷が発生した場合、急性期の応急処置としてアイシングが推奨されている。アイシング処置によって炎症・疼痛が抑えられ、正常な組織の二次的損傷を防ぐことによって、その後の組織再生が促進されると長年考えられてきた^{1,2)}。一方、近年、アイシング処置が筋再生に対して必ずしも正の効果をもたらすわけではないことが明らかとなりつつある。筋損傷直後に単回・短時間（20分間）でもアイシング処置を行うと、再生筋線維の成長抑制や線維化の助長、筋線維組成の正常な分布への回復遅延といった筋の再生不全が生じることが報告されている³⁻⁵⁾。しかしながら、損傷した骨格筋に対するアイシング処置の生理作用については未だ不明な点が多い。

骨格筋が損傷すると、特にその程度が重度の場合にはエネルギー代謝の要であるミトコンドリアの量や機能も低下する⁶⁾。また、筋再生過程にお

いてミトコンドリアの生合成やマイトファジーを阻害すると、筋線維の修復や再生筋線維の成長が抑制され、線維化も助長されることが報告されている^{7,8)}。したがって、筋損傷後のアイシング処置がもたらす筋再生不全の背景に、ミトコンドリア機能の破綻（生合成や代謝機能の低下）が関与している可能性は十分に考えられるが、このような観点からアイシングの生理作用を直接的に検証した報告はない。また、疼痛緩和ケアとしてアイシング処置が有効であることは事実であるが、そのメカニズムは必ずしも明らかでなく、この利点を生かしてアイシング処置の負の側面を相殺し得る具体的な方策も未だ確立されていない。

そこで、本研究では、アイシング処置がもたらす筋再生不全の背景にミトコンドリア機能の破綻の可能性を仮定するとともに、痛みへの影響を明らかにするため、生化学的・分子生物学的に検討した（実験1）。また、筋再生を促す方策として温熱刺激の有効性が報告されていることから^{4,5,9)}、アイシング処置と温熱刺激の併用条件によって温熱刺激がアイシングによる筋再生不全を抑制する介入法となり得るかについても検討した（実験2）。

1. 方法

1.1 実験動物

実験動物には10週齢のWistar系雄性ラットを用いた。ラットは室温 $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度50~60%、12時間の明暗サイクルに設定した動物飼育室で飼育し、標準固形飼料（MF、オリエンタル酵母）と水を自由摂取させた。なお、本実験は、金沢大学動物実験規則および日本生理学会の制定した生理学領域における実験動物に関する基本指針に従い、金沢大学動物実験委員会の承認を得て実施した。

1.2 実験デザイン

実験1では、ラットの体重が等しくなるよう損

傷（IN）群と損傷+アイシング（ICE）群の2群に分けた（各12匹）。池崎ら¹⁰⁾の方法に基づき、両群のラットの両側足底筋に対して麻酔下で0.5%塩酸ブピバカインを筋注射し、筋損傷を惹起させた。ICE群には筋損傷手術終了直後の1回のみ、 0°C のアイスパックを両後肢に当てるアイシング処置を20分間行った。また、10週齢の無処置の個体をBaseline用のコントロール（Con）群とした（6匹）。

実験2では、ラットの体重が等しくなるようIN群とICE群、損傷+アイシング+温熱刺激（IH）群の3群に分け、IH群をさらに損傷1日後（IHd1）と2日後（IHd2）から温熱刺激を開始する2群に分けた（各群7匹）。Shibaguchiら⁴⁾の方法に基づき、全群のラット両側ヒラメ筋に対して麻酔下で0.5%塩酸ブピバカインを筋注射し、筋損傷を惹起させた。ICE群とIH群へのアイシング処置は、実験1と同様の方法で実施した。また、IH群には、覚醒下での温水浴（ 42°C 、30分）を損傷1日後または2日後から隔日に、最大2週間施した。

1.3 サンプルング

実験1では損傷1日後と28日後に足底筋を、実験2では損傷28日後にヒラメ筋を麻酔下で摘出し、液体窒素で冷却したイソペンタン中で素早く凍結させた後、分析まで -80°C で保存した。

1.4 ウエスタンブロット法

凍結した足底筋サンプルの一部を、ビーズ式破砕機（BMS）を用いてPhosphatase/Protease Inhibitor Cocktail（ナカライテスク）が添加されたRIPA lysis bufferでホモジナイズし、14,000 gで遠心して得られた上清を全画分として回収した。得られた全画分のタンパク質濃度をProtein Assay Kit（Bio-Rad）を用いたBradford法によって測定し、各サンプルのタンパク質濃度が均一となるように2Xおよび1X SDS Sample bufferで調整した

表1 プライマー配列一覧

Gene	Forward primer	Reverse primer
BKB ₂ R	GAGCTTGAAGCATCCTAGGGAAT	CGCTTATGCCGTGAGACAAGA
COX-2	TGTACAAGCAGTGGCAAAGG	TAGCATCTGGACGAGGCTTT
mPGES-1	ACTGCAGGAGTGACCCAGAT	TGGGTCCAGGAATGAGTAG
GAPDH	CTCTCTGCTCCTCCCTGTTC	CGATACGGCCAATCCGTTT

BKB₂R: Bradykinin B2 receptor, COX-2: Cyclooxygenase-2; mPGES-1: Microsomal prostaglandin E synthase 1, GAPDH: Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase.

後, 全てのサンプルを95℃で5分間加熱した.

調整済みのサンプル(タンパク質量: 5 µg)を10%のSDS-PAGEゲルで電気泳動・分離した. 泳動後, セミドライプロッティング装置(ATTO)を用いてゲルからpolyvinylidene difluoride (PVDF)膜(Merck Millipore)にタンパク質を転写した. 転写後のPVDF膜をBullet Blocking One for Western Blotting(ナカライテスク)で5分間ブロッキングし, その後5%ウシ血清アルブミンを含むTris-buffered saline containing 0.1% tween 20 (TBST)で希釈した抗Voltage-dependent anion-selective channel 1抗体(55259-1-AP, Proteintech)と4℃で一晩反応させた. その後, 5% Bullet Blocking One for Western Blottingを含むTBSTで希釈した抗Rabbit IgG-HRP抗体(GE Healthcare)と室温で1時間反応させ, 化学発光試薬(EzWestLumi plus, ATTO)を用いて目的のタンパク質のシグナルを検出した. 検出したシグナルの強度はImage J (NIH)を用いて定量化し, Con群の平均値に対する相対値で示した.

1. 5 リアルタイムRT-PCR法

凍結した足底筋サンプルの一部から, ReliaPrep miRNA Cell and Tissue Miniprep System (Promega)を用いて全RNAを抽出した. 抽出したRNAサンプルは, ReverTra Ace qPCR RT Master Mix (TOYOBO)を用いてcDNAに逆転写し, THUNDERBIRD Next SYBR qPCR Mix (TOYOBO)を用いてPCRを行った. 各遺伝子の増幅は, 表1で示したプライマーを用いて実施した. 内在性コントロールとしてGlyceraldehyde-

3-phosphate dehydrogenase (GAPDH)を用い, GAPDHに対する各遺伝子のmRNA発現レベルの相対発現量を算出し, Con群の平均値に対する相対値で示した.

1. 6 組織染色法

凍結したヒラメ筋サンプルから厚さ8 µmの凍結切片を作成し, 4% PFA/リン酸緩衝液(ナカライテスク)で固定処理した. 流水水洗後, シリウスレッドを含むワンギーソン液(武藤化学)で切片を染色した. 染色後, 切片を超純水で洗浄し, 70%エタノールで分別, 100%エタノールで脱水, キシレンで透徹した後, 封入剤(武藤化学)で切片を封入した. 顕微鏡(CKX41, オリンパス)と顕微鏡用デジタルカメラ(DP71, オリンパス)を用い, 1切片当たり5ヶ所を重複しないよう倍率200倍で撮影し, 画像統合ソフトウェア(DP Controller, オリンパス)でコンピュータに画像を取り込んだ. 染色画像1視野の全面積当たりのコラーゲン染色部(赤色)の面積の相対値をImage Jで定量化し, 1個体のコラーゲン線維面積は5視野の相対値の平均値として算出した.

1. 7 統計処理

データは平均値±標準偏差で示した. 実験1の検証では, 対応のないt検定を用いてIN群とICE群の平均値の差の検定を行った. また, 実験2の検証では, 一元配置分散分析を行い, 多重比較検定はTukey-Kramer法を用いた. 有意水準はP<0.05とした.

2. 結果

2.1 筋損傷後のアイシング処置がミトコンドリア量に及ぼす影響

ミトコンドリア量の指標として、損傷28日後の足底筋の Voltage-dependent anion-selective channel 1 (VDAC1) タンパク質発現量をウエスタンブロット法で検討した。その結果、VDAC1発現量はIN群と比較してICE群で有意に低い値を示した(図1, $P < 0.05$)。

2.2 筋損傷後のアイシング処置が痛み関連因子に及ぼす影響

図2に筋痛の発生に関連する Bradykinin B2 receptor (BKB_2R) と Cyclooxygenase-2 (COX-2), Microsomal prostaglandin E synthase 1 (mPGES-1) の mRNA 発現量の変化を示した。損傷1日後の足底筋の BKB_2R mRNA 発現量はIN群と比較してICE群で有意に低い値であった ($P < 0.05$)。また、mPGES-1 mRNA 発現量も BKB_2R の場合と同様に、IN群の値がICE群よりも低値を示す傾向にあった ($P = 0.055$)。一方、COX-2 mRNA 発現量にはIN群とICE群の間に統計的な差異は認めら

れなかった。

2.3 筋損傷後のアイシング処置と開始時期の異なる間欠的な温熱刺激の併用処置が線維化に及ぼす影響

図3に線維化の指標であるコラーゲン線維面積の変化を示した。損傷28日後のヒラメ筋のコラーゲン線維面積は、IN群よりもICE群で有意に高

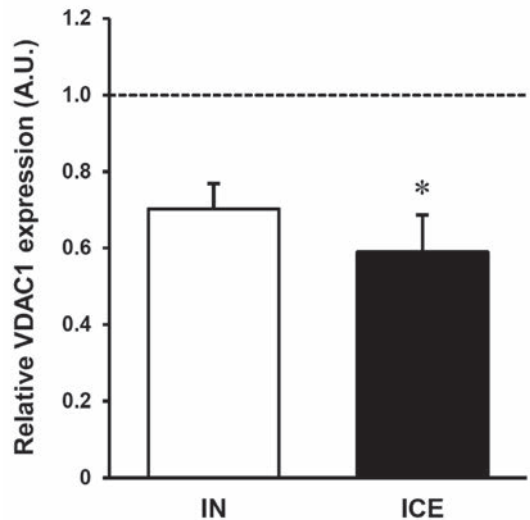


図1 筋損傷後のアイシング処置による損傷28日後のミトコンドリア量の変化 (n = 6/群)
破線は Baselineを表す * : $P < 0.05$ vs ICE群

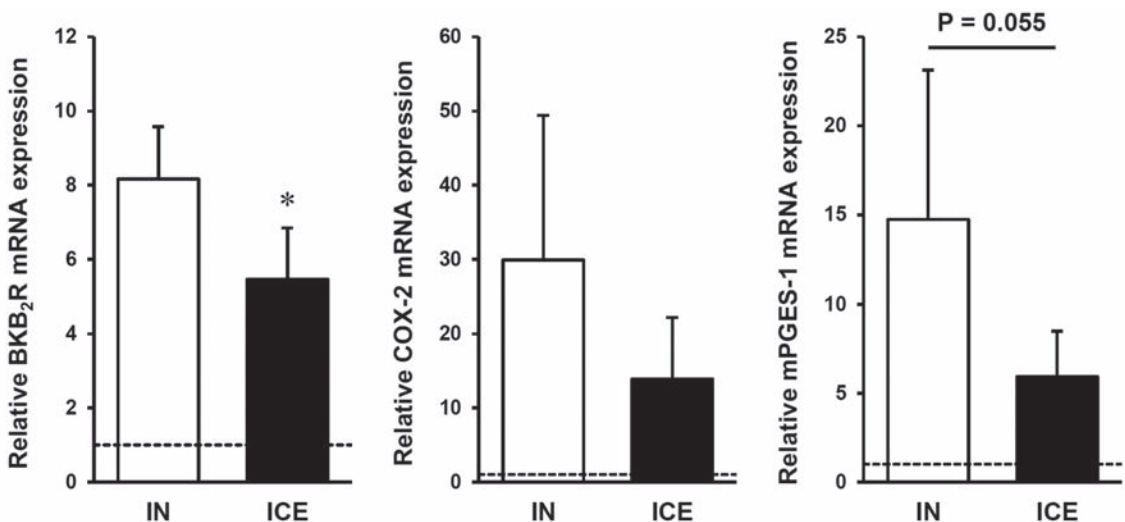


図2 筋損傷後のアイシング処置による損傷1日後の痛み関連因子mRNA発現量の変化 (n = 5/群)
破線は Baselineを表す * : $P < 0.05$ vs ICE群

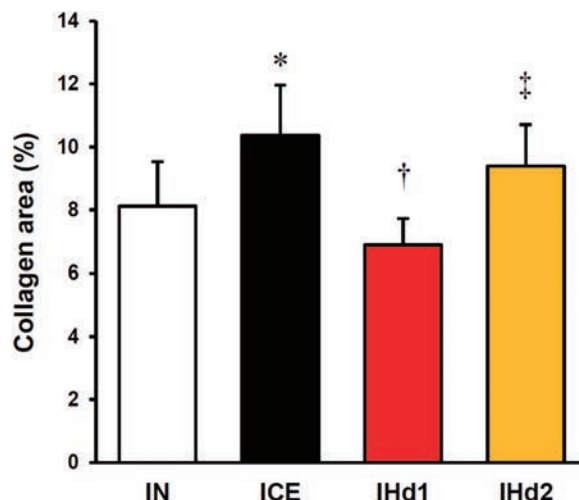
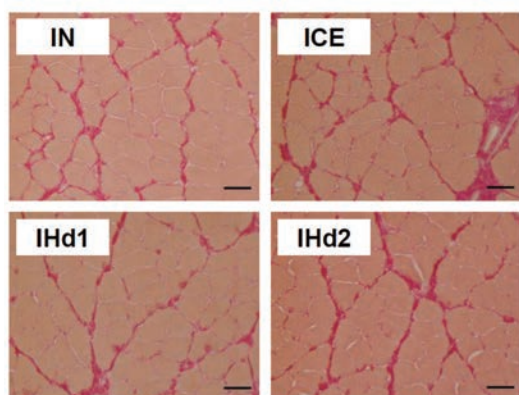


図3 筋損傷後のアイシング処置と開始時期の異なる間欠的な温熱刺激の併用処置による損傷28日後のコラーゲン線維面積の変化 (n = 7/群)

赤: コラーゲン線維, 黄: 筋線維, Scale bars = 50 μ m * : P < 0.05 vs IN群, † : P < 0.05 vs ICE群, ‡ : P < 0.05 vs IHd1群

い値を示した ($P < 0.05$)。筋損傷後のアイシング処置と損傷1日後から間欠的な温熱刺激を併用したIHd1群では、コラーゲン線維面積の値がICE群よりも有意に低く ($P < 0.05$)、IN群の値とほぼ同程度であった。一方、間欠的な温熱刺激の併用を損傷2日後から開始したIHd2群では、コラーゲン線維面積の値がIN群との間に統計的な差異は認められなかったものの、IHd1群の値よりも有意に高い値を示した ($P < 0.05$)

3. 考 察

ミトコンドリアは筋代謝の要となるオルガネラであり、かつ細胞機能の恒常性と密接に関係しているため、その量や機能の低下、変異は筋萎縮やミオパチー等の骨格筋機能不全を引き起こす^{11, 12)}。骨格筋が損傷すると、特にその程度が大きいほど一時的にミトコンドリアの量・機能が著しく低下する^{6, 7)}。したがって、競技復帰や健康の維持・増進の観点から、筋損傷後の再生過程では筋線維の再生のみならず、ミトコンドリアの量や機能の回復も促進させて、筋機能や筋代謝を素早く元のレベル、あるいはそれ以上に回復させるこ

とが求められる。本研究では、足底筋の損傷直後にアイシングを行うと、ミトコンドリア量の指標であるVDAC1発現量が損傷28日後に有意に低下した(図1)。また、筋種は異なるが、損傷後にアイシングを施したヒラメ筋では損傷28日後のコラーゲン線維面積が有意に増加した(図3)。筋損傷後のアイシング処置は遅筋・速筋を問わず線維化を助長することが報告されている^{3, 4)}。したがって、上記の結果は、筋損傷後の応急処置としてのアイシングは再生筋の線維化を亢進するのみならず、ミトコンドリア量の回復も遅延化させ、筋機能と筋代謝能の回復両方を妨げる可能性を示している。本研究ではアイシング処置によって再生筋のミトコンドリア量の回復が遅延化する機序やこの現象と線維化との関連性を直接的に明らかにすることはできなかった。これまで、筋再生過程におけるミトコンドリア生成やマイトファジーを抑制すると、筋線維の再生抑制・線維化の助長が生じることが報告されている^{7, 8)}。したがって、今後はアイシング処置がミトコンドリア量の回復に及ぼす影響をより経時的に確認するとともに、ミトコンドリア生成やマイトファジー関連因子

等への影響について検討する必要がある。

骨格筋損傷を含む急性外傷の応急処置としてアイシングに疼痛緩和作用があることは広く知られているものの、その分子機序は必ずしも明らかでない。本研究では、我々の先行研究を基に¹⁰⁾、急性炎症に伴う筋痛の誘発に参与する分子として知られるBradykininの受容体の一つであるBKB₂R¹³⁾、Prostaglandin E₂ (PGE₂)の産生に参与するCOX-2¹⁴⁾とmPGES-1¹⁵⁾のmRNA発現量を検討した。その結果、足底筋損傷後のアイシング処置によって損傷1日後のCOX-2 mRNA発現量は有意に変化しなかったものの、BKB₂R mRNA発現量は有意に低下した(図2)。また、mPGES-1 mRNA発現量も低下傾向にあった。このことは、筋損傷後の単回・短時間(20分)のアイシング処置でもBKB₂R発現とmPGES-1を介したPGE₂産生が抑制され、受傷後早期の筋痛が軽減される可能性を示している。一方、PGE₂は筋再生に必須の筋サテライト細胞の正の調節因子としても知られており¹⁶⁾、筋の再生過程でPGE₂シグナル伝達を阻害すると筋線維の再生不全や線維化の亢進が生じることが報告されている^{16,17)}。したがって、本研究のアイシング処置によって生じた線維化の亢進とミトコンドリア量回復の遅延に、受傷後早期のmPGES-1を介したPGE₂産生の減少が参与しているかもしれない。この点については推測の域を出ないため、今後その機序を含め詳細に検討する必要がある。

筋損傷後の再生過程で炎症反応(マクロファージの浸潤)や筋サテライト細胞の動員が抑制されると筋線維の再生不全が生じ、線維化も亢進する^{18,19)}。筋損傷後のアイシング処置は損傷部位へのマクロファージの浸潤と筋サテライト細胞の増殖・分化を遅延化させるが³⁾、一方で受傷直後の温熱刺激はこれらの応答を促進することが報告されている⁹⁾。したがって、アイシング処置によって炎症・再生応答が遅延化したとしても、その後

温熱刺激を併用するタイミングによってそれらを正規化できるのではないかと考えた。そこで、本研究では、間欠的な温熱刺激の併用開始時期の違いが線維化に及ぼす影響についても検討した。その結果、IHd1群とIHd2群ともに線維化の程度が軽減されていたが、IHd1群の方がICE群とIHd2群よりも線維化面積が有意に小さく、IN群と同程度の値であった。このことは、筋損傷後にアイシング処置を行ったとしても、速やかに(損傷後1日以内)温熱療法の併用を開始することによって、アイシング処置による線維化の亢進を抑制できることを示す。しかしながら、その分子機序は不明であるため、今後さらなる検討が必要である。

4. 結 論

本研究では、筋損傷受傷直後にアイシング処置を単回・短時間(20分間)行っただけでも受傷後早期の筋痛を軽減できるが、その後の再生過程における筋の質的な回復と筋代謝の要であるミトコンドリア量の回復の両方を妨げることが示唆された。また、アイシング後の併用処置としての温熱療法は、筋損傷後少なくとも1日以内から併用開始することで、アイシングの負の側面(線維化の亢進)を相殺できる介入法となり得ることが示された。

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・分析の実施にご協力頂きました金沢大学人間科学系・技術補佐員 伊藤仁美氏、山田理恵氏に深く感謝致します。

文 献

- 1) Knight K.L. Cryotherapy in sport injury management, Human Kinetics, Champaign (1995)
- 2) Merrick M.A. Secondary injury after

- musculoskeletal trauma: a review and update, *J. Athl. Train.*, **37**: 209-217 (2002)
- 3) Takagi R., Fujita N., Arakawa T., Kawada S., Ishii N., Miki A. Influence of icing on muscle regeneration after crush injury to skeletal muscles in rats, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **110**: 382-388 (2011)
 - 4) Shibaguchi T., Sugiura T., Fujitsu T., Nomura T., Yoshihara T., Naito H., Yoshioka T., Ogura A., Ohira Y. Effects of icing or heat stress on the induction of fibrosis and/or regeneration of injured rat soleus muscle, *J. Physiol. Sci.*, **66**: 345-357 (2016)
 - 5) Shibaguchi T., Hoshi M., Yoshihara T., Naito H., Goto K., Yoshioka T., Sugiura T. Impact of different temperature stimuli on the expression of myosin heavy chain isoforms during recovery from bupivacaine-induced muscle injury in rats, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **127**: 178-189 (2019)
 - 6) Nichenko A.S., Southern W.M., Tehrani K.F., Qualls A.E., Flemington A.B., Mercer G.H., Yin A., Mortensen L.J., Yin H., Call J.A. Mitochondrial-specific autophagy linked to mitochondrial dysfunction following traumatic freeze injury in mice, *Am. J. Physiol. Cell Physiol.*, **318**: C242-C252 (2020)
 - 7) Wagatsuma A., Kotake N., Yamada S. Muscle regeneration occurs to coincide with mitochondrial biogenesis, *Mol. Cell. Biochem.*, **349**: 139-147 (2011)
 - 8) Esteca M.V., Severino M.B., Silvestre J.G., Palmeira Dos Santos G., Tamborlin L., Luchessi A.D., Moriscot A.S., Gustafsson A.B., Baptista I.L. Loss of Parkin Results in Altered Muscle Stem Cell Differentiation during Regeneration, *Int. J. Mol. Sci.*, **21**: 8007 (2020)
 - 9) Takeuchi K., Hatade T., Wakamiya S., Fujita N., Arakawa T., Miki A. Heat stress promotes skeletal muscle regeneration after crush injury in rats, *Acta. Histochem.*, **116**: 327-334 (2014)
 - 10) 池崎和海, 芝口翼, 杉浦崇夫, 宮田浩文. アイシング処置がラット損傷筋の回復過程に及ぼす影響, *体力科学*, **66**: 345-354 (2017)
 - 11) Vafai S.B., Mootha V.K. Mitochondrial disorders as windows into an ancient organelle, *Nature*, **491**: 374-383 (2012)
 - 12) Powers S.K., Wiggs M.P., Duarte J.A., Zergeroglu A.M., Demirel H.A. Mitochondrial signaling contributes to disuse muscle atrophy, *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, **303**: E31-E39 (2012)
 - 13) Meotti F.C., Campos R., da Silva K., Paszcuk A.F., Costa R., Calixto J.B. Inflammatory muscle pain is dependent on the activation of kinin B (1) and B (2) receptors and intracellular kinase pathways, *Br. J. Pharmacol.*, **166**: 1127-1139 (2012)
 - 14) Prisk V., Huard J. Muscle injuries and repair: the role of prostaglandins and inflammation, *Histol. Histopathol.*, **18**: 1243-1256 (2003)
 - 15) Samuelsson B., Morgenstern R., Jakobsson P.J. Membrane prostaglandin E synthase-1: a novel therapeutic target, *Pharmacol. Rev.*, **59**: 207-224 (2007)
 - 16) Ho A.T.V., Palla A.R., Blake M.R., Yucel N.D., Wang Y.X., Magnusson K.E.G., Holbrook C.A., Kraft P.E., Delp S.L., Blau H.M. Prostaglandin E2 is essential for efficacious skeletal muscle stem-cell function, augmenting regeneration and strength, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **114**: 6675-6684 (2017)
 - 17) Shen W., Prisk V., Li Y., Foster W., Huard J. Inhibited skeletal muscle healing in cyclooxygenase-2 gene-deficient mice: the role of PGE2 and PGF2alpha, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **101**: 1215-1221, (2006)
 - 18) Segawa M., Fukada S., Yamamoto Y., Yahagi H., Kanematsu M., Sato M., Ito T., Uezumi A., Hayashi S., Miyagoe-Suzuki Y., Takeda S., Tsujikawa K., Yamamoto H. Suppression of macrophage functions impairs skeletal muscle regeneration with severe fibrosis, *Exp. Cell Res.*, **314**: 3232-3244 (2008)
 - 19) von Maltzahn J., Jones A.E., Parks R.J., Rudnicki M.A. Pax7 is critical for the normal function of satellite cells in adult skeletal muscle, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **110**: 16474-16479 (2013)

身体活動による骨格筋の形態学的変化は
脳の健康増進に寄与するか？
：認知機能と情動の改善を目指した戦略の構築

公益財団法人
明治安田厚生事業団
体力医学研究所
須藤 みず紀

**Do Physical Activity Induced Morphological Changes in Skeletal Muscle
Contribute to Improvement in Brain Health: Development of Strategic Measures
Towards Improvement of Cognitive Function and Mood**

by

Mizuki Sudo

*Physical Fitness Research Institute,
Meiji Yasuda Life Foundation of Health and Welfare*

ABSTRACT

The purpose of the present study was to examine whether environmental enrichment (EE) that enables facilitation of wheel running activity and locomotor activity (LA) increase skeletal muscle mass and mitigate anxiety-like behaviors. The present EE consisted of a running wheel, a slope, a tunnel, and a hut. Wistar rats were divided into four different housing groups (standard environment: SE; only running wheel group: EEW; EE without running wheel group: EENW; and EE, n=7-12, each). The LA of each rat was continuously recorded using a three-axis accelerometer that was implanted subcutaneously at the back of the rat. After exposure to each housing environment for 30 days, the animal was transferred to the an elevated plus maze to evaluate the anxiety level. All experimental data were expressed as mean \pm standard deviation. The level of significance was set at $P < 0.05$. A two-way ANOVA found the statistically significant main effect of group ($P = 0.001$). The post-hoc analysis showed that locomotor

activity of the EE group was significantly higher than other groups ($P < 0.001$). Anxiety-like behavior was reduced in the EEW and the EENW groups. Soleus muscle were greater in the EE, EEW, EENW groups compared with the SE group. Hence, the present study suggested that both wheel running activity and LA in the absence of wheel running reduce anxiety-like behavior, but LA in the SE does not despite the same amount of LA.

キーワード

身体活動, 情動, 骨格筋, 環境エンリッチメント, 不安様行動

Keyword

locomotor activity, mood, skeletal muscle, environmental enrichment, anxiety-like behavior

要 旨

本研究は、自発的な身体活動が骨格筋に及ぼす影響と情動の関係を検証した。本実験は、Wistar系ラットを用い、4条件の飼育環境として、自発的な身体活動誘導環境モデル（遊具+ホイール群、ホイールのみ群、遊具のみ群）、通常環境モデル）を作成した。30日間の飼育期間中、各個体における身体活動レベルを計測した。飼育期間終了後に、不安様行動、及び、後肢骨格筋の形態変化を検証した。その結果、身体活動レベルは、環境エンリッチメント（遊具+ホイール）条件群が有意に高い値を示した。一方で、ヒラメ筋における骨格筋量は、通常環境条件群と比較して全群において有意な増加を示した。また、不安様行動は、ホイールのみ群、及び遊具のみ群において通常環境群よりも有意な低下を示した。以上のことから、自発的な身体活動による不安様行動の改善は、身体活動レベルに依存するとは限らず、骨格筋の形態が関連している可能性が示唆された。

緒 言

近年、“いかに心身ともに健やかな状態で老いるか”が重要視されているが、COVID-19の世界デサントスポーツ科学 Vol. 44

的なパンデミックによる「身体活動」の低下に伴い、認知機能やメンタルヘルスが加速度的に悪化することが懸念されており、「身体活動」が脳健康維持のために如何に重要であることを再認識させられている。身体活動は、認知機能や情動・感情といったメンタルヘルスを維持・向上させるだけでなく、予防策としても有力なツールとして認識されていることから、「運動による脳健康増進効果」の作用機序を解明すべく、脳や骨格筋といった単一の臓器/細胞に焦点を当てた研究が多く行われてきた。一方、運動の健康増進効果は全身に及ぶにもかかわらず、臓器間のクロストークに焦点を当てた研究は少なく、骨格筋と脳の関係性を示すエビデンスも乏しいのが現状である。

これまでの先行研究より、身体活動が認知機能の向上やメンタルヘルスの安定をもたらすことは知られている¹⁻⁵⁾が、未だ不明な点は多い。

動物モデルにおいては、飼育環境と脳機能の関係を検証した先行研究として、環境エンリッチメント (Environmental Enrichment: EE) モデルが挙げられる。環境エンリッチメントには、標準的な飼育条件と比較して、感覚、認知、運動刺激を強める飼育条件が含まれる⁶⁾。これまで、EE条件は動物の探索、社会的相互作用、認知機能の向

上、身体活動を誘導し、うつ病や不安様行動の改善につながることを示唆されている⁷⁻¹⁰⁾。一方で、EE条件による脳機能への有益な効果は、部分的にはEE条件により誘発される身体活動量の増加と関連している可能性が高い。しかしながら、各個体の活動量の評価を集団で飼育から定量することは、技術的に困難であるため、我々の知る限り、EE条件における各個体の身体活動量を直接的に評価した研究は皆無である。

また、近年、「健康寿命の長さ」は「骨格筋量」と強く相関することが示されている¹¹⁾ことから、骨格筋が身体全体に対して健康増進に重要な役割であることが示唆されている。さらに、歩行速度と認知機能¹²⁾との関係性も指摘されていることから、筋の動員そのものが脳への求心的な刺激となり、脳の機能を保つ可能性が予想されるが、身体活動量と脳機能と骨格筋の3方向の視点からの知見はほとんどない。したがって、本研究は、自発的且つ継続的な身体活動による骨格筋の形態的变化が脳の機能維持に寄与するという仮説を立てた。本研究は、動物を対象に環境エンリッチメント条件における、1) 自発的な身体活動レベルを

個体ごとに定量し、2) 骨格筋の形態的变化と行動科学テストによる情動変化の関係を明らかにすることを目的した。

1. 研究方法

1.1 実験動物と飼育環境条件

本研究は、(公財) 明治安田厚生事業団体力医学研究所動物実験委員会の倫理審査に則り実験を行った(No.2014002)。対象は、雄性のWistar rat (6週齢, SLC, 各群N = 7-12)とし、12時間の明暗サイクルで一定の温度、及び湿度が保たれた部屋で飼育を行った。餌と水は自由摂取とした。ラットは以下の4つの異なる条件下で飼育を行った(図1): 通常の飼育ケージ(40×25×20 cm)内にて飼育する通常環境条件群(standard environmental condition; SE条件群)、大型のケージ(60×40×40 cm)に遊具(スロープ、小屋、トンネル)とランニングホイールを設置して飼育する環境エンリッチメント条件群(enriched environmental condition; EE条件群)、EE条件群から遊具を省いて飼育するホイールのみ群(EE-Wheel; EEW条件群)、EE条件群からランニン

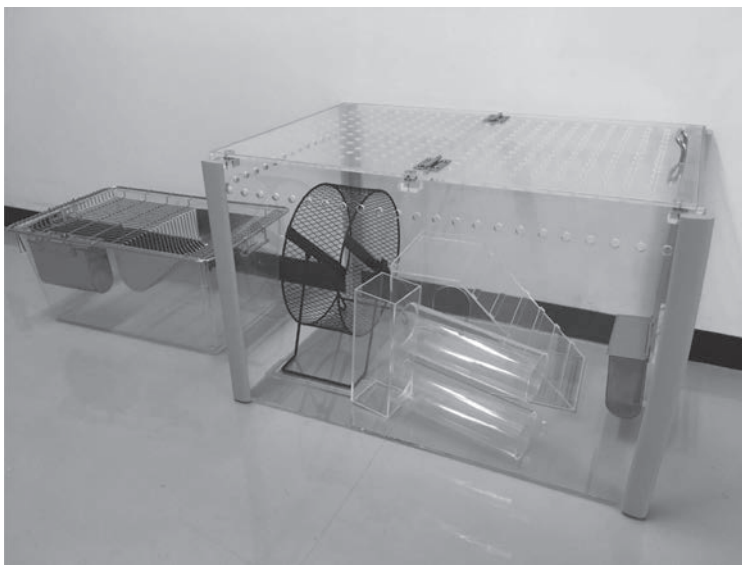


図1 通常飼育ケージ(左)と環境エンリッチメントケージ(右)

グホールを省いて飼育する遊具のみ群 (EE- No-Wheel; EENW 条件群). 全群は1ケージ2匹ずつの複数飼いとし, 飼育期間は30日間 (順化期間は1週間) とした.

1. 2 身体活動レベルの評価

身体活動レベルは, 小動物専用の3軸加速センサー (Nano-Tag: 15 mm × 14.2 mm × 7.1mm, 2.5g, キッセイコムテック社, 日本) を用いた. イソフルランによる吸引麻酔下で背部皮下にセンサーを埋め込み, 縫合の処置をおこなった. センサーは, 埋め込んでから30日間の飼育終了後に体内から回収した. 加速度センサーは, 事前に設定した閾値以上の動きを感じし振動数として記録することができる. 本研究では, 暗期における一日当たりの総振動数における週ごとの平均値を算出し, 身体活動レベル (Locomotor Activity :LA) として評価した.

1. 3 不安様行動の評価

不安様行動は, 飼育期間終了後に, 高架式十字迷路テスト (Elevated Plus-Maze Test: EPM) より評価した. この迷路は, 25 × 5cmのオープンアームと高さ15cmの黒色の壁に囲まれたクローズアームが交差しており, 床からアームまで70cmの高さを有している. アームには, 高さ3 mmのプラスチック製の板がつけられており, 動物が落下する可能性を限りなく低くした. 対象動物は, 中央部よりスタートし, 10分間の行動を継続的に動画記録した. 取得した動画より各アームの滞在時間を, 二次元動画解析ソフトウェア (Move-tr/2D, Library) を用いて解析をおこなった.

1. 4 後肢骨格筋の形態学的評価

全測定終了後に, 麻酔下において, 前脛骨筋 (tibialis anterior: TA), ヒラメ筋 (soleus: Sol), 足底筋 (plantaris: Pla) を摘出し, 直ちに筋湿

重量を測定した. 筋重量の統計結果をふまえた上で, Sol筋を対象に組織染色を行なった. 筋サンプルは, 液体窒素で冷却したイソペンタン中で急速凍結した. クライオスタット (-20℃, Leica, CM1510) で10 μmの横断切片を作成し, 免疫組織学染色後を施した. 一次抗体は, Mouse monoclonal slow MHC抗体 (Novocastrate Laboratories, Univ.of Iowa, 1 : 40), Mouse fast MHC monoclonal抗体のアイソフォームIIA型 (Studies Hybridoma Bank, Univ.of Iowa, SC-71, 1 : 1000) を用いた. 全ての切片は, 一次抗体処理後, Vectastain ABCキット (Vector Laboratories, Funakoshi, Japan) を用いて免疫組織化学反応を施し, 光学顕微鏡下にて観察・撮影を行なった. 筋線維横断面積 (cross-sectional are: CSA) は, 撮影画像を筋線維ごとにトレースした後, NIHの画像処理ソフト (Image J) を用いて測定を行なった.

1. 5 統計解析

全ての値は, 平均値 ± 標準偏差で示した. グループ間の統計的比較はGraphPad Prism 9 (version 9, GraphPad Software, La Jolla, CA) を用いた. 身体活動レベルは, 各群における週ごとの変化を二元配置の分散分析を行い, 不安様行動, 及び筋重量は各群に対する一元配置の分散分析を行なった. また, CSAの統計解析は, Student' s t-testを用いた. 全て有意水準は5%未満とし, 交互作用が見られた場合, Tukey-Kramerによる多重比較検定を実施した.

2. 結果

2. 1 体重

飼育終了後の体重は, 各群間に有意な差異はなかった (EE: 273 ± 10g, EEW: 272 ± 10g, EENW: 275 ± 12g, SE: 279 ± 15g).

2. 2 身体活動量

暗期における週ごとの身体活動レベルを算出した(図2)。身体活動レベルは、群において主効果が認められた(F 3, 24 = 7.137, P < 0.001)。また、多重比較検定の結果、EE条件群の身体活動レベルは、各群よりも有意に高い値を示した(P < 0.0001)。一方で、EENW条件群はSE条件群と比べて有意に低い値を示した(P < 0.0001)。

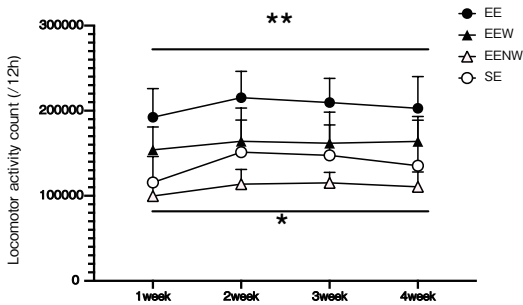


図2 暗期における週ごとの身体活動レベル mean ± SD. **P<0.0001 vs. SE, EEW, EENW, *P<0.05 vs. SE

2. 3 不安様行動の評価

EPMテストによる不安様行動は、各アームにおける滞在時間によって評価された(オープンアーム;不安様水準が低い, クローズアーム;不安様水準が高い)。オープンアーム滞在時間は、EEW条件群(185 ± 31 sec), 及びEENW条件群(233 ± 22 sec)ではSE条件群(103 ± 16 sec)と比較して有意に高い値を示した(EEW; P < 0.0001, EENW; P = 0.042)が、EE条件群(82 ± 14 sec)に差異はみられなかった。また、それぞれのアーム滞在時間の比(オープンアーム/クローズアーム)を算出した結果、群における主効果がみら

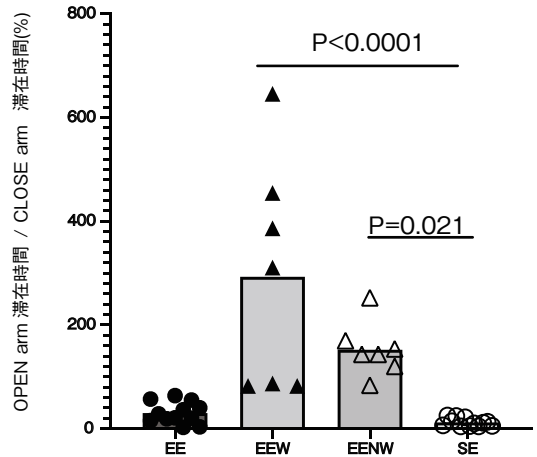


図3 高架式十字迷路における各アームにおける滞在時間比

れ(F3,35 = 33.37, P < 0.0001), EEW条件群, 及びEENW条件群においてSE条件群よりも有意に高い値を示した(EEW; P < 0.0001, EENW; P = 0.021, 図3)。

2. 4 骨格筋湿重量

飼育終了後に摘出した後肢骨格筋は、体重あたりの筋湿重量(mg/g)として算出した(表1)。体重あたりのSol筋において群間における主効果がみられ(F3, 20 = 10.66, P = 0.0002), SE条件群と比較してEE条件群, EEW条件群, EENW条件群において有意な高値を示した。TA筋とPla筋においては、群間における差異はみられなかった。

2. 5 筋線維タイプ型の割合と筋線維横断面積

体重あたりの骨格筋湿重量において、Sol筋のみ有意差が得られたことから、本報告書では、解析が終了したEE条件群とSE条件群両群間におけ

表1 UV-visible absorption spectra of UV absorbers in DMF and on cellulose acetate film

Skeletal Muscle	EE	EEW	EENW	SE	P value
TA / BW, mg / g	1.57 ± 0.03	1.60 ± 0.03	1.59 ± 0.03	1.56 ± 0.04	P = 0.79
Sol / BW, mg / g	0.45 ± 0.01*	0.42 ± 0.01*	0.40 ± 0.01*	0.36 ± 0.01	P = 0.0002
Pla / BW, mg / g	0.96 ± 0.02	0.95 ± 0.01	0.96 ± 0.02	0.92 ± 0.03	P = 0.34

mean ± SD.*P < 0.05 vs SE

る筋線維タイプの割合と筋線維横断面積を定量した。

筋線維タイプの割合は、MHC slow型、及びMHC IIA型の両方においてSE条件群 (slow; $84.3 \pm 7.1\%$, IIA; $22.3 \pm 7.2\%$) とEE条件群 (slow; $84.0 \pm 5.0\%$, IIA; $25.2 \pm 4.1\%$) の間に有意な差は見られなかった。

CSAは、slow型、及びMHC IIA型において、EE条件群はSE条件群と比較して有意に高い値を示した (slow型; $P = 0.04$, 図4, MHC IIA型; $P = 0.02$, 図5)。

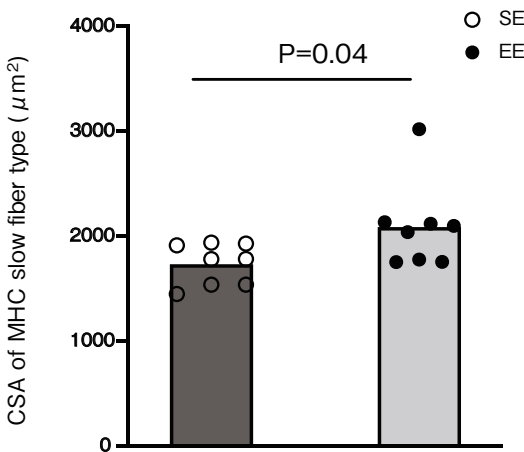


図4 ヒラメ筋におけるMHC slow型筋線維横断面積

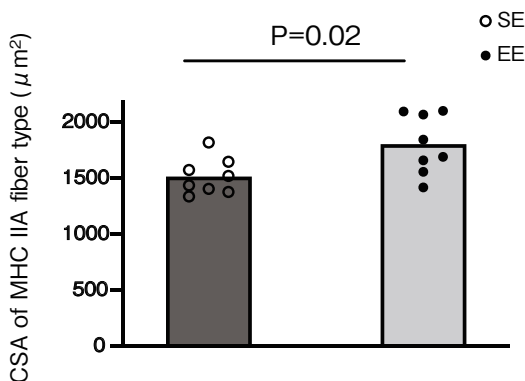


図5 ヒラメ筋におけるMHC IIA型筋線維横断面積

3. 考 察

本研究は、自発的な身体運動を促す環境エン

リッチメントが身体活動レベルに及ぼす影響を定量的に検証し、それに伴う情動と骨格筋の形態学的変化について動物モデルを用いて評価することを目的として実施した。

その結果、1) 暗期における身体活動レベルは、ホイールと遊具を設置した環境エンリッチメント条件群において、通常環境条件群、ホイールのみ条件群、遊具のみ条件群よりも高いことが明らかとなった。一方で、2) 不安様行動は、ホイールのみ条件群と遊具のみ条件群の両方において抑制されていることが示唆された。骨格筋の形態学的変化は、SE条件以外の群では、3) ヒラメ筋において筋重量の増加がみられ、EE条件群における横断面積が増加したことが明らかとなった。

身体活動レベルの増加は、環境エンリッチメント条件が自発的な身体活動量を促すことを示唆しており、特に持久的な運動と視覚、感覚刺激を与える遊具の設置条件の組み合わせにおいて身体活動レベルが増加することが本研究より示唆された。これまで、ラットにおいて身体活動量は赤外線レーザーを用いた方法による評価が多かった。レーザーを用いた場合、X, Y, Z軸方向の身体的動きを感知することで身体活動量を算出することができる。しかしながら、レーザーの場合、複数匹の動きに対して分別した解析が不可能であるため、単独での飼育中の身体活動量しか測定することができない。単独飼育により、ラットの情動はうつ状態に類似した応答が観察される可能性が高い。したがって、単独飼育は、ネガティブな状態に起因した身体活動量の減少が予想され、健全なラットにおける身体活動量と比較して過小評価される可能性が高い。よって、環境エンリッチメント条件における本研究の結果は、自発的な身体活動量と脳機能の関係性を詳細に検証する上で重要なデータとなることが予想される。

本研究における不安様行動は、環境エンリッチメント条件では変化がみられなかったが、ホイー

ルのみ条件と遊具のみ条件にて不安様水準の低下が示唆された。これまでの先行研究では、ホイール、トレッドミル運動などによる身体活動量の増加は、ポジティブな情動を誘発することが報告されてきた^{13,14)}ことから、情動の改善には効果的であると予想していた。しかしながら、本研究では、ホイールと遊具を組み合わせ環境エンリッチメント条件における身体活動レベルが上昇したにもかかわらず不安様行動の変化はみられず、ホイール運動を伴わない遊具のみ条件においても情動の改善が見られたことは興味深い。遊具のみ条件は、身体活動レベルは通常飼育群よりも低下していることが本研究の結果より示されている。ホイールによる有酸素的な運動を伴わない遊具のみの環境が、探索行動や視覚刺激を促し、脳機能に影響を及ぼすことは、これまでの先行研究^{9,10,15)}を加味すると起こりうる現象である。したがって、本研究の飼育環境において、身体活動レベルに依存しない情動の安定がもたらされた可能性がある。

また、本研究より、全ての群において身体活動レベルに依存せず、通常環境条件よりヒラメ筋における筋重量と筋線維横断面積の増加がみられた。従来、走行運動による筋の肥大は誘発しにくいとされてきたが、運動負荷の違いが走行中の筋の動員に関連した知見も報告されている¹⁶⁾。本研究にて設定した環境条件が、ホイールランニング、立ち上がり、歩行といった複数の行動を自発的に実施したことで、複合的に筋の動員に作用している可能性がある。また、先行研究では、実施頻度の多い低負荷レジスタンストレーニングが高負荷レジスタンストレーニングと比較して同等の筋肥大効果をもたらすことが指摘されている¹⁷⁾。本実験モデルは、遊具のみ条件群では、スロープ、トンネル、立位可能なケージのサイズなどの環境の設置が、後肢の骨格筋に対して高頻度の低強度筋活動となり、ヒラメ筋量の増加に寄与した可能

性があるため、身体活動レベルに依存しない筋肥大がもたらされた可能性がある。

本研究では、身体活動レベルと筋重量の増加が最も顕著であった環境エンリッチメント条件におけるヒラメ筋を対象とした筋線維タイプの割合と筋線維横断面積を定量した。ラットのヒラメ筋は、MHC IIA型とMHC slow型が主なものである¹⁸⁾が、その割合に変化は見られなかった一方で、両方の型における筋線維横断面積は増加し、肥大したことが示唆された。すなわち、この筋線維の肥大が筋重量に反映されていると考えられる。筋線維横断面積の増加の要因は、先述した身体活動における筋の動員が要因として推測されるが、今後、筋タンパク質の合成機構についての詳細を検証する必要があると考えている。

本研究より、環境エンリッチメント条件による自発的な身体活動レベルは増加したが、ポジティブな情動への変化と骨格筋の形態学的変化は非依存性である可能性が示唆された。現状では、骨格筋における形態学的変化が、脳機能の維持に影響するか否かは断定することはできない。しかし、マイオカインにより脳への影響を考慮した場合、自発的な身体活動レベルの上昇が筋肥大をもたらす、筋より放出される物質が求心的に脳の神経活動に作用する可能性は十分に考えられるだろう。本研究のモデル用いたさらなる検証が必要である。さらに、脳機能の認知機能についても現在、解析を進めており、自発的な身体活動による効果の検証を深めたい。

4. 結 論

本研究より、環境エンリッチメント条件はランニングホイールを伴うことで身体活動レベルが増加することが示された。一方で、ヒラメ筋量と横断面積は、環境エンリッチメント条件におけるホールランニングの有無にかかわらず、不安様行動の低下をもたらすことが示唆された。

謝 辞

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

文 献

- 1) Ando, S., Komiyama, T., Sudo, M., Higaki, Y., Ishida, K., Costello, J. T. and Katayama, K. The interactive effects of acute exercise and hypoxia on cognitive performance: A narrative review. *Scand J Med Sci Sports*, 30, 384-398 (2020)
- 2) Bourke, M., Patten, R.K., Klamert K., Klepac, B., Dash, S. and Pascoe, M.C.: The acute affective response to physical activity in people with depression: A meta-analysis. *J. Affect. Disord.*, 311, doi: 10.1016/j.jad.2022.05.089 (2022)
- 3) Chang, Y.K., Labban, J.D., Gapin, J.I. and Etner, J.L.: The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain Res.*, 1453, 87-101 (2012)
- 4) McMorris, T. The acute exercise-cognition interaction: From the catecholamines hypothesis to an interoception model. *Int. J. Psychophysiol.*, 170, 75-88 (2021)
- 5) Sudo, M., Ando, S. and Nagamatu, T.: Effects of acute static stretching on visual search performance and mood state. *Journal of Physical Education and Sport*, 15, 651-656 (2015)
- 6) Nithianantharajah, J. and Hannan, A.J.: Enriched environments, experience-dependent plasticity and disorders of the nervous system. *Nature Reviews: Neuroscience*, 7, 697-709 (2006)
- 7) Baumans, V.: Environmental enrichment for laboratory rodents and rabbits: requirements of rodents, rabbits, and research. *ILAR J.*, 46, 162-170 (2005)
- 8) Birch, A.M. and Kelly, A.M.: Lifelong environmental enrichment in the absence of exercise protects the brain from age-related cognitive decline. *Neuropharmacology*, 145, 59-74 (2019)
- 9) Birch, A.M., McGarry, N.B., and Kelly, A.M.: Short-term environmental enrichment, in the absence of exercise, improves memory, and increases NGF concentration, early neuronal survival, and

synaptogenesis in the dentate gyrus in a time-dependent manner. *Hippocampus*, 23, 437-450 (2013)

- 10) Harati, H., Majchrzak, M., Cosquer, B., Galani, R., Kelche, C., Cassel, J.C., and Barbelivien, A.: Attention and memory in aged rats: Impact of lifelong environmental enrichment. *Neurobiology of Aging*, 32, 718-736 (2011)
- 11) Ortega, F.B., Silventoinen, K., Tynelius, P. and Rasmussen, F.: Muscular strength in male adolescents and premature death: cohort study of one million participants. *BMJ*, 345, e7279 (2012)
- 12) Sui, S.S., Williams, L.J., Holloway-Kew, K.L., Hyde, N.K. and Pascoe, J.A.: Skeletal Muscle Health and Cognitive Function. A Narrative Review. *Int. J. Mol. Sci.*, 255, doi: 10.3390/ijms22010255 (2020)
- 13) Novak, C.M., Burghardt, P.R. and Levine, J.: The use of a running wheel to measure activity in rodents: relationship to energy balance, general activity, and reward. *Nurosci. Biobehav. Rev.*, 16, 1001-1014 (2012)
- 14) Svensson, M., Rosvall, P., Boza-Serrano, A., Andersson, E., Lexell, J. and Deierborg, T.: Forced treadmill exercise can induce stress and increase neuronal damage in a mouse model of global cerebral ischemia. *Neurobiol Stress*, 5, 8-18 (2016)
- 15) Singhal, G., Morgan, J., Jawahar, M.C., Corrigan, F., Jaehne, E.J., Toben, C., Breen, J., Pederson, S.M., Hannan, A.J., and Baune, B.T.: The effects of short-term and long-term environmental enrichment on locomotion, mood-like behavior, cognition and hippocampal gene expression. *Behavioural Brain Research*, 368, 111917 (2019)
- 16) Legerlotz, K., Elliott, B., Guillemin, B., and Smith, H.K.: Voluntary resistance running wheel activity pattern and skeletal muscle growth in rats. *Exp. Physiol.*, 93, 754-762 (2008)
- 17) Mitchell, C.J., Churchward-Venne, T.A., West, D.W., Burd, N.A., Breen, L., Baker, S.K., and Phillips, S.M.: Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J. Appl. Physiol.* (1985), 113, 71-77 (2012)
- 18) Bloemberg, D. and Quadrilatero, J. Rapid determination of myosin heavy chain expression in rat, mouse, and human skeletal muscle using multicolor immunofluorescence analysis : 7, e35273. (2012)

ヒト身体がもつ冗長自由度は
目標指向性運動の学習を難しくしているのか？
：効果的な運動学習方法論の確立を見据えて

筑波大学 佐渡夏紀

**Does The Redundancy in Human Body Make Learning Goal-Directed Motor
Tasks More Difficult?
: Insights into Establishing an Effective Motor Learning Program**

by

Natsuki Sado
*Faculty of Health and Sport Sciences,
University of Tsukuba*

ABSTRACT

The redundancy in human body is believed to make motor control more complex. However, given the inherent noise in the human control system, the redundancy may allow strategies to reduce the effects of noise during a several goal-directed motor task, making motor execution rather easy. Here I show a case in which experimental reduction of degrees of freedom delays motor learning compared to the normal condition in a non-dominant arm dart throwing task. A total of 21 adult male and female participants were randomly allocated to a shoulder-joint restrained group and a control group and asked to perform 20 throws x 10 sets of a non-dominant arm dart task. The dart landing point and upper-limb kinematics were measured using a 3D motion-capture system. The shortening of the distance between the landing point and target in the control group reached a plateau at approximately the third set, whereas this shortening was delayed in the restrained group: at the third set, the distance between the landing point and target was significantly longer in the restrained group (0.135 ± 0.026

m) than in the control group (0.099 ± 0.018 m). These results suggest that practice methods in which each motor segmented structure (i.e., part–method of learning) is mastered separately can rather delay the learning of goal-directed motor tasks.

キーワード

運動制御, ダーツ, 協調, UCM 仮説, 分習法

Keyword

Motor control, Darts, Coordination, UCM hypothesis, Part–method of learning

要 旨

ヒト身体の冗長自由度は運動制御を複雑にすると考えられている。しかし、ヒト制御系に内在するノイズを考慮すると、冗長自由度はノイズの影響を軽減させる方略を可能とし、運動遂行をむしろ簡単にしているかもしれない。本研究では、ダーツ課題を用いて、実験的な自由度の削減が通常の場合と比べて運動学習が遅延するという事例を示す。成人男女計21名を、肩関節を拘束する拘束群と対照群に無作為に割り付け、非利き腕ダーツ課題を20投×10セット行わせた。三次元動作計測装置を用いてダーツの到達点と上肢の運動学を測定した。対照群ではおよそ3セット目で到達点–目標間距離の短縮がプラトーとなったが拘束群ではこの短縮が遅延した。3セット目では拘束群 (0.135 ± 0.026 m) で対照群よりも有意に到達点–目標間距離が長かった (0.099 ± 0.018 m)。この結果は、運動構造を部分的に取り出すような分習法のような練習法は、むしろ目標指向型運動の学習を阻害してしまう可能性を示唆している。

緒 言

ヒトの身体は200以上の骨を600以上の筋で制御している多自由度系である。目の前のコップに向かって手を伸ばすような単純な動作であっても、達成するための手先の軌道・関節角度の組み

デサントスポーツ科学 Vol. 44

合わせ・筋活動の組み合わせが無数に存在する。組み合わせが無数に存在することは、その構成要素のいずれかに機能障害が生じても運動遂行を可能にするという点で、運動遂行可能性の頑健性という利点をもたらしている。しかし、一意に定まらず無数に存在する組み合わせの中からある一つを決定しなくてはならないという状況は、計算論上、制御を複雑にしているといえる。先に例示したようなリーチング課題において、各関節運動は試行間でばらつくのに対し、手先の軌道はほぼ同じ軌道を描くことが観察されている¹⁾。この観察を基にBerunstein¹⁾は、ヒトは複数の要素を協調させることで自由度を削減し、冗長性による複雑さを解決していると推察した。つまり、制御を考える上では、身体が持つ冗長自由度は運動課題の遂行を難しくする要因と捉えられている。身体の冗長自由度による運動遂行の複雑さは感覚的にも広く認識されている。例えば、運動の要素（例えば走動作における接地や腿上げ）を取り出すことで運動を簡略化して学習を促進する「分習法」が運動学習の実践場面でしばしば用いられ、保健体育の教科書にも取り上げられている。

ヒト身体には中枢神経系の運動指令から筋活動に至るまでに取り除くことのできないノイズが内在する²⁾。この制御系のノイズによってヒトはいかに簡単な動作であっても完全に同じ動作を再現することができない。このことは特にリーチング

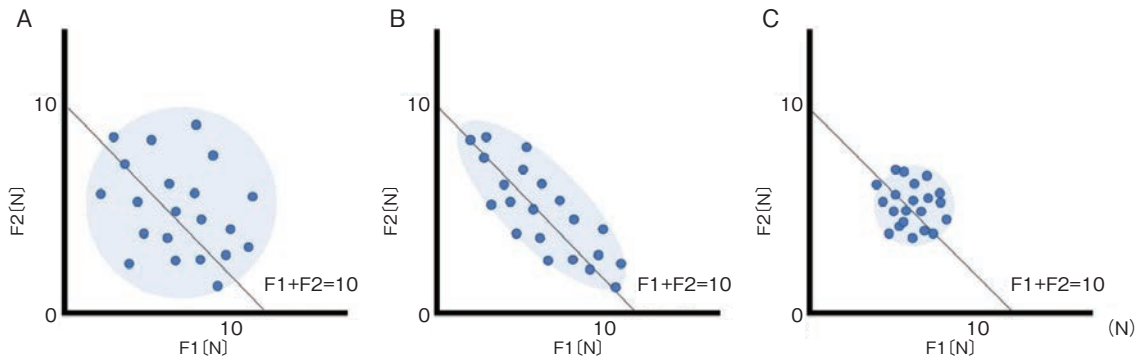


図1 UCM仮説の概念図

ここでは両手の (左手:F1 右手:F2) 合計で10Nバネを押すという試技を例にしている。Aは学習前, Bは協調によってパフォーマンスが改善した分散, Cはバラつきの縮小によってパフォーマンスが改善した分散をそれぞれ示している。「UCM仮説」では, Bのように「結果に関係するばらつき」($F1+F2=10$ の直線に直交する方向)のみを制御し「結果に関係のないばらつき」(直線に平行な方向)のばらつきを制御しないという協調方略によって合計値を10Nに近づけると考えられている。

やダーツ投げのような目標指向型の運動課題を再現よく正確に行う上で問題となりうる。ヒト運動制御の協調方略として「Un-Controlled Manifold (UCM) 仮説」が提唱されている³⁾。この仮説では、ヒトの制御系があらゆる全ての運動要素を個別に制御しようとしているのではなく、運動課題の達成に関わる方向へばらつかないように要素間を共分散させ、逆に要素間の関係から課題の結果に影響を及ぼさないばらつきは制御しないというものである⁴⁻⁷⁾(図1にその概略を示した一例を載せる)。このようなUCM仮説を基に、自由度が高い状況下では要素間の協調というノイズの影響を軽減して運動の正確性を高める方略が可能にできると考えることもできる。換言すると、運動課題の達成を“難しく”していると捉えられる冗長自由度を、むしろヒトは利用して正確性の高い運動遂行を“簡単”にしているとも捉えることができる。これまで、様々な目標指向型課題において、運動要素間の協調や上達に伴う協調度合いの高まりが確かめられ¹²⁻¹⁴⁾、冗長性が運動課題を達成する組み合わせの多様性を生み出し、ヒトはその冗長性を「利用して」課題を達成していると推察はされてきた¹²⁻¹⁴⁾。しかし、自由度が低減すると運動の学習・制御に実態としてどのような影響を与えるかは直接検証されておらず、目標指向型

課題における冗長性の利用については推察の域を出ない。

本研究では、ダーツ未経験者を対象とした非利き腕ダーツ課題を用いて、実験的な自由度の削減が初期の運動学習に及ぼす影響を検討することを目的とした。実験に先立ち、冗長自由度が削減された条件では学習が遅延することを仮説とした。

1. 方法

1.1 実験デザイン

関節の拘束による運動自由度の削減が運動学習に及ぼす影響を検討することを目的に、関節の拘束により運動自由度が削減された状態で実験試技を行う「関節拘束群」と肩関節が拘束されていない状態で実験試技を行う「対照群」に研究対象者を無作為に割り付け、非利き腕ダーツ課題を行わせるランダム化比較試験を行った。

実験に先立ち、片側の対応のないt検定を対象に検定力分析 ($\alpha = 0.05, 1 - \beta = 0.80$)を行い、各群10名の計20名が必要であることを確認した。この検定力分析の結果を基に、研究対象者はダーツ投げ経験のない健常な筑波大学に所属する学生男女21名とした。研究対象者を、肩関節を拘束される関節拘束群11名(男性5名、女性6名、 22.4 ± 4.4 歳)と、肩関節を拘束しない条件

で同課題を行う対照群10名(男性5名, 女性5名, 22.5 ± 4.0歳)に無作為に割り付けた。各研究対象者には事前に実験の目的及び試技内容の説明を行い, 書面にて協力の同意を得たうえで実験を行った。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(体021-86)。

1. 2 実験手順

本研究のダーツ課題にはハードダーツ(Chandeny製, 中国)が使用された。ダーツのシャトル側の末端には直径10 mmの反射マーカ―を, 針先から0.03 mの位置には反射マーカ―で用いられる再帰反射シールをそれぞれ貼付した。ダーツ競技で使用される標的は情報を多く含むため, 研究対象者が得られる視覚的なフィードバックが的とダーツ着弾位置のみとなるよう, ダーツ投げの標的には0.75 m × 0.50 mのコルクボードを用いた。コルクボードには4隅及び左辺上に計5点の半球型の反射マーカ―を貼付し, 目標点となるよう対角線の交点にバツ印をつけた。

実験に先立ち, 研究対象者には実験用ウェアの着用させた。直径14 mmの反射マーカ―を肩甲帯と上肢の解剖学的特徴点に貼付した(図2A)。また, 上腕と前腕には4つの反射マーカ―が固定されたプラスチックのクラスターマーカ―を貼付

した(図2A)。

解剖学的肢位のデータを取得し, その後手関節の内側と肘関節の内側側に貼付したマーカ―を除去した。マーカ―の除去後, 肘関節及び肩関節中心を算出するための機能的動作を行わせた。肘関節の機能的動作は肘関節90度程度の屈曲・伸展を5回繰り返してであった。肩関節の機能的動作は1. 水平外転0度から90度の方向に30度程度の肩関節屈曲・外転動作, 2. 肩関節屈曲30度から外転30度までの水平外転および逆回転, であった。この動作は, 股関節中心推定のガイドラインで提案されているStar-Arc動作⁸⁾を肩関節用に改変したものであった。以上の事前測定後, 関節拘束群には肩関節内外転の拘束が行える添え木を, 対照群には拘束群が装着した装具と同程度の質量である木片をそれぞれ上腕と体幹に装着した(図2B)。関節拘束群では, 拘束具により肩関節の運動ができないことを, 対照群では木片を装着した後も肩関節の運動が可能であることを確認した。添え木及び木片はいずれもベルトで巻いて固定した後にはずれないようにテープで補強した。

実験試技は, 非利き腕によるダーツ投げ課題20投 × 10セットの計200投とした。全ての研究対象者は右利きだったため, 左腕で実験試技を行った。各セット間には1分間の休憩を設け, 装具の固定

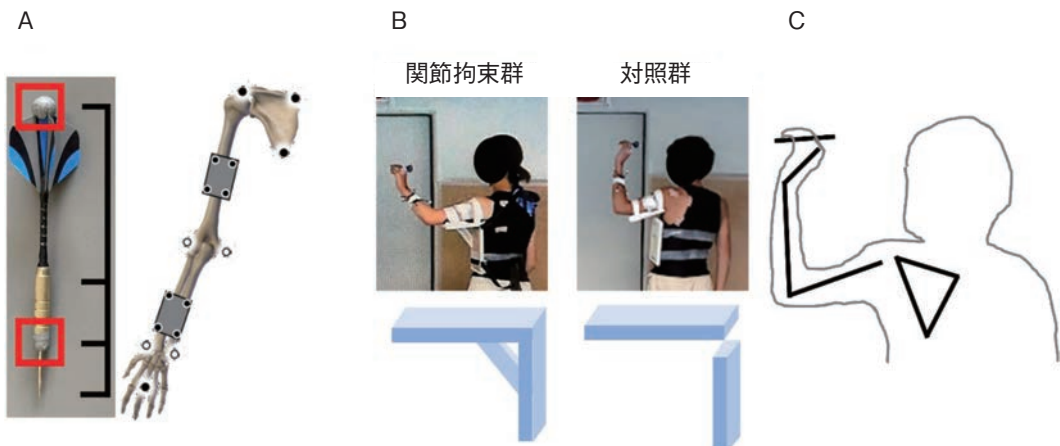


図2 実験設定

A: マーカ―セット, B: 肩関節の拘束方法, C: 使用した4セグメント(肩甲骨, 上腕, 前腕, 手) + ダーツのモデル

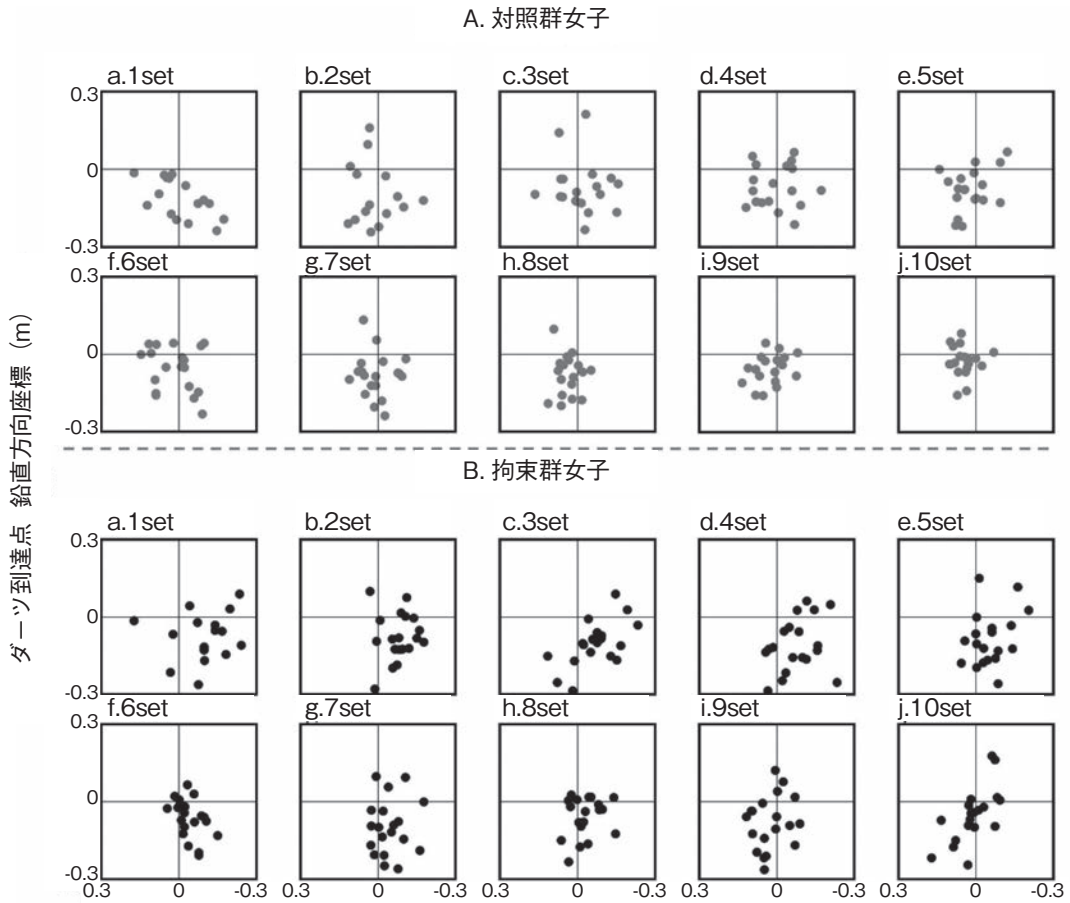


図3 ボード上のダーツ到達点の典型例
Aは対照群女子の、Bは拘束群女子の一例を示している、原点はダーツの標的点として示している。

によって傷害や不快感が発生していないかを確認しながら実験を進行した。

世界ダーツ連盟 (World Darts Federation) の公式ルールに則り、高さ1.73 m・距離2.43 mを目標点と設定し、コルクボードの対角線の交点がある位置になるよう丁寧に設置した。標的の高さに対する研究対象者の身長の違いによる影響を考慮し、0.10 mの踏み台を用いて0.10 m単位で調整を行った。

赤外線カメラ6台を有する光学式3次元自動動作計測装置 (Motion Analysis Corp. Santa Rosa, CA, USA) により研究対象者・ダーツ・コルクボードに貼付した反射マーカー3次元座標値をサンプル

リング周波数200 Hzで収集した。標的の鉛直下方向の地面上の点を原点とし、投射方向を向いた際の右方向をx軸正方向、投射方向をy軸正方向、鉛直上方向をz軸正方向とする右手系の座標系を絶対座標系と定義した。

1. 3 データ分析

得られた座標値データは残差分析^{9,10)}により遮断周波数を決定し、2次のButterworth low-pass digital filterを双方向からかけることで位相ずれの無いように平滑化した。実際に使用された遮断周波数は、研究対象者の上肢のマーカーが13-19 Hz、ダーツのマーカーが13-16 Hzであった。本

研究では左肩甲帯, 左上腕, 左前腕, 左手部から構成された4セグメントモデルを使用した(図2C)。手関節中心は関節の内外に貼付した2個のマーカースの midpoint 定義とした。肘関節中心は, 肘関節屈曲伸展課題中の, 上腕に対する前腕のクラスターマーカース4点に共通する幾何学的回転軸を求め, 上腕骨内・外側上顆の位置を回転軸に投影しその midpoint と定義した¹¹⁾。肩関節中心は, 肩関節の機能的運動課題中の, 肩甲帯における上腕のクラスターマーカース4点に共通する幾何学的な回転中心を求めることで定義した¹¹⁾。

ダーツの持ち手の座標はダーツ針先側の反射マーカースから0.035 m シャトル側後部の反射マーカース方向へ向かった点としてそれぞれ定義した。ダーツの針先の座標は, シャトル側後部の反射マーカースから針側の反射シルまでの線分を0.03 m 延長した所にある点と定義した。ダーツ離手瞬間は, ダーツの持ち手と第三中手骨の距離が3 SD 以上離れた瞬間として定義した。針先の座標がコルクボード平面を通過した瞬間の3フレーム前から3フレーム後までの計7フレームの針先の座標で3次スプライン内挿を行い, コルクボード

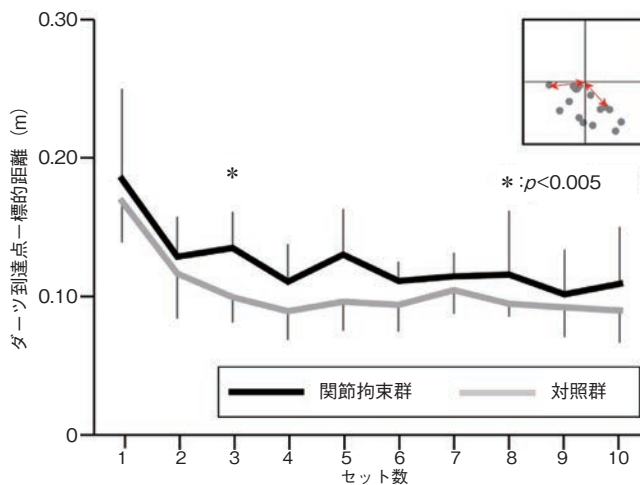


図4 ダーツ到達点—目標座標のセット内平均
アスタリスクは有意差を表している (Bonferroniの不等式を用いて, 有意水準の補正を行っている)

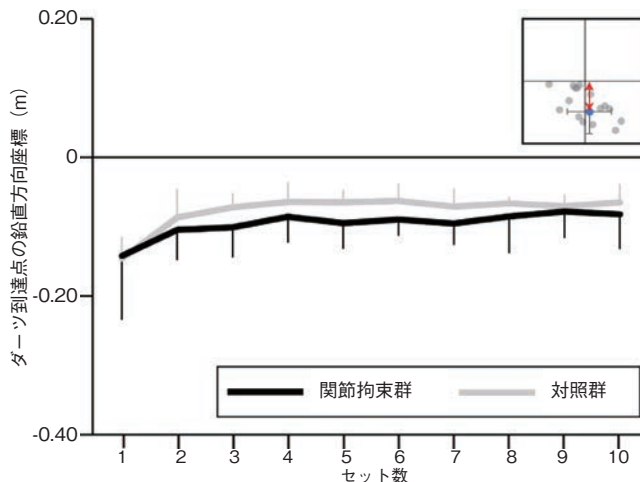


図5 ダーツ標的点を原点としたダーツ到達点の鉛直座標の各セットの平均値

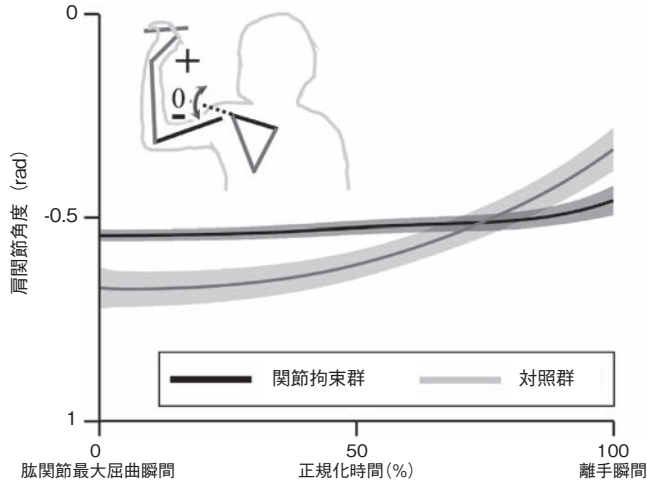


図6 肩(肩甲上腕)関節角度の時系列変化の例

関節拘束群と対照群それぞれ1名ずつの10セット目20投のアンサンブル平均を示している。時間は肘関節最大屈曲瞬間から離手瞬間までを100%として正規化している。肩甲骨上角から肩峰に向かうベクトルと肩関節中心から肘関節中心に向かうベクトルが同じ方向を向いている肢位(上腕が水平に近い肢位)を0度とし、正が外転、負が内転として示している。

平面上の点を着弾位置と定義した。コルクボード4点の位置座標からコルクボードの対角線の交点(つまり目標点)を原点とする右手系の座標系を定義し、着弾位置はこの座標系で示した。肩関節角度を、肩峰角(AI)から肩甲骨上部角(TS)に向かうベクトルと肘関節中心から肩関節中心に向かうベクトルの角度として算出した。

1. 4 統計処理

本研究では、各種の変数について1セット20投の平均値を各研究対象者の各セットの代表値として統計処理に用いた。ダーツの飛行中の姿勢により針先側の反射シールの位置が計測できなかった試技は除外した。Shapiro-Wilk testを用いて正規性を確認した後、正規性の有無に応じて対応のないt-testとWilcoxon signed-rank testのいずれかを用いてダーツ到達点から標的間の距離の群間差を検定した。危険率はBonferroniの不等式を用いて補正し、検定全体の有意水準は5%とした。

2. 結果

関節拘束群も対照群もセットが進むにつれて

ダーツ到達点一標的間距離が短縮された(図3, 4)。距離の短縮は、関節拘束群ではおおよそ6セット目、対照群ではおおよそ3セット目でそれぞれプラトーとなることが観察された(図4)。3セット目において関節拘束群(0.135 ± 0.026 m)のダーツ到達点一標的間距離は対照群(0.099 ± 0.018 m)より有意に長かった($p=0.04$, 図4)。全てのセットで、標的を原点としたダーツ到達点の鉛直座標は関節拘束群と対照群の間に有意差は認められなかった($p>0.14$, 図5)。

対照群では離手に向かって肩関節が約0.2 rad(約11°)外転したのに対し、関節拘束群の肩関節はほとんど動いていないことが確認された(図6)。

3. 考察

非利き腕ダーツ投げ課題において、対照群ではおおよそ3セット目で到達点-目標間距離の短縮がプラトーとなったが、拘束群ではこの短縮が遅延することが観察された。3セット目では拘束群で対照群よりも有意に到達点-目標間距離が長かった。これらの結果は、非利き腕ダーツ投げ課題で

は冗長自由度の実験的な削減が運動学習を遅らせたことを示している。

ダーツ試技中の肩関節角度の変化は関節拘束群で小さく、関節拘束が適切に行われたことを確認した。また、ダーツ到達点の鉛直座標に差はみられなかった。従って、本研究で得られた拘束群と対照群の差は、肩関節の自由度削減によってダーツ速度が不足したことによるものではなく、運動学的自由度の削減が影響した結果を表しているものと考えられる。

これまで、様々な目標指向型課題において、関節運動や筋活動、投射運動における投射角度・投射速度の変数（リリース変数）が運動学習によって協調していくことが確かめられてきた¹²⁻¹⁴⁾。これらの協調研究では、冗長性により運動課題を達成する運動の組み合わせの多様性を生み出し、ヒトは「冗長性を利用して」課題を達成していると推察されてきた¹²⁻¹⁴⁾。しかし、筆者の知る限り、自由度を実験的に削減して通常の運動学習と比較した研究は行われておらず、冗長自由度が目標指向型運動の利点となることを直接示した研究は見られない。そのため、「単に制御変数の次元を削減して冗長自由度による計算コストを小さくするためだけに強調させているのか」、「運動課題の正確性を高めるために冗長自由度を利用しているのか」、について直接言及することができなかった。一方、本研究は非利き腕ダーツ投げ課題において冗長自由度の削減が運動学習を遅らせたことを示した。この結果は、これまで推察の域を出なかった、運動を複雑にしていると考えられている冗長自由度がむしろヒトの正確性・再現性の高いパフォーマンスに有利であることを直接的な事例を示すものである。

本研究では非利き腕ダーツ投げ課題という上肢のみの運動を対象とした。そのため、冗長自由度の削減が運動学習に及ぼす影響について今回得られた知見を他の身体部位、より多くの身体の自由
デサントスポーツ科学 Vol. 44

度が関わる運動課題に直接適用できない。また、本研究は初期の運動学習を対象としており、運動課題の経験者がさらに正確性及び再現性を高めるといふ運動学習に本研究で得られた知見を適用することはできない。つまり長期的な運動学習に対する言及にも限界がある。以上のような部位特異性・自由度特異性・短長期的特異性といった問題が解決されることで、冗長自由度と運動学習の関係が今後さらに明らかにされていくと考えられる。本研究の知見はこれらの検証をするための仮説を立てる上で重要な根拠を提示するものである。

運動学習の現場では、複数の運動要素からなる全身運動について、運動要素を取り出して個別に学習させ、後で組み合わせる「分習法」がしばしば用いられている。しかし、本研究は自由度を削減することでむしろ正確性を求められる目標指向型運動課題の学習が遅延することをダーツ課題で示した。本研究で得られた知見が先駆けとなり、今後一般化されることで、全身運動の運動要素を細分化して習得する分習法に代わり、まとめて習得するための運動学習理論が構築されることが期待される。

4. 結 論

本研究では非利き腕ダーツ投げ課題における、肩関節拘束による実験的な自由度の削減が初期の運動学習に及ぼす影響を検討した。ダーツ到達点一目標点間の距離を肩関節の冗長自由度を持たない関節拘束群と対照群で比較した結果、関節拘束群の方が通常の試技を行う対処群よりも距離が短縮されるのが遅くなった。本研究の結果は、運動学的自由度が大きい状況がむしろ運動学習にとって有利になる事例の1つを示すものである。

謝 辞

本研究は堆耕平氏・藤森俊秀氏・野中愛里氏（筑

波大学大学院)の多大な協力を得て行われた。また、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団第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る。

文 献

- 1) Bernstein, N. The coordination and regulation of movements. *New York Pergamon Press.* (1967)
- 2) Faisal, A.A., Selen, L.P.J. & Wolpert, D.M. Noise in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience* vol. 9 292–303 (2008)
- 3) Scholz, J.P., Kang, N., Patterson, D. & Latash, M.L. Uncontrolled manifold analysis of single trials during multi-finger force production by persons with and without Down syndrome. *Exp. Brain Res.* 153, 45–58 (2003)
- 4) Krishnamoorthy, V., Latash, M. L., Scholz, J. P. & Zatsiorsky, V.M. Muscle synergies during shifts of the center of pressure by standing persons. *Experimental Brain Research* vol. 152 281–292 (2003)
- 5) D' Avella, A., Saltiel, P. & Bizzi, E. Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior. *Nat. Neurosci.* 6, 300–308 (2003)
- 6) Latash, M. L., Scholz, J. P. & Schöner, G. Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 30, 26–31 (2002)
- 7) Turvey, M.T. & Fonseca, S.T. The medium of haptic perception: A tensegrity hypothesis. *J. Mot. Behav.* 46, 143–187 (2014)
- 8) Camomilla, V., Cereatti, A., Vannozzi, G. & Cappozzo, A. An optimized protocol for hip joint centre determination using the functional method. *J. Biomech.* 39, 1096–1106 (2006)
- 9) Wells, R.P. & Winter, D.A. Assessment of Signal and Noise in the Kinematics of normal, Pathological and Sporting Gaits. *Proc. 1st Conf. Cdn. Soc. Biomech., Locomot.* 92–94 (1980)
- 10) Winter, D.A. Kinematics. in *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* vol. 4th 45–81 (John Wiley & Sons, 2009)
- 11) Gamage, S.S.H.U. & Lasenby, J. New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation. *J. Biomech.* 35, 87–93 (2002)
- 12) Nasu, D., Matsuo, T. & Kadota, K. Two types of motor strategy for accurate dart throwing. *PLoS One* 9, (2014)
- 13) Kudo, K., Tsutsui, S., Ishikura, T., Ito, T. & Yamamoto, Y. Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. *J. Mot. Behav.* 32, 337–345 (2000)
- 14) Müller, H. & Sternad, D. Decomposition of Variability in the Execution of Goal-Oriented Tasks: Three Components of Skill Improvement. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 30, 212–233 (2004)

日本外傷データベースを用いたスポーツ関連外傷の疫学データの推移と予後関連因子に関する研究

大阪大学	中尾 俊一郎
(共同研究者) 同	廣瀬 智也
同	中川 雄公
同	片山 祐介
同	北村 哲久

Epidemiological Study in Sports-Related Trauma Using The Japan Trauma Data Bank

by

Shinichiro Nakao, Tomoya Hirose,
Yuko Nakagawa, Yusuke Katayama
*Department of Traumatology and Acute Critical Medicine,
Osaka University Graduate School of Medicine*
Tetsuhisa Kitamura
*Department of Social and Environmental Medicine,
Osaka University Graduate School of Medicine*

ABSTRACT

Background: Sports-related trauma is an important epidemiological problem. The purpose of this study was to evaluate epidemiological characteristics, and to explore prognostic factors in sports-related trauma in Japan. Methods: A retrospective analysis was performed using the Japan Trauma Data Bank (JTDB). We included sports-related trauma admitted between 2004 and 2018. Logistic regression analysis was performed to explore factors associated with in-hospital mortality and adjusted odds

ratios (aOR) were calculated. Results: We identified 5,828 eligible patients, 2,429 were children and 3,399 were adults. The median age was 21 years, and 83.8% were male. The most common season for children was April-June (30.6%) , and the most common season for adults was January-March (37.5%) . In-hospital mortality was 1.2%. In multivariable logistic regression analysis, male, head/neck injury, and thoracic injury were significantly associated with in-hospital mortality (aOR 4.11 [95% CI 1.49-17.02], P=0.018; aOR 18.00 [95% CI 10.06-33.92], P<0.001; aOR 4.18 [95% CI 2.27-7.50], P<0.001) . Conclusion: In sports-related trauma in JTDB, male, head/neck injury, and thoracic injury were significantly associated with in-hospital mortality.

キーワード

スポーツ関連外傷, 疫学, 日本外傷データベース, 死亡率

Keyword

sports-related trauma, epidemiology, Japan Trauma Data Bank, mortality

要 旨

【背景】スポーツ関連外傷は、重大な疫学的問題である。本研究の目的は、本邦において、スポーツ関連外傷において小児と成人の違いなど疫学的特徴を評価し、予後関連因子を探索することである。【方法】日本外傷データベース (JTDB) を用いて後方視的な解析を行った。2004年から2018年に入院したスポーツ関連外傷を対象とした。ロジスティック回帰分析を行い、院内死亡と関連する因子を探索した。【結果】対象患者5,828例を同定し、2,429例が小児、3,399例が成人であった。年齢の中央値は21歳で、83.8%が男性であった。小児で最も多い季節は4-6月 (30.6%) であり、成人で最も多い季節は1-3月 (37.5%) であった。院内死亡は1.2%で、多変量解析の結果、男性、頭頸部外傷、胸部外傷は院内死亡と有意に関連していた (aOR 4.11 [95% CI 1.49-17.02], P=0.018; aOR 18.00 [95% CI 10.06-33.92], P<0.001; aOR 4.18 [95% CI 2.27-7.50], P<0.001)。【結語】JTDBを用いてスポーツ外傷の疫学を分析した。男性、頭

頸部外傷、胸部外傷は院内死亡と有意に関連していた。

緒 言

外傷は、世界中で45歳以下の死亡原因の第1位となっている¹⁾。スポーツに関連した外傷の多くは軽度から中等度であるが、重篤な外傷が発生し、重大な合併症や後遺症、死亡を引き起こすことがある²⁾。スポーツに関連した小児の大きな外傷は比較的少ないが、子供や青少年のスポーツへの参加が盛んになるにつれて増加していると報告されている³⁻⁵⁾。小児のスポーツ関連外傷の特徴は、身体活動、筋発達、学校環境などの違いにより、成人のそれとは異なる場合がある⁶⁻⁸⁾。しかし、重症スポーツ関連傷害の特徴や、小児と成人の違いに関する情報はまだ乏しい。

本邦におけるスポーツ関連外傷の疫学は、スポーツ安全協会、日本体育協会、日本スポーツ振興センターなどの機関からの報告があり、中学校・高等学校の体育的部活動中の事故として届出のあったものでは年間発生頻度は10万人あたり

9,452件、スポーツ安全協会傷害保険の保険金支払い実績からの検討では加入者10万人あたりの発生頻度は1,874件と報告されている。疾患別頻度の内訳では「骨折」、「捻挫」、「挫傷・打撲症」が多いが、致命的な外傷や重症外傷となりうる外傷分類ではなく、例えば胸腹部の臓器損傷は「内臓系疾患」とまとめられており、スポーツによる重症外傷や死亡に関する調査としては限定的である。また、スポーツ関連外傷は、学校管理下以外の一般市民による体力増進、健康保持やレクリエーション目的のスポーツは含まれていない。本研究の目的は、日本全国のデータベースを用いて、重症スポーツ関連外傷の特徴と転帰を記述し、予後との関連因子を検討することである。

1. 研究方法

【研究デザイン】全国の任意の病院ベースのAIS3以上の重症外傷を登録するレジストリである日本外傷データバンク (JTDB) の後方視的な解析を行った。大阪大学大学院医学系研究科の施設倫理委員会が本研究を承認した。インフォームドコンセントの要件は免除された (承認番号16260-3)。

【日本外傷データバンク】JTDBは、日本外傷学会と日本救急医学会により2003年に制定された⁹⁾。2018年現在、日本全国の主要な外傷治療施設280施設がこのレジストリに参加している¹⁰⁾。データは、AIS (Abbreviated Injury Scale) コーディングの研修を修了した参加施設の医療スタッフにより、Webベースのシステムを用いて収集・提出された。JTDBには、外傷患者に関する以下の情報が含まれている：年齢、性別、損傷メカニズム、AISコード (バージョン1998)、Injury Severity Score (ISS)、病院到着時のバイタルサイン、救急医療システムの呼び出しから退院までの日付と時系列、処置 (例：経カテーテル動脈塞栓術)、外科手術とCTスキャン、合併症、退院時のデサントスポーツ科学 Vol. 44

死亡率などである。ISSは、最も重傷の3つの身体部位における最高AISスコアの二乗の合計として計算された¹¹⁾。

【対象】JTDBに登録された2004年から2018年に入院したスポーツ関連傷害の患者を研究の対象とした。年齢、性別、院内死亡率に関する情報が記録にない患者、および病院間搬送による二重になっているデータは除外した。対象患者を、18歳未満の小児と18歳以上の成人の2群に分けた。

【変数】JTDBデータベースから以下の患者特性を抽出した：年齢、性別、鈍的または鋭的外傷、救急医療システム (119番) への通報から入院までの日付と時系列、AISコード、ISS、病院到着時のバイタルサイン、退院時の死亡率。季節的な傾向を評価するため、12か月を4つの期間に分けた。1月～3月、4月～6月、7月～9月、10月～12月の4つの期間に分けた。救急医療システムの通報を受けた時間帯を8時間の時間帯に分けた (すなわち、00:00-07:59, 08:00-15:59, 16:00-23:59)。負傷部位を評価するために、AISコード化された外傷を次のカテゴリーに分類した：頭頸部、胸部、骨盤/下肢、脊椎。病院到着時の収縮期血圧が80mmHg未満をショックと定義した¹²⁾。病院外心停止は、病院到着時の収縮期血圧が0mmHg、または心拍数が0bpmの場合と定義した。

年齢の段階にわたる分布を表すために、小児は4つのグループに、成人は3つのグループに年齢を分類した：未就学児 (0～5歳)、学童期 (6～11歳)、少年期1 (12～14歳)、少年期2 (15～17歳)、若年成人 (18～64歳)、若年高齢者 (65～74歳)、高齢者 (75歳以上)¹³⁾。

【統計解析】連続変数は中央値および四分位範囲 (IQR)、カテゴリー変数はカウントおよびパーセンテージで示した。2群間の患者特性の比較は、連続変数にはMann-Whitney U検定、カテゴリー変数にはカイ二乗検定またはFisherの正確検定を用いた。2群間の院内死亡率の差を比較するため

に、多変量ロジスティック回帰分析を用い、調整オッズ比 (aOR) および95%信頼区間 (CI) を算出した。

両側P値<0.05を統計的有意とした。すべての統計解析はR統計ソフトウェア (version 3.6.2 ; R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) を用いて行った。

2. 研究結果

調査期間中にJTDBに記録された356,535人の外傷患者のうち、6,669人がスポーツ関連外傷に分類された。そのうち、スポーツ関連外傷の患者5,828例を同定し、2,429例が小児、3,399例が成人であった (図1)。患者の特徴を表1に記載した。患者全体の年齢の中央値は21歳 (IQR, 14-40歳) で、83.8%が男性であった。ほとんどは鈍的外傷であった (98.7%)。受傷季節は、全コホートでは1月から3月が最も多かった (30.3%)。小児では4~6月 (30.6%) が最も多く、次いで7~9月 (27.0%)、成人では1~3月 (37.5%) が多く、季節の分布は小児と成人では有意差を認めた (P<0.001)。時間帯は、小児も成人も08:00~15:59が最も多く (60.3% vs 64.4%)、小児と成人で時間帯の分布に有意差があった (P<0.001)。16:00~

23:59の時間帯のスポーツ関連外傷は、小児でより多かった。受傷部位は、全コホートで頭頸部が最も多かった (16.5%)。小児、成人ともに受傷部位は頭頸部が最も多く、次いで小児では骨盤・下肢外傷、成人では脊椎外傷であった。頭頸部、胸部、骨盤・下肢および脊椎への外傷は、小児が成人より有意に少なかった (14.5% vs. 18.0%, p<0.001; 3.8% vs. 14.3%, p<0.001; 9.6% vs. 16.9%, p<0.001; 7.5% vs. 17.0%)。ISS中央値は9 (IQR, 4-13) であり、小児のISS中央値は9 (IQR, 4-9)、成人は9 (IQR, 8-16) であった。病院到着時のショックは全コホート中1.2%、院外心停止は0.4%であった。病院到着時ショックと院外心停止に2群間で統計学的な差はなかった。全体の院内死亡率は1.2%で、小児の院内死亡率 (0.6%) は、成人 (1.6%) よりも低かった (P<0.001)。小児および成人における年齢群別の患者特性を表2および表3に示した。小児では、学童期以降で4月から6月の受傷が多く、成人は全年齢層で最も多い季節は1月から3月であった。

患者特性と院内死亡率の関係を表4にまとめた。多変量ロジスティック回帰分析の結果では、小児と成人の院内死亡率には統計的に有意な差は認められなかった (aOR 0.56 [95% CI 0.29-1.00]、

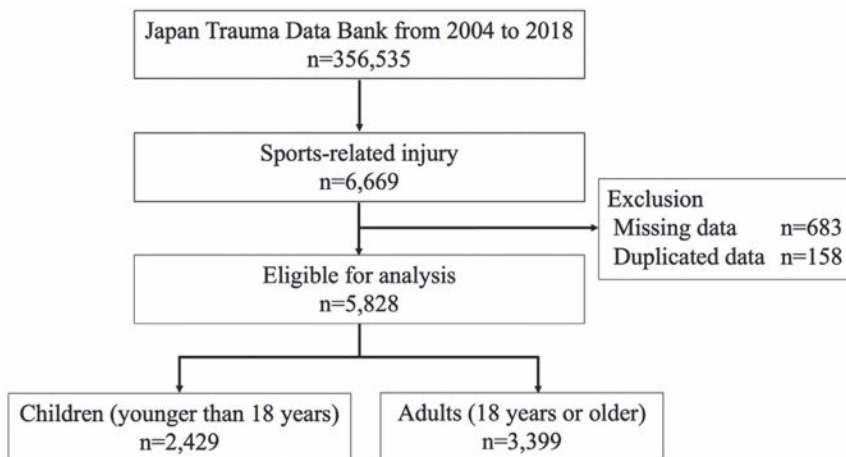


図1 患者フロー

表 1 2004年から2018年までの重症スポーツ関連傷害の患者特性

Characteristics	Total		小児		成人		P value
	n=5,828		n=2,429		n=3,399		
Age, median, Q1-Q3	21	14-40	14	11-16	36	24-48	
Male sex, n (%)	4,886	(83.8)	2,072	(85.3)	2,814	(82.8)	0.010
Type of injury, n (%)							0.057
Blunt	5,755	(98.7)	2,406	(99.1)	3,349	(98.5)	
Penetrating	23	(0.4)	5	(0.2)	18	(0.5)	
Missing	50	(0.9)	18	(0.7)	32	(0.9)	
Season, n (%)							<0.001
January-March	1,768	(30.3)	495	(20.4)	1,273	(37.5)	
April-June	1,474	(25.3)	744	(30.6)	730	(21.5)	
July-September	1,391	(23.9)	656	(27.0)	735	(21.6)	
October-December	1,195	(20.5)	534	(22.0)	661	(19.4)	
Time of day							<0.001
00:00-07:59	109	(1.9)	26	(1.1)	83	(2.4)	
08:00-15:59	3,653	(62.7)	1,464	(60.3)	2,189	(64.4)	
16:00-23:59	1,665	(28.6)	776	(31.9)	889	(26.2)	
Missing	401	(6.9)	163	(6.7)	238	(7.0)	
Injury site (AIS 3+) , n (%)							
Head/neck	964	(16.5)	352	(14.5)	612	(18.0)	<0.001
Thorax	578	(9.9)	92	(3.8)	486	(14.3)	<0.001
Abdomen	369	(6.3)	150	(6.2)	219	(6.4)	0.720
Pelvis/lower-extremity	806	(13.8)	232	(9.6)	574	(16.9)	<0.001
Spine	760	(13.0)	182	(7.5)	578	(17.0)	<0.001
ISS, median, Q1-Q3	9	4-13	9	4-9	9	8-16	<0.001
Shock on arrival, n (%)	68	(1.2)	25	(1.0)	43	(1.3)	0.607
Out-of-hospital cardiac arrest, n (%)	22	(0.4)	7	(0.3)	15	(0.4)	0.540
In-hospital mortality, n (%)	71	(1.2)	15	(0.6)	56	(1.6)	<0.001

AIS, Abbreviated Injury Scale; ISS, Injury Severity Score

表 2 小児における重症スポーツ関連外傷の年齢層別患者特性

Characteristics	0-5 years		6-11 years		12-14 years		15-17 years	
	Preschoolers		Middle childhood		Young teens		Teenagers	
	n=41		n=593		n=844		n=951	
Age, median, Q1-Q3	5	5-5	10	8-11	13	13-14	16	15-17
Male sex, n (%)	30	(73.2)	444	(74.9)	737	(87.3)	861	(90.5)
Season, n (%)								
January-March	11	(26.8)	131	(22.1)	190	(22.5)	163	(17.1)
April-June	9	(22.0)	177	(29.8)	240	(28.4)	318	(33.4)
July-September	11	(26.8)	134	(22.6)	228	(27.0)	283	(29.8)
October-December	10	(24.4)	151	(25.5)	186	(22.0)	187	(19.7)
Time of day								
00:00-07:59	0	(0.0)	4	(0.7)	8	(0.9)	14	(1.5)
08:00-15:59	25	(61.0)	315	(53.1)	539	(63.9)	585	(61.5)
16:00-23:59	13	(31.7)	232	(39.1)	246	(29.1)	285	(30.0)
Missing	3	(7.3)	42	(7.1)	51	(6.0)	67	(7.0)
Injury site (AIS 3+) , n (%)								
Head/neck	9	(22.0)	74	(12.5)	91	(10.8)	178	(18.7)
Thorax	1	(2.4)	10	(1.7)	28	(3.3)	53	(5.6)
Abdomen	0	(0.0)	25	(4.2)	50	(5.9)	75	(7.9)
Pelvis/lower-extremity	6	(14.6)	54	(9.1)	97	(11.5)	75	(7.9)
Spine	0	(0.0)	11	(1.9)	51	(6.0)	129	(12.6)
ISS, median, Q1-Q3	9	4-9	9	4-9	9	4-9	9	5-16
Shock on arrival, n (%)	2	(4.9)	12	(2.0)	4	(0.5)	7	(0.7)
Out-of-hospital cardiac arrest, n (%)	1	(2.4)	4	(0.7)	1	(0.1)	1	(0.1)
In-hospital mortality, n (%)	0	(0.0)	6	(1.0)	2	(0.2)	7	(0.7)

AIS, Abbreviated Injury Scale; ISS, Injury Severity Score

表3 成人における重症スポーツ関連外傷の年齢層別患者特性

Characteristics	18-64 years Young adults n=3,082		65-74 years Younger elderly n=227		75 years and older Older elderly n=90	
	Age, median, Q1-Q3	33	23-45	69	66-71	78
Male sex, n (%)	2,582	(83.8)	179	(78.9)	53	(58.9)
Season, n (%)						
January-March	1,136	(36.9)	110	(48.5)	27	(30.3)
April-June	670	(21.7)	42	(18.5)	18	(20.0)
July-September	671	(21.8)	41	(18.1)	23	(25.6)
October-December	605	(19.6)	34	(15.0)	22	(24.4)
Time of day						
00:00-07:59	73	(2.4)	8	(3.5)	2	(2.2)
08:00-15:59	1,952	(63.3)	172	(75.8)	65	(72.2)
16:00-23:59	833	(27.0)	35	(15.4)	21	(23.3)
Missing	224	(7.3)	12	(5.3)	2	(2.2)
Injury site (AIS 3+) , n (%)						
Head/neck	537	(17.4)	52	(22.9)	23	(25.6)
Thorax	447	(14.5)	34	(15.0)	5	(5.6)
Abdomen	214	(6.9)	4	(1.8)	1	(1.1)
Pelvis/lower-extremity	480	(15.6)	62	(27.3)	32	(35.6)
Spine	512	(16.6)	52	(22.9)	14	(15.6)
ISS, median, Q1-Q3	9	5-16	9	9-16	9	9-16
Shock on arrival, n (%)	38	(1.2)	4	(1.8)	1	(1.1)
Out-of-hospital cardiac arrest, n (%)	12	(0.4)	2	(0.9)	1	(1.1)
In-hospital mortality, n (%)	51	(1.7)	3	(1.3)	2	(2.2)

AIS, Abbreviated Injury Scale; ISS, Injury Severity Score

表4 重度のスポーツ関連傷害を負った患者の死亡率に関する各変数のオッズ比

Characteristics	Mortality		Adjusted Odds Ratio (95% CI)	P value
	%	(n/N)		
Age group				
Children	0.6	(15/2,429)	0.56 (0.29 to 1.00)	0.057
Adults	1.6	(56/3,399)	Reference	NA
Sex				
Male	1.4	(67/4,886)	4.11 (1.49 to 17.02)	0.018
Female	0.4	(4/942)	Reference	NA
Season				
January-March	1.8	(31/1,768)	1.73 (0.70 to 3.38)	0.333
April-June	0.9	(13/1,474)	1.12 (0.45 to 2.67)	0.868
July-September	1.4	(18/1,319)	0.68 (0.58 to 3.15)	0.527
October-December	0.8	(9/1,195)	Reference	NA
Time of day				
00:00-07:59	0.9	(1/108)	0.68 (0.04 to 3.68)	0.718
08:00-15:59	1.4	(50/3,603)	1.05 (0.60 to 1.93)	0.869
16:00-23:59	1.0	(17/1,665)	Reference	NA
Injury site (AIS 3+)				
Head/neck	5.5	(53/964)	18.00 (10.06 to 33.92)	<0.001
Thorax	0.4	(18/4,864)	Reference	NA
Abdomen	3.6	(21/578)	4.18 (2.27 to 7.50)	<0.001
Pelvis/lower-extremity	1.0	(50/5,250)	Reference	NA
Spine	0.5	(2/369)	1.26 (0.20 to 4.50)	0.764
Thorax	1.3	(69/5,459)	Reference	NA
Abdomen	0.2	(2/806)	0.48 (0.07 to 1.66)	0.323
Pelvis/lower-extremity	1.4	(69/5,022)	Reference	NA
Spine	1.1	(8/760)	1.28 (0.54 to 2.72)	0.538
Missing	1.2	(63/5,068)	Reference	NA

OR, odds ratio; CI, confidence interval; ISS, Injury Severity Score; AIS, Abbreviated Injury Scale

表5 スポーツ関連外傷の経時的推移

	2004-2008 (n=432)	2009-2013 (n=2004)	2014-2018 (n=3392)
小児	156 (36.1%)	783 (39.1%)	1490 (43.9%)
成人	276 (63.9%)	1221 (60.9%)	1902 (56.1%)
年齢層			
<6	2 (0.5%)	12 (0.6%)	27 (0.8%)
6-11	29 (6.7%)	180 (9.0%)	384 (11.3%)
12-14	53 (12.3%)	285 (14.2%)	506 (14.9%)
15-17	72 (16.7%)	306 (15.3%)	573 (16.9%)
18-64	264 (61.1%)	1120 (55.9%)	1698 (50.1%)
65-74	9 (2.1%)	71 (3.5%)	147 (4.3%)
75-	3 (0.7%)	30 (1.5%)	57 (1.7%)
性別			
Male	366 (84.7%)	1669 (83.3%)	2851 (84.1%)
Female	66 (15.3%)	335 (16.7%)	541 (15.9%)
時間帯			
0-8h	12 (2.8%)	42 (2.1%)	55 (1.6%)
8-16h	272 (63.0%)	1225 (61.1%)	2156 (63.6%)
16-24h	130 (30.1%)	590 (29.4%)	945 (27.9%)
季節			
1-3月	146 (33.8%)	575 (28.7%)	1047 (30.9%)
4-6月	98 (22.7%)	467 (23.3%)	909 (26.8%)
7-9月	114 (26.4%)	488 (24.4%)	789 (23.3%)
10-12月	74 (17.1%)	474 (23.7%)	647 (19.1%)
頭部頸部外傷	103 (23.8%)	350 (17.5%)	511 (15.1%)
胸部外傷	43 (10.0%)	204 (10.2%)	331 (9.8%)
腹部外傷	52 (12.0%)	129 (6.4%)	188 (5.5%)
下肢骨盤外傷	46 (10.6%)	274 (13.7%)	486 (14.3%)
脊椎外傷	75 (17.4%)	236 (11.8%)	449 (13.2%)
ISS, Median [IQR]	9.00 [9.00, 16.0]	9.00 [4.00, 13.0]	9.00 [4.00, 13.0]
来院時ショック	17 (3.9%)	30 (1.5%)	24 (0.7%)
死亡	12 (8.1%)	28 (5.9%)	22 (3.0%)

p=0.057) が、男性、頭頸部外傷、胸部外傷は院内死亡と有意に関連していた (aOR 4.11 [95% CI 1.49-17.02], P=0.018; aOR 18.00 [95% CI 10.06-33.92], P<0.001; aOR 4.18 [95% CI 2.27-7.50], P<0.001)。表5に、スポーツ関連外傷の患者特性の経年変化をまとめた。4年ごとの登録患者数は増加しており、高齢者の割合は増加傾向で、死亡割合は低下傾向であった。

3. 考 察

日本全国のデータベースを用いて、重症スポーツ関連外傷の特徴や転帰、患者の転帰に関連する因子について報告した。スポーツ外傷の季節は、小児では4～6月と7～9月が多く、成人では1～3月であった。多変量解析の結果、小児と成人

の院内死亡率に統計的な差は認められなかったが、男性、頭頸部外傷、胸部外傷は院内死亡と有意に関連していた。

頭頸部の外傷は院内死亡率の悪化と有意に関連しており、これは先行文献^{14, 15)}と一致していた。胸部外傷は単独でも重症となり死亡率に影響を与えていると言われているが、特に頭部と合併すると、さらに死亡率に影響を与えていると言われている¹⁶⁾。

先行研究では、スキーやスノーボードなどの冬季スポーツにおいて、重度の外傷が比較的多く見られると報告されている¹⁷⁻¹⁹⁾。日本では冬季スポーツが盛んであるため、成人の重症スポーツ関連外傷は1月から3月にかけて多く発生したことは矛盾しない結果である。子供のスポーツ関連外

傷は、4～6月と7～9月に多く、これは日本の学校制度と一致する。小学校、中学校、高校では、通常の体育に加えて、中学生と高校生が自主的に課外活動としてスポーツクラブに参加することができる²⁰⁾。また、日本の学校では毎年、全校生徒が参加する運動会が開催され、ウォーキング、ランニング、水泳競技などの活動が行われている²⁰⁾。これらは、小児の重症スポーツ関連外傷の季節や時間帯の分布に影響を与える可能性がある。

頭胴体比が大きく、頭蓋骨が薄いため頭部外傷は子どもでより一般的であるが、本研究では成人で頭部外傷が多かった²¹⁾。腹部損傷は、胸郭が柔軟で腹筋が発達していないため、小児でより起こりやすいと考えられている²²⁾。腎臓損傷のようなスポーツに関連した重度の腹部損傷は、過去の研究で示された小児の単独損傷で起こりやすいとされている^{23, 24)}。しかし、本研究では小児と成人で有意差は認めなかった。このような受傷部位の分布の違いは、流行しているスポーツの種類で異なると考えられる。北米などではアメリカンフットボールなどの激しいコンタクトを伴うスポーツは人気であるが、日本ではそれほど普及していない。過去の国際的な外傷データベースの分析では、ウィンタースポーツの主要な外傷では、頭部、胸部、脊椎、骨盤の損傷が一般的であったと報告されている¹⁷⁾。このことから、本研究では成人のスポーツ関連外傷は冬季に発生していたため、頭頸部、胸部、下肢/骨盤、脊椎損傷の割合が子供と比較して大きいことが説明できるかもしれない。院内死亡率については、小児と成人の間に統計的に有意な差は認められなかった。

また、スポーツによる重度外傷の患者特性と転帰を分析したところ、男性、頭頸部外傷、胸部外傷がそれぞれ独立して死亡に関連していた。この結果は、スポーツにおける外傷の予防と治療の改善に役立つと思われる。重症スポーツ関連傷害で

は、頭頸部と胸部の損傷が多いため、スポーツ用の頭部保護具と胸部保護具がより強調されるかもしれない²⁵⁻²⁷⁾。

本研究は、本邦のAIS3以上の外傷を登録する重症外傷のレジストリを用いており、経年的に登録数が増加していることが予想された。JTDBは2003年から登録が開始されており、本研究は2004年からのデータを用いていること、参加施設数は徐々に増加していることを踏まえると、登録数の増加は外傷患者の増加ではなく、レジストリへの参加施設数の増加によるものと考えるのが妥当であろう。今後もレジストリの分析を続け、経年的変化を検討していく必要がある。

本研究にはいくつかの限界がある。第一に、本研究は日本の主要な救命救急センターが参加した全国規模の外傷データベースを基にしているが、JTDBは人口ベースのデータベースではなく、データの登録も任意であるため、結果の一般化には限界があるかもしれない。第二に、JTDBはスポーツの種目に関するデータを含んでいないため、スポーツ種目におけるサブグループ解析を行うことができなかった。第三に、今回の結果は人気スポーツの分布、人口の年齢分布、学校教育制度、医療制度が異なる地域には適用できない可能性がある。

4. 結 語

全国規模の外傷データベースを用いて、重度のスポーツ関連外傷の包括的な解析を実施した。スポーツ関連外傷が最も多く発生する季節は、小児では4～6月、成人では1～3月であった。小児と成人に関わらず、院内死亡率は男性、頭頸部外傷、胸部外傷は院内死亡率と関連していた。疫学を理解することで、本研究は重度のスポーツ関連外傷の予防とケアの向上に役立つ可能性がある。

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助成を受けたものです。

文 献

- 1) Mock, C.; Joshipura, M.; Arreola-Risa, C.; Quansah, R. An Estimate of the Number of Lives That Could Be Saved through Improvements in Trauma Care Globally. *World J. Surg.*, **36**, 959–963, doi:10.1007/s00268-012-1459-6(2012)
- 2) Petridou, E.; Kedikoglou, S.; Belechri, M.; Papadopoulos, F.; Alexe, D.M.; Trichopoulos, D.; Robert, B.; Leben, S.; Rosa, G.; Thomas, H.; et al. Sports Injuries among Adults in Six European Union Countries. *Eur. J. Trauma*, **29**, 278–283, doi:10.1007/s00068-003-1295-3(2003)
- 3) Green, R.S.; Butler, M.B.; Kureshi, N.; Erdogan, M. A Retrospective Evaluation of Pediatric Major Trauma Related to Sport and Recreational Activities in Nova Scotia. *Can. J. Emerg. Med.*, **18**, 106–111, doi:10.1017/cem.2015.69(2016)
- 4) Caine, D.; Caine, C.; Maffulli, N. Incidence and Distribution of Pediatric Sport-Related Injuries. *Clin. J. Sport Med.*, **16**, 500–513, doi:10.1097/01.jsm.0000251181.36582.a0(2006)
- 5) Caine, D.; Maffulli, N.; Caine, C. Epidemiology of Injury in Child and Adolescent Sports: Injury Rates, Risk Factors, and Prevention. *Clin. Sports Med.*, **27**, 19–50, doi:10.1016/j.csm.2007.10.008(2008)
- 6) McGuine, T. Sports Injuries in High School Athletes : A Review of Injury-Risk and Injury-Prevention Research. *Clin. J. Sport Med.*, **16**, 488–499(2006)
- 7) Dwek, J.R. A Structural and Mechanism-Based Perspective toward Understanding Pediatric and Adult Sports Injuries. *Am. J. Roentgenol.*, **206**, 980–986, doi:10.2214/AJR.15.15937(2016)
- 8) Scarneo, S.E.; Kerr, Z.Y.; Kroshus, E.; Register-Mihalik, J.K.; Hosokawa, Y.; Stearns, R.L.; DiStefano, L.J.; Casa, D.J. The Socioecological Framework: A Multifaceted Approach to Preventing Sport-Related Deaths in High School Sports. *J. Athl. Train.*, **54**, 356–360, doi:10.4085/1062-6050-173-18(2019)
- 9) Kobayashi, K. Challenges for Improving Trauma Care in Japan. *J. Trauma - Inj. Infect. Crit. Care*, **58**,

- 1134–1139, doi:10.1097/01.TA.0000169953.29347.81(2005)
- 10) Japan Trauma Care and Research Japan Trauma Data Bank Report 2019 Available online: <https://www.jtcr-jatec.org/traumabank/dataroom/data/JTDB2019e.pdf> (accessed on 30 April 2021)
- 11) BAKER, S.P.; O' NEILL, B.; HADDON, W.J.; LONG, W.B. The Injury Severity Score: A Method for Describing Patients with Multiple Injuries and Evaluating Emergency Care. *J. Trauma Inj. Infect. Crit. Care*, **14**, 187–196(1974)
- 12) Neidel, T.; Salvador, N.; Heller, R. Impact of Systolic Blood Pressure Limits on the Diagnostic Value of Triage Algorithms. *Scand. J. Trauma Resusc. Emerg. Med.*, **25**(2017)
- 13) Centers for Disease Control and Prevention Child Development Available online: <https://www.cdc.gov/ncbddd/childdevelopment/positiveparenting/index.html> (accessed on 30 May 2022)
- 14) Yue, J.K.; Winkler, E.A.; Burke, J.F.; Chan, A.K.; Dhall, S.S.; Berger, M.S.; Manley, G.T.; Tarapore, P.E. Pediatric Sports-Related Traumatic Brain Injury in United States Trauma Centers. *Neurosurg. Focus*, **40**, 1–12, doi:10.3171/2016.1.FOCUS15612(2016)
- 15) Winkler, E.A.; Yue, J.K.; Burke, J.F.; Chan, A.K.; Dhall, S.S.; Berger, M.S.; Manley, G.T.; Tarapore, P.E. Adult Sports-Related Traumatic Brain Injury in United States Trauma Centers. *Neurosurg. Focus*, **40**, 1–12, doi:10.3171/2016.1.FOCUS15613(2016)
- 16) Tachino J, Katayama Y, Kitamura T, Kiyohara K, Nakao S, Umemura Y, Ishida K, Hirose T, Nakagawa Y, Shimazu T. Assessment of the interaction effect between injury regions in multiple injuries: A nationwide cohort study in Japan. *J. Trauma Acute Care Surg.* Jan 1;90 (1) :185-190. doi: 10.1097/TA.0000000000002969(2021)
- 17) Weber, C.D.; Horst, K.; Lefering, R.; Hofman, M.; Dienstknecht, T.; Pape, H.C. Major Trauma in Winter Sports: An International Trauma Database Analysis. *Eur. J. Trauma Emerg. Surg.*, **42**, 741–747, doi:10.1007/s00068-015-0596-7(2016)
- 18) Eun, J.C.; Bronsert, M.; Hansen, K.; Moulton, S.L.; Jazaeri, O.; Nehler, M.R.; Greenberg, J.I. Vascular Injury Is Associated with Increased Mortality in Winter Sports Trauma. *Ann. Vasc. Surg.*, **29**, 109–113, doi:10.1016/j.avsg.2014.10.003(2015)
- 19) De Roulet, A.; Inaba, K.; Strumwasser, A.;

- Chouliaras, K.; Lam, L.; Benjamin, E.; Grabo, D.; Demetriades, D. Severe Injuries Associated with Skiing and Snowboarding: A National Trauma Data Bank Study. *J. Trauma Acute Care Surg.*, **82**, 781–786, doi:10.1097/TA.0000000000001358 (2017)
- 20) Akiyama, T. Undokai and Sports Events in the Japanese School System. *Pediatr. Int.*, **62**, 1230–1233, doi:10.1111/ped.14332 (2020)
- 21) Kissoon, N.; Dreyer, J.; Walia, M. Pediatric Trauma: Differences in Pathophysiology, Injury Patterns and Treatment Compared with Adult Trauma. *Cmaj*, **142**, 27–34 (1990)
- 22) LEVY, J.L.; LINDER, L.H. Major Abdominal Trauma in Children. *Am. J. Surg.*, **120**, 55–58 (1970)
- 23) Patel, D.P.; Redshaw, J.D.; Breyer, B.N.; Smith, T.G.; Erickson, A.; Majercik, S.D.; Gaither, T.W.; Craig, J.R.; Gardner, S.; Presson, A.P.; et al. High-Grade Renal Injuries Are Often Isolated in Sports-Related Trauma Darshan. *Injury*, **46**, 1245–1249, doi:10.1016/j.injury.2015.02.008.High-grade (2016)
- 24) Nakao, S.; Katayama, Y.; Hirayama, A.; Hirose, T.; Ishida, K.; Umemura, Y.; Tachino, J.; Kiguchi, T.; Matsuyama, T.; Kiyohara, K.; et al. Characteristics and Outcomes of Pediatric Blunt Renal Trauma: A Nationwide Cohort Study in Japan. *Eur. J. Trauma Emerg. Surg.*, doi:10.1007/s00068-021-01795-w (2021)
- 25) Cross, K.M.; Serenelli, C. Training and Equipment to Prevent Athletic Head and Neck Injuries. *Clin. Sports Med.*, **22**, 639–667, doi:10.1016/S0278-5919(02)00099-6 (2003)
- 26) Cantu, R.C.; Mueller, F.O. The Prevention of Catastrophic Head and Spine Injuries in High School and College Sports. *Br. J. Sports Med.*, **43**, 981–986, doi:10.1136/bjism.2009.067728 (2009)
- 27) Classie JA, Distel LM, Borchers JR. Safety baseballs and chest protectors: a systematic review on the prevention of commotio cordis. *Phys. Sportsmed.*, Apr;**38** (1) :83-90. doi: 10.3810/psm.2010.04.1765 (2010)

運動による白色脂肪組織の量的・機能的適応を制御する 因子としての骨格筋 AMP キナーゼの可能性

京都大学大学院 横 川 拓 海
(共同研究者) 同 江 川 達 郎
同 林 達 也

Effect of Skeletal Muscle-Specific AMP Kinase Inhibition on Exercise-Induced Quantitative and Functional Adaptations of White Adipose Tissue

by

Takumi Yokokawa
*Division of Food Science and Biotechnology,
Graduate School of Agriculture, Kyoto University*
Tatsuro Egawa, Tatsuya Hayashi
*Graduate School of Human and Environmental studies,
Kyoto University*

ABSTRACT

Exercise elicits quantitative and functional adaptations of white adipose tissue (WAT) ; however, the molecular mechanism remains unclear. AMP kinase (AMPK) in the skeletal muscle may contribute to the adaptations of WAT via enhanced fat oxidation and myokine expression. Therefore, we investigated whether AMPK in the skeletal muscle is involved in exercise-induced quantitative and functional adaptations of WAT. For skeletal muscle-specific inhibition of AMPK activity, we used transgenic mice overexpressing the dominant-negative mutant of AMPK $\alpha 1$ in the skeletal muscle (AMPK-DN mice). Both AMPK-DN and wild-type (WT) mice were randomly divided into two groups: wheel running groups or sedentary groups. After

the four-week intervention, the body weight was measured, and the epididymal WAT was excised. The protein expression of lipolysis-related molecules, triacylglycerol synthesis-related molecules, and a mitochondrial marker were measured by western blotting. AMPK-DN mice demonstrated exercise-induced decrement of epididymal WAT weight. Furthermore, although WT mice showed an increase in the protein expression of lipolysis-related molecule perilipin 1, this increase was diminished in AMPK-DN mice. On the other hand, no significant differences between genotypes were observed in the exercise-induced response of triacylglycerol synthesis-related molecules (fatty acid synthase and stearoyl-CoA desaturase 1) and a mitochondrial marker (voltage-dependent anion channel). In conclusion, these results suggest that AMPK in the skeletal muscle contributes to exercise-induced quantitative and functional adaptations of WAT.

キーワード

AMPキナーゼ, 白色脂肪組織, 肥満, 運動, ミトコンドリア

Keyword

AMP kinase, white adipose tissue, obesity, exercise, mitochondria

要旨

運動は白色脂肪組織の量的・機能的適応を惹起するが、詳細な分子機序は明らかでない。骨格筋AMPキナーゼ (AMPK) は脂肪酸利用の制御やマイオカインの発現を介して、運動による白色脂肪組織の適応に寄与している可能性がある。以上より、本研究では骨格筋AMPKが、運動による抗肥満効果ならびに白色脂肪組織の分子適応に寄与する可能性を検討することを目的とした。骨格筋特異的AMPK $\alpha 1$ ドミナントネガティブ変異体過剰発現 (AMPK-DN) マウスならびに野生型マウスを、自発性走運動群ならびに非運動群にわけて、介入を実施した。4週間の介入期間終了後、体重を測定し、精巢上体白色脂肪組織をサンプリングした。AMPK-DNマウスでは、運動に伴う白色脂肪組織重量の減少ならびに脂肪分解関連分子の発現増加が部分的に減弱していた。一方、運動によ

るトリアシルグリセロール合成関連分子ならびにミトコンドリアマーカーの増加は、野生型およびAMPK-DNマウスにて同程度であった。以上より、骨格筋AMPKは運動による白色脂肪組織の量的・機能的適応に寄与していることが示唆される。

緒言

運動は各組織における分子シグナルを惹起することで、脂肪酸代謝亢進・抗肥満効果をもたらすと考えられるが、その詳細な分子機序は明らかでない。運動トレーニングは、骨格筋の脂肪酸代謝関連分子ならびにミトコンドリア生合成を増加させることで、脂肪酸代謝の亢進に寄与していると考えられている。一方、近年では運動の標的として骨格筋以外の組織に関する解析が進んでおり、申請者らは長期的な運動により白色脂肪組織のミトコンドリア生合成¹⁾・脂肪酸分解関連分子²⁾が増加することを明らかとしている。しかしなが

ら、運動による白色脂肪組織の分子適応を制御する詳細な機序は未だ同定されていない。

骨格筋の5'-adenosine monophosphate-activated protein kinase (AMPK) は急性運動により活性化することが、齧歯類ならびにヒトの双方で明らかとなっている^{3,4)}。骨格筋特異的なAMPK α 欠損マウスは、運動時の脂肪酸利用が抑制されることが報告されている⁵⁾。加えて、骨格筋AMPKは白色脂肪細胞の代謝的適応をもたらすマイオカインの発現制御に関与していることも明らかとなっている⁶⁻⁸⁾。従って、運動に伴う骨格筋AMPKの活性化は、白色脂肪組織の分子適応をもたらすことで抗肥満効果に寄与している可能性が考えられるが、上記の可能性は未だ検討されていない。

以上より、本研究では骨格筋AMPKが、運動による抗肥満効果ならびに白色脂肪組織の分子適応に寄与する可能性を検討することを目的とした。

1. 実験方法

1. 1 実験動物ならびに運動介入

8-10週齢、雄性の骨格筋特異的AMPK α 1ドミナントネガティブ変異体過剰発現 (AMPK-DN) マウスならびに野生型 (WT) マウスを用いて、自発性走運動を施す群 (WT + 運動群 [n=6] ならびにAMPK-DN + 運動群 [n=6]) ならびに非運動群 (WT + 安静群 [n=7] ならびにAMPK-DN + 安静群 [n=7]) の4群に分類した。4週間の運動介入後、体重を測定し、精巣上体白色脂肪組織をサンプリングした。本実験は京都大学が定める「京都大学における動物実験実施に関する規程」に従い、京都大学大学院人間・環境学研究所人間情報研究・動物実験委員会の審査・承認を得て実施した。

1. 2 ウェスタンブロット法

白色脂肪組織におけるタンパク質発現量の解析にはウェスタンブロット法を用いた。プロテアーデサントスポーツ科学 Vol. 44

ゼ阻害剤ならびにフォスファターゼ阻害剤を加えたradioimmunoprecipitation buffer中で、ポリトロンホモジナイザーを用いて、各組織をホモジナイズした。その後、4°Cにてローテーターにより攪拌した。遠心分離後に脂肪層を除いた上清を回収し、再度、遠心分離を実施し、同様に上清を回収した。得られた上清中のタンパク質濃度を測定し、各サンプル間でタンパク質濃度が等しくなるように調整した後、3倍濃度のサンプルバッファーを混合することで、SDS-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) 用のサンプルを調整した。等量のサンプルをSDS-PAGEにより分離した後、Criterion blotter (Bio-Rad, Hercules, CA, USA) を用いて、polyvinylidene difluoride membraneへとタンパク質を転写した。転写後のメンブレンを5%の脱脂粉乳 (NFDM) を含んだtris-buffered saline (TBST) で30分間ブロッキングした後、5%アルブミンを含むTBSTに一次抗体を加えた溶液にて4°Cで一晩インキュベートした。このメンブレンをTBSTにより洗浄し、1%DFDM/TBSTで3000倍希釈した二次抗体 (Cell Signaling Technology, Danvers, MA, USA) と室温で1時間インキュベートし、再度、TBSTにて洗浄した。このメンブレンを化学発光試薬 (Nacalai Tesque, Kyoto, Japan) により反応させ、化学発光撮影装置 (ATTO, Tokyo, Japan) を用いて目的タンパク質を検出した。検出したバンドは、ImageJ (National Institutes of Health Bethesda, MD, USA) で定量化した。

1. 3 一次抗体

ウェスタンブロット法における標的タンパク質の検出には、以下の抗体を使用した：hormone-sensitive lipase (HSL, 1:5000, Cell Signaling Technology, #18381)；adipose triglyceride lipase (ATGL, 1:5000, Cell Signaling Technology, #2439)；perilipin 1 (PLIN1, 1:5000, Cell

Signaling Technology, #9349) ; comparative gene identification-58 (CGI-58, 1:5000, Abcam, Cambridge, UK, ab183739) ; fatty acid synthase (FAS, 1:5000, Cell signaling Technology, #3180) stearyl-CoA desaturase 1 (SCD1, 1:5000, Cell Signaling Technology, #2794) ; voltage-dependent anion-selective channel protein (VDAC, 1:5000, Cell Signaling Technology, #4661).

1. 4 統計解析

全ての測定値は、平均値 ± 標準誤差で示した。統計処理は、主効果を遺伝子型ならびに運動介入とした対応のない二元配置分散分析を実施した後、Benjamini and Hochberg法による多重比較検定により実施した。

2. 実験結果

AMPK-DNマウスでは運動による白色脂肪組織重量の減少が抑制されていた。

4週間の介入期間後の体重を測定したところ、4群間で有意な差は観察されなかった(図1A)。精巣上体白色脂肪組織に関しては、野生型マウス

では運動介入により組織重量が有意に減少していた。一方で、AMPK-DNマウスでは運動による白色脂肪組織重量の減少が抑制されていた(図1B)。

AMPK-DNマウスでは運動に伴う脂肪分解関連タンパク質の増加が部分的に抑制された。

運動及び骨格筋AMPK経路が白色脂肪組織の脂肪分解経路に及ぼす影響を検討するために、関連タンパク質の白色脂肪組織における発現量を測定した。野生型マウスにおいて、運動によるPLIN1の有意な増加(図2C)ならびに、HSLおよびCGI-58の増加傾向が観察された(図2AおよびD)。一方、AMPK-DNマウスにおいては、運動によるHSLおよびCGI-58の発現増加が観察されなかった(図2A, D)。また、PLIN1に関しても、AMPK-DNマウスでは運動による発現増加が減弱していた(図2C)。加えて、野生型マウスの運動群と比較して、AMPK-DNマウスの運動群では、CGI-58が有意に減少しており(図2D)、HSLは減少傾向を示した(図2A)。ATGLに関しては、4群間で有意な差が検出されなかった(図2B)。

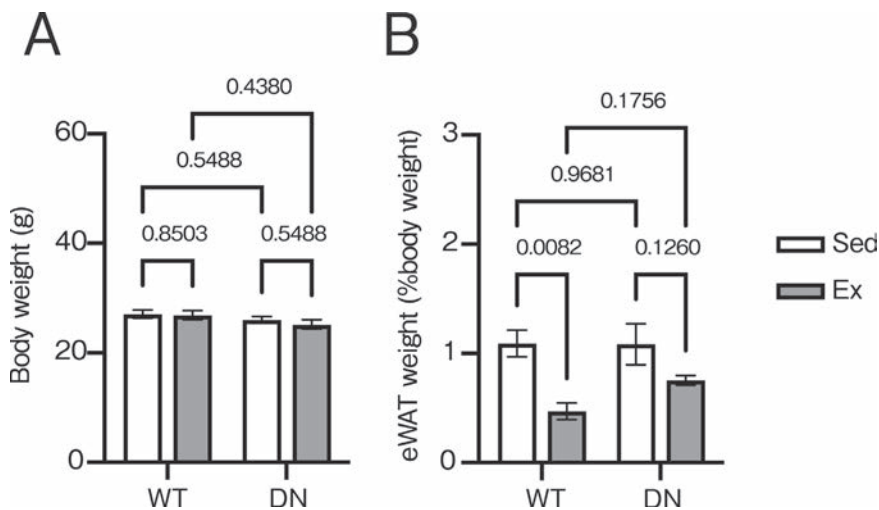


図1 体重ならびに精巣上体白色脂肪組織重量(%体重)
eWAT: 精巣上体白色脂肪組織, WT: 野生型マウス, DN: AMPKドミナントネガティブ変異体発現マウス, Sed: 非運動群, Ex: 運動群, eWAT: epididymal white adipose tissue

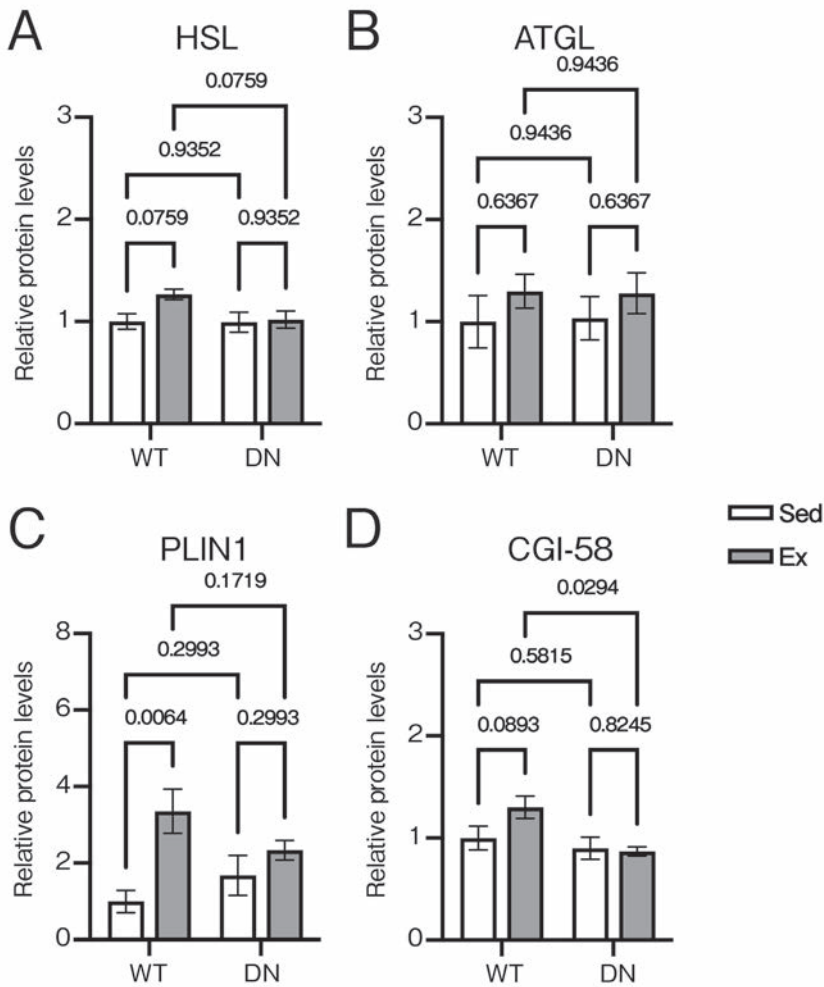


図2 白色脂肪組織における脂肪分解関連タンパク質の発現量

WT : 野生型マウス, DN : AMPK ドミナントネガティブ変異体発現マウス, Sed : 非運動群, Ex : 運動群, HSL : hormone-sensitive lipase, ATGL : adipose triglyceride lipase, PLIN1 : Perilipin 1, CGI-58 : comparative gene identification-58

野生型ならびに AMPK-DN マウスにおいて、運動によるトリアシルグリセロール合成経路関連タンパク質の増加が観察された。

運動及び骨格筋 AMPK 経路が白色脂肪組織のトリアシルグリセロール合成経路に及ぼす影響を検討するために、関連タンパク質の白色脂肪組織における発現量を測定した。野生型ならびに AMPK-DN マウスの双方において、運動による FAS ならびに SCD1 の発現増加が観察された。一方で、AMPK-DN の発現による影響は検出されなかった (図3)。

野生型ならびに AMPK-DN マウスにおいて、運動によるミトコンドリアタンパク質の増加が観察された。

運動及び骨格筋 AMPK 経路が白色脂肪組織のミトコンドリア生合成に及ぼす影響を検討するために、ミトコンドリアマーカーである VDAC の白色脂肪組織における発現量を測定した。野生型ならびに AMPK-DN マウスの双方において、運動による VDAC の発現増加が観察された (図4)。一方、遺伝子型による発現変動は観察されなかった。

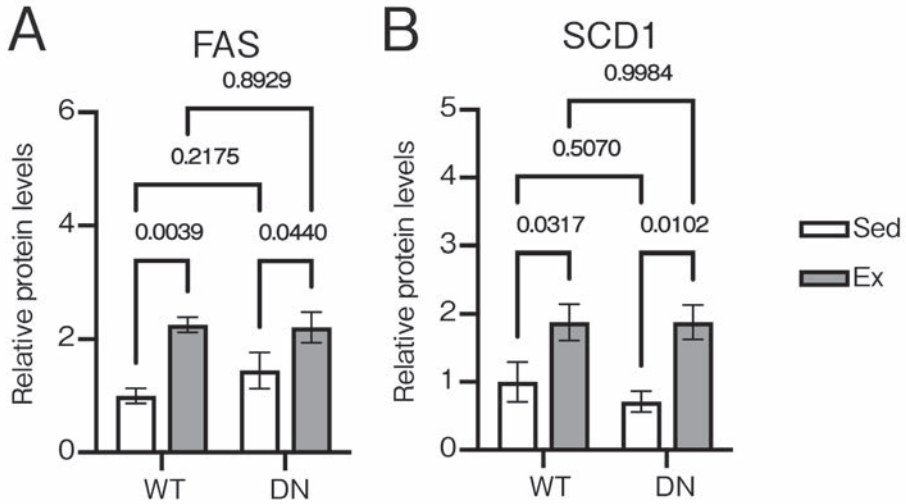


図3 白色脂肪組織におけるトリアシルグリセロール合成経路関連タンパク質の発現量
WT:野生型マウス, DN:AMPKドミナントネガティブ変異体発現マウス, Sed:非運動群, Ex:運動群, FAS:Fatty acid synthase, SCD1:stearoyl-CoA desaturase 1

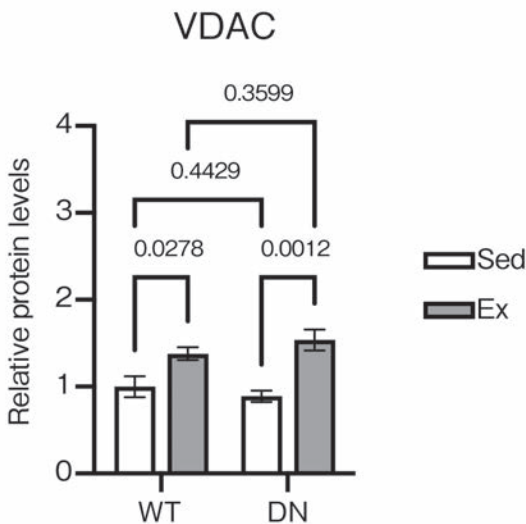


図4 白色脂肪組織における
ミトコンドリアタンパク質の発現量
WT:野生型マウス, DN:AMPKドミナントネガティブ変異体発現マウス, Sed:非運動群, Ex:運動群, VDAC:voltage-dependent anion-selective channel protein

3. 考 察

本研究結果より、骨格筋 AMPK は、自発性走運動に伴う白色脂肪組織重量の減少ならびに、白色脂肪組織の脂肪分解経路関連タンパク質の発現増加に部分的に関与していることが示された。一

方、自発性走運動による白色脂肪組織のトリアシルグリセロール合成経路関連タンパク質の増加ならびに、ミトコンドリア生合成の亢進に関しては、骨格筋 AMPK の寄与が観察されなかった。以上より本研究は、骨格筋 AMPK が運動に伴う白色脂肪組織の量的・機能的適応に関与していることを示唆した点で新規性を持つ。

本研究において、骨格筋 AMPK 活性は、自発性走運動に伴う白色脂肪組織重量の減少に関与していることが示された。この機序としては、①骨格筋 AMPK ならびに下流分子の活性化により骨格筋の脂質代謝が亢進したこと、②骨格筋 AMPK により制御される何らかの因子により白色脂肪組織の機能的変化が生じ、脂肪分解が亢進したことが考えられる。前者に関しては、骨格筋 AMPK が脂肪酸の取り込み制御に関与していること、ミトコンドリア生合成をはじめとする脂肪酸代謝経路の関連分子の発現を上方制御することが明らかとなっており、一定の成果が得られている⁹⁾。一方、後者の可能性に関しては、近年、骨格筋と白色脂肪組織の臓器連関が複数報告されているものの^{6,8)}、AMPK の直接的な関与を示した研究は存

在しない。従って、本研究では骨格筋 AMPK 活性の阻害が、運動に伴う白色脂肪組織の分子適応に与える影響を検討した。

先行研究により、長期的な運動が白色脂肪組織の脂肪分解経路を担うタンパク質の発現量を増加させることが明らかとなっている^{2, 10, 11}。HSLをはじめとするこれら分子の増加は、アドレナリンなどの運動誘導性因子による白色脂肪組織の脂肪分解活性を亢進させることで、運動時の効率的な脂肪燃焼に寄与している可能性がある¹²。従って、本研究では骨格筋 AMPK が白色脂肪組織の脂肪分解経路関連タンパク質の発現に寄与している可能性を検討した。図2で示されているように、骨格筋 AMPK は PLIN1 の運動による増加に関与していることが示唆された。先行研究により、PLIN1 の欠損マウスはカテコラミン刺激による脂肪分解が減弱すること¹³、PLIN1 の過剰発現は食事誘導性の肥満を抑制することが示されている¹⁴。従って、運動に伴う骨格筋 AMPK の活性化は、白色脂肪組織の PLIN1 の発現増加をもたらすことで、効率的な脂肪燃焼をもたらしている可能性がある。

一方で本研究では、先行研究とは異なり^{10, 11}、運動による HSL ならびに CGI-58 への影響は増加傾向のみであり、ATGL に関しては発現変動が観察されていない。この理由の1つとしては、先行研究は2群間の比較であったのに対し、本研究では4群間の比較を実施したことで、より多くのサンプルパワーが必要になったことが考えられる。また、その他の可能性として、本研究においてマウスへのストレスを考慮して多頭飼育(2匹/ケージ)にて自発性走運動を施したことがあげられる。ランニングホイールへのアクセスが社会的ヒエラルキーに依存することで、運動量に差が生じている可能性がある。以上より、適切なサンプルサイズのマウスを用いて、各マウスに十分な運動負荷をかけることのできる実験系にて、より詳細

な検討を実施する必要がある。

骨格筋と同様に、脂肪組織のミトコンドリアが、運動により増加することが明らかとなっている^{11, 15}。脂肪組織のミトコンドリアは、エネルギー代謝に寄与すると共に善玉アディポカインとされているアディポネクチンの発現制御に寄与していることが明らかとなっており¹⁶、肥満や二型糖尿病への関与が示唆されている¹⁷。白色脂肪組織のミトコンドリア生合成の制御機序として、peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator 1-alpha (PGC-1 α) の骨格筋での増加が、マイオカインである irisin ならびに β -aminoisobutyric acid (BAIBA) を介して、白色脂肪組織のミトコンドリア生合成ならびにベージュ化をもたらすことが報告されている^{6, 8}。AMPK は PGC-1 α の上方制御因子であることから¹⁸、AMPK-DN マウスでは、白色脂肪組織の運動に伴うミトコンドリア生合成の増加が抑制されると考えられた。しかしながら、本研究では野生型に比して、同程度のミトコンドリアマーカーの増加が AMPK-DN マウスにて観察された。従って、骨格筋 AMPK の白色脂肪組織におけるミトコンドリア制御への寄与は、本研究結果からは示唆されなかった。本研究のリミテーションとして、測定したミトコンドリアマーカーが VDAC のみであったことがあげられる。従って、白色脂肪組織のミトコンドリアタンパク質ならびに遺伝子の発現量を包括的に測定するとともに、ミトコンドリア DNA 量を計測することで、骨格筋 AMPK が白色脂肪組織の機能を制御する分子機序の解明につながる可能性がある。

総括

骨格筋 AMPK は、自発性走運動に伴う脂肪組織の量的・機能的適応に部分的に関与していることが示唆された。

謝 辞

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

文 献

- 1) T. Yokokawa, K. Kido, T. Suga, K. Sase, T. Isaka, T. Hayashi, S. Fujita, Exercise training increases C1SD family protein expression in murine skeletal muscle and white adipose tissue., *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **506**, 571–577. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.10.101> (2018)
- 2) T. Hashimoto, T. Yokokawa, R. Narusawa, Y. Okada, R. Kawaguchi, K. Higashida, A lactate-based compound containing caffeine in addition to voluntary running exercise decreases subcutaneous fat mass and improves glucose metabolism in obese rats, *J. Funct. Food.* **56**, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.03.007> (2019)
- 3) T. Hayashi, M.F. Hirshman, E.J. Kurth, W.W. Winder, L.J. Goodyear, Evidence for 5' AMP-activated protein kinase mediation of the effect of muscle contraction on glucose transport, *Diabetes.* **47**, 1369–1373 (1998)
- 4) N. Fujii, T. Hayashi, M.F. Hirshman, J.T. Smith, S.A. Habinowski, L. Kaijser, J. Mu, O. Ljungqvist, M.J. Birnbaum, L.A. Witters, A. Thorell, L.J. Goodyear, Exercise Induces Isoform-Specific Increase in 5'AMP-Activated Protein Kinase Activity in Human Skeletal Muscle, *Biochem. Biophys. Res. Co.* **273**, 1150–1155. <https://doi.org/10.1006/bbrc.2000.3073> (2000)
- 5) J. Fentz, R. Kjøbsted, J.B. Birk, A.B. Jordy, J. Jeppesen, K. Thorsen, P. Schjerling, B. Kiens, N. Jessen, B. Viollet, J.F.P. Wojtaszewski, AMPK α is critical for enhancing skeletal muscle fatty acid utilization during in vivo exercise in mice, *Faseb. J.* **29**, 1725–1738. <https://doi.org/10.1096/fj.14-266650> (2015)
- 6) P. Boström, J. Wu, M.P. Jedrychowski, A. Korde, L. Ye, J.C. Lo, K.A. Rasbach, E.A. Boström, J.H. Choi, J.Z. Long, S. Kajimura, M.C. Zingaretti, B.F. Vind, H. Tu, S. Cinti, K. Højlund, S.P. Gygi, B.M. Spiegelman, A PGCl- α -dependent myokine that drives brown-fat-like development of white fat and thermogenesis, *Nature.* **481**, 463–468. <https://doi.org/10.1038/nature10777> (2013)
- 7) J.S.V. Lally, R.J. Ford, J. Johar, J.D. Crane, B.E. Kemp, G.R. Steinberg, Skeletal muscle AMPK is essential for the maintenance of FNDC5 expression, *Physiol. Rep.* **3**, e12343. <https://doi.org/10.14814/phy2.12343> (2015)
- 8) L.D. Roberts, P. Boström, J.F. O' Sullivan, R.T. Schinzel, G.D. Lewis, A. Dejam, Y.-K. Lee, M.J. Palma, S. Calhoun, A. Georgiadi, M.-H. Chen, V.S. Ramachandran, M.G. Larson, C. Bouchard, T. Rankinen, A.L. Souza, C.B. Clish, T.J. Wang, J.L. Estall, A.A. Soukas, C.A. Cowan, B.M. Spiegelman, R.E. Gerszten, β -Aminoisobutyric Acid Induces Browning of White Fat and Hepatic β -Oxidation and Is Inversely Correlated with Cardiometabolic Risk Factors, *Cell Metab.* **19**, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2013.12.003> (2014)
- 9) R. Kjøbsted, J.R. Hingst, J. Fentz, M. Foretz, M. Sanz, C. Pehmøller, M. Shum, A. Marette, R. Mounier, J.T. Treebak, J.F.P. Wojtaszewski, B. Viollet, L. Lantier, AMPK in skeletal muscle function and metabolism, *Faseb. J.* **32**, 1741–1777. <https://doi.org/10.1096/fj.201700442r> (2018)
- 10) J. Ogasawara, T. Sakurai, T. Kizaki, Y. Ishibashi, T. Izawa, Y. Sumitani, H. Ishida, Z. Radak, S. Haga, H. Ohno, Higher Levels of ATGL Are Associated with Exercise-Induced Enhancement of Lipolysis in Rat Epididymal Adipocytes, *Plos One.* **7**, e40876. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040876> (2012)
- 11) T. Hashimoto, K. Sato, M. Iemitsu, Exercise-inducible factors to activate lipolysis in adipocytes, *J. Appl. Physiol.* **115**, 260–267. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00427.2013> (2013)
- 12) T. Hashimoto, H. Segawa, M. Okuno, H. Kano, H. Hamaguchi, T. Haraguchi, Y. Hiraoka, S. Hasui, T. Yamaguchi, F. Hirose, T. Osumi, Active involvement of micro-lipid droplets and lipid-droplet-associated proteins in hormone-stimulated lipolysis in adipocytes, *J. Cell Sci.* **125**, 6127–6136. <https://doi.org/10.1242/jcs.113084> (2013)
- 13) J.T. Tansey, C. Sztalryd, J. Gruia-Gray, D.L. Roush, J.V. Zee, O. Gavrilova, M.L. Reitman, C.-X. Deng, C. Li, A.R. Kimmel, C. Londos, Perilipin ablation results in a lean mouse with aberrant adipocyte lipolysis, enhanced leptin production, and resistance

- to diet-induced obesity, *Proc. National Acad. Sci.* **98**, 6494–6499. <https://doi.org/10.1073/pnas.101042998> (2001)
- 14) H. Miyoshi, S.C. Souza, M. Endo, T. Sawada, J.W. Perfield, C. Shimizu, Z. Stancheva, S. Nagai, K.J. Strissel, N. Yoshioka, M.S. Obin, T. Koike, A.S. Greenberg, Perilipin overexpression in mice protects against diet-induced obesity, *J. Lipid. Res.* **51**, 975–982. <https://doi.org/10.1194/jlr.m002352> (2010)
 - 15) L.N. Sutherland, M.R. Bomhof, L.C. Capozzi, S.A.U. Basaraba, D.C. Wright, Exercise and adrenaline increase PGC-1 α mRNA expression in rat adipose tissue, *J. Physiology.* **587**, 1607–1617. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.165464> (2009)
 - 16) E.H. Koh, J.-Y. Park, H.-S. Park, M.J. Jeon, J.W. Ryu, M. Kim, S.Y. Kim, M.-S. Kim, S.-W. Kim, I.S. Park, J.H. Youn, K.-U. Lee, Essential Role of Mitochondrial Function in Adiponectin Synthesis in Adipocytes, *Diabetes.* **56**, 2973–2981. <https://doi.org/10.2337/db07-0510> (2007)
 - 17) C.M. Kusminski, P.E. Scherer, Mitochondrial dysfunction in white adipose tissue, *Trends Endocrinol. Metabolism.* **23**, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2012.06.004> (2012)
 - 18) S. Jäger, C. Handschin, J. St.-Pierre, B.M. Spiegelman, AMP-activated protein kinase (AMPK) action in skeletal muscle via direct phosphorylation of PGC-1 α , *Proc. Natl. Acad. Sci.* **104**, 12017–12022. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705070104> (2007)

深度センサを用いた Scapular dyskinesis 検出手法の確立

東京医科歯科大学大学院 井原 拓哉
(共同研究者) 日本電気株式会社 安川 洵
かわしまクリニック 辛嶋 良介
東京医科歯科大学大学院 藤田 浩二

Establishment of Scapular Dyskinesis Detection Method Using a Depth Sensor

by

Takuya Ibara, Koji Fujita
*Department of Functional Joint Anatomy,
Graduate School of Medical and Dental Sciences,
Tokyo Medical and Dental University*
Makoto Yasukawa
Biometrics Research Laboratory, NEC Corporation
Ryosuke Karashima
Department of Rehabilitation, Kawashima Clinic

ABSTRACT

Quantification of scapular motion in patients with shoulder disorders is important, but there are no existing tools that allow simple quantification in clinical setting. Recently, depth sensors have attracted much attention in terms of accuracy and price. Therefore, this study was conducted to investigate the reliability of scapula angle measurement using depth sensors as a preliminary study to quantify scapula motion using depth sensors. The angles of superior and inferior rotation, internal and external rotation, and anterior and posterior tilt between two trials were calculated from point cloud

using depth sensor data, and the intraclass correlation coefficients and the standard error (SEM) were examined in healthy adult male subjects. The results showed that the correlation coefficients were good for both anterior elevation and scapular plane elevation. The SEM was less than 10 degrees for both tasks except for superior and inferior rotation. Based on the results of this study, quantification of scapular motion using the depth sensor was considered to be good from the standpoint of reliability, but improvement of accuracy and examination of validity need to be examined.

キーワード

肩甲骨, 肩関節, 運動機能障害, 深度センサ, 信頼性

Keyword

Scapular, Shoulder, Scapula dyskinesia, Depth sensor, Reliability

要 旨

肩関節障害を有する患者の肩甲骨運動の定量化は重要であるが、臨床現場で簡易的に定量化できるツールは現存しない。近年、深度センサは精度および価格の面から注目を集めている。そこで、本研究は、深度センサを用いた肩甲骨運動の定量化を図る予備的研究として、深度センサを用いた肩甲骨角度計測の信頼性の検討を目的に実施した。健康成人男性を対象に前方挙上および肩甲骨面挙上中の身体背面を深度センサで撮影し、深度センサの情報を用いて作成した点群データから二試行間の上・下方回旋、内・外旋、前・後傾の角度を算出し、相関係数及び標準誤差の検討を行った。結果、相関係数は、前方挙上・肩甲骨面挙上ともに良好な値を示した。また標準誤差は上・下方回旋角度を除いて両課題とも10度未満であった。本研究の結果より、深度センサを用いた肩甲骨運動の定量化は、信頼性の観点からは良好と思われたが、精度向上と妥当性の検討が必要であった。

緒 言

投球障害肩を中心とするアスリートの肩関節障害では、肩甲骨の運動への注目度は高く、肩甲骨運動の異常 (*Scapular dyskinesis*) がインピンジメント症候群などの障害を惹起することが知られている^{1,2)}。このような肩甲骨運動の異常に伴う肩関節障害の治療には、初期症状として現れる僅かな運動の異常を検出し、正しく評価することが重要であるとされている³⁾。臨床現場では経験豊富な医師やセラピストが視診や触診で評価を行っており、多くの場合、定量評価は行われていない。X線動態撮影⁴⁾ や *Dynamic MRI* を用いる方法⁵⁾、皮膚上に貼付した磁気式センサを用いる方法⁶⁾ などとも存在するが、高価で特殊な設備が必要であること、侵襲を伴うことなどから一般的な臨床現場への導入は容易でなく、普及していないのが現状である。従って、現場への導入が容易な機器を用いて、非侵襲的かつ高精度に肩甲骨運動を定量化することが、肩関節障害の治療・予防に必要な不可欠である。そこで、本研究では近年、安価に入手でき、精度も大幅に向上した深度センサに着目した。深度センサを利用した運動計測は、非侵襲的

である利点もあり研究が盛んである。近年の報告でも、深度情報を利用して肩甲骨の三次元的な姿勢および運動を評価できる可能性が指摘されている⁷⁾。そこで我々は、深度センサを利用した肩甲骨運動の異常検知技術を確立することで、臨床現場における肩関節障害の治療および予防の発展に貢献することを目的に実施した。本研究では、深度センサを用いた肩甲骨運動の異常検知のための予備的研究として、深度センサを利用した肩甲骨角度算出の信頼性の検討を行った。

1. 方法

1.1 対象

対象は、肩関節に愁訴のない健常成人男性9名18肩であった。全対象者において、肩関節に愁訴および既往がないことを確認した。また研究実施に先立ち、本学の研究倫理委員会（承認番号：M2021-295）の承認を得たうえで、各被験者に十分に研究内容を説明し、書面にて同意を得たうえ

で行った。

1.2 課題動作

課題動作は、肩関節の前方挙上（矢状面方向への挙上：図1a）と肩甲骨面挙上（前額面より30度前方位置での挙上：図1b）とした。

1.3 計測

計測にはAzure Kinect DK（Microsoft社製）を用いた。被験者は上衣を脱いだ状態で、高さ40cmの椅子に座り、被験者の後方90cm、高さ100cmの位置に三脚を用いてAzure Kinect DKを設置した。Azure Kinect DKのカラーカメラは解像度3840 × 2160 pixel、深度カメラは解像度640 × 576pixelに設定した。計測周波数は30Hzに設定した。

被験者には、最大の前方挙上および肩甲骨面挙上（前額面から前方へ30°の位置での挙上）を行った状態を保持した後、上肢を下垂し、完全に上

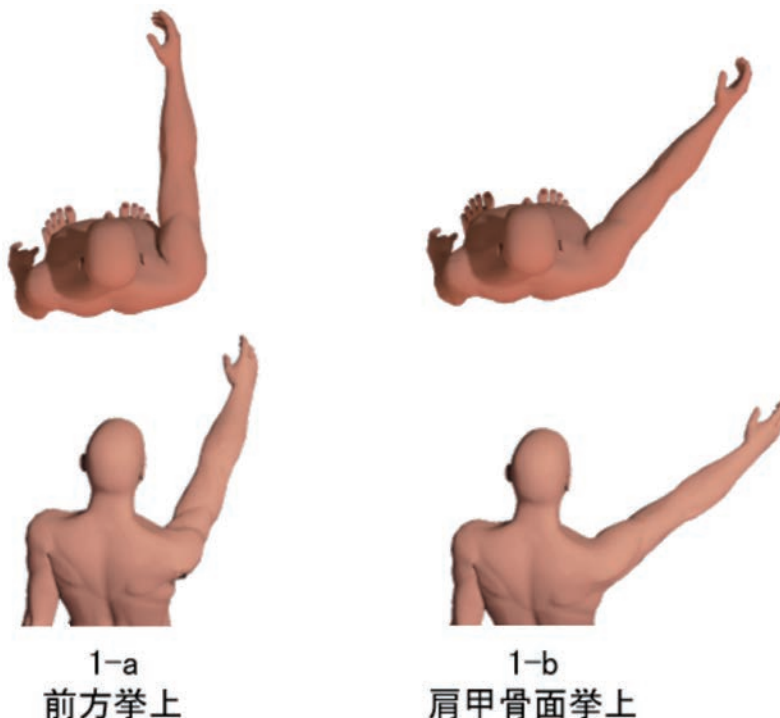


図1 課題動作

肢を下垂した安静座位を保持するよう指示した。各挙上位はそれぞれ2回ずつ実施した。課題動作試行中，身体背面の色および深度情報を，Azure Kinect DKのカラーカメラ及び深度カメラで撮影した。

1. 4 解 析

解析では，まずカラー画像から上肢挙上中の3frameを特定し，Azure Kinect DKにて取得した

色と深度情報を用いて身体背面の色付き点群を作成した(図2)。

次にAzure Kinect DKのBody Tracking機能を用いて身体各評点座標を推定した(図3)。

Body Tracking機能を用いて算出したNeck, Chest, 左右のShoulder座標によって囲まれる区間に肩甲骨が含まれるため，元の色付き点群データからこれらの座標情報を用いて，肩甲骨を含む領域を抽出した。抽出した領域の点群に対

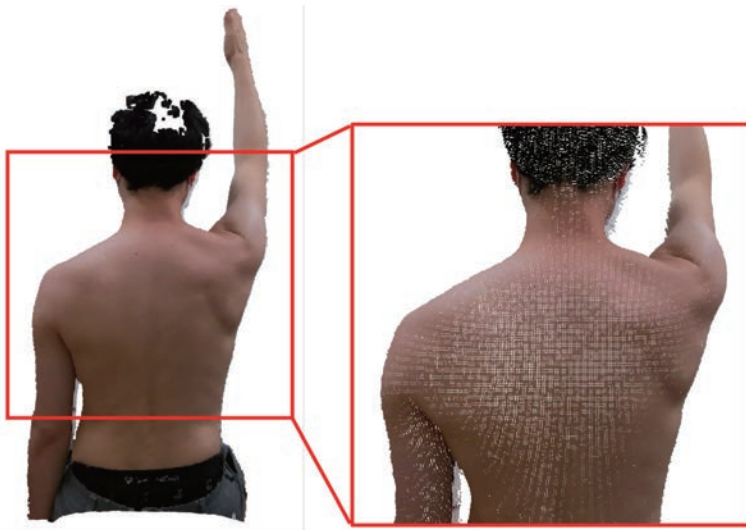


図2 身体背面の色付き点群の例

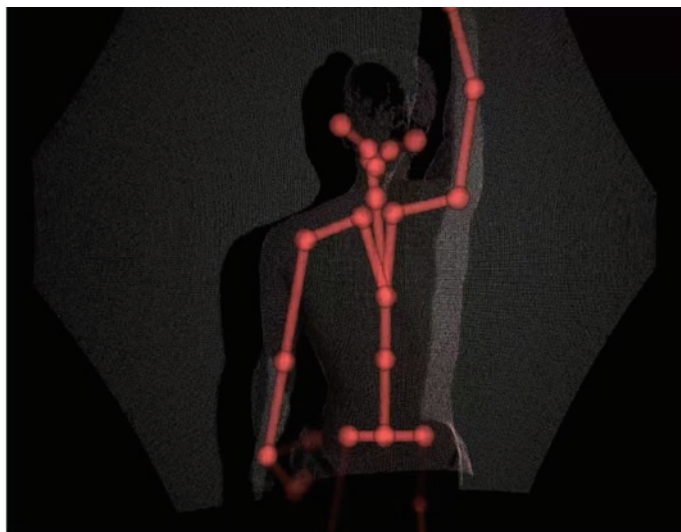


図3 Azure Kinect DKのBody Tracking機能を用いて推定した身体背面からの各標点の例

し voxel down sampling を行ったのち、Neck から Chest を結ぶベクトル (第1軸) を Y 軸正方向, 該当の Shoulder から Neck を結ぶベクトルと第1軸 がなす平面に垂直な直線がなすベクトル (第2軸) を Z 軸正方向, および第1軸, 第2軸両方に垂直なベクトルを X 軸正方向として点群を回転したのち, 原点を Neck に水平移動した。さらに, 肩甲棘および肩甲骨内側縁を含むと思われる点群を, 皮膚表面の傾きを参考に抽出し (図4), それらを用いて肩甲の向きに一致すると思われる平面を推定した。最後に, 推定した平面が XY 平面, YZ 平面, ZX 平面と成す接線の方程式を計算し, 各平面における接線の傾きを上方・下方回旋, 前・後傾, 内・外旋角度として算出した。

1. 5 統計的検討

信頼性の指標として, 各肢位 (前方挙上, 肩甲骨面挙上位) における2試行間の角度の相関係数を求めた。さらに, 2試行間の標準誤差 (SEM) および級内相関係数 (ICC (1, 2)) を算出した。

有意水準は5%とした。解析にはPython3.8を用いた。

2. 結果

前方挙上においては, Azure Kinect DK の Body Tracking が不良であった2名2肩を除いた16肩で, 相関係数は, 上・下方回旋角度:0.58 ($p=0.02$), 前・後傾斜角度:0.68 ($p<0.01$), 内・外旋角度:0.61 ($p=0.01$) であった (図5)。SEM は上・下方回旋角度:11.5°, 前・後傾斜角度:4.5°, 内・外旋角度:4.5° であった。ICC は上・下方回旋角度:0.74, 前・後傾斜角度:0.82, 内・外旋角度:0.75 であった。

肩甲骨面挙上においては, Azure Kinect DK の Body Tracking が不良であった2名2肩を除いた16肩で, 相関係数は, 上・下方回旋角度:0.73 ($p<0.01$), 前・後傾斜角度:0.71 ($p<0.01$), 内・外旋角度:0.54 ($p=0.03$) であった (図6)。SEM は上・下方回旋角度:23.0°, 前・後傾斜角度:5.5°, 内・外旋角度:7.8° であった。ICC は上・下方回旋角度:0.85, 前・後傾斜角度:0.83, 内・外旋



図4 身体背面の深度情報から推定された肩甲棘(青点)および肩甲骨内側縁(緑点)と内側縁に近似した空間上の直線(赤線)

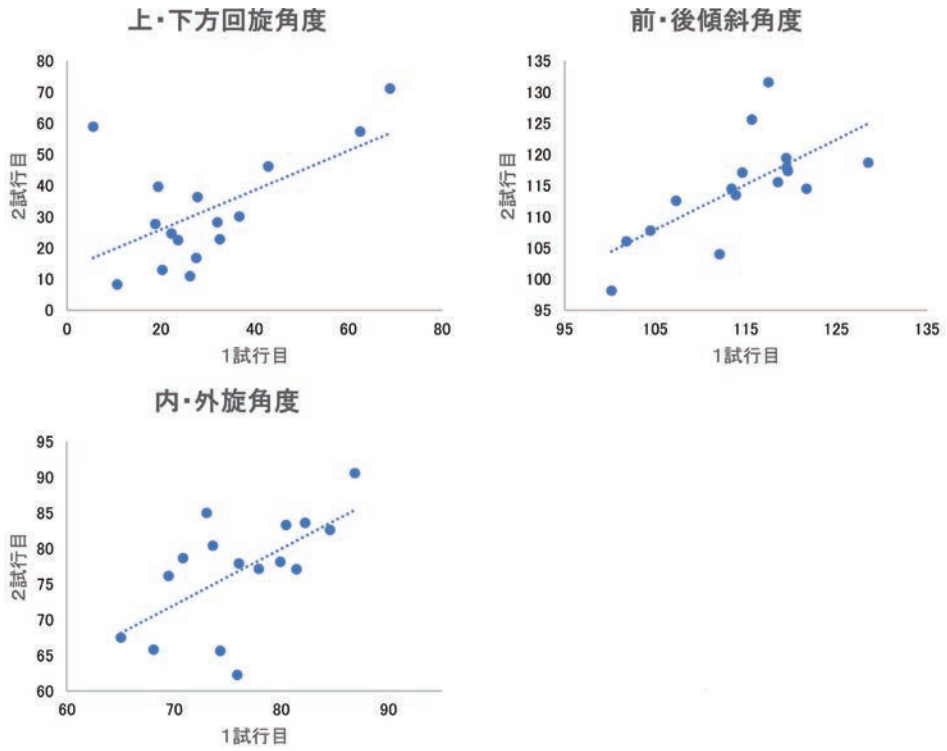


図5 前方挙上における各角度の2試行のプロット

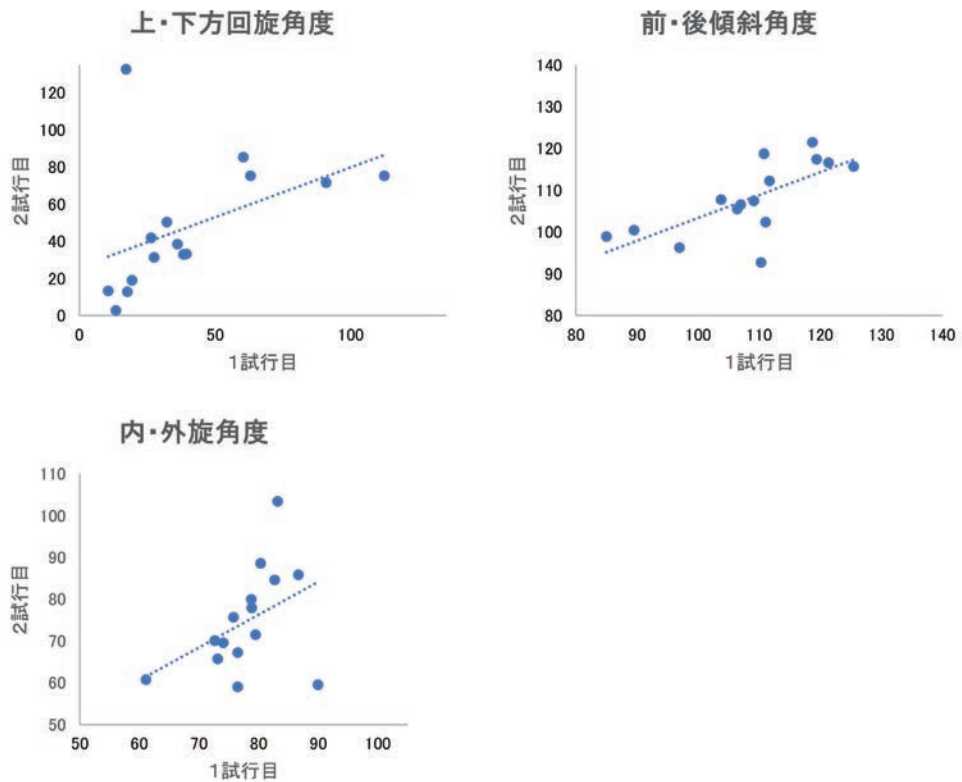


図6 肩甲骨面挙上における各角度の2試行のプロット

角度：0.63であった。

3. 考 察

本研究は深度センサを用いて、安価で侵襲のない簡便な肩甲骨運動の計測方法の確立を目指した予備的検討として、深度センサを用いて算出される角度の信頼性を検討した。

本研究の結果、前方挙上・肩甲骨面挙上ともに0.5～0.7程度の有意な相関を認め、測定信頼性があると考えられた。先行研究⁷⁾では、身体表面の隆起を利用した肩甲骨下角の位置の推定可能性に言及していたが、これは安静立位を基準としたものであり、挙上時には特に僧帽筋・広背筋と思われる筋収縮に伴う隆起の増強により肩甲骨下角の位置推定は困難であった。そこで本研究では、肩甲骨の内側縁や肩甲棘に着目した。位置の同定に関して、肩甲骨内側縁も前述の筋の膨隆の影響を受けるが、肩甲骨下角より広い幅を持つため同定しやすく、肩甲棘は、直上に筋の付着が存在しないため、筋の膨隆の影響を受けにくいことが測定信頼性向上につながったものと考ええる。

一方、SEMは上・下方回旋角度を除いて両肢位とも10度未満であった。上・下方回旋角度のSEMは前方挙上で約11°、肩甲骨面挙上で約23°であった。慣性センサを用いた肩甲骨角度の信頼性に関する報告⁸⁾では、可動範囲ではあるが検者内信頼性は挙上120°で上・下方回旋角度：0.88、前・後傾斜角度：0.67、内・外旋角度：0.80と高値を示し、SEMはいずれも5度程度を示していた。この研究と比較すると、本研究におけるSEMの値は特に内・外旋角度および前・後傾斜角度に関しては良好であった。その理由として、慣性センサを用いた計測では、重力加速度を用いて角度計算が成されるため、重力加速度方向にセンサの軸が重複し、変化が少ない動きに関しては鋭敏でない可能性がある。一方、深度センサを用いた本手法は、身体後面から深度を用いて計測しているた

め、慣性センサの不得手な部分に関してはむしろ強みになっていたと考えられた。上・下方回旋角度に関しては、精度が下がる傾向が認められた。その理由として本研究では数学的に肩甲棘や肩甲骨内側縁を同定し、それを基に角度を算出する手法を取ったが、この手法が精度を下げている要因と思われた。結果のプロット(図5,6)を見ると、数値的に妥当な範囲に一塊となった点群を認めるが、両挙上方向に関して逸脱した点も認め、計測の妥当性・精度の観点からは、まだ改善の余地があると思われた。深度センサが取得している情報量の豊富さを鑑みると、近年隆盛を極めていく機械学習などの手法を解析に取り入れることで、飛躍的に精度が上昇する可能性がある。深度センサの利用には、慣性センサと比較して、センサの皮膚ずれの影響を受けにくいことが強みとして考えられ、データ取得後の解析手法を改善していくことで、より高精度に肩甲骨角度を取得できるものと考えられた。

今後さらに研究を進め、より高精度な肩甲骨角度の推定及び運動中の角度変化の追跡、妥当性の検証を行い、臨床現場での実用に足る肩甲骨角度の提示手法の確立を図っていく必要がある。

4. 結 論

深度センサを用いた肩甲骨運動の定量化は、信頼性の観点からは十分活用できる可能性があるが、精度の点にはまだ改善の余地が残る。今後、機械学習などの手法も含めた精度の向上と、妥当性の検証を実施していく必要がある。

謝 辞

本研究の実施に当たり助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。解析にご助力いただいた山梨大学の牧野浩二先生に深く感謝申し上げます。また、被験者としてご協力いただいた皆様に

も合わせて感謝申し上げます。

文 献

- 1) Chopp-Hurley J.N., O'Neill J.M., McDonald A.C., et al. Fatigue-induced glenohumeral and scapulothoracic kinematic variability: Implications for subacromial space reduction. *Journal of electromyography and kinesiology: official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, **29**:55-63 (2016)
- 2) Noguchi M., Chopp J.N., Borgs S.P., et al. Scapular orientation following repetitive prone rowing: implications for potential subacromial impingement mechanisms. *Journal of electromyography and kinesiology: official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, **23**:1356-61 (2013)
- 3) Kibler W.B., Ludewig P.M., McClure P.W., et al. Clinical implications of scapular dyskinesis in shoulder injury: the 2013 consensus statement from the 'Scapular Summit'. *British journal of sports medicine*, **47**:877-85 (2013)
- 4) Sakuda K., Sanada S., Tanaka R., et al. Functional shoulder radiography with use of a dynamic flat panel detector. *Radiol. Phys. Technol.*, **7**:254-61 (2014)
- 5) Garetier M., Borotikar B., Makki K., et al. Dynamic MRI for articulating joint evaluation on 1.5 T and 3.0 T scanners: setup, protocols, and real-time sequences. *Insights Imaging*, **11**:66 (2020)
- 6) Overbeek C.L., Geurkink T.H., de Groot F.A., et al. Shoulder movement complexity in the aging shoulder: A cross-sectional analysis and reliability assessment. *Journal of orthopaedic research: official publication of the Orthopaedic Research Society*, **39**:2217-25 (2021)
- 7) Bonnet V., Yamaguchi T., Dupeyron A., et al. Automatic estimate of back anatomical landmarks and 3D spine curve from a Kinect sensor. 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (*BioRob*), 924-9 (2016)
- 8) van den Noort J.C., Wiertsema S.H., Hekman K.M.C., et al. Reliability and precision of 3D wireless measurement of scapular kinematics. *Medical & biological engineering & computing*, **52**:921-31 (2014)

全身振動刺激トレーニングの神経生理学的効果の検証

東京国際大学 一寸木 洋 平
(共同研究者) 大阪大学大学院 Matija Milosevic
東京国際大学 猪 股 高 志
同 酒 井 美 園

Study on Neural Effects of Whole-Body Vibration Training

by

Yohei Masugi, Takashi Inomata, Misono Sakai
Tokyo International University
Matija Milosevic
Osaka University

ABSTRACT

Whole-body vibration (WBV) training is widely used as a training method for athletes, older adults, and people with central nervous system injuries. Although it has been shown that WBV can strongly suppress H-reflex excitability of the soleus muscle, the effects on other muscles remain unknown. Therefore, the purpose of this study was to determine the effects of WBV on the spinal reflex circuits of the flexor and extensor muscles of the thigh and lower leg muscles. Seven healthy adult male individuals participated in this study and underwent assessments before, during and after WBV and a control condition that included standing only. Surface electromyography signals were recorded unilaterally in the right leg during the experiments. In the WBV condition, the intervention was applied for 1 minute and in the control condition participants stood still for 1 minute. Posterior root muscle (PRM) reflexes were measured in four lower

extremity muscles, including the tibialis anterior (TA), soleus (SOL), vastus medialis (VM), and biceps femoris (BF) before, during, and after the interventions. Our results showed that the peak-to-peak amplitudes of PRM-reflexes of the TA, SOL, and BF muscles decreased significantly during the WBV intervention, compared to before the intervention. However, no effect was observed in the control condition. These results indicate that WBV has widespread inhibitory effects on reflex circuits in muscles other than the SOL, but this effect is not sustained following a short duration intervention. Overall, our results suggest that WBV can be used effectively to temporarily decrease spasticity in neurological disorder population.

キーワード

全身振動刺激トレーニング, 経皮的脊髄刺激, 脊髄反射, 筋電図, 体性感覚入力

Keyword

whole-body vibration training, transcutaneous spinal cord stimulation, spinal reflex, electromyography, somatosensory input

要旨

全身振動刺激トレーニングは、アスリート、高齢者、中枢神経疾患患者のトレーニング法として広く用いられている。これまで全身振動刺激が、足関節の底屈筋であるヒラメ筋のH反射興奮性を強く抑制することが報告されてきたが、ヒラメ筋以外の他の筋への効果は不明であった。そこで、本研究では、全身振動刺激が大腿・下腿の屈筋・伸筋の単シナプス反射回路興奮性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。対象は、健康成人男性7名とし、実験条件は、全身振動刺激条件とコントロール条件であった。実験中、右下肢の筋から表面筋電位を測定した。全身振動刺激条件では、被検者の姿勢は立位とし、被検者の足底部へ1分間の振動刺激を付加し、介入中および介入前後における下肢4筋（前脛骨筋、ヒラメ筋、内側広筋、大腿二頭筋）のPosterior root muscle (PRM-) reflexを測定した。コントロール条件では、被検者の姿勢は、全身振動刺激条件と同一姿

勢としたが、振動刺激は与えずにPRM-reflexの計測のみを実施した。実験の結果、全身振動刺激介入中において、介入前と比較して、前脛骨筋、ヒラメ筋、大腿二頭筋のPRM-reflexのピークピーク値が有意に低下した。この低下は、全身振動刺激介入後は認められなかった。また、コントロール条件では有意な差は認められなかった。この結果から、全身振動刺激は、ヒラメ筋以外の筋の単シナプス反射回路興奮性に対しても一時的な抑制効果を有することが明らかになった。

緒言

近年、全身振動刺激 (whole-body vibration; WBV) トレーニングは、アスリートのパフォーマンス向上¹⁾、高齢者の健康増進²⁾、中枢神経疾患後のリハビリテーション³⁾など多様な目的で用いられている。現在のところ、下肢血流の増加⁴⁾、柔軟性の増加⁵⁾、単シナプス反射回路興奮性の低下⁶⁻⁸⁾などの生理学的作用が報告されている。その中でも、WBVの単シナプス反射回路興

奮性に対する効果については、Sayenkoらが報告している⁸⁾。彼らは、単シナプス反射回路興奮性の指標として、主にI a群感覚線維を経皮的に電気刺激することによって得られるHoffmann反射(H反射)と呼ばれる電気生理学的手法を用いて、WBVトレーニングの神経生理学的効果を明らかにした。彼らの報告によると、1分間のWBV(振動周波数35Hz)によって、WBV介入中におけるH反射振幅値が介入前の振幅値の約10%にまで低下した。また、この有意な低下は、WBV介入後36秒間続いた。WBVによるH反射興奮性低下の機序として、I a群感覚線維終末のシナプス前抑制やPost-activation depressionの関与が考えられている。

WBVの神経生理学的効果を調べるために、Sayenkoらが採用したH反射法は、方法論上の理由から、ヒラメ筋をはじめとした限られた筋でのみ誘発可能であり、大腿二頭筋などの誘発困難な筋の情報は取得できない。また、H反射法では、複数の筋を同時に測定できないため、複数の筋における単シナプス反射回路興奮性の変化を同時に捉えることができない。これまでWBVの筋力増強効果については多様な筋で調べられてきたが⁹⁾、WBVのH反射回路興奮性に与える効果は、ヒラメ筋のみでしか調べられておらず、他の筋への効果は不明であった。本研究では、大腿・下腿の屈筋・伸筋へのWBVの効果を同時に調べるために、下肢の複数の筋の反射応答を同時に誘発できるPosterior-root muscle reflex (PRM-reflex)法を用いた^{10,11)}。PRM-reflexは、腰髄・仙髄の後根を経皮的に電気刺激することで得られ、H反射と神経生理学的な特徴が類似していることから、主に単シナプス反射回路の興奮性を反映していると考えられている¹¹⁾。

先行研究においては、下肢の関節運動に関連した体性感覚入力、異なる髄節レベルの単シナプス反射回路興奮性に対しても抑制効果があること

が報告されている¹²⁻¹⁴⁾。これらの研究結果に基づき、本研究では、WBVによって生じる体性感覚入力、下肢複数筋の単シナプス反射回路の興奮性を同時に抑制すると仮説を立てた。この仮説を検証するため、WBVが大腿・下腿の屈筋・伸筋のPRM-reflexに及ぼす影響を明らかにすることを本研究の目的とした。

1. 研究方法

1.1 被検者

被検者は、重篤な神経疾患や整形外科疾患のない健常成人男性8名であった。被検者8名のうち、1名は立位でPRM-reflexを誘発できなかったため、途中で実験を中止した。立位で計測可能であった被検者7名(平均±標準偏差、年齢:28±6.9歳、身長:174.5±7.2cm、体重:65±8.6kg)のデータを用いてデータ解析を行った。本研究は東京国際大学医学系研究倫理審査委員会より承認が得られた後、実施された(承認番号:21-13)。被検者に対して説明文書を用いて十分な説明を行い、書面にて同意を得た上で、実験は実施された。

1.2 表面筋電図

表面筋電位を取得するために、前脛骨筋、ヒラメ筋、内側広筋、大腿二頭筋長頭に表面電極(Vitrode F-150S、日本光電社製)を電極間距離20mmで貼付した。表面筋電位信号は、生体アンプ(多チャンネル増幅器、日本光電社製)を用いて、5Hz-3kHzの帯域通過フィルタで1000倍に増幅された後、アナログ-デジタル変換器(PowerLab、ADInstruments社製)を用いてコンピュータに取り込まれ、ハードディスクに保存された。なお、サンプリング周波数は、10kHzとした。

1.3 経皮的脊髄刺激

本研究では、脊髄後根を電氣的に刺激することで誘発されるPRM-reflexを評価指標として用

いた。電気刺激には、定電流刺激装置 (DS7A, Digitimer社製) を用いた。刺激は、パルス幅が1msの矩形波とした。効果的に脊髄後根を刺激するために、陽極 (100mm × 75mm) を剣状突起と臍の間の腹部に、陰極 (50mm × 50mm) を、T12/L1, L1/L2またはL2/L3の棘突起間の皮膚に貼付した。陰極の位置は、PRM-reflexの誘発が可能な部位を探索し、決定された^{15, 16)}。刺激強度は、立位で全ての被検筋から明確な反応を誘発できる強度とした。決定した刺激強度で、二連発刺激 (刺激間隔50ms) を行い、1回目の刺激によって誘発される反応に比べて2回目の刺激によって誘発される反応が減衰するか確認した。二連発刺激を行うことで、誘発された反応が運動神経への直接的な刺激による反応であるか、あるいは、シナプスを介した反応であるかを確認した^{11, 16)}。

1. 4 三次元座標データ

三次元座標データを取得するために、4台の赤外線カメラ (OptiTrack Flex13, NaturalPoint社製)、カメラハブ (OptiHub2, NaturalPoint社製) および計測ソフトウェア (Motive Tracker, NaturalPoint) から構成される光学式モーションキャプチャーシステムを用いた。直径14mmの反射マーカーを被検者の解剖学的標点 (肩峰, 大転子, 大腿骨外側上顆, 腓骨外果, 踵骨隆起, 第5中足骨頭) にテープで貼付した。カメラのフレームレートの設定は100fpsとし、カメラハブから出力された同期信号は、アナログ-デジタル変換器 (PowerLab, ADInstruments社製) を用いて収録され、三次元座標データと表面筋電位信号との同期を行った。三次元座標データは、実験中の姿勢変化を視覚的に確認するために用いられた。

1. 5 実験プロトコル

本実験は全身振動刺激 (WBV) 条件とコントロール (Control) 条件の2条件を同日に実施した。デサントスポーツ科学 Vol. 44

2条件の間は15分間の休憩を入れた。2つ実験条件は、被検者毎に無作為に並べ替えて順序効果を排除した。実験の最後に、各筋の最大随意収縮中の表面筋電位信号を計測した。

PRM-reflexの測定は、介入前の1分間 (Pre)、介入中の1分間 (During)、介入直後からの1分間 (Post0-1)、介入1分後からの1分間 (Post1-2)、介入5分後からの1分間 (Post5-6) に行なわれた。電気刺激は、6秒の間隔を空けた。電気刺激のタイミングは、LabVIEW (National Instruments社製) によって制御された。

両条件とも被検者は、全身振動刺激装置 (Personal Power Plate, Power Plate社製) 上で立位姿勢をとった。WBV条件では、1分間にわたり被検者の足底部に振動刺激 (35Hz) が与えられた。Control条件では、足底部への振動刺激は与えられなかった。

介入時の振動刺激の有無を記録するために、1軸加速度センサー (3123A, Dytran Instruments社製) を全身振動刺激装置上に取り付け、加速度のアナログ信号を、アナログ-デジタル変換器 (PowerLab, ADInstruments社製) を介してPCに取り込んだ。得られたデータは、実験中の振動刺激の有無を確認するために用いられた。

1. 6 データ解析

刺激によって得られたPRM-reflexのピークピーク値を算出した。背景筋活動量として、刺激前50msの表面筋電位信号の二乗平均平方根の値を求め、その値を最大随意収縮時の二乗平均平方根の値で正規化した。解析には、データ解析ソフトウェア (Matlab R2020b, Mathworks社) を用いた。

1. 7 統計解析

二連発刺激による1発目と2発目のPRM-reflexのピークピーク値の比較は、対応のあるt検定を用いた。正規性の検定 (Shapiro-Wilk) が棄却さ

れた場合は、ノンパラメトリックの検定である Wilcoxon の符号順位検定を用いた。

各条件の PRM-reflex のピークピーク値と背景筋活動量は反復測定の一元配置分散分析を行った。その結果、主効果があった場合は、Pre の値をベースラインとして、Dunnnett の検定を行った。反復測定の一元配置分散分析は、正規性の仮定を基にした検定であるため、統計解析を行う前は前提が満たされているか確認を行った。正規性の検定 (Shapiro-Wilk) が棄却された場合は、ノンパラメトリックの検定である Friedman の検定を用いた。

統計処理及びグラフ作成には、Sigmaplot (Systat

Software 社製) を用いた。有意水準は 5% とした。

2. 結果

図 1 に二連発刺激によって誘発された PRM-reflex のピークピーク値の値を示す。2 発目の PRM-reflex のピークピーク値が 1 発目のものよりも有意に小さかった (TA:p=0.016, SOL:p=0.005, VM:p=0.016, BF:p=0.027)。

図 2 に WBV 条件および Control 条件における PRM-reflex のピークピーク値の典型データ (n=1) を示す。WBV 条件では、Pre に比べると、During において、TA と SOL と BF でピークピーク値の明らかな低下が認められた。しかし、WBV 条件

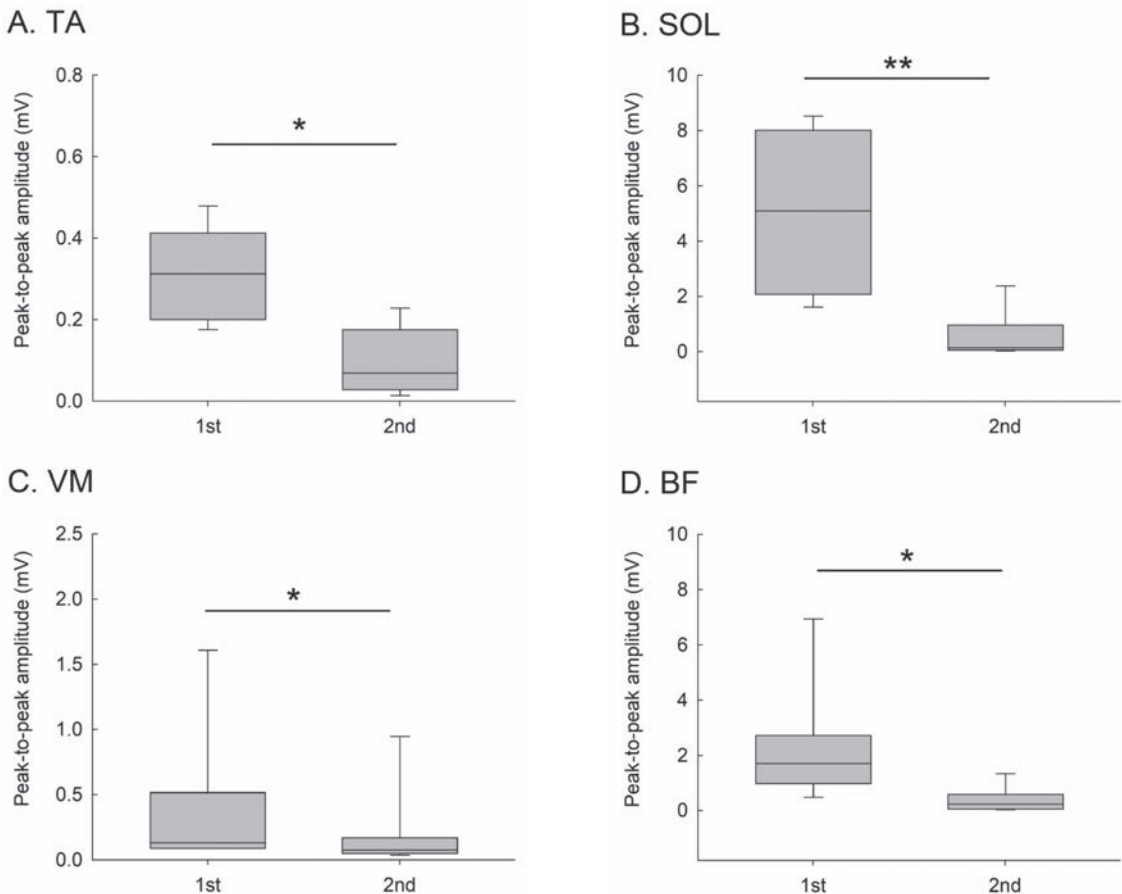


図 1 二連発刺激による PRM-reflex のピークピーク値の変化 (n=7)

二連発刺激によって誘発された前脛骨筋 (TA)、ヒラメ筋 (SOL)、内側広筋 (VM)、大腿二頭筋 (BF) における PRM-reflex のピークピーク値 (中央値、四分位範囲) を示している。刺激間隔は 50 m s とし、同一強度の刺激を加えたところ、1 発目 (1st) に比べ、2 発目 (2nd) のピークピーク値は有意に小さな値を示した。*:p<0.05, **:p<0.01

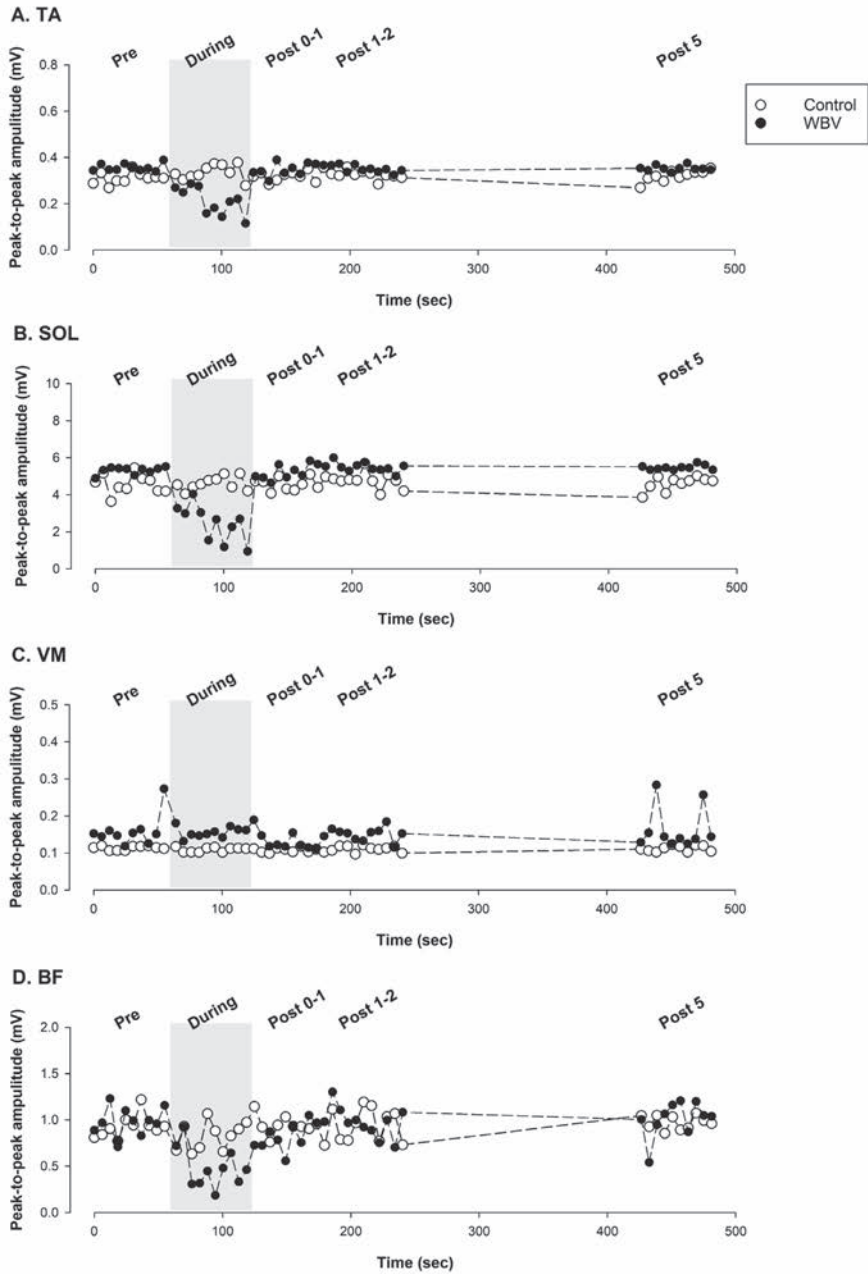


図2 全身振動刺激条件 (WBV) およびコントロール条件 (Control) における PRM-reflexのピークピーク値の変化 (典型例n=1)

縦軸は、前脛骨筋 (TA) ,ヒラメ筋 (SOL) ,内側広筋 (VM) ,大腿二頭筋 (BF) におけるPRM-reflexのピークピーク値を示している。横軸は測定開始を0秒とし、時系列を示した。

のDuringに見られた低下は、介入後には見られなくなった。

図3にWBV条件およびControl条件におけるPRM-reflexのピークピーク値の変化を示す。各

プロットとエラーバーは、被検者7名の平均値と標準誤差を示している。Control条件のデータに対して、反復測定の一元配置分散分析およびFriedmanの検定を行ったところ、有意差は認め

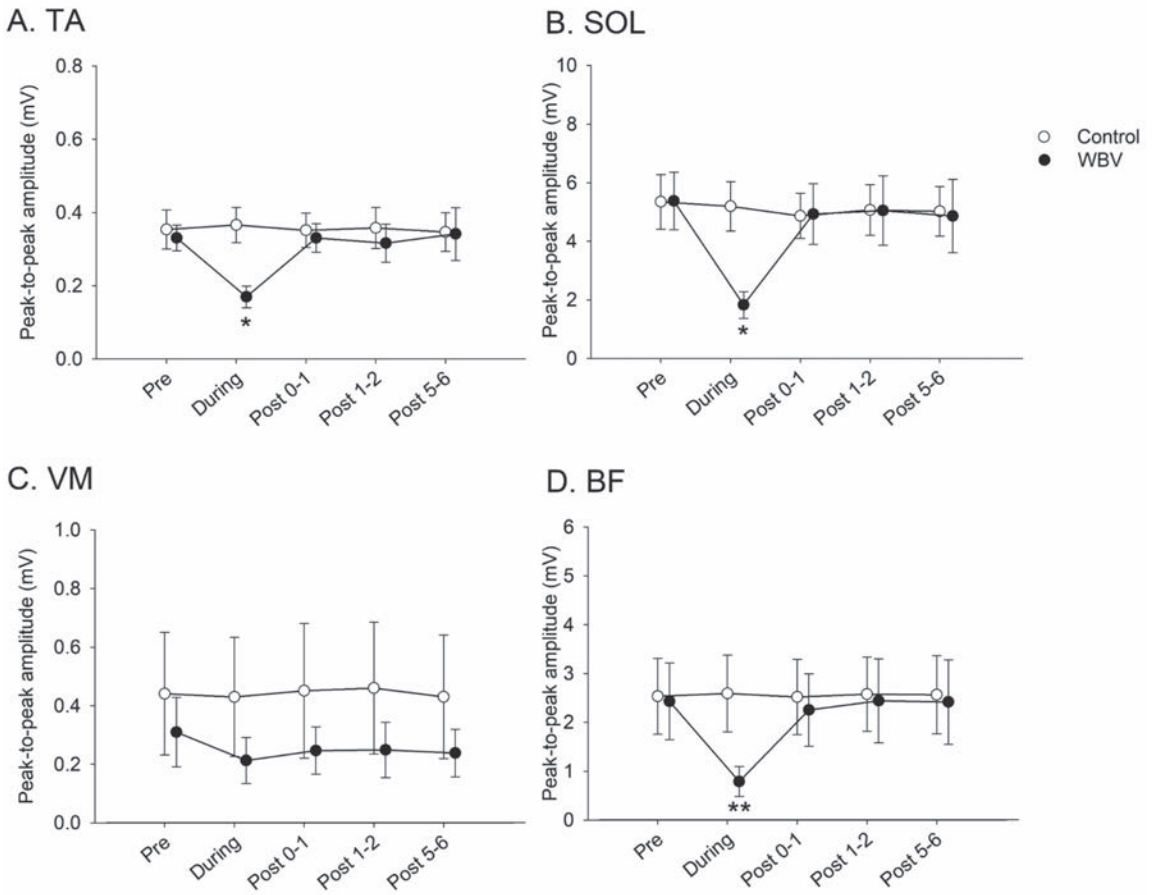


図3 全身振動刺激条件 (WBV) およびコントロール条件 (Control) におけるPRM-reflexのピークピーク値の変化 (n=7) 縦軸は、前脛骨筋 (TA)、ヒラメ筋 (SOL)、内側広筋 (VM)、大腿二頭筋 (BF) におけるPRM-reflexのピークピーク値 (平均値±標準誤差) を示している。横軸は、介入前 (Pre)、介入中 (During)、介入直後から1分間 (Post0-1)、介入1分後から1分間 (Post1-2)、介入5分後から1分間 (Post5-6) を示した。*: $p<0.05$, **: $p<0.01$

られなかった。一方で、WBV条件のTA、SOL、BFのデータにおいては、有意差が認められた (TA: $p=0.006$, SOL: $p=0.004$, BF: $p=0.002$)。さらに、Dunnettの検定の結果、Preと比較して、Duringで有意な低下が認められた (TA: $p=0.011$, SOL: $p=0.018$, BF: $p=0.002$)。

表1にWBV条件およびControl条件における背景筋活動量のデータを示す。背景筋活動量は、最大随意収縮 (MVC) 中の表面筋活動電位で正規化した値 (%MVC) を用いた。反復測定の一分散分析およびFriedmanの検定の結果、WBV条件のTA、SOL、VMおよびBFにおいて有意差が認め

られた (TA: $p<0.001$, SOL: $p=0.019$, VM: $p=0.020$, BF: $p<0.001$)。さらに、Dunnettの検定の結果、Preと比較して、Duringで有意な増加が認められた (TA: $p=0.047$, SOL: $p=0.029$, BF: $p<0.001$)。一方で、Control条件においては有意差は認められなかった。

3. 考察

本研究の目的は、WBVが大腿・下腿の屈筋・伸筋の単シナプス反射回路興奮性に及ぼす影響を明らかにすることであった。実験の結果、1分間のWBV介入中において、下肢3筋 (前脛骨筋、

表1 WBV条件およびControl条件における背景筋活動量 (%MVC) の変化 (平均値±標準誤差)

		Pre	During	Post 0-1	Post 1-2	Post 5-6
WBV	TA	1.26±0.29	3.14±0.53 *	1.13±0.13	0.85±0.11	0.69±0.08
	SOL	4.94±0.84	8.79±1.44 *	6.19±0.68	5.01±0.60	5.05±0.60
	VM	2.48±0.53	5.72±1.32	2.63±0.61	2.35±0.62	2.51±0.58
	BF	3.41±0.51	7.99±1.54 **	4.91±1.69	3.80±1.02	3.64±0.73
Control	TA	1.06±0.30	1.31±0.31	1.26±0.32	1.16±0.40	0.73±0.12
	SOL	5.19±0.88	4.83±0.89	4.36±0.76	4.69±0.80	4.59±0.68
	VM	1.98±0.36	2.15±0.36	2.23±0.37	2.30±0.52	2.08±0.33
	BF	3.75±0.85	4.36±1.71	3.07±0.76	3.29±0.93	3.39±0.66

Dunnett's test, * p < 0.05, ** p < 0.01

ヒラメ筋, 大腿二頭筋) のPRM-reflexのピークピーク値が有意に低下した. この低下は, WBV介入終了後は認められなかった. 以下に, 本結果を考察する.

3. 1 方法論について

本研究で用いたPRM-reflexは, 二連発刺激によってPRM-reflexのピークピーク値が減少することや局所振動刺激によって振幅の減少が見られることから, シナプスを介した反応であるとされている¹¹⁾. また, シミュレーションを用いた研究により, PRM-reflexは主に脊髄後根が刺激されることによって誘発されると考えられている^{17, 18)}.

本研究では, 刺激電極の貼付位置を決定した後, 二連発刺激によって誘発された反応が運動神経への直接的な刺激による反応であるか, あるいは, シナプスを介した反応であるかを確認した. 図1に見られるように, 測定されたすべての筋でピークピーク値の減少が見られたことから, 本研究で計測された反応は, シナプスを介した反射応答であり, 単シナプス反射回路の反射応答を誘発できたものと考えられる.

3. 2 WBVの神経生理学的効果

WBVの神経生理学的効果については, これまでH反射法を用いて調べられてきた⁶⁻⁸⁾. この方法を用いた研究によると, ヒラメ筋のH反射が介入前と比較して, WBV中に強く抑制されるこ

とが示されている⁸⁾. 本研究において, ヒラメ筋のPRM-reflexのピークピーク値がWBV介入中に大幅に減少した点は先行研究の結果と一致している. 一方で, 刺激の持続効果については, 先行研究では介入後36秒間持続したと報告されているが, 本研究では介入後1分間の低下は認められず, 先行研究の結果⁸⁾と一致しなかった. 先行研究では, EasyStand 5000と呼ばれる立位姿勢を保持する装置が用いられており, 立位時における筋活動量の差が不一致の原因のひとつと考えられる. また, H反射とPRM-reflexの違いとして, PRM-reflexでは, 異名筋のI a群感覚線維からの入力の影響があり, この点も結果の差異の要因として考えられる.

ヒラメ筋以外の他の筋においても, WBV中にPRM-reflexのピークピーク値が大幅に減少した. ヒラメ筋以外の筋への抑制効果を報告した研究は, これまでなく, 本研究において初めて明らかにすることができた. 先行研究において, 受動ステップング^{12, 14)}など筋紡錘を中心とした体性感覚入力が惹起される条件において, 単シナプス反射回路興奮性が全体的に抑制されることが示されており, I a群感覚線維終末のシナプス前抑制が関与していると考えられてきた¹⁴⁾. 本研究においても, WBVによって惹起される体性感覚入力が, I a群感覚線維終末のシナプス前抑制やPost-activation depressionなどの複数の抑制機序が, 複数の筋のPRM-reflexの低下に関与したものと考えられる.

3. 3 臨床的意義

WBVトレーニングは、アスリート、高齢者、中枢神経疾患患者のトレーニング法として広く用いられている。WBVトレーニングの効果については、既に多数の介入研究が行われており、システマティック・レビューでもその有効性が報告されている¹⁻³⁾。例えば、中枢神経疾患患者においては、伸張反射亢進の結果として生じる運動機能障害の1つである痙縮に対する治療効果が検証されており、脳性麻痺や脳卒中の痙縮の緩和に対して一部有効性が認められている³⁾。しかし、今のところ、そのメカニズムについては明らかになっていない。

PRM-reflexを評価指標として用いた本研究においては、WBVが下肢の複数の筋の単シナプス反射回路興奮性を同時に低下させることが明らかになった。この結果から、WBVトレーニングが下肢の複数の筋の痙縮緩和や筋緊張低下の効果を有することが示唆された。本研究では、短時間のWBVによる急性効果について検討したが、繰り返しWBVを行うことで単シナプス反射回路興奮性を持続的に低下させられるかは今後検討する必要がある。また、本研究は健常者を対象としたものであったため、中枢神経疾患患者を対象として今後検討する必要がある。

4. 結 論

本研究では、WBVが大腿・下腿の屈筋・伸筋の単シナプス反射回路興奮性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験を行ったところ、WBVに下肢の複数の筋の単シナプス反射回路興奮性を同時に抑制する効果があることが明らかになった。

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、研究助成の申請時にご協力頂いた東京大学大学院中澤公孝教授、本研究にご参加頂いた被検者の皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Hortobagyi, T., et al., Small and inconsistent effects of whole body vibration on athletic performance: a systematic review and meta-analysis. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **115** (8) : p. 1605-25 (2015)
- 2) Sitja-Rabert, M., et al., Efficacy of whole body vibration exercise in older people: a systematic review. *Disabil. Rehabil.*, **34** (11) : p. 883-93 (2012)
- 3) Huang, M., L.R. Liao, and M.Y. Pang, Effects of whole body vibration on muscle spasticity for people with central nervous system disorders: a systematic review. *Clin. Rehabil.*, **31** (1) : p. 23-33 (2017)
- 4) Lythgo, N., et al., Whole-body vibration dosage alters leg blood flow. *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, **29** (1) : p. 53-9 (2009)
- 5) Jacobs, P.L. and P. Burns, Acute enhancement of lower-extremity dynamic strength and flexibility with whole-body vibration. *J. Strength Cond. Res.*, **23** (1) : p. 51-7 (2009)
- 6) Kipp, K., et al., Spinal reflex excitability and homosynaptic depression after a bout of whole-body vibration. *Muscle Nerve*, **43** (2) : p. 259-62 (2011)
- 7) Armstrong, W.J., et al., The acute effect of whole-body vibration on the hoffmann reflex. *J. Strength Cond. Res.*, **22** (2) : p. 471-6 (2008)
- 8) Sayenko, D.G., et al., Acute effects of whole body vibration during passive standing on soleus H-reflex in subjects with and without spinal cord injury. *Neurosci. Lett.*, **482** (1) : p. 66-70 (2010)
- 9) Sarabon, N., et al., Resistance Exercise, Electrical Muscle Stimulation, and Whole-Body Vibration in Older Adults: Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *J. Clin. Med.*, **9** (9) (2020)
- 10) Minassian, K., et al., Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord. *Muscle Nerve*, **35** (3) : p. 327-36 (2007)
- 11) Courtine, G., et al., Modulation of multisegmental monosynaptic responses in a variety of leg muscles during walking and running in humans. *J. Physiol.*,

- 582 (Pt 3) : p. 1125-39(2007)
- 12) Masugi, Y., et al., Effects of movement-related afferent inputs on spinal reflexes evoked by transcutaneous spinal cord stimulation during robot-assisted passive stepping. *Neurosci. Lett.*, **627**: p. 100-6(2016)
 - 13) Masugi, Y., et al., Neural effects of muscle stretching on the spinal reflexes in multiple lower-limb muscles. *PLoS One*, **12** (6) : p. e0180275(2017)
 - 14) Nakajima, T., et al., Robotic-assisted stepping modulates monosynaptic reflexes in forearm muscles in the human. *J. Neurophysiol.*, **106** (4) : p. 1679-87(2011)
 - 15) Masugi, Y., H. Obata, and K. Nakazawa, Effects of anode position on the responses elicited by transcutaneous spinal cord stimulation. *Annu Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 2017: p. 1114-1117 (2017)
 - 16) Masugi, Y., et al., Remote muscle contraction enhances spinal reflexes in multiple lower-limb muscles elicited by transcutaneous spinal cord stimulation. *Exp. Brain Res.*, **237** (7) : p. 1793-1803 (2019)
 - 17) Danner, S.M., et al., Can the human lumbar posterior columns be stimulated by transcutaneous spinal cord stimulation? A modeling study. *Artif. Organs*, **35** (3) : p. 257-62(2011)
 - 18) Ladenbauer, J., et al., Stimulation of the human lumbar spinal cord with implanted and surface electrodes: a computer simulation study. *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.*, **18** (6) : p. 637-45(2010)

坂ダッシュトレーニングによる下肢筋活動への影響

東京大学・早稲田大学 欠 畑 岳
(共同研究者) 立命館大学 後 藤 悠 太
早稲田大学 磯 繁 雄
順天堂大学・早稲田大学 彼 末 一 之

Effects of The Lower Limb Muscle Activity During Uphill Sprint Training

by

Gaku Kakehata

The university of Tokyo, Waseda Univerisity

Yuta Goto

Ritumeikan university

Shigeo Iso

Waseda university

Kazuyuki Kaosue

Juntendo university, Waseda Univerisity

ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify effect of uphill sprinting to running spatiotemporal variables and lower limb muscle activity. Twelve university sprinters (seven males) were volunteered to this study. Subjects performed 60 m sprint with maximal effort in two conditions (level sprint vs uphill sprint). Then, we obtained running spatiotemporal variables and electromyography (EMG) from lower limb muscles (biceps femoris, rectus femoris, tibial anterior, lateral head of gastrocnemius). We calculated the running spatiotemporal variables (e.g., running speed, step

frequency, step length), EMG activity amplitudes (%MVC), and relative EMG timings in running cycle (%) in analysis section (40-60m). We observed running speed, step frequency, and step length were significantly decreased in the uphill sprint. However, no significant differences were observed in EMG activity amplitudes between two conditions. On the other hand, the onset and offset timings of rectus femoris muscle were significantly shifted to the latter half of the running cycle in the uphill sprint. Therefore, we may consider the possibility that delay in the timing of the recovery movement (i.e., hip flexion) of the swing leg in the uphill sprint. These results suggest that uphill sprint training may affect the timing of muscle activity rather than the amount of muscle activity. We conclude that neuromuscular control of the lower limb muscle is different between uphill sprint and level sprint.

キーワード

スプリント走, 坂ダッシュ, 下肢筋活動, 筋電図, バイオメカニクス

Keyword

Sprint running, Uphill sprint, Muscle activity, Electromyography, Biomechanics

要 旨

本研究は、上り坂走と平地走における下肢筋活動の相違について解明することを目的とした。被験者は大学陸上競技部の男女12名（男子7名、女子5名）であった。平地および上り坂で60mを全力疾走した際の走動作と下肢筋（前脛骨筋、腓腹筋外側頭、大腿直筋、両脚の大腿二頭筋）の筋電図を取得した。解析区間（40-60m）における時空間的変数、筋活動のタイミング、筋活動量を定量し条件間で比較した。その結果、上り坂走では走速度、ピッチ、ストライドが有意に減少した。筋活動量はいずれも条件間で有意差が認められなかった。一方、上り坂走では、大腿直筋の筋活動のタイミングがランニングサイクルの後半に有意にシフトした。これは上り坂走において、スウィング脚のリカバリー動作（股関節屈曲）のタイミングに遅延が生じ、ピッチの低下に繋がっていたと推察される。以上より、坂ダッシュトレーニング

は、筋活動量でなく筋活動のタイミングに影響を及ぼす可能性が示された。

緒 言

短距離走のトレーニング方法に坂ダッシュトレーニング（上り坂走）がある。上り坂走は、傾斜走路を駆けあがることで下肢筋群を鍛えるレジステッドスプリントトレーニングである¹⁾。国立スポーツ科学センターの陸上競技トレーニング場においても傾斜走路が併設されており、上り坂走は多くのトップアスリートが実施するトレーニング方法のひとつである。また、上り坂走は陸上競技以外のスポーツにおいてもそのトレーニング効果を認める報告がある^{2,3)}。先行研究では、上り坂走では、平地走と比較して下肢筋群の筋活動量が増加するという一連の知見が得られているが^{4,6)}、その走速度は7.5m/sに満たず、中距離走（800m）のレース中の走速度と同程度である。一方、トップスプリンターの100m走における最高

走速度は11m/sを超えることを考慮すると、これまでの上り坂走と平地走による下肢筋活動の違いは、比較的低速度における知見に留まっている現状がある。また、上り坂走と平地走における筋活動や走動作の変化を検討した先行研究の多くは、トレッドミル走による実験環境であり、両条件間で走速度を統一させるというプロトコルが多く^{4, 7-9)}、全力疾走した際の筋活動や時空間的変数(走速度、ピッチ、ストライドなど)の変化は解明されていない。また、トレッドミル走とオーバークラウンド走(overground running)とでは走動作や筋活動に相違があることが指摘されている^{10, 11)}。したがって、上り坂走による下肢筋活動への影響について、全力疾走(高速度)、かつオーバークラウンド走による筋活動の振る舞いから検討する必要がある。そこで、本研究は全力疾走中の下肢筋活動について2つの条件間(上り坂走および平地走)における筋活動のタイミングおよび活動量の相違について解明することを目的とした。

1. 方法

1.1 被験者

被験者は大学陸上競技部に所属する短距離選手男子7名、女子5名であった(表1)。被験者には、実験の目的と内容および危険性等について口頭で

説明し、実験参加への同意を得た。本研究は早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認(承認番号2021-093)を得たうえで実施した。

1.2 実験プロトコル

被験者は十分なウォーミングアップを実施後、全天候型陸上競技場の直線走路を全力疾走する条件(以下、平地走)と競技場隣接のアスファルト舗装された上り坂傾斜路(平均傾斜4°)を全力疾走する条件(以下、上り坂走)でそれぞれ60m走を2本実施した。被験者には、いずれも加速区間40mのあと、40-60m区間を最大努力で疾走するよう指示した。この40-60m区間を分析区間として定義し、20mの所要タイムを光電管システム(Brower TCi-Gate Timing System, Brower Timing)で記録した。試技の順番はランダムとし、いずれもタイムの良い試技を分析対象試技として採用した。接地、離地のタイミングを同定するために被験者の走動作をデジタルハイスピードカメラ(FZ-300, Panasonic)で追従撮影した(240Hz)。被験筋は、両側の大腿二頭筋(biceps femoris: BF)、右脚の大腿直筋(rectus femoris: RF)、前脛骨筋(tibial anterior: TA)、腓腹筋外側頭(lateral head of gastrocnemius: LG)の計5筋とした。各筋

表1 身体特性および平地走と上り坂走における時空間的変数の個別データ

Subject	Gender	Mass(kg)	Height(m)	Age(years)	Running speed(m/s)		Step frequency(Hz)		Step length(m)		Contact time(sec)		Flight time(sec)	
					Level	Uphill	Level	Uphill	Level	Uphill	Level	Uphill	Level	Uphill
A	W	50	1.63	21	8.20	6.80	4.07	3.97	2.01	1.71	0.118	0.136	0.128	0.116
B	W	54	1.65	21	7.84	6.69	4.19	4.10	1.87	1.63	0.117	0.139	0.122	0.106
C	W	48	1.58	22	7.35	6.37	4.09	3.95	1.80	1.61	0.119	0.142	0.125	0.111
D	W	52	1.69	19	8.73	7.32	4.39	4.28	1.99	1.71	0.100	0.120	0.129	0.113
E	W	62	1.71	22	7.78	6.67	4.06	4.00	1.92	1.67	0.121	0.138	0.126	0.112
F	M	69	1.71	22	9.90	9.17	4.50	4.46	2.20	2.06	0.094	0.099	0.128	0.125
G	M	74	1.81	22	9.66	8.40	4.25	4.12	2.27	2.04	0.101	0.113	0.134	0.130
H	M	60	1.72	22	9.98	8.56	4.47	4.41	2.23	1.94	0.095	0.110	0.129	0.117
I	M	72	1.69	22	9.32	7.85	4.51	4.46	2.07	1.76	0.102	0.122	0.120	0.103
J	M	66	1.70	22	10.06	8.54	4.57	4.54	2.20	1.88	0.093	0.108	0.126	0.112
K	M	79	1.87	19	9.35	8.31	4.18	4.13	2.24	2.01	0.106	0.117	0.134	0.126
L	M	78	1.83	22	9.71	8.16	4.38	4.20	2.22	1.94	0.096	0.112	0.132	0.127
Mean ± SD		64 ± 11	1.72 ± 0.08	21 ± 1	8.91 ± 0.97	7.64 ± 0.95*	4.29 ± 0.19	4.2 ± 0.21*	2.07 ± 0.16	1.82 ± 0.17*	0.106 ± 0.011	0.122 ± 0.014*	0.127 ± 0.004	0.117 ± 0.008*

平均値 ± 標準偏差

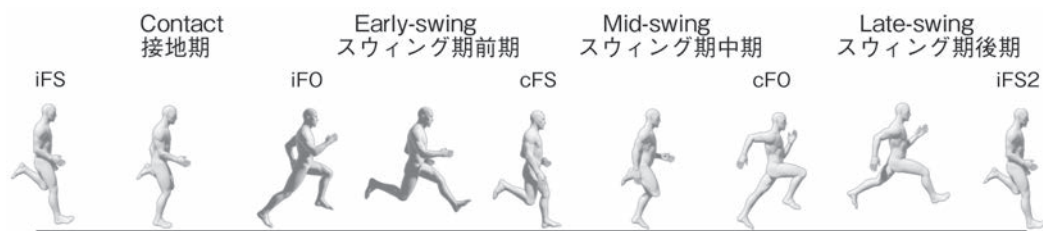


図1 ランニングサイクル局面の定義

の筋電図信号はワイヤレス筋電センサー (Trigno Wireless Sensor, DELSYS) を用いて、サンプリング周波数2000Hzにて記録した。大腿の筋電センサー貼付位置は、解剖学的正位において大転子から膝関節裂隙を結んだセグメントを大腿長とし、その50%位置の筋腹位とした。下腿の筋電センサー貼付位置は、解剖学的正位において膝関節裂隙と外果を結んだセグメントの30%位置の筋腹位とした。各筋の筋電図信号は、20-450 Hzのバンドパスフィルター処理をされたうえで、コンピューターに取り込まれた。試技の終了後、各筋の最大随意収縮 (以下、MVC) を5秒間の徒手抵抗により記録した。

1. 3 時空間的変数の解析方法

20mの所要タイムに要した時間 (sec) から走速度 (m/s) を算出した。ハイスピードカメラの動画を動画再生ソフトウェア (QuickTime Player, Apple) に取り込み、分析区間に要した4-5ランニングサイクル分の接地の瞬間 (Foot-Strike: 以下、FS) と離地の瞬間 (Foot-Off: 以下、FO) のタイミングのフレーム数をカウントした。そのフレーム数から各ステップの接地時間 (sec)、滞空時間 (sec) を算出し、平均のピッチ (Hz) を算出した。また、走速度とピッチから平均ストライド (m) を算出した。

1. 4 筋電図信号の解析方法

筋電図信号は、生体信号処理速度ソフト (Lab Chart 8 for windows, ADInstruments) に取り込み、

同期装置 (全周囲光呈示器, Q'sfix) の光信号が確認された時刻を基準に、カメラ映像の時間軸と同期させた。筋電図信号の時間軸に、動画像から読み取ったFSとFOのタイミングを対応させ、右脚を「基準脚 (ipsilateral leg)」, 左脚を「反対脚 (contralateral leg)」とした。本研究では、両脚のFSとFOのタイミングから、ランニングサイクルの局面を図1の通り定義した。ランニングサイクルは、基準脚のFS (以下、iFS) の瞬間から次の基準脚のFS (以下、iFS2) までとし、iFSから基準脚のFO (以下、iFO) までを「接地期 (Contact)」と定義した。また、iFOから反対脚のFS (以下、cFS) までを「スウィング期前期 (Early-swing)」, cFSから反対脚のFO (以下、cFO) までを「スウィング期中期 (Mid-swing)」, cFOからiFS2までを「スウィング期後期 (Late-swing)」と定義した (図1)。これらの4局面における筋活動量を二乗平均平方根 (RMS) 値として求め、MVC値で正規化した相対値で算出した (%MVC)。先行研究を基に、大腿直筋と両脚の大腿二頭筋の筋活動のオンセット、オフセットのタイミングをTKEOフィルタによる閾値設定に従い算出した^{12,13)}。TKEOフィルタは、筋電図信号のオンセットを計算するための信頼性の高い方法であることが確認されている^{12,13)}。これらのオンセット、オフセットのタイミングは、ランニングサイクルの相対的なタイミング (%) で算出した。

大腿直筋と両脚の大腿二頭筋のオンセット (onset) およびオフセット (offset) のタイミングから、筋制御の変数であるSwitchおよびScissors

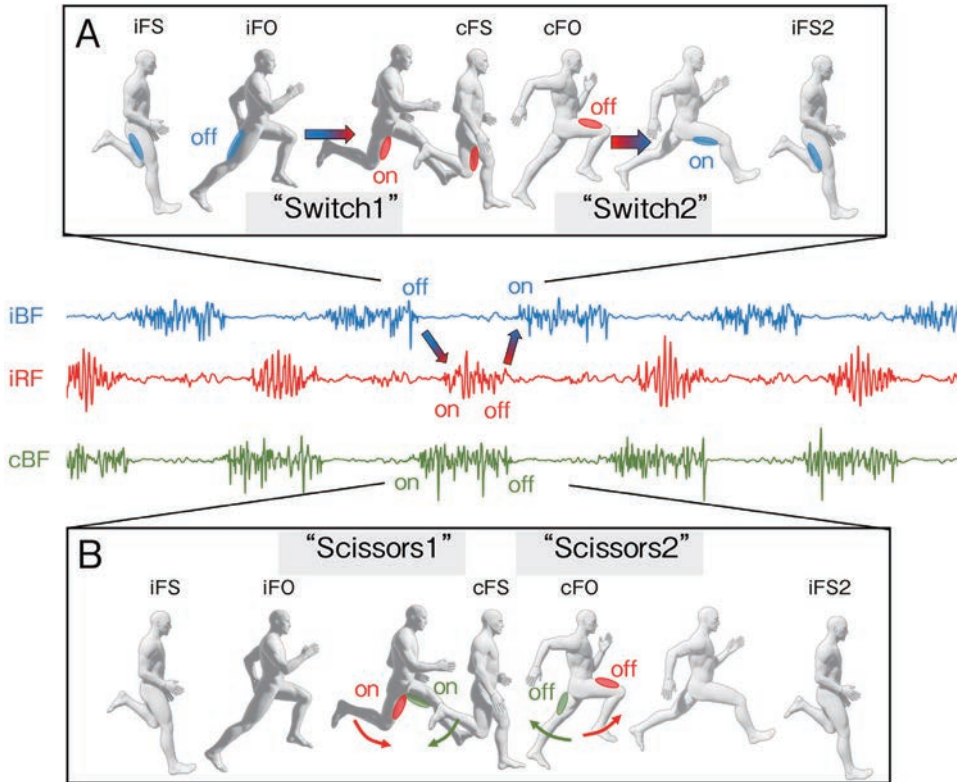


図2 筋制御の変数SwitchおよびScissorsの定義
(先行研究¹⁵⁾を基に作成)

について、先行研究を基に定義した^{14,15)} (図2).

「Switch」

基準脚の主動筋と拮抗筋の関係にある基準脚の大腿直筋 (iRF) と大腿二頭筋 (iBF) の切換えに要した時間の長さを示す指標として以下のように定義した (図2A).

$$\text{Switch1 (\%)} = (\text{iRF-onset}) - (\text{iBF-offset})$$

$$\text{Switch2 (\%)} = (\text{iBF-onset}) - (\text{iRF-offset})$$

これらが負の値である場合は、大腿直筋と大腿二頭筋は共収縮していることを示す.

「Scissors」

スウィング脚の股関節屈筋として機能する大腿直筋 (iRF) と接地脚 (反対脚) の股関節伸筋として機能する大腿二頭筋 (cBF) との活動の時間差を示す指標として以下のように定義した (図2B).

$$\text{Scissors1 (\%)} = (\text{iRF-onset}) - (\text{cBF-onset})$$

$$\text{Scissors2 (\%)} = (\text{cBF-onset}) - (\text{iRF-onset})$$

1. 5 統計処理

平地走と上り坂走における時空間的変数および筋活動のタイミングの平均値の差の検定は対応のあるt検定により検討した. また筋活動量の平均値の差の検定について、対応のある1要因の分散分析により検討した. 有意水準は5%未満とし、10%未満を有意傾向として扱った.

2. 研究結果

2. 1 時空間的変数

表1に、平地走と上り坂走における各変数の平均値±標準偏差を示した. 上り坂走において走速度 ($p < 0.001$), ピッチ ($p < 0.001$), ストライド ($p <$

0.001), 滞空時間 ($p < 0.001$) が有意に減少した。一方, 接地時間 ($p < 0.001$) は有意に増加した。

2. 2 筋活動の変数

表2に筋電図信号の変数の平均値±標準偏差を示した。上り坂走においてiRF-onset ($p = 0.024$), iRF-offset ($p = 0.046$) がサイクルの後半に有意にシフトした。同様に, 上り坂走においてiBF-offsetがサイクルの後半にシフトする傾向がみられた ($p = 0.094$)。さらに, 上り坂走において, Switch2 ($p = 0.092$) およびScissors2 ($p = 0.057$) が

表2 平地走と上り坂走における筋活動のタイミング

	Level	Uphill	P-value
iRF-onset (%)	39.7 ± 3.5	40.7 ± 2.8	*0.024
iRF-offset (%)	74.0 ± 3.7	75.5 ± 3.4	*0.046
iBF-onset (%)	73.4 ± 4.1	73.9 ± 3.8	0.469
iBF-offset (%)	30.3 ± 4.4	31.9 ± 3.4	#0.094
cBF-onset (%)	24.9 ± 3.8	24.2 ± 3.0	0.235
cBF-offset (%)	80.7 ± 5.5	79.5 ± 4.4	0.276
Switch1 (%)	9.4 ± 6.3	8.3 ± 4.5	0.229
Switch2 (%)	-0.6 ± 3.4	-1.2 ± 3.4	#0.092
Scissors1 (%)	14.9 ± 4.5	15.4 ± 4.7	0.388
Scissors2 (%)	6.7 ± 6.0	3.3 ± 3.0	#0.057

平均値±標準偏差

*: 5% 水準で有意差がある, #: 10% 水準で有意傾向にある。

短縮する傾向にあった。図3に, 大腿直筋と両脚の大腿二頭筋の活動のタイミングについて示した。図4に, 基準脚における前脛骨筋, 腓腹筋外側頭, 大腿直筋, 大腿二頭筋の筋活動量を示した。いずれも条件間で有意差は認められなかった。

3. 考 察

本研究は平地走と上り坂走, いずれも全力疾走中の時空間的変数, 筋活動量, 筋活動のタイミングの相違について調べた。

3. 1 時空間的変数および筋活動量について

上り坂走で平地走と同一の走速度を獲得するためには, 高いピッチが要求される^{4,8)}。また, 上り坂走では, 筋活動量が増大するという知見が得られている^{4,6)}。条件間で走速度を7.5m/sで統一したトレッドミル走では, 上り坂走で大殿筋, 中殿筋, 大腿直筋, 大腿二頭筋, 腓腹筋外側頭の筋活動量が増加したことが報告されている⁴⁾。しかし, これらの認識はトレッドミル走による実験環境に基づく。一方, 本研究では平地走, 上り坂走

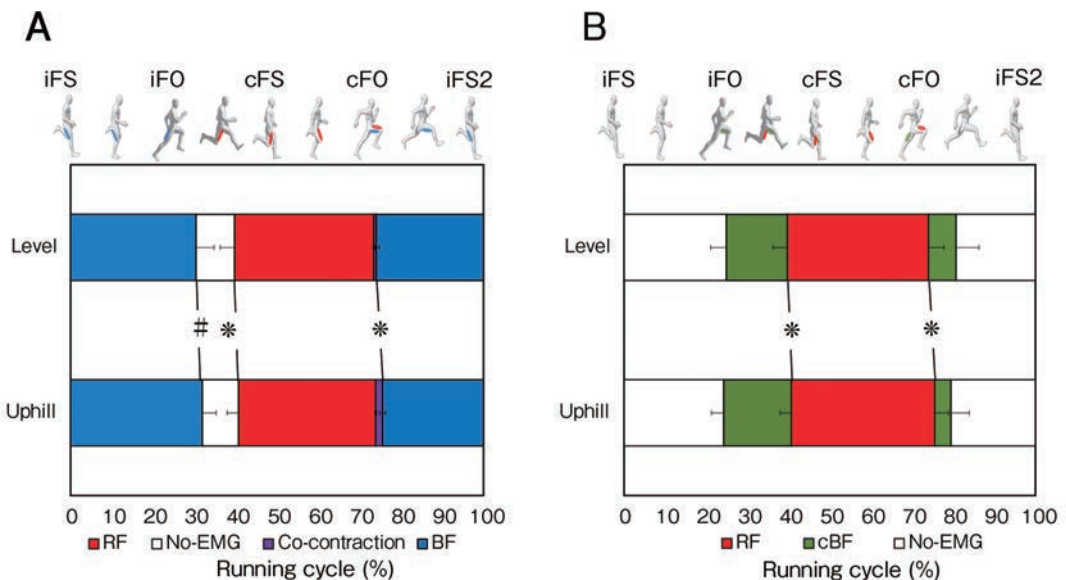


図3 大腿直筋と大腿二頭筋の筋活動のタイミング

*: 5% 水準で有意差がある, #: 10% 水準で有意傾向にある

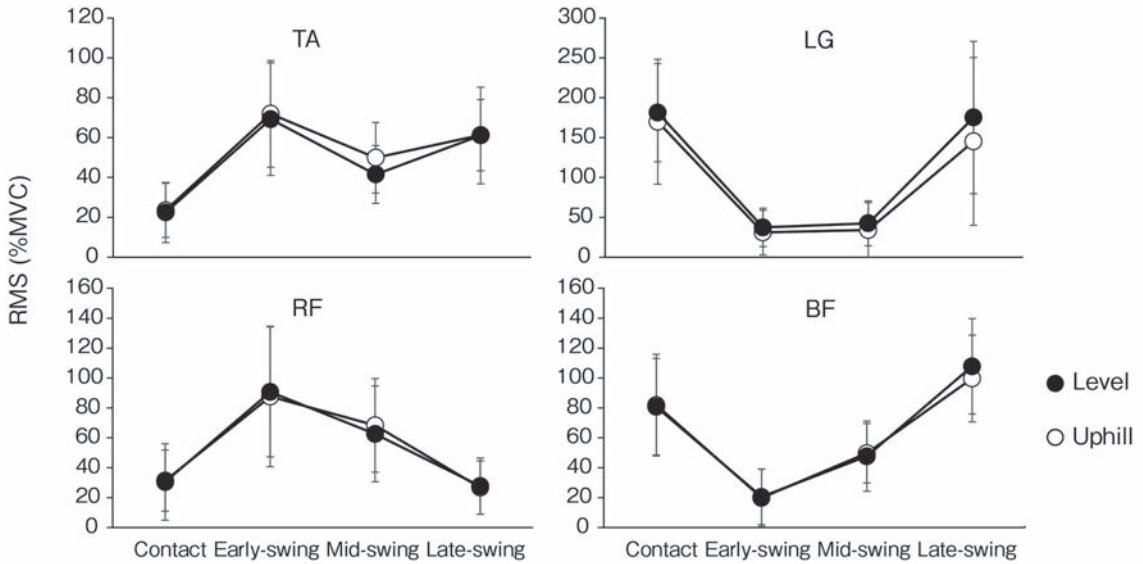


図4 基準脚の前脛骨筋, 腓腹筋外側頭, 大腿直筋, 大腿二頭筋の活動量の比較

いずれもオーバーグラウンド走で全力疾走するという実験環境であり, 上り坂走では全被験者の走速度, ピッチ, ストライドが低下した(表1)。つまり, 上り坂走で平地走の全力疾走時よりも高い走速度を獲得することはオーバーグラウンド走では困難であり, トレッドミルで走速度を統一させた先行研究とは異なるピッチ, ストライドの適応が示された。また, 筋活動量についても先行研究とは異なり条件間で有意差は認められなかった(図4)。これらのことから, トレーニングで実施されるオーバーグラウンド走による上り坂走は, 平地走よりも低い走速度に留まるものの, 平地走と同等の筋活動量が要求されることが明らかとなった。また, 上り坂走ではピッチの低下すなわちランニングサイクル時間の延長が生じることから, 平地走と同等の筋活動量をより長い時間にわたり発揮していたことが推察される。以上より, オーバーグラウンド走による上り坂走では, 筋活動量そのものに変化は生じさせず, 平地走と同等の筋活動量に留まることが示された。

3. 2 筋活動のタイミングについて

これまで, 上り坂走と平地走における筋活動のタイミングを定量しその相違について検討した研究は無い。スプリントでは大腿筋活動が主要なパワー発揮を担うこと¹⁶⁻¹⁸⁾, さらに大腿直筋と大腿二頭筋の活動のタイミングが高いスプリントパフォーマンスを獲得するために重要な因子であることから^{14, 15)}, これら2筋の活動のタイミングに着目した。その結果, 上り坂走における大腿直筋のオンセット, オフセットのタイミングは, ランニングサイクルの後半にシフトするという特徴が観察された(表2, 図3)。スプリントにおける大腿直筋は主に股関節屈曲筋として機能し^{14, 19, 20)}, スウィング脚を前方に振り出す局面であるスウィング期前半および中盤に強く活動する(図4)。また, 特に高速度では, 素早い股関節屈曲(脚のリカバリー動作)によって, 高いピッチを獲得する戦略に切り替わる¹⁶⁻¹⁸⁾。このとき大腿直筋の活動のタイミングが早い者ほど高いピッチを獲得していたことが示されている¹⁴⁾。また, 上り坂走において, 股関節は平地走よりも離地時には伸展

位にあるため、接地期における可動域が増大することが報告されている⁸⁾。本研究で観察された上り坂走で大腿直筋の活動のタイミングが遅れるという変化は、股関節屈曲のタイミングすなわちリカバリー動作の遅延に繋がり、結果としてピッチの低下を誘発していた可能性が考えられる。

さらに、上り坂走では大腿二頭筋のオフセットのタイミングがランニングサイクルの後半にシフトする傾向がみられた (iBF-offset, $p=0.094$)。上り坂走では、傾斜路に対して身体重心を鉛直方向へ移動させる必要があるため、接地期後半における地面反力の推進成分が増大する^{21, 22)}。さらに、股関節が平地走よりも離地時に伸展位にあること²³⁾、上り坂走において接地時間が延長したという結果を考慮すると、上り坂走で大腿二頭筋のオフセットのタイミングが遅延したことは、股関節伸筋である大腿二頭筋の活動を延長させ、より大きな地面反力を獲得しようとした適応であると推察される。以上より、大腿直筋と大腿二頭筋の活動のタイミングは上り坂走と平地走とは異なる筋活動の振る舞いを示すことが示唆された。

3. 3 筋制御の変数について

上り坂走において、スウィング期後半における大腿直筋と大腿二頭筋の切り替わりに要した時間 (Switch2) が短縮する傾向にあった ($p=0.092$)。先行研究では、Switch2とピッチに有意な正の相関関係があることが報告されている。すなわち、主動筋と拮抗筋のスムーズな切り替えが達成されている者ほど高いピッチを示した¹⁴⁾。本研究では上り坂走でピッチが低下したが、その要因のひとつはこの主動筋と拮抗筋の活動の制御の変化にあると考えられる。さらに、スウィング脚の大腿直筋のオフセットのタイミングと接地脚の大腿二頭筋の活動のオフセットのタイミングの時間差 (Scissors2) が短縮する傾向にあった ($p=0.057$)。このことは、相対的にスウィング脚の大腿直筋の

活動が反対脚の活動に対して遅延していたことを意味する。先行研究では、このScissors2の時間が長い、つまりスウィング脚の大腿直筋の活動を早期に実現している者ほど、高いピッチを獲得していたことが報告されている¹⁴⁾。これは、スプリントの技術で重要視されている技術のひとつであるシザース動作に相当する筋制御の特徴であり、Scissors2の時間の延長は、上り坂走におけるシザース動作の遅延を間接的に反映しているものと考えられる。以上より、これらの筋制御の変化が、上り坂走におけるピッチの低下の要因である可能性が考えられる。

4. 結 論

オーバーグラウンド走かつ最大努力による坂ダッシュトレーニングでは走速度、ピッチ、ストライドが減少する。このとき、下肢筋活動量は変化しないものの、大腿直筋の筋活動のタイミングがランニングサイクルの後半に有意にシフトする。その結果、スウィング脚のリカバリー動作 (股関節屈曲) のタイミングに遅延が生じ、ピッチの低下を誘発している可能性が考えられる。まとめると、オーバーグラウンド走かつ最大努力による坂ダッシュトレーニングでは、筋活動量そのものが增大するのではなく、筋活動のタイミングに影響を及ぼす可能性が示唆された。以上より、坂ダッシュトレーニングを現場で実施する際、大腿筋 (大腿直筋と大腿二頭筋) の活動のタイミングを、平地走と同等に維持させることで、高いピッチの獲得に繋がり、結果として高いパフォーマンスに繋がる可能性が示唆される。

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された。財団の御支援に深く感謝する。本研究を遂行するにあたり御協力いただいた早稲田大学競走部

にも感謝する。

文 献

- 1) Paradisis, G.P., & Cooke, C.B. The effects of sprint running training on sloping surfaces. *J. Strength Cond. Res.*, 20 (4), 767-777(2006)
- 2) Jakeman, J.R., McMullan, J., & Babraj, J.A. Efficacy of a Four-Week Uphill Sprint Training Intervention in Field Hockey Players. *J. Strength Cond. Res.*, 30 (10), 2761-2766(2016)
- 3) Kavaliauskas, M., Kilvington, R., & Babraj, J. Effects of in-season uphill sprinting on physical characteristics in semi-professional soccer players. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 57 (3), 165-170(2017)
- 4) Okudaira, M., Willwacher, S., Kuki, S., Yoshida, T., Maemura, H., & Tanigawa, S. Effect of incline on lower extremity muscle activity during sprinting. *J. Phys. Fit. Sports Med.*, 10 (2), 67-74(2021)
- 5) Slawinski, J., Dorel, S., Hug, F., Couturier, A., Fournel, V., Morin, J. B., & Hanon, C. Elite long sprint running: a comparison between incline and level training sessions. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 40 (6), 1155-1162(2008)
- 6) Yokozawa, T., Fujii, N., & Ae, M. Muscle activities of the lower limb during level and uphill running. *J. Biomech.*, 40 (15), 3467-3475(2007)
- 7) Abe, D., Fukuoka, Y., Muraki, S., Yasukouchi, A., Sakaguchi, Y., & Niihata, S. Effects of Load and Gradient on Energy Cost of Running. *J. Physiol. Anthropol.*, 30 (4), 153-160. doi:10.2114/jpa2.30.153(2011)
- 8) Swanson, S.C., & Caldwell, G.E. An integrated biomechanical analysis of high speed incline and level treadmill running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32 (6), 1146-1155(2000)
- 9) Wall-Scheffler, C.M., Chumanov, E., Steudel-Numbers, K., & Heiderscheid, B. Electromyography activity across gait and incline: The impact of muscular activity on human morphology. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 143 (4), 601-611(2010)
- 10) Van Caekenberghe, I., Segers, V., Willems, P., Gosseye, T., Aerts, P., & De Clercq, D. Mechanics of overground accelerated running vs. running on an accelerated treadmill. *Gait Posture*, 38 (1), 125-131(2013)
- 11) Van Hooren, B., Fuller, J.T., Buckley, J.D., Miller, J.R., Sewell, K., Rao, G., Willy, R.W. Is Motorized Treadmill Running Biomechanically Comparable to Overground Running? A Systematic Review and Meta-Analysis of Cross-Over Studies. *Sports medicine*, 50 (4), 785-813(2020)
- 12) Li, X., Zhou, P., & Aruin, A.S. Teager-Kaiser energy operation of surface EMG improves muscle activity onset detection. *Ann. Biomed. Eng.*, 35 (9), 1532-1538(2007)
- 13) Solnik, S., Rider, P., Steinweg, K., DeVita, P., & Hortobagyi, T. Teager-Kaiser energy operator signal conditioning improves EMG onset detection. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 110 (3), 489-498(2010)
- 14) Kakehata, G., Goto, Y., Iso, S., & Kanosue, K. Timing of Rectus Femoris and Biceps Femoris Muscle Activities in Both Legs at Maximal Running Speed. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 53 (3), 643-652(2021)
- 15) Kakehata, G., Goto, Y., Iso, S., & Kanosue, K. The Timing of Thigh Muscle Activity Is a Factor Limiting Performance in the Deceleration Phase of the 100-m Dash. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 54 (6), 1002-1012(2022)
- 16) Dorn, T.W., Schache, A.G., & Pandy, M.G. Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *J. Exp. Biol.*, 215, 1944-1956(2012)
- 17) Schache, A.G., Brown, N.A., & Pandy, M.G. Modulation of work and power by the human lower-limb joints with increasing steady-state locomotion speed. *J. Exp. Biol.*, 218, 2472-2481(2015)
- 18) Schache, A.G., Dorn, T.W., Williams, G.P., Brown, N.A., & Pandy, M.G. Lower-limb muscular strategies for increasing running speed. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 44 (10), 813-824(2014)
- 19) Howard, R.M., Conway, R., & Harrison, A.J. Muscle activity in sprinting: a review. *Sports Biomech.*, 17 (1), 1-17(2018)
- 20) Mero, A., Komi, P. V., & Gregor, R. J. Biomechanics of sprint running. A review. *Sports Med.*, 13 (6), 376-392(1992)
- 21) Devita, P., Janshen, L., Rider, P., Solnik, S., & Hortobágyi, T. Muscle work is biased toward energy generation over dissipation in non-level running. *J. Biomech.*, 41 (16), 3354-3359(2008)
- 22) Gottschall, J.S., & Kram, R. Ground reaction forces during downhill and uphill running. *J. Biomech.*, 38

- (3), 445-452(2005)
- 23) Kowalski, E., & Li, J.X. Lower limb joint angles and ground reaction forces in forefoot strike and rearfoot strike runners during overground downhill and uphill running. *Sports Biomech.*, 15 (4), 497-512 (2016)

ランニング中の足部アーチ変化および 足底荷重分布パターンの定量化

国士舘大学大学院 木内 聖
(共同研究者) 同 平野 智也
同 角田 直也
同 船渡 和男

Quantitative Analysis of Foot Arch Deformation and Plantar Load Distribution Pattern During Running

by

Akira Kiuchi, Tomoya Hirano,
Naoya Tsunoda, Kazuo Funato
Kokushikan University Graduate School of Sport System

ABSTRACT

The purpose of this study was to quantify changes in the foot medial longitudinal arch and the plantar load distribution during running. Plantar pressure measurement plate (Novel GmbH®, 100Hz), motion capture system (Oxford, 100Hz) and Force plate (Kistler, 1KHz) were synchronized. Plantar load distribution was divided into five sub-area based on anatomical measurement points. Medial longitudinal arch angle was calculated as the angle between the first metatarsal distal medial, navicular tuberosity and posterior aspect of heel, and first metatarsophalangeal joint angle as the angle between the hallux proximal end of first phalanx, first metatarsal distal and proximal medial. The plantar load was observed to shift to the forefoot during push off, and the medial longitudinal arch angle showed the largest change. Thereafter, the anterior ground reaction force tended to increase with dorsiflexion of the

metatarsophalangeal joint. Medial longitudinal arch is a flexible structure that absorbs plantar load during foot contact, and it was assumed that the dorsiflexion of the first metatarsophalangeal joint during push off contributed to the increase in foot stiffness to support forward propulsion from the forefoot.

キーワード

足底荷重, 足部アーチ, 地面反力, ランニング, キネマティクス

Keyword

Plantar load, Foot arch, Ground reaction force, Running, Kinematics

要 旨

ランニングにおける足部内側縦アーチの変化および足底荷重を定量化することを目的とした。足底圧分析機 (Novel GmbH[®], 100Hz), モーションキャプチャシステム (Oxford, 100Hz), フォースプレート (Kistler, 1KHz) を同期し, 足底を解剖学的計測点に基づいて5つに分割した。参加者8名が2.78m/sの速度でランニングを行った。内側縦アーチ角度は第一中足骨遠位端, 舟状骨, 踵骨側面のなす角度, 中足趾節関節角度は, 母趾末節骨近位端, 第一中足骨遠位端および近位端のなす角度として算出した。足底荷重は, 接地とともに後足部および前足部外側の荷重がみられ, 蹴り出し時には前足部に荷重がシフトし, 内側縦アーチ角度が最大の変化量を示した。その後, 中足趾節関節背屈に伴い前方向の地面反力が増加する傾向がみられた。内側縦アーチは, 足部接地中, 足底荷重を吸収するための柔軟な構造から, 蹴り出し時に中足趾節関節を背屈させることで剛性を高め, 前足部で蹴り出すことで前方への推進力を生み出していると推察される。

緒 言

ヒトの足部は, 3つのアーチ (内側縦アーチ, 外側縦アーチ, 中足骨アーチ) によって形成され

ている。その中でも, 内側縦アーチは, 歩行やランニング中に足底に加わる負荷に応じて接地初期の柔軟な構造から, 接地後期に硬い構造へ変化することで, 前方への推進力を生成するという重要な役割を担う¹⁾。

足部の接地中に足底に加わる負荷は足底荷重と呼ばれ, 今日までに足底圧分析機を用いて評価されてきた。足底荷重を評価する際の問題として, 足底をどの様に区分して各足底部位の荷重を定量化するかがあげられる。一般的に用いられる幾何学的方法は, 決められたアルゴリズムで足底を区分するため, 簡便に部位別の足底荷重を評価することができる。しかし, 足部のかたちは人それぞれ異なるため, 足底のどの部分にどのくらいの荷重がかかっているのか定量化して評価することが困難である。この制限を克服するために, 足の解剖学的ランドマークに基づいた区分方法が開発された^{2,3)}。一般人のジョギングや競技者のランニング動作では, 足部に関する障害の発生が高く⁴⁾, それを防止するためのシューズの設計・開発にも注視されてきた⁵⁾。ランニング動作において, 上記のスポーツ障害を予兆し, 防止するためには, 足部の機能解剖学的見地に基づいた足底荷重の評価と足部が持つ内側縦アーチの衝撃吸収が考えられるところである。しかし, 現在までランニング中の内側縦アーチの変化と足底荷重分布の定量的

分析および評価に関する試みは希少である。そこで本研究は、ランニングにおける足部接地中の内側縦アーチの変化と足底荷重分布を足の解剖学的ランドマークに基づいて定量化することを目的とした。

1. 研究方法

1.1 参加者

参加者は、健康な成人男性8名であった(年齢: 20.8 ± 3.4 歳, 身長: 174.2 ± 4.7 cm, 体重: 69.9 ± 5.6 kg)。実験実施にあたり、参加者に対し、実験の目的、方法および危険性について説明し、実験参加の同意を得た。なお、本研究は、国士舘大学大学院スポーツ・システム研究科研究論議評価委員会の承認を得て実施した(承認番号: 21014)。

1.2 データ取得

図1に実験配置図を示した。位置座標データは、光学式三次元動作分析システム VICON カ

メラ14台(Oxford社製, 以下 VICON)を用いて取得した。サンプリング周波数は100fpsとした。地面反力の測定には、フォースプレート(900×600mm, Kistler社製, 以下 FP)2台を用いた。サンプリング周波数は1kHzとした。足底荷重分布の測定には、足底圧分析機 Novel emed XL (1529×504mm, Novel GmbH[®]社製, 以下 Novel)を用いた。Novelは、1センサー5×5mm (0.25cm²)であり、1440×440mmの測定範囲の中に25344のセンサーが配列されている。1センサーの測定閾値は10kPa (1N/cm²)であり、その後5kPaの精度で圧力を測定することができる。1センサーに加わる足底荷重(N)は、1センサーの圧力値(1N/cm²)に、1センサーの面積(0.25cm²)を乗じることで算出した。サンプリング周波数は100Hzとした。3つの計測器(VICON, FPおよびNovel)は、NovelのTTL信号をVICONおよびFPに入力することで同期した。

参加者には、Novelが埋設された走路を2.78m/sでランニングするように指示を行った⁶⁾。速度

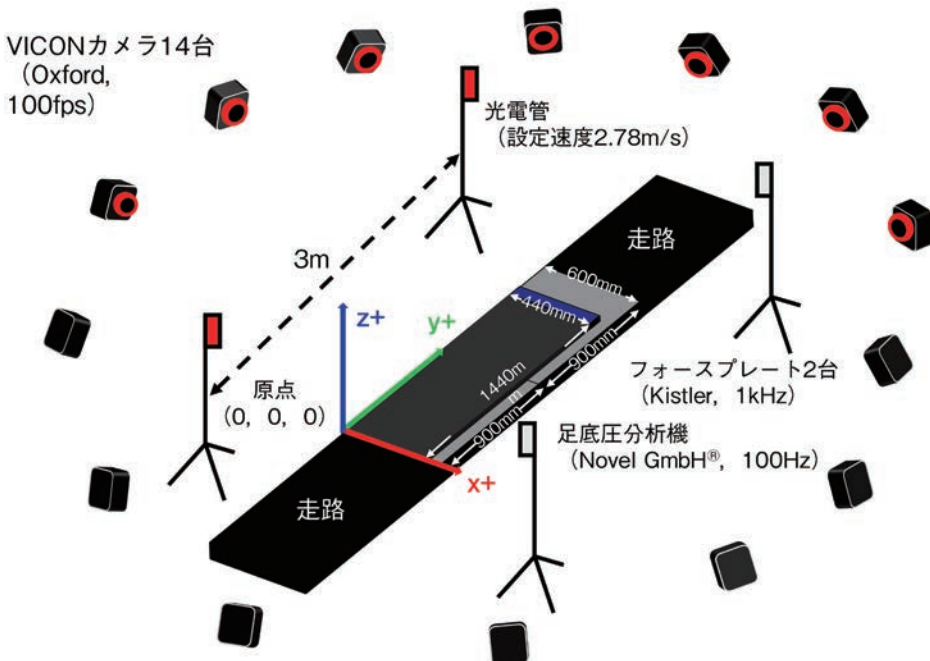


図1 実験配置図

は、光電管を測定範囲3mに設置し、通過タイムを計測し、測定範囲から通過タイムを除すことで算出した。視線が下を向いたり、Novelの測定範囲に歩幅を合わせたりせず、設定速度の±5%の範囲で走行した試技を成功試技と定義した。

1. 3 座標定義

本研究で用いたVICONおよびFPの座標系はGlobal Coordinate System座標系として定義し、左右軸をx軸、前後軸をy軸、x軸とy軸に直行した軸をz軸とした。Novel座標系とVICONおよびFP座標系の原点位置が異なるため、Novelの測定範囲上にリファレンスマーカーを4点設置し、NovelとVICONおよびFP座標系との位置関係を計測した。最終的に、各リファレンスマーカーの座標値をNovel automaskソフトウェア (Novel GmbH[®]社製) に入力することでNovel座標系の原点位置をVICONおよびFP座標系を統一した。

1. 4 足部ランドマーク貼付位置

足部解剖学的計測点から足底を区分するためにOxford Foot Modelを参考に、参加者の右足部解剖学的計測点にランドマークを貼付した (図2)。

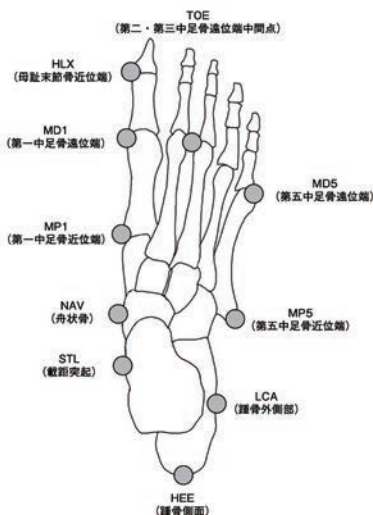


図2 足部ランドマーク貼付位置

貼付位置は、踵骨外側部 (Lateral calcaneus 以下 LCA), 載距突起 (Sustentaculum tail 以下 STL), 第一中足骨近位端 (First metatarsal proximal medial 以下 MP1), 第一中足骨遠位端 (First metatarsal distal medial 以下 MD1) 母趾末節骨近位端 (Hallux proximal end of first phalanx 以下 HLX), 第二・第三中足骨遠位端中間点 (Between second and third metatarsal head 以下 TOE), 第五中足骨近位端 (Fifth metatarsal proximal lateral 以下 MP5), 第五中足骨遠位端 (Fifth metatarsal distal lateral 以下 MD5), 踵骨側面 (Posterior aspect of heel 以下 HEE), 舟状骨 (Navicular tuberosity 以下 NAV) の合計10点とした。

1. 5 足底圧区分方法

足底圧は、先行研究^{2,3)}をもとに足部ランドマーク座標位置から5部位に分割した。図3に足底分割方法と分割された足底部位の名称を示す。VICONによって計測した足部ランドマーク座標位置 (x, y) は、Novel座標上へ鉛直に投射された。Novel座標はVICONおよびFP座標と統一されているため、1センサー計測範囲 (x座標: 5mm, y

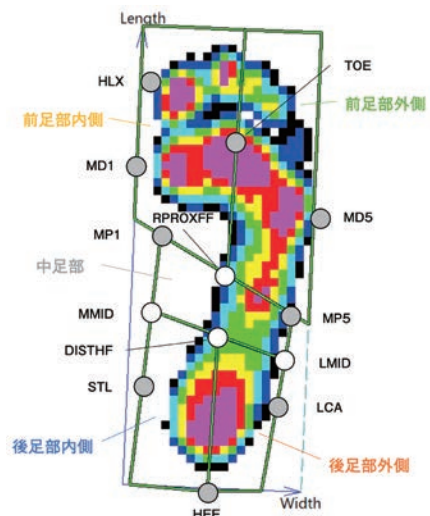


図3 足底分割方法と分割された足底部位

座標：5mm)ごとに足底を区分した。

足底圧を区分するために、足部ランドマーク座標位置から中間座標位置を算出した。MP1座標位置とSTL座標位置を結んだ中間座標位置 (Medial mid-point between MP1 and STL 以下 MMID) およびMP5とLCAを結んだ中間座標位置 (Lateral mid-point between MP5 and LCA 以下 LMID) を決定した。次に、MP1とMP5を結んだ中間座標位置 (Proximal fore foot 以下 PROXFF) およびMMID座標位置とLMID座標位置を結んだ中間座標位置 (Distal heel foot 以下 DISTHF) を算出した。最終的に、PROXFFとTOEを結んだ線を延長することにより、前足部を内側と外側に分割し、DISTHFとHEEを結ぶことにより、後足部を内側と外側に分割した。また、DISTHFとPROXFFの間を中足部とした。

1. 6 データ分析

計測したNovelデータは、Novel automaskソフトウェア (Novel GmbH[®]社製) を用いて各足底部位の荷重値を算出した。

ランドマークの位置座標データは、残渣分析法を用いて最適遮断周波数 (7Hz) を決定した後、4次のバターズ型ローパスフィルターを用いて平滑化を行った。足部キネマティクスデータとして、内側縦アーチ角度および中足趾節関節角

度をVisual3D v6 x64 (C-Motion社製) を用いて分析した。内側縦アーチ角度は、MD1、NAVおよびHEEの成す角度として、中足趾節関節角度は、180°からHLX、MD1およびMP1のなす角度を差し引いて算出した (図4)。足部キネマティクスデータは、踵接地時のデータを基準にして、足部接地中の変化量 (Δ) を求めた。

2. 研究結果

図5は、ランニング中の足底部位別の足底荷重および内側縦アーチ角度の変化量を示す。足底荷重は、接地とともに後足部の内外側および前足部外側が増加し、その後、前足部内側の荷重が増加した。足底荷重の最大値 (合計荷重値：2.55N/BW) は接地時間の40%でみられ、前足部内外側で大きな値を示す傾向であった (前足部内側：1.13N/BW, 前足部外側：1.09N/BW)。足底荷重が最大値を示す40%以降は、後足部および中足部の荷重が減少し、前足部に荷重が移行していく傾向がみられた。内側縦アーチ角度の変化量は、前足部の荷重値の増加に伴い増加する傾向がみられ、足底荷重が最大値を示す接地時間の40%付近で最大値 (15.1°) を示し、その後は急速に減少する傾向であった。

図6は、ランニング中の中足趾節関節角度の変化量および前後方向の地面反力を示す。中足趾節

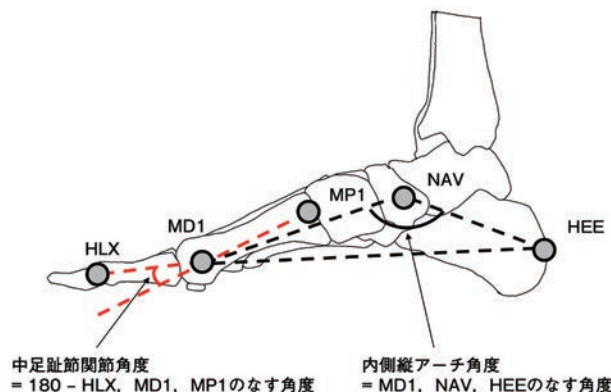


図4 足部キネマティクスデータ分析方法

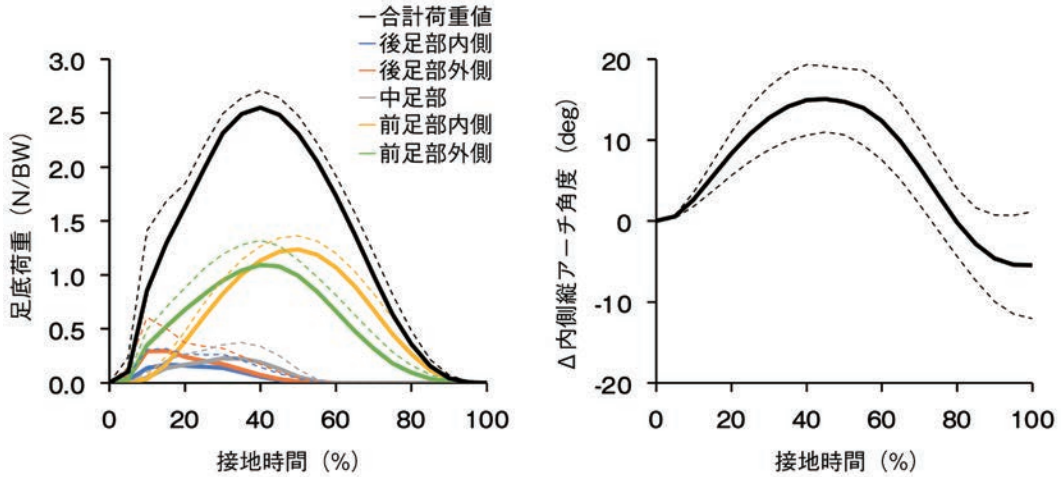


図5 ランニング中の足底部位別の足底荷重および内側縦アーチ角度の変化量

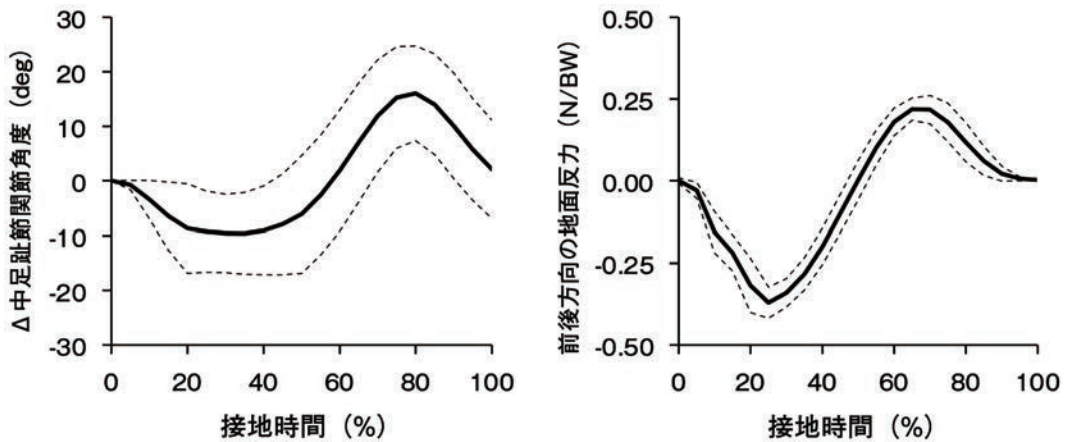


図6 ランニング中の中足趾節関節角度の変化量および前後方向の地面反力

関節角度の変化量は、足部接地後から接地時間55%まで底屈する傾向がみられ、60%以降から背屈する傾向がみられ、80%で最大値(16.1°)に達した。前後方向の地面反力は、足部接地と同時に後ろ方向の地面反力がみられ、接地時間25%で最大値(-0.37N/BW)がみられた。接地時間50%以降から前方向の地面反力が増加し、65～70%で最大値(0.22N/BW)を示した。

3. 考察

本研究は、ランニング中の足底荷重パターンの定量化を試みた。その結果、足底荷重は、接地と

ともに後足部の内外側および前足部外側の荷重に始まり、足部接地から離地までを正規化した接地時間の10%以降から前足部内側および中足部の荷重がみられ、40%で最大の荷重値がみられた。前足部外側は40%で最大値に達し、その後、徐々に減少した。前足部内側の荷重は40%以降も増加する傾向がみられ、50%で最大値に達し、その後、徐々に減少した。De Cock et al.⁷⁾は、若年成人220名のランニング中の足底圧を評価した。その結果、ランニング中の足底圧の一般的なパターンは、踵、第五中足骨、第一中足骨、第一趾の順であったと報告している。本研究結果においても

蹴り出し時に、前足部の外側から内側へ荷重がシフトする傾向がみられた。足部内側縦アーチは母趾外転筋を有し、蹴り出し時に足部剛性を高める役割を担っているとされている^{6,8)}。本研究で観察された前足部外側から内側への荷重シフトは、蹴り出し時の足部剛性を高めるための足部の機能であると考えられる。一方で、本研究結果では、明確な後足部の荷重がみられなかった。これは、実験試技を裸足でのランニングとしたため、多くの参加者が踵接地を避け、フォアフット走法またはミッドフット走法であったためであると考えられる。

内側縦アーチ角度の変化量は、最大の荷重値を示す接地時間の40%付近で最大の変化量を示し、先行研究と同様な傾向を示した⁶⁾。足部の内側縦アーチは、荷重の変化に適応するために十分な柔軟性と前方推進を可能にする剛性を持つ。最大の変化量を示した接地時間の40%付近は前足部に大きな荷重がかかっており、足部内側縦アーチは足部への負荷を吸収する役割を担っていると考えられる。Hicks⁹⁾が提唱したウィンドラスメカニズムは、中足趾節関節背屈に伴い、足底腱膜が踵骨を中足骨へ引っ張ることで内側縦アーチが拳上し足部の剛性が高まるとされている。本研究においても、中足趾節関節背屈に伴い、内側縦アーチ角度が減少する傾向がみられた。また、前後方向の地面反力をみてみると、中足趾節関節が背屈する60%以降で前方向の地面反力が増加する傾向がみられた。このことから、中足趾節関節の背屈に伴い、足部の剛性が高まり前方への推進力が高まったと推察される。

4. 総括

本研究は、ランニングにおける足部内側縦アーチの変化および足底荷重を定量化することを目的とした。その結果、解剖学的計測点によって区分された足底荷重パターンは、接地とともに後足部

の内側および前足部外側の荷重に始まり、足部接地から離地までを正規化した接地時間の10%以降から前足部内側および中足部の荷重がみられた。最大の荷重値を示す接地時間の40%付近では、前足部の内外側で高い荷重値を示し、内側縦アーチ角度は、最大の変化量を示した。前方向の地面反力が増加する接地時間の60%以降は、足底荷重の前足部外側から内側へのシフト、中足趾節関節背屈に伴う内側縦アーチ角度の減少がみられた。このことから、足部内側縦アーチは、足部接地中、足底荷重を吸収するための柔軟な構造から、蹴り出し時に中足趾節関節を背屈させることで剛性を高め、前足部で蹴り出すことで前方への推進力を生み出していると推察される。

謝辞

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

文献

- 1) Mahieu Céline, Salvia Patrick, Beyer Benoît, Rooze Marcel, Feipel Véronique, Van Sint Jan Serge: Metatarsal arch deformation and forefoot kinematics during gait in asymptomatic subjects, *International Biomechanics*, 6: 75-84(2019)
- 2) Stebbins J.A., Harrington M.E., Giacomozzi C., Thompson N., Zavatsky A., Theologis T.N.: Assessment of sub-division of plantar pressure measurement in children, *Gait & posture*, 22: 372-376(2005)
- 3) Giacomozzi Claudia, Stebbins Julie A.: Anatomical masking of pressure footprints based on the Oxford Foot Model: validation and clinical relevance, *Gait & posture*, 53: 131-138(2017)
- 4) Williams Iii Dorsey S., McClay Irene S., Hamill Joseph: Arch structure and injury patterns in runners, *Clinical biomechanics*, 16: 341-347(2001)
- 5) Boyer Katherine A., Andriacchi Thomas P.: Changes in running kinematics and kinetics in response to a rockered shoe intervention, *Clinical biomechanics*,

- 24: 872-876 (2009)
- 6) Kelly Luke A., Lichtwark Glen., Cresswell Andrew G.: Active regulation of longitudinal arch compression and recoil during walking and running, *Journal of The Royal Society Interface*, 12: 20141076 (2015)
- 7) De Cock Anneleen, De Clercq Dirk, Willems Tine, Witvrouw Erik: Temporal characteristics of foot roll-over during barefoot jogging: reference data for young adults, *Gait & posture*, 21: 432-439 (2005)
- 8) Kelly Luke A., Cresswell Andrew G., Racinais Sebastien, Whiteley Rodney, Lichtwark Glen: Intrinsic foot muscles have the capacity to control deformation of the longitudinal arch, *Journal of The Royal Society Interface*, 11: 20131188 (2014)
- 9) Hicks J.H.: The mechanics of the foot: II. The plantar aponeurosis and the arch, *Journal of anatomy*, 88: 25 (1954)

マスク着用が運動時の呼吸筋活動， 呼吸循環応答および有酸素能力に及ぼす影響

大阪教育大学 小川 剛 司

Effect of Cloth Face Mask Wearing on Exhaustive Incremental Running Among Young Men

by

Takeshi Ogawa
Osaka Kyoiku University

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effects of wearing a cloth face mask on physiological responses during exercise and running performance. Nine healthy men performed a graded load treadmill running test until exhaustion while wearing a cloth face mask (FM) and without a mask (CON). Minute ventilation and oxygen uptake were measured using a mass spectrometry metabolic analyzer, and mouth pressure (Pm) was measured and calculated as an integral Pm to assess respiratory muscle effort. Maximal minute ventilation was significantly lower in the FM condition than in the CON condition ($p < 0.05$), while an integral Pm was significantly higher in the FM condition than in the CON condition ($p < 0.05$), and Time to exhaustion tended to be lower in the FM condition ($p = 0.07$). However, VO_{2max} was not significantly different between conditions. Our results suggest that in healthy young men, wearing a cloth facemask did not affect aerobic capacity even though impairing pulmonary hyperventilation.

キーワード

マスク，有酸素能力，呼吸筋，呼吸

Keyword

face mask, aerobic capacity, respiratory muscle, pulmonary ventilation

要 旨

本研究は、マスク着用が運動時の呼吸代謝応答および運動能力に及ぼす影響を調べることを目的とした。9名の健康男子大学生が実験に参加した。実験は、布マスクを着用 (FM) およびマスクなし (CON) の条件において、トレッドミル走による漸増負荷運動を疲労困憊まで行った。運動中、呼気ガス代謝分析器を用いて、換気量 (V_E) および最大酸素摂取量 (VO_{2max}) を測定した。最大 V_E は FM で CON よりも有意に低値を示す一方で ($p < 0.05$)、口腔内圧は FM で有意に高値を示した ($p < 0.05$) ことから、マスク着用による最大 V_E の低下は呼吸抵抗の増加によって生じることが示唆された。運動継続時間は FM で CON よりも低値を示す傾向にあった ($p = 0.07$)、運動能力が低下する可能性が示唆された。一方で、 VO_{2max} にはマスクありなしで有意な差は見られなかった。布製マスクは、呼吸抵抗が低いながらも換気量を低下させ、運動能力を低下させる傾向にあるものの、有酸素能力には影響しないことが示唆された。

緒 言

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) は、2019年12月に中国で確認されてから、数ヶ月のうちに世界的流行となった。COVID-19の感染は主に飛沫核への曝露によって生じることから、その防止行動として、ソーシャルディスタンスの確保や、室内での密閉、密集を防ぐ、いわゆる「三密」の回避が推奨され、マスク装着が日常化するなど、人の生活行動を大きく変えた。フェイスマスクの着用は、人との距離を保てない場合や、室内に他者と長時間滞在する場合に、感染拡大地域におい

てはその着用の効果を認め、推奨されている^{1,2)}。運動中は、激しい呼吸により飛沫核の広がりが大きくなることがシミュレーションされている^{3,4)}。そのため、運動中であってもマスクの着用の必要性が議論されてきた。

近年、サージカルマスクやN95マスク着用時の運動パフォーマンスや呼吸・循環反応に関する研究が数多く行われている⁵⁻⁷⁾。運動中のマスクの装着は不快感の増大や、運動耐容能が低下する可能性が指摘されている^{5,6)}。また、これらのマスクの着用は呼吸抵抗を増加させ、結果として肺換気量を減少させる^{6,7)}。マスク着用によって呼吸が制限されることで、ガス交換の低下、動脈血酸素飽和度 (SaO_2) の低下が引き起こされ、結果として最大酸素摂取量 (VO_{2max}) の低下が生じることが考えられる。一方で、マスクを着用しても運動耐性や呼吸循環応答には影響を及ぼさないことを報告するものもあり⁸⁾、マスクの種類や、実験参加者の特性、運動プロトコルが異なることで、一貫した結果は得られていない。さらに、先行研究において実験条件で用いられるサージカルマスクやN95マスクは運動時に着用することはあまりなく、スポーツ実践の場面では、近年、薄手の布製フェイスマスクを着用することが多い。運動時に着用することの多い布製フェイスマスクでも、呼吸抵抗による不快感や呼吸筋活動の増大により、運動パフォーマンスを低下させるかについては十分に明らかでない。

COVID-19の感染拡大とその対策が長期に続く現在、感染拡大予防対策を取りながら、社会活動の維持する行動が求められている。マスク着用が運動時の呼吸循環応答および運動能力にどのような影響を及ぼすかについて調査することで、ス

スポーツ活動や学校体育をはじめとする社会活動の維持と、感染拡大予防のバランスの取れた施策を実行していく上で重要な基礎的な知見をもたらすものと考えられる。そこで本研究では、布製フェイスマスクの装着時の呼吸筋活動、呼吸循環応答、 VO_{2max} および運動パフォーマンスを調べることを目的として、健康な若年男性9名を対象に、フェイスマスク装着時と非装着時のトレッドミル走試験を疲労困憊するまで実施した。

1. 実験方法

1. 1 対象者

健康な男性9名を対象に呼吸器循環器系及び筋骨格系に既往歴の有無を問診し、参加意思を示した(年齢: 21.3 ± 2.0 歳,身長: 175.3 ± 5.9 cm,体重: 69.5 ± 3.8 kg)。

実験に先立ち、実験の趣旨、実験実施上の起こり得る危険性について十分に説明し、実験参加の同意を得た。本研究はヘルシンキ宣言に則り、被験者倫理・人権・個人情報保護への配慮の上に実験が遂行された。本研究は大阪教育大学倫理委員会の承認を得て行われた。

1. 2 研究手順

すべての被験者はトレッドミルによる疲労困憊までの漸増負荷走行テストをマスク装着条件(FM)およびマスクを装着せずに行う条件(CON)の2条件で行った。それぞれのテストは、別日に少なくとも48時間を空けて無作為な順序で行った。また日内変動を考慮し、各被験者内における2条件のテストは同じ時間帯(時間差2時間以内)に行われた。被験者は本実験参加前一週間以内に、実験手順について説明を受け、実験機器の装着および運動様式に慣れるために、練習を行った。被験者には、実験開始24時間前からカフェインおよびアルコールの摂取と過度な運動を行わないように指示した。テスト当日は、実験室

に入室後、身長および体重測定を行い、任意のストレッチを行った。その後トレッドミルを用いて歩行による3分間のウォーミングアップを行った。ウォーミングアップ終了後、被験者は呼気ガス分析のため、蛇管を介して質量分析計のセンサーに接続された呼気マスクを着用した。心拍出量測定のための心電図電極を6箇所貼り付けた。事故防止のために、上半身ハーネスを装着した後、測定を開始した。測定開始後、3分間の安静を保ち、テストを開始した。トレッドミルにおける走運動ではハーネスの位置を被験者に合わせて調節し、実験を通して同じ長さに調節した。また、走運動において、ランニングシューズは普段履き慣れたものを2条件のテストの両方で同じものを使用することとした。すべての実験において室内の気温を25℃に設定した。

1. 3 フェイスマスク

本研究のFM条件では、市販されている布製のフェイスマスクを用いた(表地:ポリエステル100%,裏地:ポリエステル98%,ポリウレタン2%)。フェイスマスクを着用してから呼気採取マスクを着用し、激しい呼吸時にも呼気ガスの漏れの無いようヘッドストラップで固定した(図1A)。呼気マスクを装着した後、被験者は50cmH₂Oの圧力で呼気を行い、呼気マスクに接続された蛇管の先を手で閉じた。この時験者と被験者は、漏れの音や感覚、視覚的(マスクが持ち上がっていないか、横からの気流等)に注意深く確認した(図1B)。

1. 4 漸増負荷運動テスト

本研究はBruce treadmill protocol⁹⁾を用いて漸増負荷運動テストを行った。運動負荷は3分毎にトレッドミルの速度と傾斜を増加させた(表1)。

3分間の歩行によるウォーミングアップ(3.0km/h, 0%傾斜)を行った後、実験器具を装



図1 布マスクの着用

A.布マスク着用時の呼吸マスク: 着用の手法, B.気流の漏れが無いかは蛇管出口を塞いで呼吸努力により圧力を高めて確認した.

表1 漸増負荷走行テストの負荷設定

ステージ	走速度 (km/h)	斜度 (%)
1	3.0	10
2	4.0	12
3	5.4	14
4	6.7	16
5	8.0	18
6	8.8	20
7	9.6	22

着しテストを開始した。テスト開始後、トレッドミル上での3分間の安静を行い、その後、疲労困憊に至るまで走行した。疲労困憊の基準はトレッドミル後方にある、速度に対して維持できなかった場合に、被験者の足等が通過するとトレッドミルが非常停止するセンサーの80cm手前に設けた一定ラインより、被験者が走行位置を維持できずに後ろに下がった時点を疲労困憊とし、運動を終了した。

1. 5 測定項目

呼吸ガスの測定は、蛇管を通して呼吸採取マスクに接続された質量分析計 (ARCO-2000N, ARCO, Japan) を用いて呼吸ガスを分析することで運動中連続的に測定した。Breath by breath法で酸素摂取量 (VO_2)、二酸化炭素排出量 (V_{CO_2})、分時換気量 (V_E)、一回換気量 (VT)、呼吸数 (f_R)

を測定した。質量分析計は校正ガス (大気相当: O_2 , 20.90%, CO_2 , 0.05%, N_2 , Balance) を用いて校正した。各パラメーターは60秒毎に平均して、運動中のその最大値を解析に用いた。最大酸素摂取量 (VO_{2max}) は、漸増負荷運動テストにおける VO_2 を1分毎に平均し、その最大値を用いた。 VO_{2max} の判定条件として呼吸交換比が1.10以上、最大心拍数が予想最大心拍数 ($220 - \text{年齢}$) の90%を超える、走速度の増加にも関わらず VO_2 が定常に達する、のいずれか2つ以上の条件を満たされていることとし、すべてのテストにおいて確認した。心拍数 (HR)、一回拍出量 (SV) 及び心拍出量 (CO) は、インピーダンス式心拍出量計 (Physio Flow Q-Link, Manatec Biomedical, France) を用いて1拍ごとに測定し、60秒毎に平均して解析に用いた。口腔内圧を圧力トランスデューサーカテーテル (MicroSensor Basic Kit, Codman & Shurtleff, Inc., MA) を呼吸マスク内に固定し、フェイスマスクや呼吸マスクを装着した場合にもカテーテルの先端が皮膚及びマスクに当たらないことを確認した上で測定を行った。口腔内圧はAD変換器 (PowerLab 8a/d, AD instruments, Australia) を介してサンプリング周波数200Hzでノートパソコン

に記録し、波形分析ソフト (Lab Chart ver.7, AD instruments, Australia) を用いて解析した。口腔内圧の変化は、吸気筋群 (吸気圧) および呼気筋群 (呼気圧) の活動によって発生することから、得られた口腔内圧は、吸気圧および呼気圧の双方の絶対値を60秒毎に積分し解析に用いた。動脈血酸素飽和度 (Sao₂) は、被験者の全額部からPulse Oximeter (N-560, Covidien Med, Ireland) を用いて測定し、60秒毎に記録した。主観的運動強度 (RPE) はBorgスケールを用いて測定し、呼吸困難感 Modified Borgスケール¹⁰⁾ を用いて測定した。RPE及び呼吸困難感は1分毎に被験者に尋ね、記録した。

1. 6 統計解析

実験によって得られたデータは全て平均値±標準偏差で示した。全ての統計解析はデータ解析ソフトSPSS 28 (IBM, NY) を用いた。布マスク装着条件間の比較にはpaired t-testを用いた。効果量はCohen's d (d) を算出し、それぞれ効果量が0.8, 0.5, および0.2となった時を効果大, 中, 小とした。RPEおよび呼吸困難感、繰り返しのある2元配置分散分析 (マスク条件×走行ステージ) を用いた。効果量は偏イータ2乗 (ηp^2) を算出し、それぞれ効果量が0.01, 0.06, および0.14となった時を効果大, 中, 小とした。有意水準 (P) は5%未満とした。

2. 研究結果

2. 1 呼吸代謝応答

漸増負荷運動テストの結果を表2に示す。また、図2に最大酸素摂取量 (VO_{2max}) および漸増負荷運動走行テストにおける疲労困憊までの運動継続時間の結果を示した。VO_{2max} はFMとCONで有意な差は見られず (P=0.76, d=0.58), 運動継続時間はFMにおいてCONよりも有意ではないものの低値を示す傾向にあり (P=0.02, d=0.68), その低下率は2.6 ± 3.4%であった。V_Emax はFMにおいてCONと比較して有意に低値を示し (P<0.001, d=1.42), その低下率は13.4 ± 10.7%であった。VTはFMでCONよりも有意に低かった (P=0.03, d=0.85), f_RはMaskでCONよりも有意ではないものの低い傾向にあった (P=0.04, d=1.66)。∫ PmはMaskでCONよりも20.7 ± 22.6%有意に高値を示した (P=0.02, d=0.78)。

CO, SV, HR, は、MaskとCONで有意な差は見られなかった (表2)。Sao₂についても両条件間で有意な差は見られなかった。

2. 2 呼吸困難感

RPEおよび呼吸困難感の漸増負荷走行中の結果を図3に示す。RPEおよび呼吸困難感ともに交互作用 (マスク条件×走行ステージ) は有意でなかった (P=0.09およびP=0.12)。また、マスク着

表2 漸増負荷走行テストにおける呼吸循環応答の最大値

	マスクあり	マスクなし	P値	効果量 (d)
V _E max (L/min)	98.9 ± 11.6	117.6 ± 11.6	<0.001	1.42
VT (L)	2.2 ± 0.3	2.4 ± 0.3	0.03	0.85
f _R (breath/min)	51.2 ± 5.4	54.2 ± 5.2	0.04	0.78
V _{CO₂peak} (ml/min)	3780 ± 390	4179 ± 526	0.05	0.76
CO _{max} (L/min)	24.5 ± 6.0	25.4 ± 5.2	0.71	0.13
SV (ml)	135.1 ± 31.8	142.6 ± 33.5	0.59	0.18
HR (beat/min)	189.2 ± 7.9	190.1 ± 7.7	0.55	0.12
Sao ₂ (%)	93.8 ± 2.5	93.0 ± 1.7	0.33	0.35
∫ Pm (cmH ₂ O.min)	166.3 ± 29.1	138.5 ± 15.3	0.02	0.95

数値は平均 ± 標準偏差。V_Emax, 最大換気量; VT, 一回換気量; f_R, 呼吸数; V_{CO₂peak}, 最高二酸化炭素排出量; CO_{max}, 最大心拍出量; SV, 一回拍出量; HR, 心拍数; Sao₂, 動脈血酸素飽和度; ∫ Pm, 口腔内圧積分値。

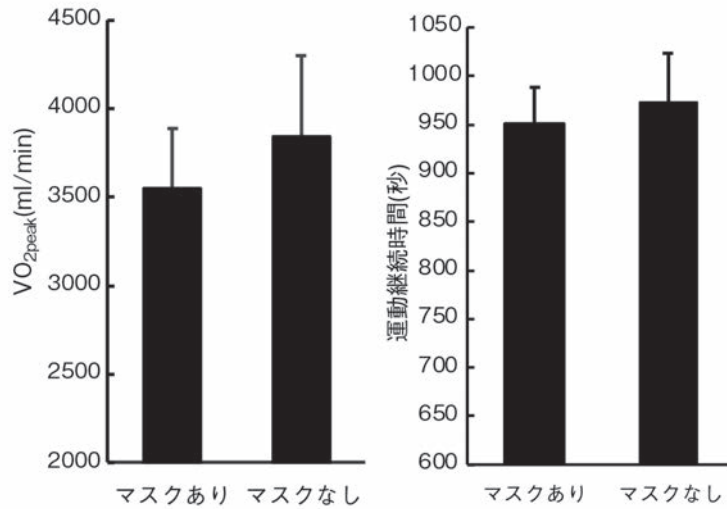


図2 VO_{2max}および運動継続時間

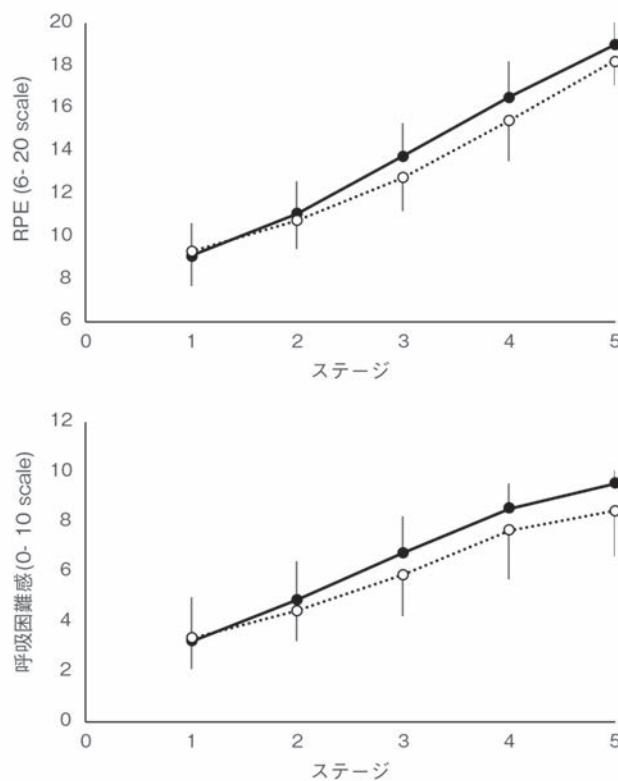


図3 最大下走行各ステージにおけるRPEおよび呼吸困難感

図は走行運動における第5ステージまでの各ステージにおける結果を示す。上がRPE, 下が呼吸困難感を示す。●はマスクあり条件, ○はマスクなし条件を示す。RPE, 呼吸困難感双方において交互作用 (マスク条件×走行ステージ) は有意でなかった (P=0.09およびP=0.12)。

用条件の主効果も有意ではなかった (P=0.25およびP=0.05)。しかしながら, 呼吸困難感のマスク条件の $p \eta^2$ は0.32と高かった。

3. 考察

先行研究において不織布マスクやN95マスクを

着用しての運動は、運動中の不快感を増大させ、運動耐性を低下させる可能性があることが報告されている¹⁾。また、マスクを着用しての運動は熱放散を妨げ、熱中症の危険性を高めることも指摘されている¹⁾。マスク着用運動中の生理的反応として、最大下運動時の呼吸困難の増加、HRや血圧の上昇などが確認されているものの、ガス交換効率の低下によるSao₂の低下、VO_{2max}の減少があるかどうかについては、結果が一致していない^{5-8, 11, 12)}。これら先行研究の多くは不織布マスクでの検討であり、COVID-19感染拡大以降にスポーツ実践において、よく着用されるようになった布マスクでの検討は少ない。本研究はスポーツの実践で使用されるような低抵抗の布製マスク装着時の最大走運動時の呼吸循環応答を調べることを目的とした。その結果、布製フェイスマスクの装着によって口腔内圧の増加とV_Emaxの大きな低下が観察され、呼吸抵抗と呼吸筋活動が増加することで換気増大が制限されることが示唆された。一方で、循環応答はマスク条件間で有意な差は見られなかった。さらに、布製フェイスマスクの装着はVO_{2max}に対して影響は少ないこと、運動パフォーマンスの低下が誘発される可能性が示唆された。

多くの非鍛錬者では激しい運動中でもSao₂は維持されており、肺換気量そのものは正常肺のガス交換に影響を与えないと考えられている。一方で、持久的鍛錬者では運動誘発性動脈性低酸素血症 (EIAH) が見られることがある。持久的鍛錬者では運動中の高すぎる心拍量による肺胞における拡散時間の短縮や、ガス交換に関与しない血流 (死腔) の増加の他、不十分な換気量によるガス交換制限が、換気/血流比の不均衡をもたらし、動静脈酸素格差の拡大を生じさせることがその原因として考えられている^{13, 14)}。特に換気応答の制限に注目すると、高強度運動時には胸郭の物理的な制限や気道抵抗の増大はV_Eを制限し、

Sao₂レベルに影響することが報告されている¹⁵⁾。本研究の被験者においては、CON条件においてすでにSao₂は安静時 (99%) と比較して5%程度低下しており、若干であるがSao₂の低下が観察された。そこで、マスク装着によってV_Eが制限されるのであれば、Sao₂の大きな低下が見られ、VO_{2max}も低下する可能性があったが、結果としては、FM条件でCON条件よりもV_Eは大きく低下したものの、フェイスマスクを装着してもSao₂に差が見られず、布製マスクの装着はV_Eの高さ自体には影響するものの、ガス交換を悪化させないことが示唆された。

先行研究では、サージカルマスクやN95マスクを着用しての運動は、呼吸困難感や不快感を増大させることが報告され、これが運動パフォーマンスに影響することが示唆されている^{5, 11)}。しかしながら、呼吸困難感FM条件で高く推移する傾向にあるものの、有意ではなかった。本研究で用いた、布製のフェイスマスクは医療用マスクよりも呼吸の抵抗が低かったことが予想され¹⁶⁾、運動時の呼吸困難感はそれほど高まらないことが示唆された。

運動時の換気増大に対して、呼吸筋活動は指数関数的に増大し、呼吸筋での酸素消費量は増大する¹⁷⁾。そのため、高強度運動時には活動筋と呼吸筋の間で、血流競合が生じることが知られており、呼吸筋活動の増大は活動筋への血流量を制限することが報告されている^{18, 19)}。したがって、呼吸筋活動の増大は運動パフォーマンスの制限要因になりうるということが示唆されている²⁰⁾。本研究で算出した口腔内圧積分値は、正確な呼吸筋仕事量ではないものの、FM条件においてCON条件よりも高値を示しており、フェイスマスクの着用によって呼吸抵抗が高まり、呼吸筋活動が増大したことが考えられる。フェイスマスク着用によって、呼吸筋努力が増加し、活動筋との血流競合が生じることで、活動筋への血流が制限された可能

性があり、運動パフォーマンス低下傾向の一因となった可能性がある。

フェイスマスクを装着して運動した場合の循環応答については、N95マスクの場合、最大下運動強度では血圧が上昇すること⁶⁾や、心拍数が高くなる傾向がある⁷⁾一方で、最大心拍出量は影響を受けないことが報告されている⁵⁾。本研究では、若い男性では布製フェイスマスクを装着しても最大心拍出量に影響がないことを示唆する結果となった。

本研究の限界について、本研究の被験者は、健康な若い男性であった。本研究の結果はすべての人において、布製マスクを着用しても有酸素能力には影響しないと結論づけることはできない。子供や高齢者、慢性呼吸器疾患患者など、体力特性や年齢、呼吸器疾患の有無により、異なる結果が得られることが予想される²¹⁾。一方で、本研究では、呼気ガス採取マスクと布製マスクを重ねた状態で運動テストを実施した。そのため、ガス採取用マスクは呼吸抵抗が小さいとはいえ、実際の運動状況よりも高い呼吸負荷がかかっていたことが考えられる。したがって、本研究で得られた結果は、布製フェイスマスクの効果を過大評価する可能性がある。

4. まとめ

本研究では、布製フェイスマスクを着用した最大運動時の呼吸循環応答および有酸素能力を検討した。その結果、布製フェイスマスクを装着しての最大走行時には、呼吸筋活動が高まり、 V_E が低下するものの、 VO_{2max} は非装着時と有意な差がなかった。本研究の結果から、健康な若年男性において布製マスクを装着すると、ガス交換や有酸素能力に影響を与えることなく運動が可能であるが、運動能力が低下する可能性があることが明らかとなったこれらの結果から、COVID-19流行地では、大きな飛沫の飛散を防ぐことができる布

デサントスポーツ科学 Vol. 44

製マスクを着用して運動することは、COVID-19流行地において人との距離を保てない屋内などでは認められるかもしれない。

謝 辞

本研究に対して助成を賜った財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、実験にご協力いただきました対象者の皆様ならびに、実験遂行に協力いただきました平野由夏様に深く感謝いたします。

文 献

- 1) WHO. COVID-19 infection prevention and control living guideline: mask use in community settings. <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1403813/retrieve> (2021)
- 2) Esposito, S., Principi, N., Leung, C.C. & Migliori, G. B. Universal use of face masks for success Against COVID-19: evidence and implications for prevention policies. *Eur. Respir. J.* **55**, 1-5 (2020)
- 3) Chandrasekaran, B., Fernandes, S. "Exercise with facemask; Are we handling a devil's sword?" - A physiological hypothesis. *Med. Hypo.* **144**, 110002 (2020)
- 4) Jones, N.R., Qureshi, Z.U., Temple, R.J., Larwood, J.P., Greenhalgh, T., & Bourouiba, L. Two meters or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19? *BMJ* **370**, m3223 (2020)
- 5) Fikenzer, S., Uhe, T., Lavall, D., Rudolph, U., Falz, R., Busse, M., ... & Laufs, U. Effects of surgical and FFP2/N95 face masks on cardiopulmonary exercise capacity. *Clin. Res. Cardiol.* **109**, 1522-1530 (2020)
- 6) Lässig, J., Falz, R., Pökel, C., Fikenzer, S., Laufs, U., Schulze, A., ... & Busse, M. Effects of surgical face masks on cardiopulmonary parameters during steady state exercise. *Sci. Rep.* **10**, 22363 (2020)
- 7) Umutlu, G., Acar, N.E., Sinar, D.S., Akarsu, G., Güven, E., Yildirim, I. COVID-19 and physical activity in sedentary individuals: differences in metabolic, cardiovascular, and respiratory responses during aerobic exercise performed with and without a surgical face masks. *J. Sports Med. Phys. Fit.* (2021)
- 8) Shaw, K., Butcher, S., Ko, J., Zello, G.A., &

- Chilibeck, P.D. Wearing of Cloth or Disposable Surgical Face Masks has no effect on Vigorous Exercise Performance in Healthy Individuals. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **17**, 8110 (2020)
- 9) Bruce, R., Kusumi, F., Hosmer, D. Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *Am. Heart J.*, **85**, 546-562 (1973)
 - 10) Kendrick, K.R., Baxi, S.C., Smith, R.M. Usefulness of the modified 0-10 Borg scale in assessing the degree of dyspnea in patients with COPD and asthma. *J. Emerg. Nurs.* **26**, 216-222 (2000)
 - 11) Driver, S., Reynolds, M., Brown, K., Vingren, J. L., Hill, D. W., Bennett, M., ... & Jones, A. Effects of wearing a cloth face mask on performance, physiological and perceptual responses during a graded treadmill running exercise test. *Br. J. Sports Med.* **56**, 107-113 (2022)
 - 12) Shaw, K.A., Zello, G.A., Butcher, S.J., Ko, J.B., Bertrand, L., Chilibeck, P.D. The impact of face masks on performance and physiological outcomes during exercise: a systematic review and meta-analysis. *Appl. Physiol. Nutr. Metabo.* **46**, 693-703 (2021)
 - 13) Harms, C.A., Stager, J.M. Low chemoresponsiveness and inadequate hyperventilation contribute to exercise-induced hypoxemia. *J. Appl. Physiol.* **79**, 575-80 (1995)
 - 14) Dempsey, J.A., Wagner, P.D. Exercise-induced arterial hypoxemia. *J. Appl. Physiol.* **87**, 1997-2006 (1999)
 - 15) Powers, S.K., Jacques, M., Richard, R., & Beadle, R.E. Effects of breathing a normoxic He-O₂ gas mixture on exercise tolerance and VO₂ max. *Int. J. Sports med.* **7**, 217-221 (1986)
 - 16) Hopkins, S.R., Dominelli, P.B., Davis, C.K., Guenette, J.A., Luks, A.M., Molgat-Seon, Y., Sá, R.C., Sheel, A.W., Swenson, E.R., Stickland, M.K. Face Masks and the Cardiorespiratory Response to Physical Activity in Health and Disease. *Ann. Am. Thorac. Soc.* **18**, 399-407 (2021)
 - 17) Aaron, E.A., Seow, K.C., Johnson, B.D., Dempsey, J.A. Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J. Appl. Physiol.* **72**, 1818-1825 (1992)
 - 18) Harms, C., Wetter, T., McClaran, S., Pegelow, D., Nিকে, G., Nelson, W., Hanson, P., Dempsey, J. Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *J. Appl. Physiol.* **85**, 609-618 (1998)
 - 19) Harms, C.A., Babcock, M.A., McClaran, S.R., Pegelow, D.F., Nিকে, G.A., Nelson, W.B., Dempsey, J.A. Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *J. Appl. Physiol.* **82**, 1573-1583 (1997)
 - 20) Harms, C.A., Wetter, T.J., St. Croix, C.M., Pegelow, D.F., Dempsey, J.A. Effects of respiratory muscle work on exercise performance. *J. Appl. Physiol.* **89**, 131-138 (2000)
 - 21) Alkan, B., Ozalevli, S., Akkoyun, Sert O. Maximal exercise outcomes with a face mask: the effects of gender and age differences on cardiorespiratory responses. *Ir. J. Med. Sci.* **26**, 1-7 (2021)

運動前の食事摂取の違いが動脈ステイフネスと 有酸素性運動パフォーマンスに及ぼす影響 —植物性ベース食品と動物性ベース食品の比較—

日本体育大学 岡本孝信

Effects of Differences in Pre-Exercise Dietary Intake on Arterial Stiffness and Aerobic Exercise Performance -Comparison of Vegetable and Animal Based-Foods-

by

Takanobu Okamoto
Nippon Sport Science University

ABSTRACT

This study was investigated the effects of vegetable-based versus animal-based dietary intake before exercise on arterial stiffness and aerobic exercise performance. Eleven healthy young adults performed a vegetable-based or animal-based dietary trial on separate days in a randomized crossover trial. We matched the protein, fat, and carbohydrate (PFC) balance of vegetable and animal-based diets. Carotid-femoral pulse wave velocity (cfPWV), blood pressure and heart rate were measured before and 120 min after the meal on the both vegetable-based or animal-based dietary trial. After the all measurement, aerobic performance was assessed using a graded power test. The cfPWV in the vegetable-based diet significantly decreased after the meal ($p < 0.05$). However, The cfPWV in the animal-based diet did not differ before and after meal. Blood pressure and heart rate did not differ before and after meal in the both trials. Maximal oxygen uptake was higher in the vegetable-based diet trial than in the animal-based diet trial ($P < 0.05$). These results indicate that pre-exercise vegetable-based dietary intake may reduce arterial stiffness, and may improve aerobic exercise

performance.

キーワード

食事摂取, 脈波伝播速度, 最大酸素摂取量, 血圧, 心拍数

Keyword

Dietary intake, Pulse wave velocity, Maximal oxygen uptake, Blood pressure, Heart rate

要 旨

本研究は運動前の植物性ベース食品と動物性ベース食品の摂取が動脈ステイフネスと有酸素性運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討した。11名の健康な若年成人男性(21歳~27歳)を対象に, タンパク質, 脂質, 炭水化物(PFC)のバランスを同様の比率で設定された植物性ベース食品(植物性条件)または動物性ベース食品(動物性条件)条件をそれぞれ別々の日に実施した。植物性または動物性条件において, 食品摂取前および食品摂取120分後に頸動脈-大腿動脈間脈波伝播速度(cfPWV), 血圧および心拍数を測定した。全ての測定終了後, 有酸素性運動パフォーマンスとして最大酸素摂取量を測定した。植物性条件では, 食後にcfPWVが有意に減少した($p < 0.05$)。しかし, 動物性条件におけるcfPWVは, 食前と食後で有意差が認められなかった。両条件において, 食事前後で血圧および心拍数に有意差は認められなかった。最大酸素摂取量は, 植物性条件において動物性条件と比較して有意に高値を示した($P < 0.05$)。本研究の結果から, 運動前の植物性ベースの食品摂取は動脈ステイフネスを低下させ, 最大酸素摂取量を向上させる可能性が示唆された。

緒 言

動脈ステイフネス(硬さ)の増大は心血管系疾患の独立した危険因子である¹⁾。動脈ステイフネ

スは加齢や様々な生活習慣にともない増大するため, その増加の抑制や改善が心血管系疾患発症の一次予防として重要であろう。中でも, 頸動脈-大腿脈波伝播速度(cfPWV)で評価した中心動脈ステイフネスの上昇は, 心筋梗塞または脳卒中等の将来の心血管イベントおよび全死因死亡の強力な予測因子である²⁻⁴⁾。したがって, 中心動脈ステイフネスの上昇を出来るだけ抑えることは, 心血管疾患の予防に重要である。

世界的な食事志向の変化にともない, 植物性食品摂取を中心としたベジタリアンやヴィーガンといった菜食者は毎年世界各国で増加傾向にある⁵⁾。植物性食品には, 硝酸塩, 亜硝酸塩やフラボノイドなどが豊富に含まれており, 動脈機能に対して好影響を与えることが報告されている。実際, 植物性食品の摂取を中心とした菜食者は雑食者と比較して, 動脈ステイフネスの指標である脈波伝播速度(pulse wave velocity: PWV)や頸動脈内中膜複合体厚が有意に低く⁵⁾, 血管内皮機能の指標である血流依存性血管拡張反応が有意に高いことが示された⁶⁾。一方, 日常的食事における菜食者は雑食者と比較して, 最大酸素摂取量(VO_2max)を始めとする有酸素性運動パフォーマンスが有意に高いことが報告されている⁷⁾。このように, 植物性食品の摂取は動脈機能のみならず, 有酸素性運動パフォーマンスの向上に有効である可能性が推測される。

近年, 中心動脈は有酸素性運動パフォーマンスと関連することが報告されており, 加齢にともな

う動脈スティフネスの増大がVO₂maxの低下や肥満度 (BMI) と関連することが明らかにされている⁸⁾。また, Fernberg et al.⁸⁾ は, 若年者であってもVO₂maxが低い場合は動脈伸展性が低いことを報告している。さらに, われわれはVO₂maxと動脈スティフネスの日差変動とその関係性について検討し, 動脈スティフネスが低い日はVO₂maxが高く, 動脈スティフネスが高い日のVO₂maxは低いことを報告している⁹⁾。しかし, 運動前の植物性食品の摂取が動脈スティフネスや有酸素性運動パフォーマンスに及ぼす影響については明らかにされていない。

本研究では, 運動前の一回の食事摂取の違いが動脈スティフネスおよび有酸素性運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討することを目的とした。

1. 方法

1. 1 対象者

対象者は定期的な運動習慣および喫煙習慣のない健康な成人男性11名(年齢:21歳~27歳, 身長:171.1 ± 5.0cm, 体重:63.7 ± 5.8kg, 体脂肪率:14.9 ± 4.1%, BMI:21.8 ± 2.0kg/m²)とした。なお, 対象者の選定においては, 国際標準化身体活動質問票 (IPAQ) 日本語短縮版を用いて低身体活動と評価された者を対象とした(表1)。実験の開始にあたり, ヘルシンキ宣言の原則に基づいて, 本研究の目的と実験手順について文章および口頭で十分に説明し, 全ての参加者から書面における実験

表1 対象者の身体特性

年齢 (平均:歳)	22.6 ± 1.8
年齢 (範囲:歳)	21-27
身長 (cm)	171.1 ± 5.0
体重 (kg)	63.7 ± 5.8
体脂肪 (%)	14.9 ± 4.1
BMI (kg/m ²)	21.8 ± 2.0
身体活動量	低い
喫煙習慣	なし

BMI:体格指数

参加への同意を得た。

なお, 本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認(承認番号第021-H026号)を得て実施した。

1. 2 身体組成の測定

身長は身長計(株式会社ヤガミ製:YG-200)を用いて0.1cm単位で測定した。体重および体脂肪はインピーダンス法により体組成計(株式会社インボディー・ジャパン製:Inbody770)を用いて測定した。

1. 3 実験プロトコル

対象者は, 実験室来室後に気温23℃, 湿度50%に設定した人工気候室にて仰臥位で10分間の安静を取った。中心動脈の伸展性の測定として大動脈-大腿間脈波伝播速度(cfPWV)を, 下肢動脈伸展性の測定として大腿動脈-足首間脈波伝播速度(faPWV)を測定した。また, 上腕動脈の血圧および心拍数を測定した。全ての事前測定が終了後, 被験者は指定の時間から植物性ベース食品または動物性ベース食品を摂取した。食事2時間後から動脈機能の測定を行うため, 再度測定前に仰臥位で10分間の安静を取り, cfPWV, faPWV, 血圧および心拍数の測定を行った。その後, 自転車エルゴメーター(Lode社製:Corivalcpet)を用いた漸増負荷試験を実施し, VO₂maxを測定した(図1)。

各条件はクロスオーバーで実施され, 1週間以上の条件間隔で実験を行った。

1. 4 植物性ベース食品および動物性ベース食品

対象者は植物性ベース食品と動物性ベース食品の摂取を行った。植物性および動物性ベース食品の両方において, PFC(タンパク質, 脂質, 炭水化物)バランスをエネルギー生産栄養素バランスの目標量内(タンパク質:13~20%, 脂質:20~30%, 炭水化物:50~65%)に収まるよう同

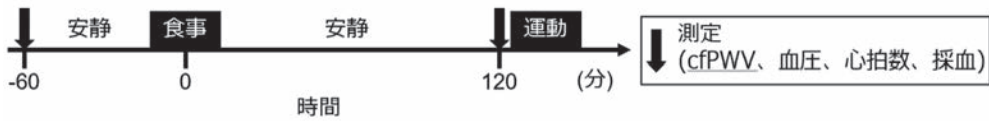


図1 実験プロトコル
cfPWV: 頸動脈-大腿動脈脈波伝播速度

様に設定した。PFCバランスは、PFCそれぞれのカロリー（タンパク質:4kcal, 脂質:9kcal, 糖質:4kcal）と1日の推定エネルギー必要量から目標量内に収まるよう算出した。

推定エネルギー必要量 (kcal/日) = 基礎代謝量 (kcal/日) × 身体活動レベル¹⁰⁾

植物性ベース食品は米類、野菜、穀物、豆類で構成されていた。一方、動物性ベース食品は米類、肉類、野菜で構成されていた。なお、植物性、動物性ベース群共、卵製品や乳製品は摂取しなかった。

1. 5 動脈スティフネスの測定

本研究では、大腿動脈および下肢の動脈スティフネスをそれぞれ反映する頸動脈-大腿動脈PWV (cfPWV) および大腿骨-足首PWV (faPWV) を測定した。cfPWVおよびfaPWVの測定には、血圧脈波検査装置 (formPWV/ABI, フクダコーリン社製, 東京, 日本) を使用した。本装置は、心音図、心電図、脈波および血圧を同時に測定することで、動脈スティフネスを非侵襲的に測定することが可能である。PWVの測定に先立って、対象者を仰臥位にて20分間安静にさせた。

cfPWVは以下の式より算出した。

$$\text{cfPWV} = \text{Dcf} / \text{Tcf}$$

Dcfは頸動脈起始部から大腿動脈に当たったトノメトリーセンサーまでの距離を、Tcfは頸動脈から大腿動脈脈波の切痕までの時間差を示す。

faPWVは足関節のセンサーと大腿動脈のセンサーから得られる足関節動脈波と大腿動脈波の立

ち上がり時間の時間差を基に算出された。

1. 6 血圧および心拍数の測定

上腕動脈の収縮期血圧および拡張期血圧は血圧脈波検査装置 (フクダコーリン株式会社製: FORM -5 PWV/ABI) を用いて上腕にオシロメトリーセンサーを取り付けて動脈の血圧波形を記録して評価した。頸動脈収縮期血圧は同じ血圧脈波検査装置を用いて頸動脈にトノメトリーセンサーを取り付けて血圧波形を記録して評価した。プレチスモグラフィーを用いて得られた圧力信号は、収縮期血圧および拡張期血圧の値を等しくすることで校正し、平均動脈血圧を算出するために使用された。

心拍数は両手首に心電図センサーを装着して評価した。

1. 7 最大酸素摂取量の測定

最大酸素摂取量 (VO₂max) の測定は自転車エルゴメーター (Lode社製: Corival 1000SS) を用いた運動負荷試験を行った。1分間安静を保った後、20Wで1分のウォームアップを行い、1分間で20W分徐々に増加するプログラムで疲労困憊まで測定した。運動中は電子メトロノームに従って所定のペダリング頻度 (60回転/分) を保った。運動中の呼気ガスは、呼気ガス分析装置 (ミナト医科学株式会社製: AE-310S) を用いてブレスバイブレス法で測定した。VO₂maxは、呼吸交換比が>1.15かつ、VO₂がプラトーに達したときの30秒平均の最大値を酸素摂取量と定義した。

1. 8 血糖値

検者がメーカーのマニュアルに従って、看護師が採血をした採血針の先から採血針（株式会社三和化学研究所製：アイピット）に血液（約2 μ L）を採取し、自己検査用グルコース測定器（PHCホールディングス株式会社製：GT-1830グルコガード™ Gブラック）にセンサー（アークレイ株式会社：自己検査用グルコースキット Gセンサー）を注入後、血液を吸入してグルコースオキシダーゼ酵素電極法により血糖値の測定を行った。

1. 9 血液生化学分析

血液サンプルは、採血針（テルモ株式会社：シユアシールドSV採血セット）を用いて各参加者の非利き腕の尺骨静脈から収集した。1 mLの蒸留水を加えた後、全てのサンプルを4,000RCFで15分間遠心分離し、血清分注後に冷凍保存（5℃）した。

分析項目は、中性脂肪（TG）、総コレステロール、高比重リポタンパク（HDL）-コレステロール、低比重リポタンパク（LDL）コレステロールとした。

中性脂肪（TG）は酵素法（遊離グリセロール消去法）、総コレステロール、HDLコレステロールおよびLDL-コレステロールは酵素法（直接法）により測定した。

1. 10 統計処理

すべてのデータは平均値±標準偏差で示した。統計解析には統計解析ソフトウェア（IBM：SPSS

Statistics Ver.27.0）を用いた。測定データの経時的変化の比較には、繰り返しのある2元配置分散分析（条件×時間）を行い、有意差が認められた場合は下位検定としてBonferroni法による多重比較を行った。VO₂maxの比較には対応のあるt検定を用いた。統計処理の有意水準は危険率5%未満とした。

2. 結果

2. 1 対象者の特性

表1に本研究の対象者11名の身体特性を示した。本研究は非肥満者で身体活動量が低く、喫煙習慣がない者を対象とした。

cfPWVの変化

表2に、植物性および動物性条件における食事前後のcfPWVの変化を示した。食前のcfPWVは植物性条件および動物性条件の間に有意差を認めなかった。植物性条件におけるcfPWVは食前と比較して食後において有意に低下した（p<0.05）。一方、動物性条件におけるcfPWVは摂取前後において有意な変化は認められなかった。

表2 植物性および動物性条件における食事前後のcfPWVの変化

cfPWV (cm/秒)	食前	食後
植物性条件 (n=11)	860 ± 66	790 ± 95*
動物性条件 (n=11)	826 ± 63	835 ± 85

cfPWV: 頸動脈-大腿動脈間脈波伝播速度

* p<0.05 vs. 食前

faPWV、血圧および心拍数の変化

表3に、植物性および動物性条件における食事前後のfaPWV、血圧および心拍数の変化を示し

表3 植物性および動物性条件における食事前後のfaPWV、血圧および心拍数の変化

	植物性条件 (n=11)		動物性条件 (n=11)	
	食前	食後	食前	食後
faPWV (cm/秒)	918 ± 144	966 ± 119	921 ± 122	937 ± 98
収縮期血圧 (mmHg)	115 ± 6	117 ± 10	114 ± 10	116 ± 7
拡張期血圧 (mmHg)	66 ± 5	65 ± 8	64 ± 7	65 ± 6
平均血圧 (mmHg)	83 ± 5	84 ± 7	80 ± 8	82 ± 5
脈圧 (mmHg)	49 ± 5	52 ± 4	50 ± 7	51 ± 6
心拍数 (bpm)	53 ± 8	56 ± 10	54 ± 6	57 ± 8

faPWV: 大腿動脈-足首間脈波伝播速度

た。食前のfaPWV, 血圧および心拍数は植物性条件および動物性条件の間に有意差を認めなかった。faPWV, 血圧および心拍数は両条件において食前と比較し, 食後に有意な変化は認められなかった。

VO₂maxの比較

表4に, 植物性および動物性条件におけるVO₂maxの比較を示した。植物性条件におけるVO₂maxは動物性条件と比較し, 有意に高値を示した (p<0.05)。

表4 植物性および動物性条件におけるVO₂maxの比較

	植物性条件 (n=11)	動物性条件 (n=11)
VO ₂ max (mL/kg/秒)	47.0±3.2*	44.9±4.1
VO ₂ max: 最大酸素摂取量		

* p<0.05 vs. 動物性条件

血糖値, 総コレステロール, HDLコレステロール, LDLコレステロールおよび中性脂肪の変化

表5に, 植物性および動物性条件における食事前後の血糖値, 総コレステロール, HDLコレステロール, LDLコレステロールおよび中性脂肪の変化を示した。食前の血糖値, 総コレステロール, HDLコレステロール, LDLコレステロールおよび中性脂肪は植物性条件および動物性条件の間に有意差を認めなかった。血糖値, 総コレステロール, HDLコレステロールおよびLDLコレステロールは, 両条件において食前と比較して食後に有意な変化は認められなかった。中性脂肪

(TG)は動物性条件において食前と比較し, 食後において有意に増加した (p<0.05)。

3. 考 察

本研究では, 運動前の1回の食事摂取の違いが動脈ステイフネスおよび有酸素性運動パフォーマンスに及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。その結果, 植物性条件におけるcfPWVは食前と比較して食後において有意に低下した。また, 植物性条件におけるVO₂maxは, 動物性条件と比較して有意に高値を示した。したがって, 運動前の植物性ベース食品の摂取は動脈ステイフネスを低下させ, 有酸素性運動パフォーマンスの向上に寄与している可能性が唆された。

Taylor et al.¹¹⁾は, 健康な成人男女17名を対象に液体混合食(経腸栄養剤:1日のエネルギー消費量の40%)の摂取前と比較して摂取60分後と180分後の両方でcfPWVが有意に減少したことを報告した。また, 食事の内容により動脈ステイフネスが増大することも報告されており, 例えば高脂肪食摂取180分後に, 中性脂肪増加にともなうcfPWVの有意な増加が報告されている¹²⁾。このように, 動脈ステイフネスは1回に摂取する食事の内容によって変化する。本研究は植物性ベース食品の摂取において, 食後2時間後のcfPWVは有意に低下した一方で, 動物性ベース食品におけるcfPWVは摂取前後において有意な変化が認められなかった。これらの結果は, 1回の植物性ベ-

表5 植物性および動物性条件における食事前後の血糖値, 中性脂肪, 総コレステロール, HDLコレステロールおよびLDLコレステロールの変化

	植物性条件 (n=11)		動物性条件 (n=11)	
	食前	食後	食前	食後
血糖値 (mg/dL)	91.7±6.6	96.1±9.5	91.1±6.8	98.5±11.4
中性脂肪 (mg/dL)	73.3±38.9	82.3±22.6	75.8±31.5	97±43.9*
総-cho (mg/dL)	157.5±33.4	162.9±33.3	163.5±35.4	164.4±31.1
HDL-cho (mg/dL)	57.2±11.8	59.5±11.2	56.4±13	57.7±10
LDL-cho (mg/dL)	84.5±26.2	87.9±28.4	90.8±27.1	90.5±25.5

cho: コレステロール, HDL: 高比重リポタンパク, LDL: 低比重リポタンパク

ス食品の摂取が中心動脈スティフネスの低下に効果的であることを示唆する。植物性食品には多くの植物性ポリフェノールが含まれており¹³⁾、動脈スティフネスの低下に影響したものと考えられる。実際、若年男性を対象とした研究において、植物性ポリフェノール類の1回の摂取は、摂取2時間後の動脈スティフネスを有意に低下させることが報告されている¹⁴⁾。また、先行研究において1回のポリフェノールの摂取は若年者の動脈スティフネスを有意に低下させることが報告されている¹⁵⁾。このように、本研究結果は先行研究と同様の結果を示している。さらに、植物性食品の一つである大豆食品にはイソフラボンが含まれており、その代謝物であるエクオールは、ヒトの血管内皮細胞において一酸化窒素合成酵素 (eNOS) と熱ショックタンパク質 (Hsp90) の結合を促進する。Hsp90はeNOSに結合することで、eNOSの活性化が促進され¹⁶⁾、LアルギニンをLシトルリンおよびNOに変換する。NOは血管平滑筋を弛緩させ動脈スティフネスを低下させる。したがって、本研究の結果は、植物性ベース食品摂取にともない食後2時間においてcfPWVが有意に低下していることから、イソフラボンやエクオールの作用により血管平滑筋の緊張度を急激に減少させた可能性が示唆された。

本研究では、動物性食品条件と比較して、植物性食品条件においてVO₂maxが有意に高値を示した。VO₂maxを規定する因子は一回拍出量、心拍数、動静脈酸素較差であり、心血管系の影響を強く受ける。特に左心室から駆出される血液を緩衝する大動脈の伸展性はVO₂maxに影響を及ぼすことが明らかにされている¹⁷⁾。一般の集団において、動脈伸展性が高いほど左室の収縮および拡張機能が高く¹⁸⁾、さらには、持久性アスリートにおいても、動脈伸展性が高いほど、左心室の収縮および拡張機能が低い報告されている¹⁹⁾。また、加齢にともなう中心動脈スティフネスの増大

はVO₂maxの低下と関連することが示唆されている。実際、Tomoto et al.²⁰⁾は、18-64歳の健康な男性82名を対象にした検討で、近位大動脈の動脈スティフネスがVO₂maxと負の相関関係にあることを報告した。

一方、Boreham et al.²¹⁾は405名を対象とした研究において大動脈スティフネスとVO₂maxに負の相関があることを報告した。さらに近年、Okamoto et al.⁹⁾は、健康な若年男女24名を対象に個々のVO₂maxと動脈スティフネスの日差変動とその関係性について検討し、動脈伸展性が高い日はVO₂maxが高く、動脈伸展性が低い日のVO₂maxは低いことを報告している。したがって、動脈スティフネスの低下はVO₂maxの増加に寄与する可能性があるものと考えられる。

先行研究において、菜食者は雑食者と比較してVO₂maxが有意に高い⁷⁾ことが報告されている。しかし、菜食者は雑食者と比較し、炭水化物の摂取量及びグリコーゲン貯蔵量が多く、運動時のエネルギー生産、運動パフォーマンス向上に起因している可能性が報告されている⁷⁾。しかし、本研究では植物性食品および動物性食品のPFCバランスを同等に設定し、糖質摂取量はほぼ統一した。その結果、血糖値は両条件において食前と比較し食後に変化は見られず、条件間差も認められなかった。一方、動物性条件における食後の中性脂肪は食前と比較して有意に増加した。植物性条件の中性脂肪は食事前後において有意な変化を認めなかったことから、両条件間のPFCバランスを統一したものの、動物性条件の脂質の割合が高くなっていった可能性が示唆される。さらに、植物性食品に含まれる血漿硝酸塩と亜硝酸塩は動脈機能とともに、有酸素性運動パフォーマンスを増加させることが報告されている²²⁾。したがって、本研究の結果は、グリコーゲン貯蔵量と関係なく、一過性の植物性食品摂取による動脈スティフネスの低下が有酸素性運動パフォーマンスの向上に起

因したものと考えられた。

本研究で得られた成果は、日常生活において応用が可能である。例えば、本研究の結果は、健康増進のためにジョギングやウォーキングを実施する前の食事として、植物性食品を摂取することによって効率の良い運動を行える可能性を示唆する。また、本研究の結果において、動物性条件と比較し、植物性条件のVO₂maxは有意に高値を示したことから、競技会やトレーニングなどの運動実施前の食事選択においても応用可能である。競技種目や競技レベルにおいて日々の食事の選択やタイミングは異なるが、運動前の食事選択の新しい知見を提供する。

以上のことより、本研究で得た知見は、健康増進や競技力向上のための新しい食事選択として活用することができる重要な知見である。

4. 結 論

本研究の結果から、運動前の植物性食品の摂取が動脈ステイフネスを低下させ、最大酸素摂取量を向上させる可能性が示唆された。

謝 辞

本研究の遂行に際して、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心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) Sutton-Tyrrell K., Najjar S.S., Boudreau R.M., Venkitachalam L., Kupelian V., Simonsick E.M., Havlik R., Lakatta E.G., Spurgeon H., Kritchevsky S., Pahor M., Bauer D., Newman A.; Health ABC Study., Elevated aortic pulse wave velocity, a marker of arterial stiffness, predicts cardiovascular events in well-functioning older adults. *Circulation.*, 28;111 (25) :3384-90 (2005)
- 2) Scuteri A., Tesaro M., Appolloni S., Preziosi F., Brancati A.M., Volpe M., Arterial stiffness as an independent predictor of longitudinal changes

- in cognitive function in the older individual. *J. Hypertens.*, 25 (5) :1035-40 (2007)
- 3) Vlachopoulos C., Aznaouridis K., O'Rourke M.F., Safar M.E., Baou K., Stefanadis C., Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with central haemodynamics: a systematic review and meta-analysis. *Eur. Heart J.*, 31 (15) :1865-71 (2010)
 - 4) Vlachopoulos C., Aznaouridis K., Stefanadis C., Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with arterial stiffness: a systematic review and meta-analysis. *J. Am. Coll. Cardiol.*, 55 (13) :1318-27 (2010)
 - 5) Acosta-Navarro J., Antoniazzi L., Oki A.M., Bonfim M.C., Hong V., Acosta-Cardenas P., Strunz C., Brunoro E., Miname M.H., Filho W.S., Bortolotto L.A., Santos R.D., Reduced subclinical carotid vascular disease and arterial stiffness in vegetarian men: The CARVOS Study. *Int. J. Cardiol.*, 230:562-6 (2017)
 - 6) Lin C.L., Fang T.C., Gueng M.K., Vascular dilatory functions of ovo-lactovegetarians compared with omnivores. *Atherosclerosis.*, 158 (1) :247-51 (2001)
 - 7) Boutros G.H., Landry-Duval M.A., Garzon M., Karelis A.D., Is a vegan diet detrimental to endurance and muscle strength? *Eur. J. Clin. Nutr.*, 74 (11) :1550-5 (2020)
 - 8) Fernberg U., Fernström M., Hurtig-Wennlöf A., Arterial stiffness is associated to cardiorespiratory fitness and body mass index in young Swedish adults: The Lifestyle, Biomarkers, and Atherosclerosis study. *Eur. J. Prev. Cardiol.*, 24 (17) :1809-18 (2017)
 - 9) Okamoto T., Kobayashi R., Hashimoto Y., Kikuchi N., Ogoh S., Is individual day-to-day variation of arterial stiffness associated with variation of maximal aerobic performance? *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.*, 9;13 (1) :4 (2021)
 - 10) Murakami K., Livingstone M.B.E., Okubo H., Sasaki S., Prevalence and characteristics of misreporting of energy intake in Japanese adults: the 2012 National Health and Nutrition Survey. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.*, 27 (2) :441-50 (2018) .
 - 11) Taylor J.L., Curry T.B., Matzek L.J., Joyner M.J., Casey D.P., Acute effects of a mixed meal on arterial stiffness and central hemodynamics in healthy adults. *Am J. Hypertens.*, 27 (3) :331-7 (2014)

- 12) Fryer S., Stone K., Paterson C., Brown M., Faulkner J., Lambrick D., Credeur D., Zieff G., Martínez Aguirre-Betolaza A., Stoner L., Central and peripheral arterial stiffness responses to uninterrupted prolonged sitting combined with a high-fat meal: a randomized controlled crossover trial. *Hypertens. Res.*, **44** (10) :1332-40 (2021)
- 13) Burkholder-Cooley N, Rajaram S, Haddad E, Fraser GE, Jaceldo-Siegl K., Comparison of polyphenol intakes according to distinct dietary patterns and food sources in the Adventist Health Study-2 cohort. *Br. J. Nutr.*, **115** (12) :2162-9 (2016)
- 14) Rodriguez-Mateos A., Weber T., Skene S.S., Ottaviani J.I., Crozier A., Kelm M., Schroeter H., Heiss C., Assessing the respective contributions of dietary flavanol monomers and procyanidins in mediating cardiovascular effects in humans: randomized, controlled, double-masked intervention trial. *Am. J. Clin. Nutr.*, **108** (6) :1229-37 (2018) .
- 15) Nishiwaki M., Kora N., Matsumoto N., Ingesting a small amount of beer reduces arterial stiffness in healthy humans. *Physiol. Rep.*, **5** (15) :e13381 (2017)
- 16) Joy S., Siow R.C., Rowlands D.J., Becker M., Wyatt A.W., Aaronson P.I., Coen C.W., Kallo I., Jacob R., Mann G.E. The isoflavone Equol mediates rapid vascular relaxation: Ca²⁺-independent activation of endothelial nitric-oxide synthase/Hsp90 involving ERK1/2 and Akt phosphorylation in human endothelial cells. *J. Biol. Chem.*, **15**:281 (37) :27335-45 (2006)
- 17) Vaitkevicius P.V., Fleg J.L., Engel J.H., O'Connor F.C., Wright J.G., Lakatta L.E., Yin F.C., Lakatta E.G., Effects of age and aerobic capacity on arterial stiffness in healthy adults. *Circulation.*, **88** (4 Pt 1) :1456-62 (1993)
- 18) Borlaug B.A., Melenovsky V., Redfield M.M., Kessler K., Chang H.J., Abraham T.P., Kass D.A., Impact of arterial load and loading sequence on left ventricular tissue velocities in humans. *J. Am. Coll. Cardiol.*, **16**:50 (16) :1570-7 (2007)
- 19) D'Andrea A., Riegler L., Cocchia R., Scarafile R., Salerno G., Gravino R., Golia E., Vriz O., Citro R., Limongelli G., Calabrò P., Di Salvo G., Caso P., Russo M.G., Bossone E., Calabrò R. Left atrial volume index in highly trained athletes. *Am. Heart J.*, **159** (6) :1155-6 (2010)
- 20) Tomoto T., Maeda S., Sugawara J., Relation between arterial stiffness and aerobic capacity: Importance of proximal aortic stiffness. *Eur. J. Sport Sci.*, **17** (5) :571-5 (2017)
- 21) Boreham C.A., Ferreira I., Twisk J.W., Gallagher A.M., Savage M.J., Murray L.J., Cardiorespiratory fitness, physical activity, and arterial stiffness: the Northern Ireland Young Hearts Project. *Hypertension.*, **44** (5) :721-6 (2004)
- 22) Cermak N.M., Gibala M.J., van Loon L.J., Nitrate supplementation's improvement of 10-km time-trial performance in trained cyclists. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, **22** (1) :64-71 (2012)

スポーツとアートとテクノロジーを融合した 新しいスポーツ参画システムによる 若者の運動継続モデルの検証

順天堂大学 鈴木大地
(共同研究者) 同 柳谷登志雄
グランドデザイン株式会社 小川和也
株式会社ネイキッド 村松亮太郎
東京大学 野崎大地

Study of A Model for Youth Exercise Continuity Through A New Sports Participation System that Integrates Sports, Art, and Technology

by

Daichi Suzuki, Toshio Yanagiya
Faculty of Health Sports Science, Juntendo University
Kazuya Ogawa
Grand Design Co.,Ltd.
Ryotaro Muramatsu
NAKED, INC.
Daichi Nozaki
Graduate School of Education, The University of Tokyo

ABSTRACT

Increasing the rate of sports participation in the population is an issue that many countries are tackling. In Japan, the sports participation rate among adults is less than 30%, especially among those in their 20s and 30s, which is the lowest compared with other age groups, and there is an "indifferent" group to exercise and sports.

The purpose of this study was to investigate the attitudes of the younger generation toward exercise and sports, and to examine the motivational factors necessary for the indifferent to exercise and continue to do so. Male and female university students were guided through a new sports content (SPOREV.) that combined digital technology, art, and music on campus, and their attitudes toward exercise and sports were confirmed through a questionnaire survey before and after the experience.

As a result, most of the participants answered that they had a certain exercise habit and confidence in their physical fitness in the past and at present. On the other hand, some students in the indifferent group who had no exercise habit and had no intention to exercise in the future also participated in SPOREV. because "it looked interesting" or "I was invited by a friend," and their motivation to exercise tended to increase after the experience. In the future, we will further examine the motivation and reward system to make the indifferent group want to engage in exercise.

キーワード

運動習慣, 興味・関心, ニュースポーツ, アート, テクノロジー

Keyword

Exercise Habits, Interests, New Sports, Arts, Technology

要 旨

国民のスポーツ実施率向上は各国が取り組む課題である。わが国においては、成人のスポーツ実施率は3割以下で、特に若者世代(20・30代)は他年代に比べ最も低く、また運動・スポーツへの「無関心層」が存在する。

本研究では、若年世代の運動・スポーツに対する意識を調査するとともに、無関心層が運動実施・継続に必要な動機付け要因を検証することを目的とした。男女大学生を対象に、キャンパス内に設置したデジタル技術にアートと音楽を融合した新しいスポーツコンテンツ(SPOREV.)を提供し、その体験の前後にアンケート調査にて、運動・スポーツに対する意識を調査した。

その結果、SPOREV.を体験した多くは、過去や現在に一定の運動習慣や体力への自信があると

答えた学生であった。一方で、運動習慣がなく今後も運動するつもりがないと答えた無関心層の学生の一部も「面白そう」「友人に誘われた」との理由でSPOREV.を体験しており、体験後の運動に対する意欲が向上する傾向があった。今後は、さらに無関心層が運動に取り組みたくなる動機付けや報酬システムを検討する。

緒 言

東京2020オリンピック・パラリンピックを契機に、政府は国民のスポーツ参画を加速させ、健康長寿社会実現を目指している。その一方で、成人の週3日以上スポーツ実施率は27.0%であり、特に20代と30代はそれぞれ18.9%、および17.5%と他年代に比べ最も低いことが報告されている¹⁾。また、運動・スポーツをしない「無関心層」が15.2%存在し、運動の頻度を増やせない理由と

して「仕事や家事が忙しいから」(43.7%)「面倒くさいから」(27.5%)が多数を占めている。

スポーツ実施・継続率向上は、各国が政策として取り組む世界規模課題であるが、2020年からのコロナ禍での外出自粛により、身体活動量やスポーツ環境条件が更に低下している。また、日本においては、運動・スポーツ実施理由は「健康のため」(73.9%)「体力増進・維持のため」が上位を占めており¹⁾、また、「運動・スポーツ=学校体育や部活動」のイメージが定着しており、生活の中で気軽にスポーツを楽しむ習慣や環境が整備されていないことも課題である。

スポーツ実施率と運動時間の低下に伴い、子供の体力低下が報告されている²⁾。青年期の体力は、その後の寿命や高血圧、糖尿病といった生活習慣病にも関連することがわかっており^{3,4)}、青年期の体力が低いことが中高年期以降に疾病を発症させ、死亡率を高めることに繋がると考えられる。また一方で、青年期のスポーツ・運動習慣が直接的に中高年期以降の疾病と関連するだけでなく、青年期から中高年期にかけてのスポーツ・運動習慣の継続が様々な疾病予防には重要であることも報告されている^{5,6)}。つまり、青年期のスポーツ・運動習慣の定着が、将来の疾病予防に繋がり、医療費削減に関与すると考えられるため、より早期からのスポーツ・運動習慣の定着を図る必要がある。

スポーツ庁は、20~50代の「働き盛り世代」に健康的なライフスタイルを定着させるために、一日の大半を過ごす職場において、スポーツに親しむきっかけづくりを進めている。例えば、朝や昼休みなどに体操・ストレッチをするなどのスポーツ・運動の機会を提供することや、階段の利用や徒歩・自転車通勤の奨励、あるいはスタンディングミーティングの実施など、社員の健康増進のために、スポーツ競技に限らず、スポーツ実施に向けた積極的な取組を行っている企業を「スポーツ

エールカンパニー」として認定する制度を実施して、スポーツ運動習慣の普及を行っている⁷⁾。

一方、学校体育や部活動での運動実施機会のあった高校を卒業後、大学生のスポーツ機会は著しく低下するものの、その年代に向けたアプローチ方法は確立していない。

近年、エンターテインメントやゲーミフィケーションと身体活動量増加・スポーツ実施率向上に関して注目が高まっている。例えば、2016年に発売されたスマートフォン向け位置情報ゲームアプリ「Pokémon GO」において、ゲームアプリ使用前後を比較すると1日の平均歩数が約2,000歩増加することが報告されている⁸⁾。また、2007年に発売されたWii専用ゲームソフト『Wii Fit』や2017年に発売されたNintendo Switch専用フィットネスソフト『リングフィット アドベンチャー』など、スポーツやフィットネスをテーマにしたゲームソフトの売り上げが多いことから、若年層へのアプローチ方法として、スポーツ・運動の多様性を発信することも効果的であると考えられる。

そこで本研究では、若者年代の運動実施や継続の動機付けを明らかにするために、高いエンターテインメント性(デジタル技術やアート・音楽)とフィジカルデータ蓄積システムを併せ持つ、既に開発済みの新しいスポーツコンテンツ(SPOREV.)を応用し、若年世代の生活圏に、行動変容や嗜好性の検証を行う。「楽しんで繰り返しスポーツ空間に参加した結果健康になる」システムの構築と、運動継続に必要な要素を探索し独創的な運動継続モデルの提案に繋げる。

1. 方法

1.1 対象者

東京都内にキャンパスが所在する1私立大学の医学・医療系および国際教養に関する学部所属する男女大学1年生620名を対象とした。すべて

の対象者は、本研究の目的及び内容、安全性に関するインフォームド・コンセントを行った上で実験参加の同意を得た。本研究は、順天堂大学スポーツ健康科学部・大学院スポーツ健康科学研究科研究等倫理委員会の承認を得た後に実施した。

1. 2 実験手順

2022年4月に対象者全員に運動・スポーツの実施・意識に関するWeb方式のアンケートを実施(図1▼調査①)し、その後所属キャンパス内に新しいスポーツコンテンツ(「NAKED SPOREV.」:次項で詳細説明)の設置について案内を行った(図1▽アナウンス①)。4月4日から5月31日までの約2か月間の平日11:00-17:00までにキャンパス内にて、自由に体験できることとした(図2)。体験した者には体験直後の感想を調査した(調査②)。設置開始から、おおよそ一か月経過時点で再度呼びかけを行い体験を促した(図1▽アナウ

ンス②)。設置期間終了後、体験の有無にかかわらず対象者全員に運動・スポーツの実施・意識に関するWebアンケートを再度実施した(図1▼調査②)。

1. 3 「NAKED SPOREV.」

株式会社ネイキッドが開発し、パナソニック株式会社エレクトリックワークス社が技術支援しているシステムで、Azure Kinect DKによりボーンデータや動作をセンシングし、映像・音響とともに運動を安全に実施し新たなスポーツ拡張体験が可能なコンテンツである⁹⁾。これまでに、渋谷区立宮下公園サンドコートにて「体力測定を、もっと楽しく」というテーマで、体力測定でよく行われる「垂直とび」、「反復横とび」、「筋力測定」をコンテンツ化し実施した。壁を押す力の数値によって変化する動物との力比べや、自分の跳躍力が動物で表現されるなど、身体を動かすと、その

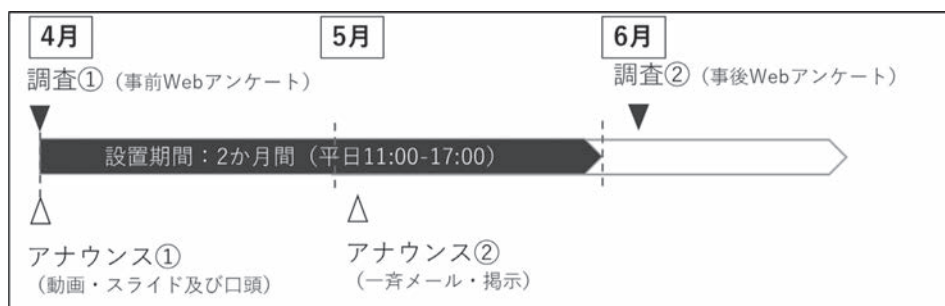


図1 実験スケジュール

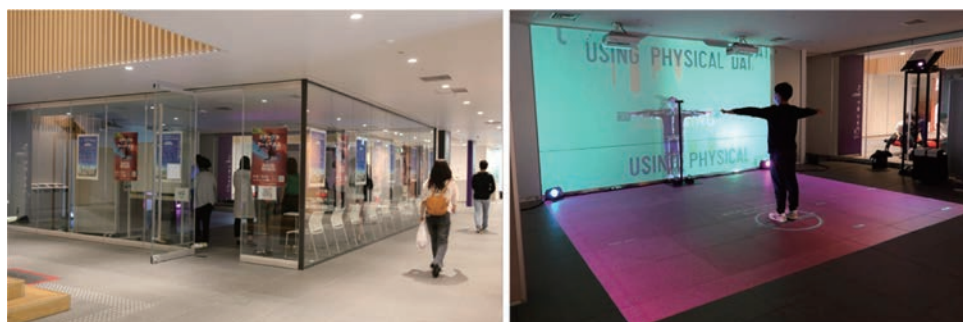


図2 キャンパス内に設置した「NAKED SPOREV.」(左)と体験の様子(右)

人の動きやフィジカルデータからアニメライズされたアートが生み出される仕様である。体験後には、体験者のスマートフォンにフィジカルデータが記録され、日々の生活でのアドバイスがフィードバックされる。

本研究では、「垂直とび」と「反復横とび」の2種目を設定し、いずれかを選択して体験する仕様とし実施した。

1. 4 質問項目

運動・スポーツの実施・意識に関するWeb方式のアンケート(調査①, 調査②)での質問項目は、スポーツ庁の「スポーツの実施状況に関する調査」、笹川スポーツ財団「スポーツライフに関する調査」、行動変容ステージモデルを参考に、①健康・体力・運動・スポーツに関する意識、②今まで(過去)の運動・スポーツの実施状況、③現在の運動・スポーツの実施状況、④今後の運動・スポーツの実施について、の4つのカテゴリで作成した。体験した者には体験直後の感想を調査した(調査②)。

1. 5 データ処理

対象者を調査②時点で、SPOREV.に「実際に体験した(体験群)」、「見に行ったが体験しなかった(見学群)」、「行かなかった(非体験群)」の3群に区分し、各質問への回答を比較する記述統計を実施した。また、 χ^2 乗検定、残差分析を実施し、比較検討した。有意水準は5%未満とし、すべての解析はSPSS(Ver. 25, IBM社製)を用いて行った。

2. 結果

2. 1 SPOREV.への参加状況

4月と6月に実施した運動・スポーツの実施・意識に関するWeb方式のアンケート(調査①, 調査③)の両方に回答をした対象者522名のうち、

SPOREV.を「実際に体験をした(体験群)」は81名(15.5%)、「見に行ったが体験しなかった(見学群)」は165名(31.6%)、「行かなかった(非体験群)」は276名(52.9%)であった。

2. 2 SPOREV.のへ参加状況と背景(運動習慣・背景)

SPOREV.に「体験した(体験群)」、「見に行ったが体験しなかった(見学群)」、「行かなかった(非体験群)」の3群間の背景を比較検討した。比較検討項目は、1)性別、2)運動・スポーツの実施状況(行動変容の6つのステージ)、3)体力への自信、4)今まで(過去)の運動部活動の所属、5)今後の運動・スポーツの実施とした。

1) 性別

性別では、統計的な差は見られなかったが体験群は男性が多く、非体験群には女性が多く見られた(図3)。

2) 運動・スポーツ実施状況(行動変容の6つのステージ)

行動変容の6つのステージをみると、非体験群において、「運動実施はなく、今後もするつもりがない」という無関心期の人が多かった(残差分析; $p<0.01$)。また、見学群において「運動はしていないが、今後はじめようと思っている」の関心期の人が多い傾向が見られた($p=0.05$)。定期的に運動をしている人(6ヶ月以上継続している、実施しているが6ヶ月未満)の割合は大きく変わらなかった(図4)。

3) 体力への自信

体力への自信との関連では、統計的な群間差は見られなかったが、体験群は「体力に自信がある」「どちらかと言えば体力に自信がある」人が多く見られた。一方、非体験群には、「体力に自信が

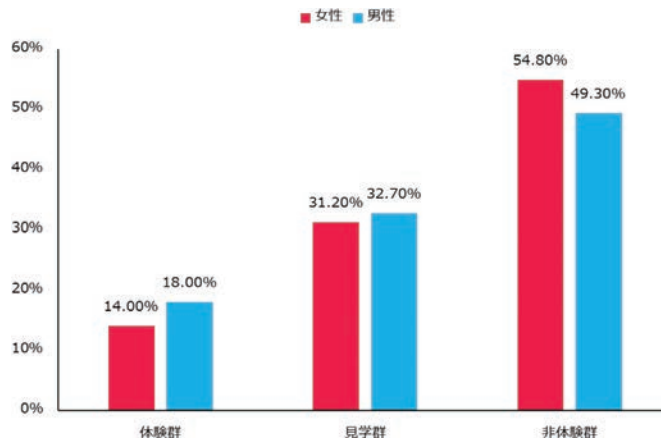


図3 SPOREVの体験状況における性差

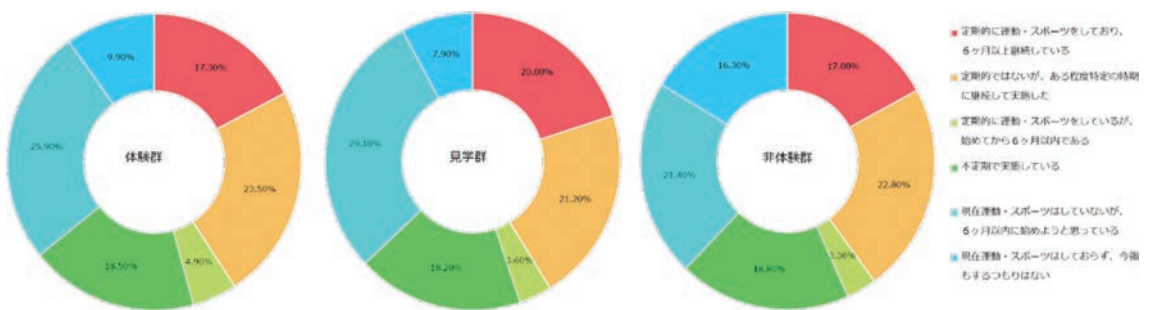


図4 運動・スポーツ実施状況とSPOREVの体験状況

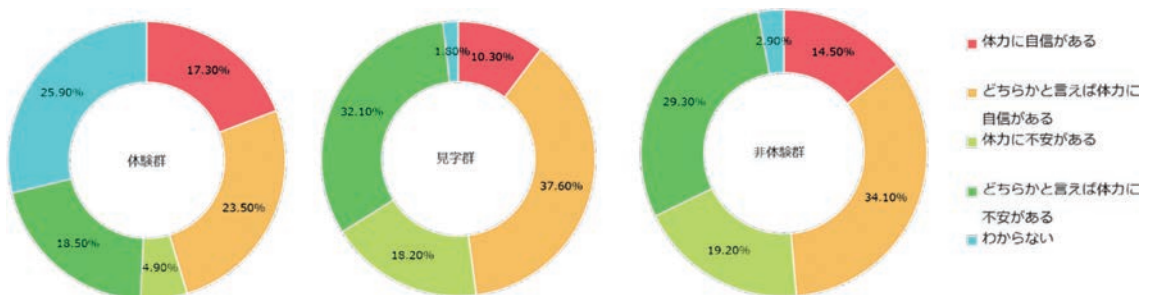


図5 体力への自信とSPOREVの体験状況

ある」と「体力に不安がある」と答えた人が多く、回答が二極化していた(図5)。

4) 今まで(過去)の運動部活動の所属
SPOREVの体験状況は、高校時代の部活

動への所属状況との間に有意な関連が見られた($p < 0.05$)。体験群には運動部に所属していた人が多く(残差分析; $p < 0.05$)、見学群には運動部と文化部の両方が多く(残差分析; $p < 0.05$)、もしくは文化部に所属していた人が多い傾向であった

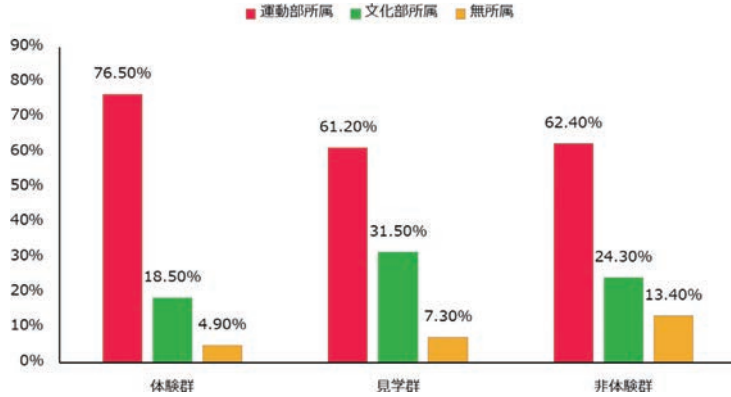


図6 今まで(過去)の運動部活動の所属とSPOREV.の体験状況

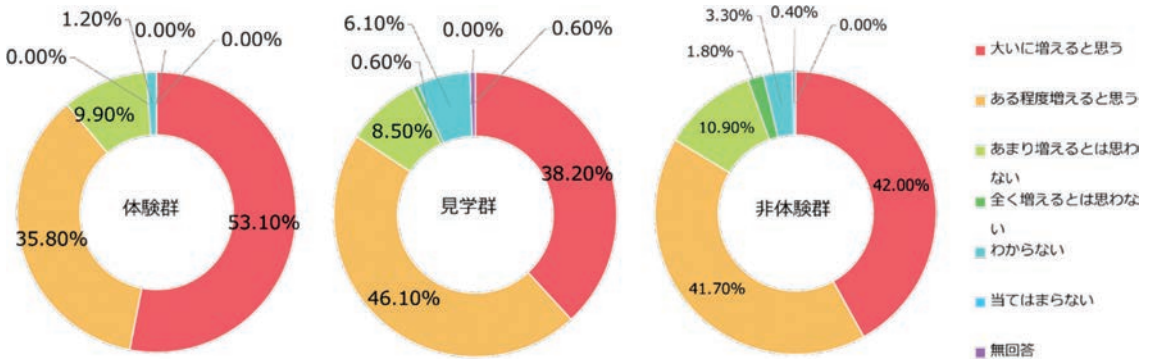


図7 SPOREV.体験状況と今後の運動・スポーツ実施への意欲

($p=0.05$). 非体験群は部活動に所属していない人が多い結果であった(残差分析; $p<0.05$) (図6).

5) 今後の運動・スポーツの実施

大学キャンパスでの生活圏にスポーツの取り組みがあった場合、運動実施回数はどうなるかという質問では、体験群では「運動実施回数が大いに増える」と答えた人が多かった(残差分析; $p<0.05$). 見学群では「ある程度増える」「わからない」と回答した人が多く、非体験群には、「まったく増えるとは思わない」と答えた人が多く見られた(図7).

2. 3 体験・見学前後での運動に対する意識の変化

体験群と見学群の246名の体験・見学前後(調

査①と調査②)での運動・スポーツの実施状況(行動変容の6つのステージ)の変化について検討した. その結果, 調査①で「今後も運動するつもりがない」と答えた21名のうち, 体験・見学後に10名が「今後も運動するつもり」, 11名が変わらず「今後も運動するつもりがない」と答えた(表1). また, 同じく, 「今後も運動するつもりがない」と回答した21名のうち, 14名が「SPOREV.であれば後は運動するつもり」と回答し, 7名が変わらず「今後も運動するつもりがない」と答えた(表2).

2. 4 SPOREV.に参加した・見学に行った理由/行かなかった理由

体験群, 見学群259名にSPOREV.を訪れた理由を複数回答で尋ねた結果, 「面白そうだから」

表1 運動・スポーツの実施状況（行動変容の6つのステージ）の変化

	体験・見学後(調査③)				現在運動・スポーツはしていないが、6ヶ月以内に始めようと思っている	現在運動・スポーツはしていません、今後もしない
	定期的に運動・スポーツをしており、6ヶ月以上継続している	定期的に運動・スポーツをしているが、始めてから6ヶ月以内である	定期的ではないが、ある特定の時期に継続して実施した	不定期で実施している		
定期的に運動・スポーツをしており、6ヶ月以上継続している	29 (61.7%)	9 (19.1%)	4 (8.5%)	5 (10.6%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
定期的に運動・スポーツをしているが、始めてから6ヶ月以内である	2 (20.0%)	6 (60.0%)	1 (10.0%)	1 (10.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
定期的ではないが、ある特定の時期に継続して実施した	4 (7.4%)	11 (20.4%)	19 (35.2%)	16 (29.6%)	3 (5.6%)	1 (1.9%)
不定期で実施している	6 (13.3%)	6 (13.3%)	5 (11.1%)	22 (48.9%)	3 (6.7%)	3 (6.7%)
現在運動・スポーツはしていないが、6ヶ月以内に始めようと思っている	4 (5.8%)	24 (34.8%)	6 (8.7%)	15 (21.7%)	13 (18.8%)	7 (10.1%)
現在運動・スポーツはしていません、今後もしない	0 (0.0%)	1 (4.8%)	1 (4.8%)	5 (23.8%)	3 (14.3%)	11 (52.4%)

表2 SPOREV.での運動・スポーツの実施状況（行動変容の6つのステージ）の変化

	体験・見学後(調査③)				すぐには運動・スポーツはできないが、6ヶ月以内に始めようと思っている	今後もしない
	定期的に運動・スポーツができ、6ヶ月以上継続できる	定期的に運動・スポーツができるが、始めてから6ヶ月以内で終了する	定期的ではないが、ある特定の時期は継続して実施できる	不定期で実施する		
定期的に運動・スポーツをしており、6ヶ月以上継続している	16 (34.0%)	4 (8.5%)	4 (8.5%)	13 (27.7%)	3 (6.4%)	7 (14.9%)
定期的に運動・スポーツをしているが、始めてから6ヶ月以内である	1 (10.0%)	1 (10.0%)	3 (30.0%)	5 (50.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
定期的ではないが、ある特定の時期に継続して実施した	4 (7.4%)	5 (9.3%)	17 (31.5%)	21 (38.9%)	4 (7.4%)	3 (5.6%)
不定期で実施している	9 (20.0%)	3 (6.7%)	12 (26.7%)	17 (37.8%)	1 (2.2%)	3 (6.7%)
現在運動・スポーツはしていないが、6ヶ月以内に始めようと思っている	8 (11.6%)	3 (4.3%)	13 (18.8%)	31 (44.9%)	6 (8.7%)	8 (11.6%)
現在運動・スポーツはしていません、今後もしない	0 (0.0%)	1 (4.8%)	3 (14.3%)	7 (33.3%)	3 (14.3%)	7 (33.3%)

(30.1%) が最も多く、次いで「友人に誘われたから」(20.8%), 「楽しそうだから」(20.1%), 「興味があったから」(15.8%), 「友人に勧められた」(4.6%) であった。

一方で、非体験群の249名のSPOREV.を訪れなかった理由は、「時間がなかったから」(49.4%), 「特に理由はない・なんとなく」(35.3%) であった。

3. 考察

本研究では、対象者の運動行動変容ステージ

に着目し、そのステージによってスポーツコンテンツへの体験の有無を検討した。その結果、SPOREV.を体験した、または見学したと回答した246名に着目したところ、事前アンケートでは、「運動するつもりはない」と回答した21名のうち、10名は参加後に「今後、運動をするつもり」と行動が変化した回答をした。これを、岡が作成した運動行動の変容段階¹⁰⁾の視点で考えると、運動をするつもりはないという「無関心期」の21名のうち10名が、今後運動するつもりという「関心期」のステージへと行動が変化したことが窺え

た。

さらに、事前アンケートで「運動するつもりはない」と回答した「無関心期」の21名のうち、もし今後SPOREV.での運動を実施する場合はどうかと条件付きで質問したところ、14名が「SPOREV.であれば今後は運動するつもり」と回答し、7名が変わらず「今後も運動するつもりがない」と答えた。すなわち、運動するつもりはないと回答した「無関心期」のうち、特にこのSPOREV.の実践を通して、“私は現在、運動をしていないが、近い将来(6ヵ月以内)に始めようと思っている”という「関心期」や“私は現在、運動をしているが、定期的ではない”，といった「準備期」に移行した学生が増えたことが明らかとなった。

このことから、実際に、SPOREV.を体験した、または見学した学生のうち、運動行動変容ステージモデルの「無関心期」に該当していた学生にとって、今回のSPOREV.での体験や、見学が、運動実施に対するハードルを下げ、行動の変化への一助となったことが考えられる。

なお、運動行動の変容ステージは、他の年代と同様に大学生の運動実施を検討する際の有効な変数であることが示されており¹¹⁾、若年成人のスポーツ実施率向上やスポーツ習慣の獲得に向けた運動行動の変容ステージを考慮した介入の有効性が示唆されている。荒井らは、大学生における運動行動の変容ステージに対応した体育授業が運動習慣に与える効果を与えるとして報告していることから¹²⁾、今後、このような先行研究をふまえ、既存の若年期におけるあそびや、体育の授業のあり方をより多様なものにしたり、SPOREV.だけでなく新しいスポーツコンテンツについてもさらなる検討を行うことによって大学生の運動習慣への影響等も着目していきたい。

体験群、見学群259名にSPOREV.を訪れた理由として、「面白そうだから」、「楽しそうだから」、

「興味があったから」といったSPOREV.自体が興味関心をひくコンテンツであったことがうかがえたことと同時に、友人に誘われたから、友人に勧められたといった友人とのつながりによって体験・見学につながっていたことが明らかとなった。一方、約半数の非体験群が体験しなかった理由として、半数が「時間がなかったから」と答えている。このことは、スポーツ庁のスポーツ実施に関する調査と同様の結果が得られた。今回、スポーツ実施率が低調な若年成人(大学生)に対する取り組みとして、学生生活の多くの時間を過ごすキャンパス内に機器を設置し、空き時間に運動を取り入れてもらうことを目論んでいたものの、想定通りには実践につながらなかった。しかし、非体験群の3割以上が「特に理由はない・なんとなく」とも回答していたため、特に大きな理由がないこと、なんとなく体験しなかったという理由であることより、積極的なアプローチがあれば体験につながった可能性があることも示唆された。

今後、今回のようなエンターテインメント性の高いスポーツ参画コンテンツの改良を検討することに加え、さらにゲーミフィケーションや報酬系メカニズムを加味したシステムを検討するなど、スポーツに無関心な若者のスポーツ参画及び継続の契機となる仕組みづくりを目指す必要がある。

将来的には、SPOREV.による運動を継続的に実施することにより、運動参加や継続といった運動習慣に関する調査のみならず、運動部活動やサークル活動と同様に、大学生の体力の維持あるいは増進につながるかという効果測定をする必要もあるといえる。SPOREV.の特徴として、単なる身体を用いたエンターテインメント装置のみならず、運動機能をスコア化することで体力測定の機能も有することから、縦断的な設置により、このような調査も可能であるといえる。体力の観点からいうと、筋力の維持には最大筋力の30%以上の力発揮が必要であり、体力の増進には週に2

～3度のトレーニング実施が必要であると言われて
いる。SPOREV.による運動がこれらの強度と
頻度を上回るものであれば、体力の維持増進の効
果を期待することができる。

4. 結論・結語・総括・まとめ

本研究によって、運動習慣がなく今後も運動を
するつもりがないと答えた無関心層の学生にお
いても、「面白そう」「友人に誘われた」との理由
でSPOREV.に参加したのち、運動に対する意欲
が向上する傾向を認めた。この結果は、今後、運
動へ無関心な若者が運動に取り組む契機や動機付
け、環境づくりへ検討に繋がるものである。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人
石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感
謝申し上げます。また、本研究を実施するにあっ
てご尽力くださった順天堂大学スポーツ健康科学
部の染谷由希助教、河村剛光准教授、大久保菜穂
子准教授、同研究戦略推進センターの小倉かさね
URA、同スポーツ健康医科学推進機構（JASMS）
事務局、株式会社ネイキッド、パナソニック株式
会社エレクトリックワーク社に深く感謝いたしま
す。

最後に、キャンパス内での本研究の実施にあた
り、実施大学の代表者、各学部長、各部署の皆様
にご尽力いただき、また、20名を超える研究補
助の学生の皆様のご協力無くして成り立ちません
でした。関係頂いた皆様には心より御礼申し上げ
ます。

文 献

1) 令和元年・スポーツ庁. 令和元年度スポー

ツの実施状況等に関する世論調査. https://www.mext.go.jp/sports/content/20210526-spt_kensport01-000007034_8.pdf

- 2) 平成29年度全国体力・運動能力、運動習慣等調査結果 https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/toukei/kodomo/zencyo/1401184.htm
- 3) Sato M., Kodama S., Sugawara A., Saito K., Sone H. Physical fitness during adolescence and adult mortalit. *Epidemiology*, May;20 (3) :463-4(2009)
- 4) Someya Y., Kawai S., Kohmura Y., Aoki K., Daida H. Cardiorespiratory fitness and the incidence of type 2 diabetes: a cohort study of Japanese male athlete. *BMC Public Health*, May 23;14:493(2014)
- 5) Paffenbarger R.S. Jr, Hyde R.T., Wing A.L., Steinmet C.H. A natural history of athleticism and cardiovascular health. *JAMA*, Jul 27;252 (4) :491 (1984)
- 6) Otsuka H., Tabata H., Shi H., Kaga H., Someya Y., Abulaiti A., Naito H., Umemura F., Kakehi S., Ishijima M., Kawamori R., Watada H., Tamura Y. Associations of Exercise Habits in Adolescence and Old Age with Risk of Osteoporosis in Older Adults: The Bunkyo Health Study. *J. Clin. Med.* Dec 19;10 (24) :5968(2021)
- 7) スポーツ庁. スポーツエールカンパニー https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/sports/mcatetop05/list/1399048.htm
- 8) Xian Y., Xu H., Xu H., Liang L., Hernandez A.F., Wang T.Y., Peterson E.D. An Initial Evaluation of the Impact of Pokémon GO on Physical Activity. *J. Am. Heart Assoc.* 6: e005341(2017)
- 9) 「NAKEDSPOREV.」(株式会社ネイキッド) <https://naked.co.jp/works/9736/>
- 10) 岡浩一郎. 行動変容のトランスセオレティカル・モデルに基づく運動アドヒレンス研究の動向, *体育学研究*, 45, 4. 543-561(2000)
- 11) Suminski R., Petosa, R. Stages of Change Among Ethnically Diverse College Students, *Journal of American College Health*, 51:1, 26-31(2006)
- 12) 荒井弘和, 木内敦詞, 浦井良太郎, 中村友浩. 運動行動の変容ステージに対応した体育授業プログラムが大学生の運動習慣に与える効果, *体育学研究*, 1-13(2009)

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	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 障害者健康増進・運動医科学支援センター長
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(兼)	佐 藤 祐 造	名古屋大学名誉教授 一般社団法人健康評価施設査定機構 理事長
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	和歌山県立医科大学リハビリテーション医学講座 教授
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	田 村 照 子	文化学園大学 名誉教授
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(兼)	藤 本 繁 夫	大阪公立大学 名誉教授
委 員	吉 岡 利 忠	医療法人三良会 村上新町病院 院長

* (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

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
障害者健康増進・運動医科学支援センター長

緒 方 徹

2021年に開催されたパラリンピック東京大会を経て、パラスポーツが社会の中にどの様に定着するかが問われる時期を迎えている。そして、社会への定着の一環として、スポーツ科学の中での定着にとっても大事な時期となっている。依然としてCOVID-19による活動制限はとくにフィールド研究分野では大きな影響を及ぼしており、パラアスリートを対象とした研究の実施が容易でない状態が続いている。こうした中ではあるが、本号ではパラスポーツに関して2篇の報告が寄せられている。研究実施が難しいなかで工夫がなされた業績であり、その点でも意義深いものである。

大橋らの報告はバドミントン競技用車いす開発を念頭に置いた片手駆動が可能な車いす機構の操作に関するものである。ラケット競技において状況に応じて片手で車椅子の前後移動ができるよう、片側のリムを二重にしたシステムを作成し、健常成人を対象とした研究を行い、操作時の筋肉への負荷量を筋電図解析によって実施している。標準化された前後運動を実施することで、その時に生じる筋活動電位を、通常車いすを使用した場合と片手駆動の車いすを使用した場合とで比較している。これによって上肢のどの筋肉への負荷が多くなるかを解析し、特に片手駆動の車いすにおいては深指屈筋と上腕三頭筋の活動が増加することを明らかにしている。開発したシステムを現場に広めていくうえで、身体への影響を考慮した貴重な情報が得られたと考えられる。

一方、安間らは片側大腿切断ランナーを対象に

下肢にかかる負荷量を床反力計を用いることで定量的に計測している。計測に際しては実際の競技場面の走行を想定したスピードをトレッドミル上で再現したうえで下肢にかかる力を計測しており、競技に直結した研究デザインとなっている。義足ランナーの健側、義足側と健常者を比較することで、義足ランナーの健側下肢への負荷量が大きいことを明らかにしている。また、走行スピードを複数条件設定し、走行速度があがることで、義足側の負荷量も漸増していくことが確認された。大腿切断者の短距離走は義足の膝継手や板バネなど道具の側に目が向きがちであるが、それを支える下肢に対する影響を定量的に捉えた点に大きな意義がある。

今回の2篇の論文はいずれも競技実施がパラアスリートのからだに及ぼす影響に焦点をあてたものとなった。パラスポーツを展開していくうえで、ハイパフォーマンスの競技実践を進める事の重要性は言うまでもないが、並行してスポーツ障害の予防に向けた知見の蓄積も欠かせない。移動機能の障害をもつアスリートにおいては、健常部位への負荷は日常生活ですでに高い状態にあることが知られており、スポーツ障害によって疼痛や機能障害が生じると、競技だけでなく日常生活にも支障が生じることが懸念される。本号の2篇は筋電図や床反力計といったパラメータを活用し、これを適切な対照群と比較することで局所にかかる負荷を論じるアプローチをとっている点で共通性がある。パラアスリートのスポーツ障害に関する

研究はまだ課題が多く残されており、今後もこうしたアプローチによる研究が活発に行われることが期待される。

スポーツの様々な場面において縦断的なデータの蓄積によるスポーツ障害の予防・治療の試みが進んでおり、近年のセンサーの小型化や、機械学習も含めたデジタルデータの処理技術の発展がこの分野を益々推し進めていくことが予想される。パラスポーツにおいては選手や競技の個別性が高く、どのようなデータを収集するのか、またデータの標準化をどのように行うかについてなど検討する課題は多い。加速度センサーを例に挙げると、体のどの部位につけるのか、競技の様式によって対象者をどのように分類するのか、またそもそも健常者で用いられる加速度データの解析方法がパラアスリートで利用できるのか、といった点があ

げられる。また、スポーツ障害発生の有無についてもデータベース化はまだ進んでいない。ここには健常者のスポーツと異なり、選手の疾患や障害の個人情報管理と密接に関連した配慮事項があることにも取り組んでいかなければならない。

このようにパラアスリートのスポーツ障害研究には様々なハードルがあり、研究の対象として容易ではないかもしれない。しかし、競技を始めたアスリートが長く競技に関わり、さらにその後の生活においても支障なく過ごせる環境を整備するためにもこの分野の科学支援は欠かせない要素といえる。研究者だけで乗り越えられないハードルも存在するため、選手や関わる各団体がスポーツ障害研究の重要性について共通認識をもって、研究の環境の整備がすすむことが期待される。

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員

日 本 女 子 大 学 名 誉 教 授

一 般 社 団 法 人 日 本 衣 料 管 理 協 会 副 会 長

島 崎 恒 藏

第44回研究成果報告書に掲載の被服・工学系の研究課題について講評する。研究課題は4件あり、それぞれ内容は多岐にわたるが、課題ごとに講評したい。

研究課題「高強度運動後の筋血流・酸素化動態からみたクールダウンの効果：MRIを用いた検討」は、高強度運動後のクールダウンの効果に着目したものである。クールダウンは、全身の循環動態の急激な変化を避ける目的で行われるものであり、本課題は、筋血流・酸素化動態の観点からアプローチするものである。血流の画像化には、コンピュータ断層診断装置(CT)を用いる方法などもあるが、造影剤(トレーサー)を必要とするなど侵襲的な側面を持っている。本課題の特徴は、磁気共鳴画像法(MRI)により非侵襲的に血流・酸素化動態を評価するところにある。

実験において、被検者は健康成人男性で、測定対象部位は「前腕」である。運動負荷は、握力計を用いた右手のハンドグリップ運動とし、被検者の実施可能な最大強度で「収縮/弛緩」を「1秒/1秒」のサイクルで2分間、繰り返すものである。MRIによる撮像は、運動前、運動直後、運動20分後の3回実施している。得られた画像から動脈スピニング(ASL)法により、右前腕近位部(前腕全体、手関節屈筋群および伸筋群)の血流マップを得ている。実験結果としては、運動前に比較して前腕全体、手関節屈筋群と伸筋群の血流量は2分間の運動直後に有意に増加し、20分間の回復期に屈筋群と伸筋群の血流量は安静時

と同等程度まで回復した。骨血流に関しては、部位によって傾向が異なり、たとえば橈骨では運動直後に血流量は低下し、20分後には有意に増加することが明らかになった。以上のように、MRIのASL技術を用いることにより、本研究では前腕を測定部位とした血流測定が可能であるなどの成果を得ている。しかし気になる点として、測定部位としては他の部位も考えられるわけで、「なぜ前腕部を選択するのに至ったのか」については説明があってもよかったと思う。また、本実験結果が血流障害などの疾患に対する臨床応用へも期待できるとしているが、スポーツ科学の観点からは、本課題が目指した「クールダウンの効果」に対し、この実験結果から導かれる意義や知見などに関する言及がなく、物足りなさが残る点是否定できない。クールダウンの解明は、スポーツ分野に寄与する面が大きい故に、本研究をさらに進展させていただきたいと考える。

研究課題「屋外暑熱環境下における運動中の高放射熱が身体冷却リカバリー時の体温動態に及ぼす影響」は、屋外暑熱環境下において運動を行った際の身体冷却リカバリー時の体温動態に関して研究したものであるが、特に影響が大きい高放射熱存在下の環境に焦点を当てている。夏季の熱中症への対策が取りざたされる昨今、スポーツ関係者ばかりでなく、屋外労働者などにも有効な情報提供が期待される研究課題でもある。

実験においては、運動習慣のある健康男性(大学生)を被検者として、気温31-35℃、湿度48

- 65% RH, 日射量 $950 - 1,150 \text{ W/m}^2$ の環境下で直腸温が 38.50°C になるまで, 定められた自転車運動で負荷をかけている. 身体冷却リカバリーは, 室温 $28 - 31^\circ\text{C}$, 湿度 $50 - 60\% \text{ RH}$ の環境下で, 「冷水摂取のみ」と「冷水摂取とファン付きジャケット併用」をランダムな順序で実施し, 直腸温が 37.75°C に低下するまで継続している. 実験結果としては, リカバリー時の外耳道温における低下率は, ファン付きジャケット併用の方が水分摂取のみのケースよりも有意に高く, 平均皮膚温では冷却開始 20 分間の低下率も, ファン付きジャケット併用の方が水分摂取のみよりも有意に高いことが示された. また主観的指標に関してもファン付きジャケット併用によって早期に改善していくことが示されたが, 本研究課題で注目点となる直腸温の低下率は, 平均値においてはファン付きジャケット併用の方が冷水摂取のみよりもわずかに高い傾向であったものの, 統計的に有意差は検出できなかったとしている. 本実験の結果は, 冷水摂取とファン付きジャケット併用が高輻射を伴う屋外暑熱環境下における被検者の熱負荷を早期に低減し, 疲労感や温熱感の低下に結びつく点で, 有効であることを示した. 若干, 気づいた点を挙げるとすれば, 被検者数がやや少ないのではないかと思う点と, 実験で採用したファン付きジャケットの性能の問題である. 前者に関しては, この種の実験では個人差・実験誤差が大きいと思われるためであり, 後者に関しては, ファン付きジャケットの冷却性能が直接結果に結びつく点と考えるため, これらの点に対する念入りな検討があってもよかったであろう. 今後の研究に期待したい.

研究課題「汗中の乳酸に反応して図柄が変化するスポーツウェアの開発」は, スポーツウェアに関する研究ではあるものの, これまで研究例の多かった快適性や機能性に関する研究とは, 全く視点が異なるものである. 本研究課題は, 従来から

著者らが進めてきた一連の研究から派生した課題のようで, 具体的にはスポーツ時の汗に含まれる乳酸量の評価(表示)を試みたものである. すなわち, 乳酸反応性ポリマーを綿布(報告書中では"木綿布")と複合させ, 色素を用いることで, 乳酸濃度により綿布上の図柄を変化させるという試みである. これが実現すれば, 汗中の乳酸濃度に対応して図柄が変化するスポーツウェアを作り出すことができ, アイデア商品につながる可能性もある.

具体的な実験手順は, モノマー溶液(含有成分: ポロン酸モノマーや第四級アンモニウムモノマー)を綿布に含浸し, これにフォトマスク(図柄)を介し紫外線を照射して重合させ, 乳酸反応性ポリマーを綿布上で複合化する. 得られた綿布をアニオン色素で着色すれば, 乳酸水溶液に対応して図柄が変化する綿布を作り出すことができる. 実験において, アニオン色素で着色した乳酸反応性ポリマーの複合化綿布に対して, 乳酸濃度を検討したところ, 乳酸濃度の上昇により図柄が変化していくことが確かめられた. しかし実際には, 図柄のさらなる精細度の向上が必要であることがわかった. また申請書において計画したインクジェットプリンターの使用やアイロンプリント紙の検討も, 残された問題となっている. ここで付言すれば, 実際にスポーツウェア等への応用を考える場合には, 上記の課題に加え, さらに乗り越えなければならないハードル(課題)もある. たとえば, 乳酸濃度変化による繰り返し反応への耐久性, そして衣服であれば洗濯や日光に対する耐久性にも十分な対策が必要であろうし, それ以前に汗中の乳酸濃度を検出する場合に, "ウェアのどの部位につけて, どのような利用の仕方をするか", なども検討すべきであろう. しかし着想は面白い課題なので, 実現に向かって進捗させていきたい.

研究課題「環境条件の違いにおける発汗による

衣服の張り付き不快感の評価」は、衣服の快適性評価に関わる研究課題であり、衣服が発汗によって濡れて張り付いた際の不快感について検討したものである。特に本課題では環境条件を変化させた状態で、生理・心理状態を調査しているのが特徴である。

実験では、健常な成人男性を被検者として、一定の環境下で20分間の運動を負荷して発汗を促した後、温湿度が異なる5種類の環境下で生理・心理状態を調査している。評価時に着用したのは、Yシャツ（綿・ポリエステル混紡のブロード生地）である。またこの他に、同種のYシャツ生地から採取した試料を加温した人工皮膚上に置き、水分を滴下して熱・水分の移動状態を把握し、さらに生地の水分量を変化させて人工皮膚との間のすべり抵抗測定も行っている。実験結果からは、環境条件が大きく評価に影響することが示さ

れている。すなわち低湿度環境では冷感や濡れ感による不快感が生じ、中位的な温度環境では生地のすべり抵抗感が表面化して不快感となり、高温湿度の環境では衣服内湿度が高くなって蒸れ感やべたつき感による不快感が発現することが明らかにされている。以上の結果は、有益な知見といえようが、試料としてYシャツ生地を選定した点については、若干疑問が残る。Yシャツを肌着なしに直接着用することもあるだろうが、皮膚と直接接触する重要さを考えると、明らかに肌着素材（ニット）の方がプライオリティは高いはずである。両者の間では、生地特性がかなり異なるので、Yシャツ生地の結果が肌着素材にそのまま適用できるかは疑問である。また分析方法に関しても幾分、荒っぽさを感じる点があり、生地の種類や構造との関係も含めて、本研究課題がさらに継続・発展することに期待したい。

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 教授 田 畑 泉

中川伸ら(山口大学)は、嫌気性作業閾値(AT)より低い主観的運動強度13以下の強度での、30分間自転車エルゴメータ運動を週2回、4週間、慢性あるいは反復性うつ病患者8名(44.6 ± 12.8歳)に行わせたところ、うつ病臨床評価HANDの値が12.87から8.62に大きく低下し、これを明らかにし、従来、有効性が報告されている中等度の強度での1時間の運動を週3回よりも負担の少ない運動療法で、臨床の観点から大きな改善を得ることができたと報告している。この研究は、我が国において患者数が増加しているうつ病の新たな運動療法の開発につながる社会的にも意義のあるものと考えられる。

山中航ら(順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科)は、仮想空間(VR)技術を用いたサイクリング運動中の競争他者との関わりが運動パフォーマンスに与える影響を観察した。その結果、追い抜かれる場面において、自転車運動のパフォーマンス(回転数)が低下することが示された。この研究成果は、競技力向上につながる新しいメンタルトレーニング法の開発に記する貴重なものである。

芝口翼(金沢大学)らは、ラットを対象とした研究により、筋損傷後のアイシングが、28日後の当該筋のミトコンドリア量を低下させ、さらに筋の線維化を促進すること、一方、アイシング1日後から隔日で温熱刺激(温水浴(42℃:30分))を2週間で行うことにより、筋損傷後のアイシングによる筋線維化を抑制すること報告した。

これらの結果は、スポーツ現場で疼痛予防等のために頻用されるのアイシングの副作用を温熱刺激が抑制することを示したものであり、今後、ヒトを対象に同様な方法によるスポーツ選手の筋コンディション維持に関する方策開発の一助となる可能性が示された。

佐渡夏紀(筑波大学)は、成人男女(21名)を対象に、ダーツ投げにおいて、肩関節を拘束することにより自由度を削減した場合に、そうで無い条件に比べて、3投目の到達点-目標間距離が短縮したことより、運動学的自由度が大きい状況の方が運動学習に有利となることを示唆した。この研究は冗長性という観点から、保健体育の授業を再評価するという点で社会的意義が高いと考えられる。

一寸木洋平(東京国際大学)らは、Posterior-root muscle reflex法を用いて、これまで報告の無い、ヒラメ筋以外の下肢筋(前頸骨筋、大腿二頭筋)においても、全身振動刺激が、単シナプス反射回路興奮性を一時的に抑制することを若年男子7名で明らかにした。この全身振動刺激はスポーツ選手の競技力向上等で利用されていることから、その機序をさらに解明することに資する基礎研究として価値があると考えられる。

欠畑岳(東京大学・早稲田大学)は、大学陸上競技所属の男子7名と女子5名を対象に、上り坂(平均傾斜4°)と平地における60m全力疾走中の下肢筋活動を筋電図で比較評価した。その結果、平地走に比べて登り坂走では、大腿直筋と大腿二

頭筋の筋活動のタイミングがランニングサイクルの後半にシフトすることが明らかとなった。この研究は、陸上競技で頻用されている全力坂道走トレーニングに関する実践的・かつ基礎的研究として評価される。

木内聖（国士舘大学）らは、ランニング（速土：2.78 m/sec）中の足部の3つのアーチ（内側縦アーチ、外側縦アーチ、中足骨アーチ）変化及び足底加重分布パターンを足底圧分析機で定量化した。その結果、特に内側縦アーチが前方への推進力を生み出していることを明らかにした。この研究成果は、足部のアーチという観点から、競技力向上のための新しいトレーニング方法の開発につながる基礎的研究として評価される。

小川剛司（大阪教育大学）は、スポーツ実践中に多く用いられている布製のマスクが、運動に対する呼吸循環系の反応に及ぼす影響を、若年男性9名を対象に観察した。その結果、最大換気量は有意に低下したが、最大酸素摂取量や最大心拍出

量、血中酸素飽和度には影響が見られなかったと報告した。この研究成果は、新型コロナウイルス蔓延下においても、布製のマスクは、呼吸循環系の反応の大きな影響を与えずに、運動を実施することが可能であることを示唆したものであり、コロナ渦における安全な運動を示したという点で社会的に大変、有意義な研究であると評価できる。

鈴木大地（順天堂大学）らは、“スポーツとアートとテクノロジーを融合した新しいスポーツ参画システム”の体験が、運動に対する行動変容のステージ与える影響について、620名の大学生について調査を行った。その結果、このシステムを体験した場合、行動ステージが上昇することが明らかとなり、このようなシステム参加が、運動・スポーツの参加が低い若年層の運動を始めるきっかけを促す可能性が示された。この研究は、若年者の運動・スポーツへの参加を高める新しい方法論の開発という観点から社会的意義が高い。

入選研究者成果報告書講評

学術委員
名古屋大学 名誉教授 押田芳治

毎年多数の応募の中から、第44回石本記念デサントスポーツ科学振興財団研究助成に採択された32件のうち報告書として提出された論文は24件に留まったという。これも少なからずコロナ禍が研究の進捗に影響をおよぼしたものと考えられる。24件中、私に課せられた9件について講評する。広範囲の研究であるので、私の独断で2つの大きな課題に分類し、評価を加えたい。中には整形外科的な分野もあり、内科医の私には少々荷が重く、的の外れたコメントであればご容赦願いたい。

1] 『運動による種々の身体反応に関する研究』

5件の研究で成り立っており、体力・スポーツ医学分野の普遍的課題といえる。まず、中村学園大学の熊原らの「若年成人における歩行および同等速度のジョギングによる座位行動ブレイクが食後血糖・脂質動態に及ぼす影響」について、これまでADAの指針で示された、2型糖尿病患者では30分座位毎に最低3分の運動を勧められている。健康者でも長時間安静に対する弊害、中途での運動の有効性を述べている。しかし、現実社会においては30分毎に運動を実施することが困難である。一つの方法として短時間運動の代わりにEMS利用も効果的か検討されるのも宜しいかと思われる。次に、日体大の岡本の「運動前の食事摂取の違いが動脈スティッフネスと有酸素性運動パフォーマンスに及ぼす影響—植物性ベースと動物性ベース食品の比較—」について、植物性ベース食品の優位性が示された。現実的に植

物性ベース食品の摂取が種々の競技成績に影響を与えるか、さらに植物性ベース食品摂取の優位性のメカニズムに関して今後一層明らかにしていただきたい。続いて、京大の横川らの「運動による白色脂肪組織の量的・機能的適応を制御する因子としての骨格筋AMPキナーゼの可能性」について、京大の林教授主宰のグループは長らく骨格筋内AMPKを研究されてきたが、今回は内臓脂肪との関係に着目し、運動によるAMPK活性増大が白色脂肪の変容に影響を与える可能性を提示した。今後は運動による骨格筋内AMPK、筋由来ペプチドであるイリシン、白色脂肪の褐色脂肪化の連関を明らかにしてほしい。名市大の檜森は「運動が炎症誘発性筋力低下を抑制する分子機構の解明」について、自己免疫性筋炎モデルを対象に自発運動は筋炎進展防止の有効性を提示したが、その機序に関して候補に挙げたタンパクは関与しないというnegative dataであった。医療費抑制の観点からも運動が自己免疫疾患の発症予防や進行阻止に有効とする研究を続けていただきたい。さいごに、明治安田厚生事業団の須藤の「身体活動による骨格筋の形態的变化は脳の健康増進に寄与するか? : 認知機能と情動の改善を目指した戦略の構築」について、これまで身体運動の継続のMCI、うつ病、寿命延伸に対する有効性は周知の事実である。残念なことに、本研究では認知機能の改善、そのメカニズムまで明らかにできていない。さらなる研究成果を期待するものである。

2] 『骨・関節・筋に関するバイオメカニクス、

整形外科的観点からの検討』

以下の4件が該当すると思われる、その評価を行う。まず、東京医歯大の井原らの「深度センサを用いた Scapular dyskinesis 検出手法の確立」について、肩甲骨動作を深度センサで計測した点はユニークな発想と思われる。ただ、筆者らも信頼性の観点から述べているように、精度の向上が喫緊の課題といえよう。次に中京大の廣野らの「求心性および遠心性収縮運動による運動単位動員特性の変化～高密度表面筋電図を用いた解析～」について、正直、一読では理解できなかった。レジスタンス運動による一時的な筋力低下の原因は神経筋疲労とし、運動部位に高密度筋電図、筋エコー図を用いて、求心性、遠心性筋収縮運動後の運動単位レベルで検討を加えたものである。先述したように研究に至った経緯、意義が理解できなかった。門外漢にも理解できるようにお願いしたい。大阪大中尾らの「日本外傷データベースを用いたスポーツ関連外傷の疫学的データの推移と予後関連因子に関する研究」について、内容は題名通りである。今後可能なら本研究結果から、外傷はどのような状況で発生したか、練習中か、競技中か、たまたま行っていた余暇スポーツ時であったかを

明示され、その対策まで言及されることを期待したい。最後に北大の門間らの「生体内における生理的環境下での関節接触面解析手法を用いた肩関節疾患の病態解明」について、筆者らも述べているように、他誌への投稿を意識してのことと思われる。本文章はあくまでも本研究申請書類に加筆した程度で論文の体をなしていない。それゆえにコメントのしようがない。

以上が私に課せられた講評である。なかには、筆者の方々から「的外れ」、「勉強不足」、「独断」等の御叱責を受けるかもしれない。一つの意見として読んでいただくと幸いである。さて、今回9編の論文、あるいは査読した論文のなかには図表が本文中に入り込んでいるものが何編か見受けられた。一般的な論文の体裁は、本文、引用文献の後に各表、図の説明文、各図で成り立っているはずである。国内外の学術雑誌の投稿規定にもそのように記載されている。

本講評を終えるにあたり、石本記念デサントスポーツ科学振興財団の篤志に厚くお礼申し上げるとともに、若手・中堅研究者のさらなる発展を祈念いたします。

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	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	佐 藤 祐 造	名古屋大学 名誉教授 一般社団法人健康評価施設査定機構 理事長
理 事	島 崎 恒 藏	日本女子大学 名誉教授
理 事	杉 浦 剛	デサントジャパン株式会社 R&D ユニット長
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
監 事	檜 垣 誠 次	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	藤 本 繁 夫	大阪公立大学 名誉教授
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

活 動 報 告

- (1) 第 44 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 4 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 4 年 3 月 22 日

- (3) 臨時書面理事会 (決議の省略)
開催日: 令和 4 年 5 月 17 日
議 題: ① 評議員会招集の件

- (4) 定時理事会
開催日: 令和 4 年 6 月 10 日
議 題: ① 令和 3 年度事業報告承認の件
② 令和 3 年度決算報告書承認の件
③ 株主権の行使の件
④ 評議員会招集の件

- (5) 第 45 回学術研究公募開始
令和 4 年 6 月 14 日

- (6) 定時書面評議員会 (決議の省略)
開催日: 令和 4 年 6 月 29 日
議 題: ① 令和 3 年度事業報告承認の件
② 令和 3 年度決算報告書承認の件

- (7) 第 43 回～第 44 回学術研究成果報告書提出締切
令和 4 年 6 月 30 日

- (8) 第 45 回課題学術研究公募締切
令和 4 年 8 月 5 日

- (9) 第 45 回課題学術研究公募申請書審査
令和 4 年 8 月 6 日～令和 4 年 11 月 17 日
- (10) 令和 4 年度学術委員会
開催日：令和 4 年 11 月 17 日
議 題：① 令和 4 年度（第 45 回）学術研究公募審査の件
② その他
- (11) 臨時書面理事会（決議の省略）
開催日：令和 5 年 1 月 20 日
議 題：① 評議員会招集の件
- (12) 定時理事会，定時評議員会（同時開催）
開催日：令和 4 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 基本財産取り崩しの件

以 上

一 編 集 後 記 一

機関紙「デサントスポーツ科学」第44巻の発行にあたり、学術研究をお寄せいただいた研究者の皆さま、発行にご尽力いただいた学術委員の先生方はじめ関係者の皆さまに厚く御礼申し上げます。

コロナ禍の影響が続くなかで精力的に研究に取り組み、予期せぬ障害を創意工夫と情熱で克服し研究を完成されたご苦労は大変なものだったと思います。残念ながら、期間内に研究の完成に至らず当号巻に掲載ができなかった研究者もいらっしゃると思いますが、次号巻への掲載に向けて引き続きご研究に取り組まれております。皆様方に心より敬意を表します。

機関紙「デサントスポーツ科学」は当号巻よりeジャーナルとしての発刊となりました。本棚に並ぶ冊子が増えなくなることには寂しさも感じますが、助成研究の成果を広く情報公開することは当財団の目指すところであり、eジャーナルへの移行により、皆さまよりお寄せいただいた研究論文が広く検索・参照され、スポーツ健康科学領域の研究の発展に寄与することに期待を感じております。

機関紙「デサントスポーツ科学」は当財団のホームページ、J-STAGE、信州大学産学連携情報提供支援データベースに掲載をいたします。これまで発行しました機関紙も順次eジャーナルとして掲載をまいります。

今後とも当財団の学術研究募集に多数のご応募をいただき、一層充実した機関紙「デサントスポーツ科学」の発行を応援いただきます様、よろしくお願い申し上げます。

編集局長 坪内 敬治

「デサントスポーツ科学」第44巻 DESCENTE SPORTS SCIENCE Vol. 44

(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5年2月22日
Feb. 22, 2023
発行所 公益財団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団 事務局
PUBLISHER THE DESCENTE AND ISHIMOTO MEMORIAL FOUNDATION
FOR THE PROMOTION OF SPORTS SCIENCE
〒556-0017 大阪市浪速区湊町1丁目2番3号 マルイト難波ビル13F
Maruito Namba Building 13F, 1-2-3 Minatomaichi
Naniwa-ku, Osaka 556-0017 Japan
Tel. 080-4187-3046
<http://www.descente.co.jp/ishimoto/>
E-mail zaidan@descente.co.jp

「デサントスポーツ科学」編集局
〒567-0086 大阪府茨木市彩都やまぶき2丁目3番2号
Tel. 080-4027-4058, 080-1499-1719
E-mail zaidan@descente.co.jp

製作所 株式会社 色染社
〒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/>