

〔一般研究発表〕

筋疲労に伴う Ca^{2+} 放出機能低下に及ぼすカルスタビンの影響

○相原千尋・渡邊大輝・和田正信（広島大学大学院総合科学研究科）

【目的】

筋疲労とは、一定の張力を継続して発揮できなくなる現象を指す。その原因の1つは、筋小胞体 (sarcoplasmic reticulum: SR) の Ca^{2+} 放出チャネル (Ca^{2+} release channel: CRC) の機能が低下し、 Ca^{2+} 放出量が低下するためであることが報告されている。CRC の機能は、CRC 自身のリン酸化・脱リン酸化状態に依存する。CRC の開口確率は、チャネルがリン酸化されると増加し、逆に、脱リン酸化されると低下することが明らかとなっている。

カルスタビンは CRC に結合し、CRC の閉口状態を一定に保つタンパク質である。しかしながら、筋疲労に伴う CRC の機能低下に、カルスタビンが関与するか否かは明らかとなっていない。そこで本研究では、この点について検討することを目的とした。

【方法】

実験には8~12週齢のWistar系雄性ラットを用いた。麻酔下のラットに、坐骨神経を介した電気刺激 (70Hz, 3秒に1回) を、腓腹筋の張力が初期値の50%に至るまで負荷した。収縮終了0.5時間後に筋を摘出した。なお、刺激を負荷した脚を刺激脚、負荷しなかった脚を安静脚とした。分析項目は、4-クロロ-m-クレゾール (4-chloro-m-cresol: CMC) 誘因性SR Ca^{2+} 放出速度、CRC のリン酸化量、CRC のリン酸化部位であるSer2844のリン酸化量、およびCRCに結合しているカルスタビン量であった。

【結果】

安静脚と比較して刺激脚では、50%の Ca^{2+} 放出速度を誘起するために必要なCMC濃度、およびCRCの脱リン酸化量は高値を示した ($P < 0.05$)。しかしながら、Ser2844のリン酸化量およびCRCに結合しているカルスタビン量には、差

異は認められなかった。

【考察】

本研究では、CRCの機能低下の原因の1つが、CRCが脱リン酸化されるためであることが示され、これは先行研究と一致する結果である。しかしながら、脱リン酸化部位はSer2844ではないこと、また、CRCの脱リン酸化に伴って、CRCに結合するカルスタビンの量は変化しないことが観察された。CRCには、リン酸化・脱リン酸化部位が複数存在するため、カルスタビンが関与しない部位が修飾を受けた可能性がある。

in vitroの実験系を用いた先行研究では、ウサギの骨格筋において、 Ca^{2+} / カルモジュリン依存性タンパク質キナーゼがCRCのSer2843をリン酸化することが示されている。また、ラットの心筋に対して、CRCに直接脱リン酸化処置を施した研究では、CRCの Ca^{2+} 放出機能およびSR Ca^{2+} 含有量が低下することが示されている。本研究の結果から、in vivoでは筋疲労に伴うCRCの Ca^{2+} 放出機能の低下に、(1) カルスタビンは関与しないこと、および(2) 心筋で報告されたものと同様のメカニズムが作用していることが示唆された。

〔一般研究発表〕

クーリングベストを用いた身体冷却が暑熱環境下の運動パフォーマンスに及ぼす影響

○竹島佳佑, 長谷川博 (広島大学大学院総合科学研究科)

【目的】

運動前の身体外部冷却は、運動初期の皮膚温の低下とそれに伴う熱知覚の改善によって、暑熱環境下の持久的運動パフォーマンスを向上させる方法として注目されている。特に頸部領域における冷却は、身体他の部位よりも大きく熱知覚を改善させることが示されている。本研究の目的は、従来使用されている胴部の冷却のみのクーリングベストと比較して、頸部冷却が可能なハイネックベストの運動前の着用が、暑熱環境下におけるタイムトライアルパフォーマンスおよび熱知覚に及ぼす影響を評価することである。

【方法】

日頃運動を行っている男子大学生8名が暑熱環境下(32℃, 50% Rh)において30分間のサイクリングタイムトライアルを行った。実験は、実験手順に慣れさせるためのファミリアリゼーションの後に、本実験としてクーリングベストを着用しない条件(NV)、クライオベストを着用する条件(CV)、ハイネックベストを着用する条件(HV)の3回のトライアルをランダムに行った。クーリングベストはウォーミングアップ後に15分間着用された。パワー出力、直腸温、皮膚温、心拍数、主観的運動強度、全身の温熱感覚および熱快適性を測定した。

【結果】

トライアル全体の平均パワー出力はCV条件(182 ± 17 W, d = 0.29)およびHV条件(183 ± 16W, d = 0.36)においてNV条件(176 ± 21W)と比較して高値を示した。運動開始時、平均皮膚温はCV条件(34.03 ± 0.84℃)およびHV条件(33.80 ± 1.06℃)でNV条件(35.22 ± 0.57℃, p < 0.05)と比較して有意に低かった。頸部皮膚温はHV条件(32.54 ± 1.23℃, p < 0.05)

においてNV条件(35.91 ± 0.29℃)およびCV条件(35.44 ± 0.38℃)と比較して有意に低かった。発汗量はHV条件(0.91 ± 0.23kg)においてNV条件(1.0 ± 0.26kg, d = 0.36), CV条件(1.0 ± 0.21kg, d = 0.40)よりも減少した。冷却後、温熱感覚はHV条件で最も低く、CV条件, NV条件よりも有意に低かった。熱快適性は有意ではないが、クーリングベストの着用によって改善した。直腸温および心拍数は実験中のどの時点においても条件間に差は見られなかった。

【結論】

運動前のクーリングベストの着用は、皮膚温を低下させ、生理的な負担を増加させることなく持久的運動パフォーマンスを向上させた。また、パフォーマンスに対してさらなる効果は得られなかったものの、ハイネックベストは胴部の冷却のみの従来のクーリングベストよりも発汗量を減少させ、さらに運動開始前の熱知覚も大きく改善させた。このように、頸部冷却も可能なハイネックベストは競技大会やトレーニング時に、アスリートやコーチに広く求められるかもしれない。

〔一般研究発表〕

試合と練習における心理的プレッシャーについて

○遠藤拓哉, 来間千晶, 関矢寛史 (広島大学大学院総合科学研究科)

スポーツ選手は試合で良い結果を残すために、日々練習に励んでいる。しかし、試合になると様々な心理的プレッシャーがかかり、実力を発揮できないことが多々ある。心理的プレッシャーがかかる試合において良いパフォーマンスを維持するためには、練習時に試合時と同様のプレッシャーをかけて取り組むことが効果的であると考えられる。プレッシャーをかけた練習がパフォーマンスに及ぼす影響を検証した先行研究では、ゴルフパッティング課題におけるパフォーマンスの向上(Lewis & Linder, 1997)、バスケットボールフリースロー課題におけるあがりの抑制(Oudejans & Pijpers, 2009)、警察官の射撃における正確性の向上(Nieuwenhuys & Oudejans, 2011)などについて明らかにされてきた。しかし、これらの研究結果は、実際の競技場面よりも低強度のプレッシャーを負荷した、あるいは競技場面で生じるプレッシャーとは質の異なる状況や賞罰などを操作してプレッシャーを負荷した結果得られたものである。そのため、試合でかかる心理的プレッシャーに対処するために競技者は練習でどのような心理的プレッシャーを意図的にかけているのか、また練習でかかる心理的プレッシャーは試合でかかる心理的プレッシャーに対応するのかわについては、これまで研究されていない。したがって、より試合を意識した試合のための練習が現場でなされるために、試合と練習における心理的プレッシャーを現場から抽出し、練習でかかる心理的プレッシャーと試合でかかる心理的プレッシャーの対応関係を明らかにすることが必要である。そこで、本研究の目的は、1. 試合、練習においてどのような心理的プレッシャーがあるのかを明らかにすること、2. 練習においてどのような心理的プレッシャーをかけた練習方法があるのかを明ら

かにすること、3. 試合と練習における心理的プレッシャーを比較し、その対応関係を調べること、の3点とした。

競技者14名(男性7名、女性7名;平均年齢23.71歳,SD = 4.12)及び指導者11名(男性9名、女性2名;平均年齢37.0歳,SD = 12.06)を対象にインタビュー調査を実施した。本研究では、幅広い競技種目と競技レベルからデータを収集するため、調査対象の競技種目を11種目(サッカー7名、チアリーディング4名、マラソン1名、アーチェリー1名、柔道1名、テニス1名、陸上1名、バドミントン1名、弓道1名、インドアサッカー1名、クロスカントリースキー1名)、また、競技レベルを地区大会から国際大会までと設定した。データ収集は、半構造化面接の形式で行い、面接内容はICレコーダーによって録音した。面接終了後、面接者が文字起こしを行い、トランスクリプト(逐語記録)化した。分析方法には、質的分析を用いた。質的分析では、心理的プレッシャーに関連する意味単位を試合時と練習時に関するものに分けてから類似したものの同士を分類しカテゴリー分けを行った。

その結果、161,113単語の中から心理的プレッシャーに関連する627の意味単位が抽出された。まず試合でかかる心理的プレッシャーは21カテゴリーに分類され、自然にかかる心理的プレッシャー19カテゴリー(e.g., 周りからの期待、試合中の状況の変化)と操作された心理的プレッシャー2カテゴリー(自分にプレッシャーをかける、指導者が選手のプレッシャーをコントロールする)を含んでいた。これらより試合においては、指導者や競技者はパフォーマンスを発揮する上で

心理的プレッシャーのレベルを最適にするように意識的に心理的プレッシャーを操作していることが明らかとなった。また、練習でかかる心理的プレッシャーは36カテゴリーに分類され、自然にかかる心理的プレッシャー22カテゴリー（e.g., 失敗への恐れ、指導者の厳しい指導）と操作された心理的プレッシャー14カテゴリー（e.g., 環境を試合に近づける、トレーニングメニューを操作する）を含んでいた。練習では、指導者だけではなく競技者自身も多様なプレッシャーをかけていることが明らかとなった。さらに、試合時と練習時のプレッシャーの対応関係について、まず練習時には存在せず試合でのみみられた心理的プレッシャーとして、「感覚や体調が異なる」、「怪我の再発」、「試合の価値が大きい」、「自分に自信がない」というカテゴリーが示された。これらの心理的プレッシャーに対処するには、メンタルトレーニング（e.g., イメージトレーニング、リラクゼーション、カウンセリング、自己暗示法）を用いることができると考えられる。一方で、試合時には存在せず練習時でのみみられた心理的プレッシャーには、「罰メニューを賭ける」、「理不尽なプレッシャーをかけられる」、「指導者があえて関わる」、「キャプテンをローテーションさせる」、「選手自身に練習メニューを作らせる」というカテゴリーが示された。以上より、競技者や指導者は練習において、試合でかかる心理的プレッシャーに慣れるという目的だけではなく、練習の質を向上させるという目的で心理的プレッシャーを意図的にかけていることが明らかとなった。

〔話題提供〕

競技中における『気持ちが切れた』現象とは？ —質的・量的手法からのアプローチ—

○来間千晶（広島大学大学院総合科学研究科）・関矢寛史（広島大学大学院総合科学研究科）・
小川茜（広島大学大学院総合科学研究科，西日本短期大学）

日本人競技者が自身の競技会での経験について言及する際に、「気持ちが切れた」または「気持ちが切れなかった」という表現を用いている。そのような競技者の発言から、競技中に気持ちが切れた場合には競技パフォーマンスが悪く、切れなかった場合には競技パフォーマンスが良くなる可能性があると考えられる。そこで本研究では、(1) 競技中における気持ちが切れた／切れなかった現象の構成概念および発現機序を明らかにすること、(2) 競技中における気持ちが切れた現象を抑制する要因を明らかにし、それらが競技者の心理状態および課題成績に及ぼす効果について検討することを目的とした。

研究1では、気持ちが切れた／切れなかった現象の構成概念および発現機序、気持ちが切れることの抑制要因を明らかにすることを目的とした。現象に関しての先行研究の蓄積が少なく、変数が把握されていないときに用いられる（才木，2006）質的手法を用いた。18名の現役競技者の逐語記録を分析した結果、気持ちが切れた現象は、戦況など「気持ちが切れた原因」、プレーへの集中力の低下など「気持ちが切れている状態」、ポジティブ・ネガティブな感情など「気持ちが切れた試合後の反応」によって構成されていることが明らかになった。また、気持ちが切れなかった現象は、戦況の良し悪しなど「気持ちが切れそうになった原因」、戦意喪失など「気持ちが切れそうな状態」、他者のポジティブな言動など「気持ちが切れそうな状態から脱却するきっかけ」、ポジティブな感情の生起など「気持ちが切れそうな状態から脱却した後の状態」、試合結果に対する評価や感情など「気持ちが切れなかった試合後の反応」によって構成されていることが明らかになっ

た。さらに、両現象の発現機序を比較したところ、気持ちが切れることを抑制する要因として、試合前の高いモチベーション、他者のポジティブな言動、戦意の高まり、思考の転換、戦況の好転、体力の残存、気持ちが切れそうな状態における戦意の維持が挙げられた。

また、研究1で得たある事例ではライバル選手に勝つことは諦めたものの、身体動作を維持する意欲が見られた。その一方で、勝利意欲がありながらも、集中力が低下した事例も見られた。このことから、気持ちが切れている状態にはいくつかパターンがある可能性があると考えられる。また、「気持ちが切れている状態」には複数の構成概念が含まれていたことから、「気持ちが切れた」という表現はどのような状態を示すのか、明確な定義が確立できていない。

そこで研究2では、競技者の経験に基づき、(1) 競技中における気持ちが切れている状態のパターン分けをすること、(2) 競技中における「気持ちが切れた」という表現の定義づけをすることを目的とした。過去に競技会に出場したことのある競技者を対象者とし、研究1の結果をもとに作成したアンケート調査を行なう。競技会で実際に経験した「気持ちが切れている状態」について36項目の質問に回答させ、クラスター分析と分散分析または主成分分析を組み合わせを行なう。これにより、回答傾向が類似する調査対象者と質問項目をクラスターに分類し、各クラスターの性質から、気持ちが切れている状態のパターン分けおよび表現の定義づけを行なう。

〔話題提供〕

低頻度疲労とは

和田正信（広島大学大学院総合科学研究科）

1. 低頻度疲労の発見

ヒトの筋に対して電気刺激により収縮を誘起すると、発揮される張力は、50Hz付近までは刺激頻度の増大とともにほぼ直線的に増加するが、50Hzを超えると増加率は緩慢となる。張力の増加率が高い領域の刺激頻度は「低頻度」と、緩慢な領域の頻度は「高頻度」と呼ばれる。1977年、Edwardsらは、筋疲労に関する研究を行う中、激しい筋収縮後では、高頻度誘因性張力より低頻度誘因性張力の方が低下率が大きいこと、また、低頻度誘因性張力の方が回復に時間を要することを観察し、この現象を「低頻度疲労(low-frequency fatigue: LFF)」と呼んだ。

2. 低頻度誘因性張力が大きく低下する原因

興奮・収縮連関とは、筋細胞の形質膜に活動電位が発生してから、筋原線維が収縮するまでの一連の過程を指し、多くの細胞内小器官が関与する複雑な過程である。これらの中で、発揮される張力の大小に特に大きく影響するのは、筋小胞体からの Ca^{2+} 放出機能と筋原線維の収縮機能である。1990年代中頃から精力的に行われてきた、LFFのメカニズムに関する研究では、この2つの器官（筋小胞体と筋原線維）の機能の不全が、LFFの成因であることが示唆されてきた。

3. 生体内で起こる変化

しかしながら、上記の知見は摘出した筋を用いた研究から得られたものであり、生体内でもそのような現象が生ずるか否かは明らかではない。そこで我々は、生体内でLFFを発生させる動物実験モデルを開発し、この問題について検討した。その結果、LFFは Ca^{2+} 放出機能の低下に起因して起こること、また、放出機能の低下には、筋小胞体の膜上に存在する Ca^{2+} 放出チャンネルの開口確率の低減が関与することが明らかとなった。さらに、筋原線維の機能（ Ca^{2+} 感受性）は低下す

るどころか、逆に向上することも認められた。

4. 今後の課題

今後、以下の2点について検討していこうと考えている。(1)筋小胞体の Ca^{2+} 放出チャンネルがどのような化学的修飾を受けるのか。また、チャンネルを制御する機構は、放出機能の低下に関与していないのか。(2)筋原線維の Ca^{2+} 感受性の変化に対して、細胞内の酸化・還元状態がどのように影響するのか。

〔話題提供〕

産学官連携によるコンディショニング &リカバリー戦略プロジェクト

長谷川 博（広島大学大学院総合科学研究科）

近年、多くの競技会が暑熱環境下や高所環境、試合が短期間に集中するような過密スケジュールなど非常に過酷な環境下で行われている。2020年東京オリンピック・パラリンピックも例外ではなく、開催時期や環境条件、選手たちの生体負担度を考慮すると、オリンピック史上最も過酷な大会となることが予想されており、暑さ対策を含むさまざまな戦略は不可欠である。また、競技レベルに関わらず選手が怪我やオーバートレーニングを防ぎ、長期または短期間の中で試合に勝利し成功を収めるには心身ともにベストな状態（コンディション）をいかに保つことができるかが重要である。特にコンディションを維持・増進するためには、積極的休息、冷水療法、温冷交代浴、ストレッチング、睡眠、栄養などの“戦略的リカバリー”が注目されている。また、日常スポーツ活動を行い心身ともに健康な生活を目指す一般人においても運動後や労働後の疲労回復は重要なテーマである。本発表では、広島大学が有する研究施設と総合科学研究科を中心とする専門家及び地元のスポーツ施設と連携しコンディショニング及びリカバリーに関する研究・協力体制を構築するプロジェクトについて概説した。

〔特別講演要旨〕

最適ゴルフシャフト選定システムの開発

下野智史（三菱レイヨン株式会社）

1. はじめに

本稿ではバイオメカニクス研究のスポーツ現場への応用例として、最適ゴルフシャフト選定システムを概説する。

CFRP製ゴルフシャフトはラインナップの幅が広いので、個人のスイング特性にマッチしたものを選ぶシャフト選定が重要となる。現状のシャフト選定は経験豊富な専門家によって行われる。ゴルファーのスイング動作、シャフトのしなり方等を総合的に勘案し、複雑な判断が必要なのである。しかしながら高度なスキルを持つ専門家は少ない。そこで我々は、専門家でなくとも最適なシャフトを選定できるシステムの構築を目指した。

2. システム概要

本システムの最大の特徴はシャフトの違いによって生じるゴルファーのスイング動作変化を考慮した点にある。次の3つの手法を用いてこれを達成した。

1) 実験計画法

通常、個人内のスイング動作変化を把握するためには一人当たり膨大な数のシャフトで実験しなければならない。そこで実験計画法のL9型直交表を用い、必要最小限の9本のシャフトで効率的に実験を行った。スイングデータは6軸センサをシャフト内部に挿入して計測した。

2) 応答曲面法

次に、計測した9本のスイングデータから他のあらゆるシャフトをスイングした場合のデータを予測した。任意のスイングデータは応答曲面法を用いて次の式で表わされる。

$$f_i(x_i, y_i, z_i, t) = a_1(t) + a_2(t)x_i + a_3(t)y_i + a_4(t)z_i + a_5(t)x_i y_i + a_6(t)x_i^2 + a_7(t)y_i^2 + a_8(t)z_i^2$$

3) 有限要素法

最後に、予測したスイングデータとシャフトデータを対応させて有限要素法によるシミュレーションを行い、ヘッド挙動を算出した。繰り返し計算を行うことで、最適なインパクトを迎えるゴルフシャフトを導き出した。



Fig. 1 Simulation of head motion by FEM.

3. 検証結果

プロゴルファー6名を含む103名で検証実験を行った結果、89名において最適ゴルフシャフトを用いることで飛距離又は方向性、あるいはその両方が改善された。定量的には、飛距離にして約7yrd、方向性にして約7yrdが同時に改善されるものであった。

4. おわりに

本システムは2016年現在、全国4か所にて稼働している。このようにバイオメカニクスはスポーツの事象を解明する上で非常に有用であり、用具開発に必須の技術である。本例ではバイオメカニクスと計算科学を融合したシステムを構築したが、異分野と組み合わせることでこれまでにない有益な研究開発が可能になるものと思われる。特に、就職を考える学生にこの重要性が少しでも伝わり、進路選択やモチベーションの一助となれば幸いに思う。

[平成27年度広島体育学会奨励賞講演]

野球の守備練習における継続時間が生体負担度と 捕球・送球の正確性に及ぼす影響

森木吾郎 (広島文化学園大学)・黒川隆志 (環太平洋大学)・西山健太 (徳山大学)・
明石啓太 (国立スポーツ科学センター) 大塚道太 (広島大学)・
足立達也 (広島大学大学院教育学研究科)

1. 研究目的

野球のノック練習のトレーニング処方への有用な示唆を得るために、長時間のノック練習によって生じる生理的指標とスキルの指標の変化を検討した。

2. 研究方法

男子大学硬式野球部員7名にショートポジションを守らせ、17秒に1球のノック頻度で5分を1セットとし、12セットのノック練習を行った。セット間に1分間の休息を挿入した。生理的指標として、第1セットの開始30秒前から最終12セットの終了まで5秒毎に心拍数(HR)を連続記録した。第1セットの開始前(pre)及び各セットの終了後に主観的運動強度(RPE)と血中乳酸濃度(Lab)を測定した。スキルの指標として、試技毎に捕球・送球得点を評価した。

3. 結果および考察

各セットのピークHRは3セット目の最高値(173 ± 10bpm)から最終12セット目(163 ± 10bpm)の範囲で推移した。これは、HRmaxを220 - 年齢と考えると、80~90% HRmaxに相当する。この結果から、HRから見る本研究の運動プロトコールは5分間の高強度持久性運動と1分間の休息を繰り返すインターバルトレーニングの特性を呈していた。

平均Labは、preから3セット目の最高値(5.7 ± 4.1mmol/l)までに急激に上昇し、その後12セット目(2.2 ± 0.8mmol/l)まで徐々に低下した(p<.05)。この低下の原因として乳酸の原料となる筋グリコーゲンの枯渇が考えられる。中村ほか(2010)は、1ステージ4分間の漸増負荷テストを行い、総運動時間40分時点の体内グリコーゲン貯蔵量が2/3程度まで低下したことを示した。さらに、サッカー等の球技では筋グリコーゲンの枯渇により、ゲーム後半になると乳酸の産生は低下する(八田, 2009)。先述のように本研究の運

動プロトコールは5分間の高強度持久性運動の特性を持っており、Febbraio and Dancy (1999)が高強度持久性運動中の主要なエネルギー源であると示した筋グリコーゲンの低下が、終盤のセットにおけるLab低下の主な原因と考えられる。

捕球得点は1~4セット目に対して6~12セット目において3点の試技数で有意に減少、2点の試技数で有意に増加した(いずれも、p<.05)。この後半のセットでの低下は筋疲労のために高い運動強度を保つことが困難になったこと、及び疲労による判断力の低下が起きたことが原因と考えられる。

これらのことから、17秒に1回の頻度で長時間のノック練習を続ける場合、高パフォーマンスを維持するためには、1) 休息期において1回毎の守備動作の主要なエネルギー供給系であると考えられるATP-PCr系の回復を促すために、試技を数分程度のセットに区切り、セット間に短い休息をとること、また、2) 筋グリコーゲン濃度の低下から推測される筋疲労の回復を促すために、数セット終了毎に長めの休息をとること、が効果的であると示唆された。

Febbraio, M. A. and Dancy, J. (1999) Skeletal muscle energy metabolism during prolonged, fatiguing exercise. *Journal of Applied Physiology*, 87 (6) : 2341-2347.

八田秀雄 (2009) 乳酸と運動生理・生化学：エネルギー代謝の仕組み。市村出版, pp. 97-109.

中村和照・仙石泰雄・中垣浩平・吉岡利貢・緒形ひとみ・鍋倉賢治 (2010) 長距離走行中の速度と時間が血糖上昇閾値に与える影響. *体力科学*, 59 (1) : 119-130.