

博士論文

スプリントトレーニングのエネルギー代謝特性に関する研究

－運動強度，運動時間，休息時間に着目して－

令和2年度

筑波大学大学院 人間総合科学研究科 コーチング学専攻

白木 駿佑

目次

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 用語の定義 | i |
| 表のタイトル一覧 | ii |
| 図のタイトル一覧 | iii |
| 博士論文に関する業績一覧 | iv |
| 第 1 章 緒言 | 1 |
| 第 2 章 文献研究 | 4 |
| 1. 運動中のエネルギー供給機構 | 4 |
| (1) 有酸素性エネルギー供給機構 | 4 |
| (2) 無酸素性エネルギー供給機構 | 5 |
| (3) 有酸素性エネルギー供給と無酸素性エネルギー供給の関係 | 8 |
| 2. 短時間運動におけるエネルギー供給 | 9 |
| (1) 有酸素性エネルギー供給能力 | 9 |
| (2) 無酸素性エネルギー供給能力 | 10 |
| (3) エネルギー供給比率 | 12 |
| 3. 間欠的高強度運動におけるエネルギー代謝 | 15 |
| (1) 間欠的高強度運動における構成要因と分類 | 15 |
| (2) レペティションスプリントにおけるエネルギー代謝 | 19 |
| (3) 間欠的スプリントにおけるエネルギー代謝 | 20 |
| 4. 酸素借法によるエネルギー供給の定量化 | 21 |
| (1) 酸素借法 | 21 |
| (2) 酸素借法の問題点 | 22 |
| 5. 文献研究で得られた知見 | 25 |

| | |
|---|----|
| 第 3 章 研究目的 | 26 |
| 1. 研究目的 | 26 |
| 2. 研究課題 | 26 |
| 第 4 章 研究の意義, 仮説, 限界 | 27 |
| 1. 研究の意義 | 27 |
| 2. 研究の仮説 | 27 |
| 3. 研究の限界 | 27 |
| (1) 対象者による限界 | 27 |
| (2) 運動様式による限界 | 28 |
| (3) 実験方法による限界 | 29 |
| 4. 作業の仮定 | 29 |
| (1) 酸素借法によるエネルギー供給量の推定 | 29 |
| (2) 運動開始時のスタート方法について | 30 |
| 第 5 章 本研究の共通する測定方法 | 31 |
| 1. 本研究の運動様式 | 31 |
| 2. 本研究の対象者 | 31 |
| 3. 運動中の生理的指標の分析方法 | 31 |
| 4. 自転車運動中のペダル回転数 | 32 |
| (1) 強度に応じて異なるペダル回転数を用いることの妥当性の検証 | 33 |
| 5. 酸素需要量および酸素借の算出方法と間欠的漸増負荷テスト | 34 |
| 6. $\dot{V}O_2\max$ テストと生理的相対強度の算出方法 | 34 |
| 第 6 章 30 秒運動における運動強度がエネルギー代謝に与える影響 (研究課題 1- | |
| 1) | 37 |
| 1. 目的 | 37 |

| | |
|--|----|
| 2. 方法 | 38 |
| (1) 研究対象者 | 38 |
| (2) 実験手順 | 38 |
| (3) プレテスト | 39 |
| (4) 30 秒テスト | 39 |
| (5) Wingate Anaerobic Test..... | 40 |
| (6) 分析項目 | 40 |
| (7) 統計処理 | 41 |
| 3. 結果 | 44 |
| 4. 考察 | 49 |
| 5. 要約 | 51 |
| 第 7 章 60 秒運動における運動強度がエネルギー代謝に与える影響（研究課題 1- | |
| 2) | 52 |
| 1. 目的 | 52 |
| 2. 方法 | 52 |
| (1) 研究対象者 | 52 |
| (2) 実験手順 | 53 |
| (3) 最大下テストと $\dot{V}O_2max$ テスト | 53 |
| (4) 60 秒テスト | 54 |
| (5) 60-s Wingate Anaerobic Test..... | 54 |
| (6) 分析項目 | 55 |
| (7) 統計処理 | 56 |
| 3. 結果 | 59 |
| 4. 考察 | 66 |
| 5. 要約 | 69 |

| | |
|--|----|
| 第 8 章 連続する短時間全力運動における休息時間の相違がエネルギー代謝に与える影響（研究課題 2-1） | 70 |
| 1. 目的 | 70 |
| 2. 方法 | 72 |
| (1) 研究対象者 | 72 |
| (2) 実験手順 | 72 |
| (3) プレテスト | 73 |
| (4) 30 秒連続テスト | 73 |
| (5) 分析項目 | 74 |
| (6) 統計処理 | 74 |
| 3. 結果 | 77 |
| 4. 考察 | 82 |
| 5. 要約 | 86 |
| 第 9 章 間欠的スプリントにおける運動強度，運動時間，休息時間がエネルギー代謝に与える影響（研究課題 2-2） | 87 |
| 1. 目的 | 87 |
| 2. 方法 | 88 |
| (1) 研究対象者 | 88 |
| (2) 実験手順 | 89 |
| (3) 間欠的強度漸増スプリントテスト | 89 |
| (4) プレテスト | 91 |
| (5) SIT テスト | 91 |
| (6) 分析項目 | 93 |
| (7) 統計処理 | 93 |
| 3. 結果 | 98 |

| | |
|--|-----|
| 4. 考察 | 108 |
| 5. 要約 | 112 |
| 第 10 章 討論 | 114 |
| 1. 対象とするスプリントトレーニングについて | 114 |
| (1) テンポ走 | 116 |
| (2) セット走 (間欠的スプリント) | 118 |
| (3) レペティショントレーニング (レペティションスプリント) | 119 |
| 2. 競技レベルが運動中のエネルギー代謝に与える影響について | 126 |
| 3. 性差が運動中のエネルギー代謝に与える影響について | 128 |
| 4. 今後の課題 | 129 |
| 第 11 章 結論 | 132 |
| 参考文献 | 133 |
| 【海外文献】 | 133 |
| 【国内文献】 | 144 |
| 謝辞 | 149 |

用語の定義

(1) 短時間運動（スプリント）

60 秒以下の運動を短時間運動とした。スプリントと同義である。

(2) 高強度運動

最大乳酸定常閾値（血中乳酸濃度が定常になる最大強度, 70~80 % $\dot{V}O_2$ max 程度）

を超える強度の運動を高強度運動とした。

(3) 間欠的高強度運動

高強度運動を複数回行うものを間欠的高強度運動とした。「高強度インターバルトレーニング」が指す運動と同じであるが、「～トレーニング」は何らかの身体能力の向上を期待して行う運動を指しており、間欠的高強度運動は運動自体を指す場合に用いた。なお、間欠的高強度運動は以下に挙げる「レペティションスプリント」と「間欠的スプリント」を含意する。

(4) 高強度インターバルトレーニング

間欠的高強度運動と同じ運動を指すが、特に「トレーニング」として指す場合に高強度インターバルトレーニングを用いた。また、海外の文献では、「高強度インターバルトレーニング」が多用されており、それらの文献を引用する際にも用いた。

(5) レペティションスプリント

全力強度（オールアウトペース）の短時間運動を 2 回以上繰り返すものをレペティションスプリントとした。

(6) 間欠的スプリント

全力をやや下回る強度（一定ペース）の短時間運動を 3 回以上繰り返すものを間欠的スプリントとした。

表のタイトル一覧

| | | |
|------|--|-----|
| 表 1 | 実験スケジュール | 42 |
| 表 2 | 30 秒テストの結果 | 45 |
| 表 3 | 力学的相対強度ごとの 20, 30 秒間のエネルギー代謝 | 46 |
| 表 4 | 実験スケジュール | 57 |
| 表 5 | 60 秒テストの結果 | 61 |
| 表 6 | 力学的相対強度ごとの 40, 50, 60 秒間のエネルギー代謝 | 63 |
| 表 7 | 30 秒連続テストの結果 | 79 |
| 表 8 | 間欠的強度漸増スプリントテストの強度設定 | 96 |
| 表 9 | SIT テストにおける構成要因ごとの各試技の結果 | 103 |
| 表 10 | 短時間運動における運動強度, 運動時間ごとのエネルギー代謝 | 122 |
| 表 11 | 間欠的高強度運動における各指標の変化率(%) | 123 |
| 表 12 | 各運動の最高酸素摂取量と一定水準を超える酸素摂取量の累積時間 .. | 124 |
| 表 13 | 各運動の運動後最高血中濃度と総無酸素性エネルギー | 125 |

図のタイトル一覧

| | | |
|------|--|-----|
| 図 1 | 各全力運動におけるエネルギー供給比率 | 14 |
| 図 2 | 高強度インターバルトレーニングの分類 | 18 |
| 図 3 | 酸素借法によるエネルギー代謝指標の算出方法（モデル図） | 24 |
| 図 4 | 最大下テストの実験プロトコル | 36 |
| 図 5 | 30 秒テストの実験プロトコル | 43 |
| 図 6 | 力学的相対強度ごとの 30 秒間のエネルギー供給比率 | 47 |
| 図 7 | 力学的相対強度ごとの 30 秒間の各エネルギー供給量 | 48 |
| 図 8 | 60 秒テストの実験プロトコル | 58 |
| 図 9 | 60 秒テスト各試技中の酸素摂取動態（10 秒ごとの酸素摂取量） | 62 |
| 図 10 | 力学的相対強度ごとの 60 秒間のエネルギー供給比率 | 64 |
| 図 11 | 力学的相対強度ごとの 60 秒間の各エネルギー供給量 | 65 |
| 図 12 | 30 秒連続テストの実験プロトコル | 76 |
| 図 13 | 30 秒連続テストにおけるエネルギー代謝 | 80 |
| 図 14 | 30 秒連続テストにおける一定水準を超える酸素摂取量の累積時間 | 81 |
| 図 15 | 間欠的強度漸増スプリントテストのプロトコル | 95 |
| 図 16 | SIT テストの実験プロトコル | 97 |
| 図 17 | 各 SIT テストにおける一定水準を超える酸素摂取量の累積時間 | 104 |
| 図 18 | SIT テストにおける L32 と H32 の回数ごとの比較 | 105 |
| 図 19 | SIT テストにおける L32 と L42 の回数ごとの比較 | 106 |
| 図 20 | SIT テストにおける H32 と H34 の回数ごとの比較 | 107 |
| 図 21 | 短時間運動における運動強度，運動時間ごとの有酸素性比率 | 121 |

博士論文に関する業績一覧

【学術論文】

白木駿佑, 尾縣貢, 木越清信 (2018) 短時間高強度運動における運動強度とエネルギー供給比率との関係. 個人内変動に着目して. 体育学研究. 63(1): 433-440.

(主に第5章の4節を構成)

Shiraki, S., Fujii, N., Yamamoto, K., Ogata, M., and Kigoshi, K. (2020) Relative aerobic and anaerobic energy contributions during short-duration exercise remain unchanged over a wide range of exercise intensities. *Int. J. Sport and Health Sci.*, Advance publication

(Released: September 28, 2020). (主に第6章を構成)

【学会発表】

白木駿佑, 木越清信 (2016) 短時間運動における運動強度とエネルギー供給比率との関係. 第15回日本陸上競技学会. 岡山.

白木駿佑, 木越清信 (2017) 短時間高強度運動におけるエネルギー供給比率の規定要因. 第68回日本体育学会. 静岡.

白木駿佑, 奥平征道, 木越清信 (2018) 間欠的全力運動における休息時間がエネルギー代謝に与える影響. 第31回日本トレーニング科学学会. 愛知.

白木駿佑, 木越清信 (2020) 間欠的短時間高強度運動における運動強度, 運動時間, 休息時間がエネルギー代謝に与える影響. 第33回日本トレーニング科学学会. オンライン.

第1章 緒言

「スプリント」は短時間運動（60秒以下の運動）を指し、スプリント種目としては陸上競技の100~400m、競泳の50m、スピードスケートの500mなどが該当する（図子，2009）。そして、スプリントトレーニングは、スプリント能力が重要な球技スポーツや陸上競技の他種目のトレーニングにも広く用いられている（尾縣，2007；図子，2009）。実際のスポーツ現場では、トレーニング課題や計画を踏まえ、競技者のコンディションや環境要因などを考慮した上で指導者の経験や科学的根拠、理論的背景に沿ってトレーニングが考案、選択される。その中で、エネルギー供給能力や運動中のエネルギー代謝に着目したスプリントトレーニングの考案・計画・実施がなされている（荻田ほか，1998；荻田，2009；川本，2012；前村，2012；山崎，2009；山元，2019；結城，2009）。

まず、エネルギー供給能力は、スプリントパフォーマンスに影響を与えることが知られている（Minahan et al., 2007; Scott et al., 1991; Weyand et al., 1994; 前村ほか，2005b；森ほか，2012；吉岡ほか，2009）。特に、短時間運動テストとして古くから用いられている Wingate Anaerobic Test（以下，WAnT，自転車エルゴメータを用いた短時間の全力自転車運動（Bar-Or, 1987））に関する研究では、無酸素性能力と WAnT 中の発揮パワーとの間に有意な相関関係が報告されている（前村ほか，2005b；森ほか，2012）。一方、有酸素性能力が WAnT 中の発揮パワーに影響を与えることも複数の研究で報告されている（森，2009；森ほか，2012）。ほかの研究でも有酸素性能力の重要性が示唆されており（Calbet et al., 2003; 尾縣ほか，1998），各エネルギー供給能力の向上率を用いてパフォーマンスの改善を予測した研究も存在する（荻田ほか，1998）。したがって、スプリントパフォーマンスを高めるために、エネルギー供給能力を高める取り組みは重要であると考えられる。また、無酸素性代謝の動員が大きいトレーニングによって無酸素性能力が高まったとする報告もあり（Medbø and Burgers, 1990; Tabtata et al., 1996），運動中のエネルギー代謝を分析することで、合目的かつ効果的な

トレーニングを行う上で有益な知見が得られる。

短時間運動中のエネルギー代謝については、Medbø et al. (1988) が酸素借法を提唱して以来、非侵襲的に無酸素性エネルギー供給量を推定できるようになり、それに関する研究が多くなされるようになった。そして、疲労困憊に至る運動において運動時間が長いほど、有酸素性比率が対数関数的に増加することが自転車運動、走運動、水泳運動、カヤック運動などで報告されている (Duffield and Dawson, 2003; Gastin, 2001; Medbø and Tabata, 1989; Ogita et al., 2003; 平井ほか, 1993; 中垣ほか, 2008)。これらの研究により、多くの競技種目におけるエネルギー代謝特性が明らかになり、従来の方法で推定されてきたものよりも有酸素性エネルギーの貢献が大きいことが知られるようになった (Gastin, 2001)。かつては「究極の無酸素運動」と呼ばれていた400m 走においても、40~50 %が有酸素性エネルギーで賄われていることが報告されている (Duffield and Dawson, 2003; Spencer and Gastin, 2001)。しかしながら、スプリントトレーニングでは、必ずしも全力強度の運動ばかりが用いられているわけではなく、むしろ全力以下の強度で行われることの方が多い (山崎, 2009)。一般的に、運動強度が低いほど有酸素性比率が高いと考えられているが (Hoffman, 2002; 尾縣, 2007; 宮丸・宮丸, 1978)、そうでないとする指摘も存在し (荻田, 2000)、その詳細を検討した研究は存在しない。そのため、合目的なトレーニングの考案、選択につながる基礎的な知見として、短時間運動における運動強度、運動時間ごとのエネルギー代謝を明らかにする必要がある。

一方、トレーニング現場では単発の運動だけではなく、間欠的高強度運動も頻繁に用いられている (Reilly and Bangsbo, 1999; 山元, 2019)。高強度インターバルトレーニング流行のきっかけとなった「タバタプロトコル」は、スプリントトレーニングに分類され (MacInnis and Gibala, 2017)、多くの競技者に用いられている (田畑, 2015)。このタバタプロトコルは、元々はスピードスケートの競技者が行っていたトレーニングであり (田畑, 2015)、研究によって無酸素性代謝および有酸素性代謝への負荷が大きいことが明らかになり (Tabata et al., 1997)、有名になった。その後、高強度イン

ターバルトレーニングに関する多くの研究がなされている (Buchheit and Laursen, 2013a ; MacInnis and Gibala, 2017). しかしながら, 大半の研究は既存の運動プロトコルを用いて高強度インターバルトレーニングの有効性について対象者や測定項目を変えて検証したものであり, トレーニング中のエネルギー代謝を分析した研究はほとんどない. 様々なトレーニングを行うスポーツ現場においては合目的かつ効果的なトレーニングの考案・選択に資する知見が必要で, 実際に用いられているようなトレーニング中のエネルギー代謝を様々な条件で検討する必要がある. すなわち, 間欠的高強度運動の構成要因には, 運動強度, 運動時間, 休息时间などがあり, 現状のトレーニング現場では指導者の経験などによってそれらの構成要因が調節されていることから, それらの構成要因がエネルギー代謝に与える影響を明らかにする必要がある.

以上のことから, スプリントトレーニングにおける短時間運動および間欠的高強度運動のエネルギー代謝を分析することは, 得られた知見が指導者や競技者に対し合目的かつ効果的なトレーニングの考案・選択に貢献すると考えられ, 重要な課題である.

第2章 文献研究

1. 運動中のエネルギー供給機構

ヒトにおけるすべての身体運動は、ATP(アデノシン3リン酸)を加水分解し(ATP + H₂O → ADP + Pi), それを連続的に再合成することで筋収縮が生じ引き起こされる(久野, 1999). そのATP再合成経路は有酸素性エネルギー供給機構と無酸素性エネルギー供給機構の2つに大別される. スポーツ現場では, パフォーマンス向上のためにエネルギー代謝の観点から身体特性の評価やトレーニングの立案などが行われている(Medbø and Burgers, 1990; 荻田ほか, 1998). そして, Ross and Leveritt (2001) は, トレーニング効果となる代謝能力の適応には, 3つの機序があることを報告している. それは, 酵素活性の向上, エネルギー基質の貯蔵量増加, 抗疲労能力の向上である. ここでの酵素とは, エネルギー供給過程における反応を触媒する酵素を指す. エネルギー基質は, クレアチンリン酸やグリコーゲン, 脂質などを指す. 抗疲労能力は, pH低下に抗う水素イオン緩衝能力などを指す. したがって, この節では, それら3つの観点を含めエネルギー供給機構ごとに先行研究を概説する.

(1) 有酸素性エネルギー供給機構

有酸素性エネルギー供給機構は, 筋内のミトコンドリアで酸素を取り込みながらATPを再合成する経路で, 特に酸化系と呼ばれる. 酸化系は, 解糖系により生成されたピルビン酸をミトコンドリア内で分解し, 酸素を用いてATPを再合成する(坂本・増田, 2015). 解糖系(後述)や脂肪(遊離脂肪酸)のβ酸化によって生じたアセチルCoAがクエン酸回路に入ることによって, 反応が進み電子伝達系によってATPが生じる(八田, 2009). この経路は, ATP再合成速度は低いが, 非常に多量のATPを再合成できる(坂本・増田, 2015). そのため, 酸化系は低強度長時間運動において重要な役割を果たしている(坂本・増田, 2015). 実際に, 有酸素性能力の指標として古くから用いられている最大酸素摂取量(以下, $\dot{V}O_2\text{max}$)は, 長時間の運動パフ

パフォーマンスとの間に有意な相関関係が数多く報告されている (山地, 2001)。

この酸化系に関わる主な酵素として、ピルビン酸からアセチル CoA に変換するピルビン酸脱水素酵素(解糖系酵素ではあるが、酸化系 ATP 供給を律速する鍵酵素)、 β 酸化経路内にある 3-ヒドロキシアシル CoA デヒドロゲナーゼ、クエン酸回路内で重要なクエン酸シンターゼが挙げられる。特にクエン酸シンターゼは、ミトコンドリアの量的マーカーとしても用いられ、トレーニングによって高まることが多くの研究で報告されている (MacInnis and Gibala 2017)。

酸化系の材料となるエネルギー基質は糖質、脂質、タンパク質である。特に運動中は糖質が中心となり、長時間低強度の運動であるほど、脂質による酸化系エネルギー供給がなされる (大森, 1999)。当然ながら、食事によるエネルギー摂取量がエネルギー消費量を上回ることによって脂質が身体に蓄えられる。運動に重要なエネルギー源である筋グリコーゲンの貯蔵量は、トレーニングによって高まることが知られており (Ross and Leveritt, 2001)、枯渇するような長時間の運動や間欠的高強度運動ではその貯蔵量がパフォーマンスに関わる (Burke et al., 2011)。

酸化系によるエネルギー供給は、通常の生理的疲労によって直接酸化系の活動が低下することはないようである。実際に、身体的負荷の高い 30 秒全力運動を繰り返す間欠的運動であっても、2 回目や 3 回目以降にパフォーマンスが低下するのにもかかわらず、有酸素性エネルギー供給は増加したことが報告されている (Bogdanis et al., 1996; Parolin et al., 1999; Putman et al., 1995)。

(2) 無酸素性エネルギー供給機構

無酸素性エネルギー供給機構は、筋内に蓄えられたクレアチンリン酸やグリコーゲンなどを分解して ATP を再合成する経路で、非乳酸性機構の ATP-PCr 系 (以下、PCr 系) と乳酸性機構の解糖系に分けることができる。PCr 系は、クレアチンリン酸 (PCr) の分解により ATP を再合成するが ($\text{PCr} + \text{ADP} \leftrightarrow \text{ATP} + \text{Cr}$)、その ATP 再合成速度は解糖系や酸化系より速い (坂本・増田, 2015)。したがって、この供給系は

短時間で爆発的なエネルギー発揮をするような運動に特に重要な役割を果たしている。一方で、低強度の運動であっても運動開始直後にクレアチンリン酸の濃度が低下することから (Kuno et al., 1992), 強度によらず PCr 系は動員されることがわかっている。解糖系は、筋内に貯蔵されているグリコーゲンや血中のグルコースをピルビン酸に分解する過程で ATP を再合成する経路である。さらに、解糖系は PCr 系より ATP の再合成速度は劣るが、安静時の筋内濃度はクレアチンリン酸よりもグリコーゲンが 5 倍以上高いため、より多くの ATP を再合成することができる (Newsholme and Leech, 1984)。また、解糖系による ATP 再合成は運動開始後 5 秒でピークに至ると考えられており (Gastin, 2001; Glaister, 2005), 100m 走のような短時間運動でも重要である。PCr 系との比較では、運動時間が 30 秒になると解糖系による ATP 再合成量は、PCr 系と比較して 2 倍以上になると知られている (久野, 1999)。実際に、田畑 (1994) は 30 秒運動におけるクレアチンリン酸分解速度は、乳酸蓄積速度の半分であることを報告しており、30 秒以上の運動では、常に乳酸蓄積速度がクレアチンリン酸分解速度よりも高いことが報告されている。一方、15 秒程度で疲労困憊に至るさらに高強度の運動では、乳酸蓄積速度が 30 秒の運動と変わらず、その分クレアチンリン酸の分解速度が高い (田畑, 1989)。これらのことから、30 秒より短い運動では PCr 系が重要であり、それより長い運動では、解糖系の重要度がより高くなると考えられる (荻田, 2009)。

PCr 系に関わる酵素活性として、PCr から ATP への触媒を役割とするクレアチンキナーゼが挙げられる。また、PCr 系には含まれないが、短時間で ATP 再合成を行う反応 ($2\text{ADP} \rightarrow \text{ATP} + \text{AMP}$) を触媒するアデニル酸キナーゼも重要である。解糖系に関わる酵素活性は、数多くあるが、その中でもホスホフルクトキナーゼは解糖系全体の速度を調節し得るため特に重要な酵素である (久野, 1999)。他には、ピルビン酸キナーゼや乳酸脱水素酵素、ピルビン酸脱水素酵素などがある。一方、前述した 2ADP (アデノシン 2 リン酸) の反応で生成される AMP (アデノシン 1 リン酸) は、ホスホフルクトキナーゼの活性を高める働きがある (久野, 1999)。また、ATP の加

水分解では、ADP が生成されるため、これらの代謝系は相互に影響を与えていることがわかる。

無酸素性エネルギー供給に必要なエネルギー基質については、主にクレアチンリン酸とグリコーゲンが挙げられる。安静時における筋中のエネルギー源については、 $AMP \approx ADP < ATP < PCr < <$ グリコーゲンの順で多いことがわかっている（久野, 1999）。そのため PCr 系は、大部分が比較的短時間で消費される。具体的には、80m 全力走で 75%程度が消費され（Hirvonen et al., 1987）、30 秒全力自転車運動で 80%程度が消費される（Bogdanis et al., 1995）。しかもそれらの値は、運動直後から数秒経過した時点での筋を分析して得られたものであり、実質 10 秒程度の全力運動で枯渇すると考えられている（Bogdanis et al., 1995; Gastin, 2001）。これらのことから、瞬発的な運動であるほど、PCr 系の重要性は高まるといえる。また、クレアチンの経口摂取によって短時間運動のパフォーマンスが高まることが多数報告されており（Kreider et al., 2017）、短時間運動における PCr 系の重要性を裏付けている。一方、筋グリコーゲン量は比較的多量にあるため、30 秒の全力自転車運動でも 30%程度しか消費されない（Parra et al., 2000）。そのため、通常の下条件下において、筋グリコーゲン量の大きさが短時間運動のパフォーマンスに関わることはないようである（Ross and Leveritt, 2001）。なお、筋グリコーゲンは、筋線維内、筋線維間、筋細胞膜下に貯蔵されており、局所的な枯渇が生じないようにそれらの割合が調整されているが（Gejl et al., 2017）、グリコーゲンが主要因の疲労には特に筋線維内グリコーゲンの枯渇が影響していると指摘されている（Ørtenblad et al., 2013）。

疲労による無酸素性エネルギー供給への影響について、PCr 系においてはクレアチンリン酸による枯渇の影響が大きい（Bogdanis et al., 1995; 久野, 1999）。また、アシドーシス（筋 pH の低下）は、解糖系酵素（ホスホフルクトキナーゼなど）の活性を低下させる（Cairns, 2006）。特に 30 秒を超える高強度運動では、筋 pH が大きく低下するため、その影響が大きいことが知られている（Cairns, 2006）。また、アシドーシスの原因としては代謝物の水素イオンが挙げられ、疲労に抗うためにはその緩衝能

力が重要だと考えられている (Ross and Leveritt, 2001; 久野, 1999). その緩衝機能は、複数の系があるが、特に重炭酸イオンによる緩衝能力に関する研究は比較的多数なされている。実際には、運動中から運動後の過剰二酸化炭素排出量 (CO_2excess) を定量することにより、重炭酸系による緩衝作用を評価する試みがなされている (Yunoki et al., 1999; Yunoki et al., 2000; 前村ほか, 2003; 前村ほか, 2005a; 前村ほか, 2005b). そして、過剰二酸化炭素排出量と WAnT の平均パワー (20, 30, 40 秒間) との間に関連関係が認められたことが報告されており (前村ほか, 2005a), トレーニングによる適応も報告されている (前村ほか, 2005b).

(3) 有酸素性エネルギー供給と無酸素性エネルギー供給の関係

エネルギー供給機構は大きく2つに分けることができるが、両者のエネルギー供給機構は相互作用していると考えられている。ATP 再合成経路に関しては、解糖系によって生成されたピルビン酸はミトコンドリアで酸化されるため (久野, 1999), その経路は、有酸素性および無酸素性エネルギー供給機構が一連の流れでつながっていることがわかる。また、過剰に生成されたピルビン酸は、ミトコンドリアに入らずに乳酸に変化するが、この乳酸も後にミトコンドリアで酸化されることが分かっている (八田, 2009). すなわち、無酸素性エネルギー供給機構 (解糖系) の最後は有酸素性エネルギー供給機構につながる。また、PCr 系で用いられるクレアチンリン酸は、ミトコンドリアにて酸素を用いて再合成されている (Kreider et al., 2017). これらのことから、八田 (2009) は、3つの系は区別して考えるべきではなく、酸化系を中心に、その酸化系に至る過程で解糖系があり、酸化系でできた ATP を利用する過程で PCr 系があると述べている。実際に数々の研究で、有酸素性エネルギー機構と無酸素性エネルギー機構の連関が観察されている。Whipp et al. (1999) は、呼気ガス分析器と核磁気共鳴法を用いて酸素摂取量と筋のクレアチンリン酸を同時に分析した。そして、両変数は正確にミラーイメージとなることを報告している。このことは、クレアチンリン酸が減少すれば、酸素摂取量が高まることを示唆しており、ほかの研究でも

この現象は確認されている (Barstow et al., 1994; Rossiter et al., 2002). これに関連して、酸化系の代謝に重要なミトコンドリアは、ATP の加水分解の際にも生じる代謝物 (クレアチンリン酸, ADP, 無機リン酸など) に応答すると考えられている (Korzeniewski and Zoladz, 2004). したがって、酸素摂取量の立ち上がりは、有酸素性能力だけでなく無酸素性代謝を含めた ATP 供給による生成物の濃度変化に依存していると考えられている (de Aguiar et al., 2015). また、解糖系の過程で生成される乳酸によっても酸素摂取量が増加すると考えられている. すなわち、乳酸の生成による Bohr 効果 (運動中の代謝物などによって酸素解離曲線が右方へ移動し、ヘモグロビンから酸素の解離が促進されるようになること (山口・狩野, 1999)) によって、筋の酸素取り込み能が高まり、酸素摂取量が増加すると考えられている (Fukuba et al., 2002; Stringer et al., 1994). 実際に、佐伯ほか (1998) は、およそ 6 分間で疲労困憊に至る運動とその 4 分時点までの運動 (4 分間走) をトレッドミル走にて行わせ、6 分間走のうち残り 2 分間の代謝応答を検討している. その結果、4 分間走から 6 分間走における血中乳酸濃度の変化率とその酸素摂取量の変化率との間に有意な正の相関関係を報告している. すなわち、血中乳酸濃度の増加量が大きい者ほど、酸素摂取量の増加量も大きく、乳酸の生成による Bohr 効果によって筋の酸素取り込み能が高まったと推察されている (佐伯ほか, 1998).

これらのことから、運動中は有酸素性代謝と無酸素性代謝が相互に関係しているといえる.

2. 短時間運動におけるエネルギー供給

(1) 有酸素性エネルギー供給能力

前述したように、酸化系は低強度長時間運動において重要な役割を果たしており (坂本・増田, 2015), 運動時間が長いほど有酸素性代謝の貢献が大きくなる (図 1, Gastin, 2001). 一方で、短時間運動においても有酸素性能力の重要性が示唆されている. 八田 (2009) は、400m 走においては、約半分程度が酸素によるエネルギー供給

であると推測しており、有酸素性能力がパフォーマンスに及ぼす影響は小さくないと考えられる。実際に、有酸素性能力の指標である $\dot{V}O_2\max$ と400m走の速度低下率の間には有意な相関関係が報告されている（尾縣ほか、1998）。また、有酸素性トレーニングによって400m走の記録が改善された事例も報告されており（磯・高倉、1998）、スポーツ現場においても短時間運動における有酸素性能力の重要性は認知されつつある。また、走運動だけでなく自転車運動でも短時間運動における有酸素性能力の重要性が複数の研究で示唆されている。森（2009）は、40秒WAnTを行わせ、1秒間ごとの発揮パワーと $\dot{V}O_2\max$ との関係を検討したところ、27~40秒において有意な相関関係が認められたことを報告している。また、Calbet et al. (2003) は、常圧常酸素下および常圧低酸素下での30秒WAnTを行わせ比較している。そして、スプリント群において常圧低酸素下で運動中の酸素摂取量および発揮パワーが低下したことを報告している。このことは、有酸素性エネルギー供給が30秒WAnTのパフォーマンスに直接影響を及ぼしていることを示唆している。

これらのことから、有酸素性能力は、短時間運動のパフォーマンスに影響を及ぼす要因であり、短時間運動においても有酸素性代謝に着目する必要がある。

(2) 無酸素性エネルギー供給能力

前述したように、30秒より短い運動ではPCr系が重要であり、それより長い運動では、解糖系の重要度がより高くなると考えられる（荻田、2009）。また、図1に示したように時間が短い運動ほど無酸素性比率が高く（Gastin, 2001）、短時間運動において無酸素性エネルギー供給の重要度は高いといえる。実際に、解糖系エネルギー供給の指標と考えられている運動後最高血中乳酸濃度（以下、PBLa）に関して、前村ほか（2005a）は、4つの運動時間（10秒、20秒、30秒、40秒）のWAnTを行わせ、血中乳酸濃度を測定している。そして、10秒の試技を除く3つの試技においてPBLaと平均パワーとの間に有意な相関関係が認められたことを報告している。30秒WAnTを用いたほかの研究でも、PBLaと発揮パワーとの間に有意な相関関係が報告されて

いる (Granier et al., 1995; Scott et al., 1991; 前村ほか, 2005a; 森ほか, 2012). また, 400m 走記録との間にも有意な相関関係が報告されている (Hanon et al., 2011; Ohkuwa and Miyamura, 1984; Reis et al., 2004; 大西ほか, 1998; 木越ほか, 2011). 一方で, PBLa とパフォーマンスとの間に有意な相関関係が認められなかった研究 (森, 2009; 安井ほか, 1998) や対象者によっては有意な相関関係が認められなかった研究 (Ohkuwa and Miyamura, 1984; 森ほか, 2012) が散見される. この要因として, 血中乳酸濃度の値は「作った乳酸と使った乳酸のバランス」であり (榎木, 2008), 必ずしも作った乳酸だけを評価していないことが挙げられる. 乳酸は, 糖分解が高まりピルビン酸が生成され, それがミトコンドリアの反応量を超えて余ったピルビン酸が乳酸として生成される (八田, 2008). また, 生成された乳酸は血中へ放出されて全身を循環し, 心筋や遅筋繊維のミトコンドリアで代謝される (吉田, 2008). すなわち, 血中乳酸濃度は解糖系の動員された程度とミトコンドリアの処理能力などに影響を受けると考えられる. これに関して, 森丘 (2008) は, 血中乳酸濃度が高まることは無酸素性エネルギー供給機構がより多く動員したことに間違いはないが, 乳酸動態は人によって異なると述べている. したがって, 血中乳酸濃度は, 適切に無酸素性エネルギー供給量を反映しておらず (Gastin, 2001), 個人間で比較するのは注意が必要であると考えられる. そういった要因から PBLa と各種パフォーマンスとの関係は一致した見解が得られていないものと推察される.

一方, 近年では無酸素性能力の指標として最大酸素借 (Maximal Anaerobic Oxygen Deficit) が頻繁に用いられている. そして最大酸素借は, 様々なパフォーマンスとの関係が検討されている (Minahan et al., 2007; Ramsbottom et al., 1994; Scott et al., 1991; Weyand et al., 1994; 前村ほか, 2005b; 森ほか, 2012; 吉岡ほか, 2009). Weyand et al. (1994) は, 走運動における最大酸素借を測定し, 100m 走, 200m 走, 400m 走, 800m 走, 1500m 走, 5000m 走記録との関係を検討している. そしてすべての種目で, 記録との間に有意な相関関係が認められたことを報告している. また, 森ほか (2012) は, 短距離走競技者と混成競技者を対象に最大酸素借と 60 秒 WAnT との関係を検討して

いる。その結果、最大酸素借と0~30秒の平均パワーとの間に有意な相関関係が認められたことを報告している。さらに、最大酸素借と400m走のシーズン最高記録との関係では、短距離走競技者で有意な相関関係が認められたものの混成競技者においては有意な相関関係が認められなかったことが報告されている（森ほか，2012）。このように最大酸素借は、無酸素性能力の評価指標として用いられており、短時間運動において無酸素性能力は重要なパフォーマンス決定要因であることがわかる。

(3) エネルギー供給比率

各スポーツ種目や全力運動中のエネルギー供給比率を検討する研究が数多く行われている。走運動では、100~5000m走中のエネルギー供給比率が多数報告されており（Craig and Morgan, 1998; Duffield and Dawson, 2003; Nummela and Rusko, 1995; Reis et al., 2004; Reis and Miguel, 2007; Spencer and Gastin, 2001; Weyand et al., 1993; Zouhal et al., 2010; 品田ほか，2012）、水泳運動（Ogita et al., 2003; 荻田ほか，1998; 平井ほか，1993）やカヤック運動（Zouhal et al., 2012; 中垣ほか，2008）でも検討されている。また、様々な時間での全力自転車運動のエネルギー供給比率についても多数報告されている（Calbet et al., 1997; Granier et al., 1995; Ogura et al., 2006; Withers et al., 1991; 森ほか，2011）。そして、60秒以下の全力自転車運動では、有酸素性比率よりも無酸素性比率が高い（図1）。

古くからエネルギー供給比率は、運動時間と運動強度によって決定されると考えられてきた（Howald et al., 1978; Hultman and Sjöholm, 1986）。運動時間に関しては、長い運動ほど有酸素性比率が対数関数的に高まる（Gastin, 2001; 図1）。このことは走運動（Duffield et al., 2003）や水泳運動（Ogita et al., 2003）、自転車運動（Medbø and Tabata, 1989）、カヤック運動（中垣ほか，2008）などの異なる運動様式で報告されており、エネルギー供給比率は、運動時間に強く影響を受けるといえる。一方、運動強度に関して、運動強度が高いほど無酸素性比率は高くなると書籍では述べられている（Hoffman, 2002; 尾縣，2007; 宮丸・宮丸，1978）。しかしながら、運動時間を規定し

て短時間運動におけるエネルギー供給比率と運動強度との関係を検討した研究はほとんどなく、詳細に検討されたものはない。ただし、Ogita et al. (1999) は、4つの異なる強度（30秒、1分、2~3分、4~5分で疲労困憊に至る強度）で、水泳運動を行わせ、その結果、運動開始30秒間および60秒間の有酸素性比率は、各強度間で有意差が認められなかったことを報告している。このことは、運動強度が異なってもエネルギー供給比率が変わらないことを示唆しており、一般的に考えられていたものとは異なる結果であった。一方、Spencer and Gastin (2001) は、トレッドミル上で200m、400m、800m、1500mの全力疾走を行わせ、運動開始から20秒間の有酸素性比率は、それぞれ34.4%、32.0%、39.5%、59.1%であったことを報告している。このことは、運動強度が低いほど有酸素性代謝の貢献が大きくなることを示唆しているが、試技ごとに専門とする競技者が対象となっており、体力特性による影響（Calbet et al., 2003; Granier et al., 1995）が大きいと考えられる。そのほかに、異なる強度で30秒間のエネルギー供給比率を検討した研究が2編あるが（Gastin et al., 1995; Peyrebrune et al., 2014）、一致した見解は得られておらず、短時間運動におけるエネルギー供給比率と運動強度との関係は明らかになっていないのが現状である。

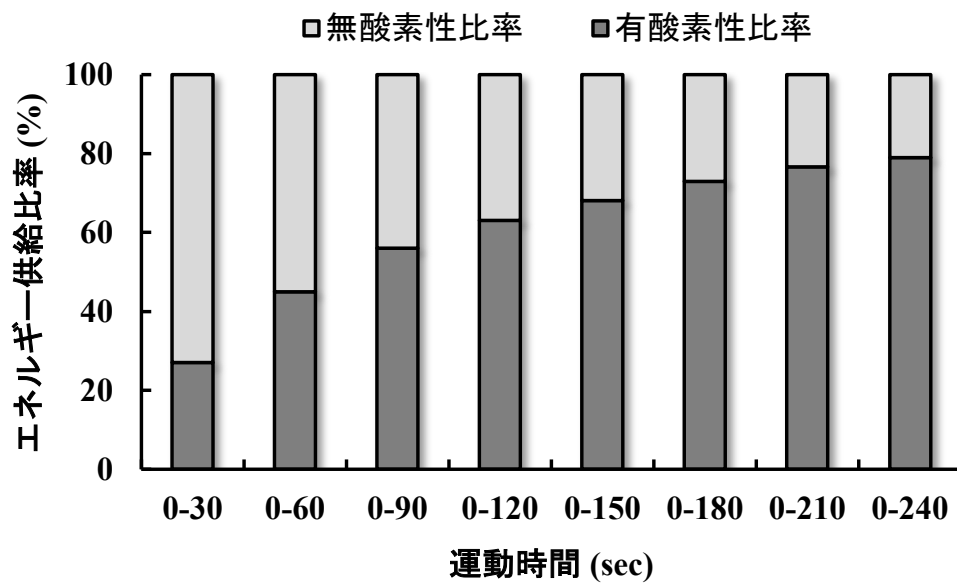


図1 各全力運動におけるエネルギー供給比率

Gastin (2001) をもとに著者作成

3. 間欠的高強度運動におけるエネルギー代謝

(1) 間欠的高強度運動における構成要因と分類

近年、高強度インターバルトレーニング (High-intensity Interval Training, 通称 HIT や HIIT) が注目されており、そのトレーニングの有効性は数多く報告されている (Bishop et al., 2011; Buchheit and Laursen, 2013a; Buchheit and Laursen, 2013b; MacInnis and Gibala, 2017; Tabata et al., 1996). また、そのエネルギー代謝についても複数の研究で検討されている。それについて概説する前に、高強度インターバルトレーニングの構成要因や分類をまとめる。Buchheit and Laursen (2013a) は、以下のように構成要因を9つに分類している。用いる語句に関して、海外論文の中でも混同して用いられる場合があり、複数の先行研究 (Bishop et al., 2011; Buchheit and Laursen, 2013a; 2013b; MacInnis and Gibala, 2017) や書籍 (Hoffman, 2002) を参考に選定した。

- ① 運動強度 (Work intensity)
- ② 運動時間 (Work duration)
- ③ 休息時間 (Relief/Rest duration of interval) ※1
- ④ 休息期運動強度 (Relief/Rest intensity of interval) ※1
- ⑤ 反復回数 (Number of reps)
- ⑥ セット数 (Number of sets)
- ⑦ セット間休息時間 (Recovery duration between sets)
- ⑧ セット間休息期運動強度 (Recovery intensity between sets)
- ⑨ 運動様式 (Exercise mode)

※1 休息が不完全休息の場合は「Relief」、完全休息の場合は「Rest」

この9つある構成要因を調節することによって身体に対し強い適応を生じさせる事ができると考えられており (Buchheit and Laursen, 2013a)、合目的なトレーニングや効果の高いトレーニングを実施するには、これらの組み合わせが重要だといえる。

特に運動強度，運動時間，休息时间，休息期運動強度は，9つの中でも重要だと考えられている（Åstrand et al., 1960; Christensen et al., 1960）．一方で，高強度インターバルトレーニングの構成要因には，無限の組み合わせが存在し，目的にあったプロトコルを選択することは困難だといえる．そこで，Buchheit and Laursen (2013a) は，高強度インターバルトレーニングを4つのタイプに分類し，それぞれの特徴をまとめている．

① RST (Repeated Sprint Training: 3~7秒間の全力運動，60秒未満の休息)

構成要因の組み合わせにより D, E いずれかの適応が見込まれる

② SIT (Sprint Interval Training: 30秒間の全力運動，2~4分の完全休息)

Eの適応が見込まれる

③ Short IT (Short Interval Training: 運動時間60秒未満)

構成要因の組み合わせにより A, B, C, D いずれかの適応が見込まれる

④ Long IT (Long Interval Training: 運動時間60秒以上)

構成要因の組み合わせにより C, D いずれかの適応が見込まれる

A: 有酸素性能力

B: 有酸素性能力+神経系能力

C: 有酸素性能力+無酸素性能力

D: 有酸素性能力+無酸素性能力+神経系能力

E: 末梢の有酸素性能力+無酸素性能力+神経系能力

このように4つのタイプに分類されているものの，構成要因の組み合わせによる幅が広すぎるためにトレーニング効果の特定ができておらず，これらの分類に該当しない高強度インターバルトレーニングも多数存在する．したがって，更に細かい分類が必要になる．そこで，複数の先行研究と書籍を参考に（Buchheit and Laursen, 2013a; MacInnis and Gibara, 2017; Hoffman, 2002），図2のように高強度インターバルトレー

ニングを分類した。すなわち、最大乳酸定常強度を超える間欠的運動は、すべて「高強度インターバルトレーニング」に含まれ (Buchheit and Laursen, 2013a), その中で運動強度と運動時間をもとに7つに分類した。なお、スプリントトレーニングには、「回復スプリント」, 「間欠的スプリント」, 「レペティションスプリント」が含まれる。

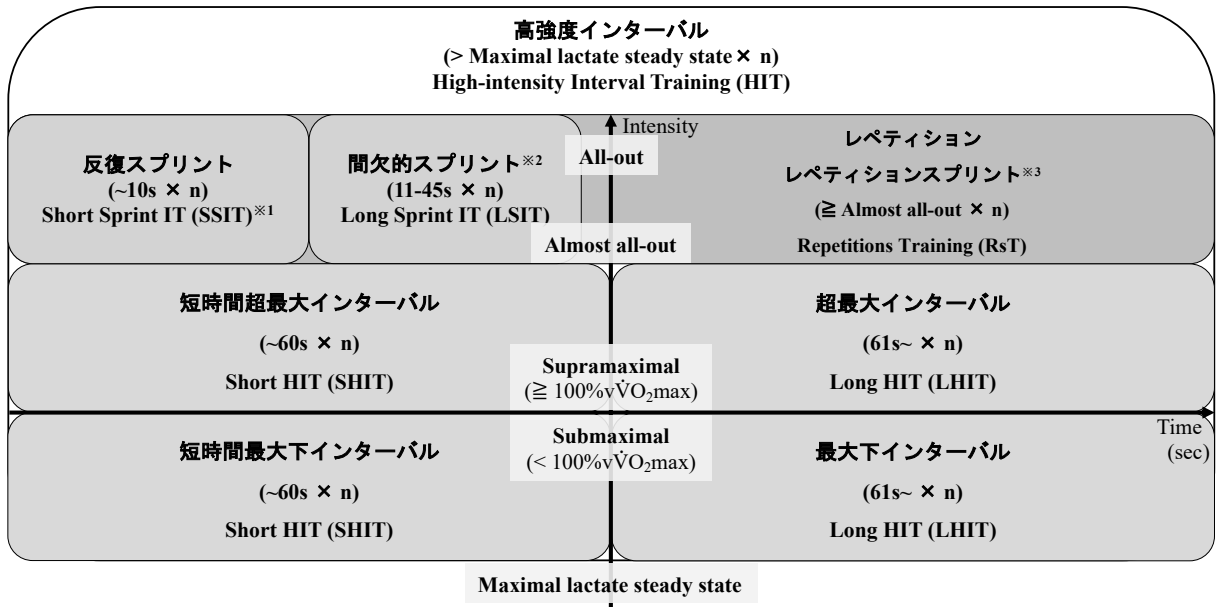


図2 高強度インターバルトレーニングの分類

複数の文献を参考に著者が作成した。Intensity は、運動 1 回あたりの強度を指す。

n: 反復回数

※1 リピートスプリント (Repeated Sprints) とも呼ばれる。

※2 通称「タバタプロトコル」は、間欠的スプリントに分類される。

※3 間欠的スプリントと比較して長時間の休息が用いられ、反復回数が少ない。特に短時間運動を用いるレペティショントレーニングは、「レペティションスプリント (Repetition Sprints)」と呼ばれる。

(2) レペティションスプリントにおけるエネルギー代謝

高強度インターバルトレーニングの分類は行ったものの、7つの各分類内においても構成要因によって無限の組み合わせが存在するため、合目的なトレーニングの考案や選択は困難である。特に、スプリント能力を高めるために用いられているレペティションスプリントや間欠的スプリント中のエネルギー代謝について検討した研究は数が限られている。

レペティションスプリントについて、海外の研究論文では、間欠的スプリントに部分的に含まれるものの (MacInnis and Gibala, 2017), 「レペティション」という用語自体は一般的ではない。一方、書籍では国内外問わず「レペティション法」や「レペティショントレーニング」, 「レペティションスプリント」などが紹介されており (Hoffman, 2002; Stein, 1999; 遠藤, 2009; 高松, 2019; 村木, 1994; 森井, 2003; 山崎, 2009), スポーツ現場では馴染みのあるトレーニング方法である。それらの書籍によると、レペティショントレーニングは、全力かほぼ全力に近い強度での運動 (必ずしも短時間ではない) を比較的長い休息時間で複数回行うものとして紹介されており、レペティションスプリントは、多くの場合 30~60 秒の全力運動をパフォーマンスが回復する十分な休息時間 (15~30 分) で行われている (Hoffman, 2002; 遠藤, 2009; 山崎, 2009)。レペティションスプリント中のエネルギー代謝を検討した研究には、30 秒全力自転車運動を 4 分程度の休息時間で 2 回以上行かせた研究が複数存在する (Bogdanis et al., 1995; Bogdanis et al., 1996; Parolin et al., 1999; Putman et al., 1995)。Bogdanis et al. (1996) は、30 秒全力自転車運動 2 回を 4 分の休息時間で行わせ、運動中の無酸素性比率が $71 \pm 2\%$ から $56 \pm 2\%$ まで低下したことを報告している。他の先行研究でも同様の結果が報告されており (Parolin et al., 1999; Putman et al., 1995), このことは、無酸素性能力を高める目的でレペティションスプリントを用いても、休息をはさんだ 2 回目以降の運動では無酸素性代謝の貢献が小さくなってしまふことを示唆している。そして、その無酸素性代謝の貢献が小さくなった要因として、筋 pH の低下 (Bogdanis et al., 1995), クレアチンリン酸の減少 (Bogdanis et al., 1995; Bogdanis

et al., 1996), 酸化系酵素活性の増加 (Putman et al., 1995), 解糖系酵素活性の低下 (Parolin et al., 1999) などを挙げている。しかしながら, それらの研究はレペティションプリントとしては休息時間の短いプロトコルが用いられており, より長い休息時間でも検討する必要がある。すなわち, 休息時間が長いほど身体は回復することが考えられ, それによっては2回目のエネルギー代謝が異なる可能性がある。実際に, Bogdanis et al. (1995) は, 30秒全力自転車運動2回を異なる休息時間(1.5, 3, 6分)で3試技行わせ, 1回目の運動直後に低下した筋pHは6分の休息時間で有意に回復したことなどを報告している。一方で, その値は安静時の値まで回復していなかったことが報告されており, クレアチンリン酸に関しても, 安静時の95%まで回復するのに13.6分要することが推定されている。さらに, パフォーマンス(運動中の発揮パワー)も十分に回復していなかったことが報告されている。しかしながら, 類似したプロトコルにおいてこれよりも長い休息時間で検討した研究はなく, その際のエネルギー代謝は当然ながら不明である。

(3) 間欠的スプリントにおけるエネルギー代謝

これまでレペティションプリントについてのエネルギー代謝について先行研究を概説してきたが, 間欠的スプリントにおけるエネルギー代謝について検討した研究はさらに数が限られている。高強度インターバルトレーニング再流行の火付け役となったタバタプロトコル(170% $\dot{V}O_2\text{max}$ の強度で20秒間6~7回, 10秒休息)は, 間欠的スプリントに含まれる(図2)。Tabata et al. (1997) は, タバタプロトコルにおける運動中のエネルギー代謝を検討し, 最大酸素消費および最大酸素摂取量と同等の値が得られたことを報告している (Tabata et al., 1997)。このことは, 無酸素性代謝および有酸素性代謝に最大限の負荷が与えられることを示唆している。実際に, そのトレーニング効果についても報告されている (Tabtata et al., 1996)。一方で, 6~7回反復されるうちの1回ごとのエネルギー代謝については検討されておらず, 回数ごとの変動については不明である。1回ごとのエネルギー代謝を検討した研究には, 水泳運動で間

欠的スプリントを行わせた研究がある。Peyrebrune et al. (2014) は、全力に近い強度で 30 秒間 4 回を 30 秒の休息で行わせ、1 回目と比較して 2 回目以降および 2 回目と比較して 4 回目の有酸素性比率が有意に高くなったことを報告している。このことは、30 秒という短い休息時間を用いた場合ではあるが、回数ごとに有酸素性比率が高まることを示唆している。しかしながら、これ以外に間欠的スプリントにおけるエネルギー代謝について検討した研究は見当たらず、間欠的スプリントにおける運動強度、運動時間、休息時間などの構成要因がエネルギー代謝に与える影響については不明のままである。

4. 酸素借法によるエネルギー供給の定量化

前述した通り、運動中のエネルギー供給は大きく有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーに大別されるが、有酸素性エネルギーの定量化については、Åstrand (1981) が呼気から測定される酸素摂取量と生体内の有酸素性 ATP 生成量との間に直接的な関係があることを報告し、酸素摂取量を測定することで容易に有酸素性エネルギー供給を定量化することができる。このことから、酸素摂取量は有酸素性エネルギー供給量とみなされている。一方、無酸素性エネルギーの定量化は非常に困難であり、長年の問題となっている (Bangsbo, 1998; Gastin, 2001)。定量化が困難である理由は、酸素を介さず筋内にある貯蔵物質で ATP を生成するためである。これまで無酸素性エネルギー供給の定量化には、筋バイオプシー法や酸素負債、血中乳酸濃度からの推定、自転車運動の発揮パワーなどが用いられてきた。しかしながら、どの方法にも問題点が指摘されており (Gastin, 2001)、その推定量は不正確であるとみなされている。一方、近年では酸素借法と呼ばれる定量法が頻繁に用いられている。

(1) 酸素借法

酸素借法という概念は、1920 年には既に報告されており (Krogh and Lindhard, 1920)、その概念を超最大強度の運動に用いたのが Hermansen et al. (1984) であると言

われている。そして、無酸素性能力の指標として用いられている最大酸素借は Medbø et al. (1988) によって提案された。そして 1990 年以降、酸素借法による研究は数多く行われている。

図 3 に、酸素借法による酸素需要量（総エネルギー供給量）および酸素借（無酸素性エネルギー供給量）の算出方法を示した。酸素借法による無酸素性エネルギー供給量の推定は、用いる方法によって値が異なるため、より正確な値を推定するために多くの検証がなされている。それは、いくつかの総説に詳しい (Medbø, 2010; Noordhof et al., 2010)。

(2) 酸素借法の問題点

近年、無酸素性エネルギー供給量の推定には酸素借法が多く用いられているが、複数の研究者によって問題点が指摘されている。その主な論点は、酸素借法では最大下運動での効率が超最大運動（ $100\% \dot{V}O_{2\max}$ を上回る強度）でも変わらないことを前提として超最大運動の酸素需要量を推定している点である。また、最大下テストのプロトコル設定についても多くの議論がなされている。それらについて概説する。

複数の研究で、出力（発揮パワーや走速度）の上昇につれて効率は低下すると報告されている (Gladden and Welch, 1978; Luhtanen et al., 1987)。すなわち、効率の低下により酸素需要量は指数関数的に増加すると考えられている (Li et al., 2015)。一方で、自転車運動に関しては、酸素借法の妥当性を示唆している研究も存在する。Medbø and Tabata (1993) は、30 秒、1 分、2~3 分で疲労困憊に至る自転車運動を行わせ、筋バイオプシーにより無酸素性代謝の ATP 再合成率を算出する方法と酸素借法の両者を用いて、比較検討を行った。その結果、二つの方法で算出されたエネルギー消費量（需要量）との間には、高い相関係数が報告されている ($r = 0.94$)。また、Hill and Vingren (2011) は、疲労困憊に至る自転車運動を異なる強度で 3 試技行わせ、回帰直線式と 16 パターンの回帰曲線式で最大酸素借を算出した。その結果、回帰直線式において最大酸素借が 3 つの試技で同じ値を示したことを報告している。このことは、

最大酸素借は異なる強度であっても同じ値が得られるという前提で、自転車運動の場合、最大下テストで得られる回帰直線が超最大運動の酸素需要量を適切に推定していることを示唆している。これらのことなどから、自転車運動での酸素借法は妥当性が高いと考えられ、荻田（1999）は、信頼性が高い方法であると述べている。

一方、最大下テストにおけるプロトコルの設定については確立していないのが現状である。運動負荷は、30~90 % $\dot{V}O_2$ max 程度の広い範囲の強度が用いられること（Buck and Naughton, 1999; Medbø, 2010）や比較的低い強度が用いられること（Finn et al., 2000; Minahan et al., 2007）もある。また、各強度での運動時間は4~10分と様々である。これらに関して、乳酸性作業閾値や換気性作業閾値、呼吸交換比1.0を超える強度では、酸素摂取量に緩成分（運動後半の局面に緩やかに漸増する酸素摂取量）や無酸素性エネルギー供給量が生じる（Hill and Vingren, 2011; Poole and Jones, 2012; Wilkerson et al., 2004）。さらに、運動時間が長い場合でも緩成分が生じてしまうため（Hill and Vingren, 2011）、各ステージの運動時間を4分にすることが推奨されている（Finn et al., 2010; Green and Dawson, 1996）。また、自転車運動の場合、最大下テストでは異なる負荷であってもペダル回転数は一定に規定されることが多い。内的仕事量を固定するために、ペダル回転数を一定にしていると考えられる。一方で、負荷に応じて至適な回転数（以下、至適回転数）があることが知られている（Böning et al., 1984; Coast and Welch, 1985）。このことは、負荷に対して高すぎる（低すぎる）回転数は、酸素摂取量が過剰に増加してしまうことを示している。そのため、自転車運動では負荷に対する至適回転数を用いることでより正確に酸素需要量を推定できると考えられる。したがって、最大下テストのプロトコルは、酸素需要量の過大評価を防ぐために、十分に低い運動強度で、酸素摂取量の定常状態が確認される可能な限り短い運動時間で設定し、自転車運動であれば至適回転数を用いることが適切であると考えられる。

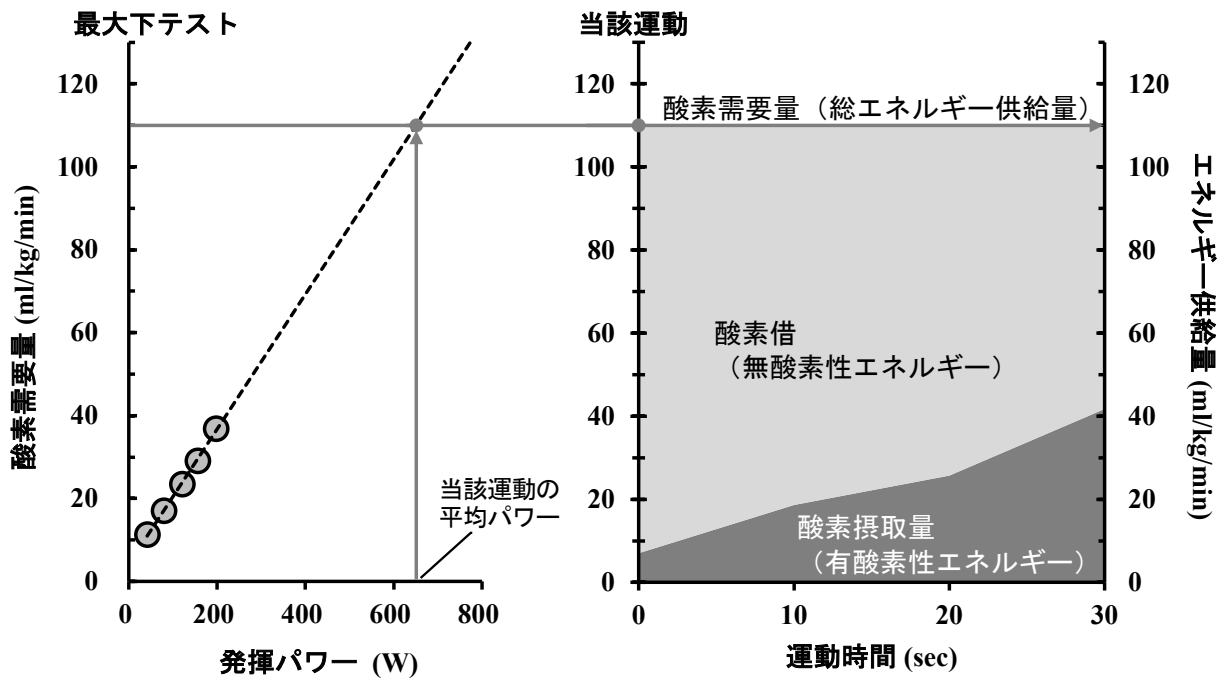


図3 酸素借法によるエネルギー代謝指標の算出方法（モデル図）

- ① 最大下テストにより発揮パワーと酸素需要量の回帰直線を個別に作成
- ② 当該運動の平均パワーを回帰直線に外挿
- ③ 算出された酸素需要量のうち実際に測定された酸素摂取量を有酸素性エネルギー、残された酸素借を無酸素性エネルギーとして算出、それらの割合をエネルギー供給比率として算出

生理的相対強度 ($\% \dot{V}O_{2\max}$) : 酸素需要量に $\dot{V}O_{2\max}$ を除し、100倍して算出

5. 文献研究で得られた知見

以上の文献研究によって、運動中のエネルギー代謝について以下の知見を得た。

- (1) エネルギー供給機構は大きく有酸素性エネルギー供給と無酸素性エネルギー供給に分けることができ、無酸素性エネルギー供給はPCr系と解糖系に分けることができる。エネルギー供給速度はPCr系>解糖系>酸化系の順であり、それぞれの供給系は連関している。
- (2) 短時間高強度運動中では、無酸素性エネルギーの貢献が大きく、無酸素性能力がパフォーマンスに影響を与える。一方で、有酸素性能力がパフォーマンスに影響を与えることもある。
- (3) 全力強度の運動において、運動時間が長い運動ほど有酸素性比率が大きくなる。
- (4) 間欠的高強度運動では、その構成要因（運動時間や休息时间など）の組み合わせが無限に存在し、それが運動中のエネルギー代謝に影響を与え、それを適切に設定することで適切なトレーニング効果が得られる。
- (5) 間欠的高強度運動では、1回目の運動が2回目以降のエネルギー代謝に影響を与え、有酸素性エネルギー供給は高まるものの無酸素性エネルギー供給は低下し、無酸素性比率が低下する。

一方、スプリント中のエネルギー代謝に関する未解決の問題は以下の通りである。

- (1) 全力を下回る強度での短時間運動におけるエネルギー代謝が検討されておらず、運動強度がエネルギー代謝に与える影響について明らかとなっていない。
- (2) 間欠的高強度運動の中でもレペティションスプリントに関して、休息时间の相違が後に続く運動のエネルギー代謝に与える影響について明らかとなっていない。
- (3) 間欠的高強度運動の中でも間欠的スプリントに関して、運動強度、運動時間、休息時間がエネルギー代謝に与える影響について明らかとなっていない。

第3章 研究目的

1. 研究目的

本研究では、短時間運動および間欠的高強度運動におけるエネルギー代謝を分析し、スプリントトレーニングに用いられる運動のエネルギー代謝特性を包括的に明らかにすることを目的とした。

2. 研究課題

上記の研究目的を達成するために以下の研究課題を設定した。

【研究課題 1】

短時間運動における運動強度がエネルギー供給比率に与える影響を明らかにするために、30秒運動を異なる強度で複数試技行わせ、20秒、30秒での強度ごとのエネルギー供給比率を分析し（研究課題 1-1）、同様に、60秒運動を用いて、40秒、50秒、60秒ごとのエネルギー代謝を分析することで（研究課題 1-2）、短時間運動のエネルギー代謝を包括的に検討する。

【研究課題 2】

間欠的高強度運動における構成要因がエネルギー代謝に与える影響を明らかにするために、レペティションスプリントと間欠的スプリントの形式を用いて、エネルギー代謝を検討する。レペティションスプリントでは、異なる休息時間で複数試技行わせ、休息時間の相違が2回目のパワー発揮やエネルギー代謝に与える影響を検討する（研究課題 2-1）。間欠的スプリントでは、構成要因の異なる4試技を行わせることで、運動強度、運動時間、休息時間がエネルギー代謝に与える影響を検討する（研究課題 2-2）。

第4章 研究の意義, 仮説, 限界

1. 研究の意義

本研究では、短時間運動および間欠的高強度運動における構成要因に着目してエネルギー代謝特性を検討する。これによって、スプリントトレーニングにおける基礎的なエネルギー代謝特性を包括的に明らかにすることができ、トレーニングの考案や選択に資する知見を得ることが出来る。特にスプリントトレーニングを取り入れているスプリント種目や球技系の競技者、指導者に対して、有益な知見となり得る。

2. 研究の仮説

- (1) 短時間運動では、運動強度がエネルギー代謝に与える影響は小さく、運動強度が低くても無酸素性エネルギーの貢献は大きい。
- (2) レペティションスプリントにおいて、パフォーマンスが十分に回復する休息時間を用いることで、エネルギー代謝も1回目と同程度まで回復する。
- (3) 間欠的スプリントの構成要因である運動強度、運動時間、休息時間はそれぞれエネルギー代謝に影響を与えるが、その中でも休息時間がエネルギー代謝に大きな影響を与え、休息時間を長くすることが無酸素性エネルギーの貢献を高めることにつながる。

3. 研究の限界

(1) 対象者による限界

本研究では、スプリントトレーニングの用いる場面を想定し、スプリント種目を専門とする競技者を対象に実験を行った。短時間高強度運動におけるエネルギー供給比率は、対象者の体力特性に影響を受けることが知られており、持久系競技者や有酸素能力の高い競技者では、有酸素性比率が高値を示すことが報告されている (Calbet et al., 2003; Granier et al., 1995; 森ほか, 2011)。本研究で対象とする競技者は

持久系競技者と比較して有酸素性能力が低いことが想定されるため、運動中における無酸素性比率は比較的高いと予想される。したがって、体力特性の異なる競技者に本研究で得られた知見をそのまま当てはめることには限界があると考えられる。

(2) 運動様式による限界

本研究での実験は、すべて自転車エルゴメータを用いた自転車運動によって行われた。自転車運動は異なる強度での運動を比較する際に無酸素性エネルギー供給量を推定する際の妥当性が高いことから (Hill and Vingren, 2011)、走運動ではなく自転車運動を採用した。一方、運動様式によって動員される筋や活動筋量、筋の収縮様式などが異なるため、それがエネルギー代謝に与える可能性がある。特に走運動と比較して、自転車運動では主に下肢筋群が動員され、短縮性収縮の時間割合が大きい。すなわち、自転車運動では運動周期に対する収縮時間の割合が約 50% を占め (Coyle et al., 1991; Neptune et al., 1998)、走運動では約 24% である (Bundle et al., 2003)。収縮時間が長いことにより運動時の筋内圧が高く、静脈還流量や一回拍出量および心拍出量が低値を示すことが報告されている (Hermansen et al., 1970)。それが運動中のエネルギー代謝に影響を与える可能性がある。実際に、漸増負荷テストにおいて自転車運動よりも走運動で $\dot{V}O_2\max$ と最大心拍数が有意に高かったことが報告されている (吉岡ほか, 2009)。一方、走運動であっても自転車運動であっても運動時間に対するエネルギー供給比率は同様の値を示すことが報告されている (Gastin, 2001)。また、水泳運動とカヤック運動を含めた 4 つの運動様式で、運動時間が長いほど有酸素性比率が高いことが報告されており (Duffield and Dawson, 2003; Gastin, 2001; Medbø and Tabata, 1989; Ogita et al., 2003; 中垣ほか, 2008; 平井ほか, 1993)、運動時間が与える影響については同様の結果が示されている。さらに、間欠的運動のエネルギー代謝を検討した研究では、水泳運動であっても自転車運動であっても 2 回目以降で有酸素性代謝の貢献が高まる (Bogdanis et al., 1996; Peyrebrune et al., 2014)。したがって、運動様式が運動中のエネルギー代謝指標の値に影響を与える可能性があるものの、構成要因 (運

動強度, 運動時間, 休息時間など) がエネルギー代謝に与える影響については必ずしも運動様式間で差があるとはいえない. しかしながら, 本研究で得られた知見を他の運動様式にそのまま当てはめることには限界があり, 注意する必要がある.

(3) 実験方法による限界

- 1) 本研究の実験では, 競技者を対象にしているため, トレーニング状況や実験時期が測定値に影響を与える可能性がある. すべての実験は, 競技シーズン終了後に行ったため, 必ずしもパフォーマンスが高い時期ではなかったことに留意する必要がある.
- 2) 本研究では, 酸素借法によってエネルギー供給量を推定した. そのため, 筋内のエネルギー代謝を直接分析したわけではなく, あくまでも有酸素性エネルギー供給量は酸素摂取量の測定から得られた値であり, 無酸素性エネルギー供給量は推定値である. したがって, 筋内で生じた代謝物の変動を分析することはできず, 無酸素性エネルギー供給機構である PCr 系と解糖系の貢献を分けて算出することはできない.
- 3) 本研究の実験はすべて自転車エルゴメータ (Power max VIII, コンビ社製) を用いた自転車運動であるが, 近年 Power max VIII の精度に問題があることが指摘されている (野村・杉田, 2020). 本研究でのプロトコルは先行研究で検証されたものよりすべての実験試技で反復あり, 繰り返しありの実験デザインを用いているため, その影響は小さく抑えられていると推察されるが, 自転車エルゴメータによって生じる測定誤差が結果に与える影響については不明である.

4. 作業の仮定

(1) 酸素借法によるエネルギー供給量の推定

本研究では, 酸素借法によって, 運動中の総エネルギー供給量を推定し, 運動中の酸素摂取量を減じることで無酸素性エネルギー供給量を推定した (図 3). その推

定方法は、間欠的漸増負荷運動テスト（以下、最大下テスト）を行わせ、発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式を個別に作成し、当該運動の発揮パワーを外挿することで酸素需要量（総エネルギー供給量）を算出する。そのため、より正確な値を推定するためには最大下テストの運動時間や運動強度の適切な設定が重要になる（Medbø, 2010; Noordhof et al., 2010）。そこで本研究では、先行研究の多くで用いられている設定と比較して低強度かつ短い運動時間の設定で、ペダル回転数は至適回転数を考慮したペダル回転数で行わせた。これらによって、理論上より正確な推定が可能になったと仮定して、エネルギー供給量の推定を行った。

(2) 運動開始時のスタート方法について

研究課題 1-1 の 30 秒テスト、1-2 の 60 秒テスト、2-2 の間欠的スプリントでは、通常のスタート方法ではなくローリングスタート（Minahan et al., 2007）を用いた。すなわち、負荷のかかるタイミングでペダリング運動を開始するのではなく、その 10 秒前から負荷のない状態でペダリングを開始して加速した時点で負荷が開始される方式を用いた。ローリングスタートを用いることによって、負荷開始直後から設定した目標回転数でペダリングすることができるようになり、強度をより正確に規定することができる。しかしながら、Peyrebrune et al. (2014) は、通常のスタート方法では、運動開始時に血中や筋中に貯蔵された酸素が用いられ、それは酸素摂取量に反映されないことからその分無酸素性エネルギーに含まれるが、ローリングスタートでは、その酸素貯蔵分の無酸素性エネルギーがローリング時に消費され、無酸素性比率が過小評価されてしまうことを指摘している。そこで、本研究のデータを用いて 30 秒全力自転車運動中のエネルギー供給比率をローリングスタートと通常スタートと比較したところ、条件間で有意差が認められなかった。水の抵抗がある水泳運動を用いた先行研究（Peyrebrune et al., 2014）と比較して、本研究で用いた自転車運動のローリングスタートは負荷が 0.0 kp であり、その影響は小さいと考えられるため、無視できる。

第5章 本研究の共通する測定方法

本研究の実験で共通して用いられる測定方法や測定項目について記述する。

1. 本研究の運動様式

本研究におけるすべての実験試技は、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ (Powermax-VIII, コンビ社製) を用いて行われ、発揮パワーは、エルゴメータから出力した信号を AD コンバータおよび USB 変換ケーブルを介して 10 msec ごとにパーソナルコンピュータに入力することで測定した。ハンドル (ドロップハンドル) は最も高い位置で固定し、サドルは個人ごとに決定した高さで実験試技を行わせた。また、足部とペダルをストラップで固定することによって不安定感を解消した。運動中は、サドルから腰を上げないように指示した。

2. 本研究の対象者

本研究では、陸上競技を専門に行っている男子大学生および大学院生を対象とした。対象者の選定は、自転車エルゴメータのペダリング運動に慣れていること、スプリント種目を含むことを条件に短距離走競技者および十種競技競技者とした。なお、実験は競技シーズン終了後に行われた。実験を行うにあたり、対象者には本研究の目的、運動に伴う苦痛、不快感および危険性を詳細に説明し、いかなる時でも実験の中断ができるという条件の下で参加の同意を得た。

3. 運動中の生理的指標の分析方法

呼気ガス指標には、自動呼気ガス分析器 (AE-310S, ミナト医科学社製) を用いて呼気ガス採集法 (EXP モード) により分析し、酸素摂取量は 5 秒ごとに値を平均して算出した。心拍数は、研究課題 1-1, 1-2, 2-1 の実験では HR モニター (S610i, Polar 社製) を用いて 5 秒ごとに測定し、実験課題 2-2 の実験では HR モニター (H10, Polar

社製)を用いて1秒ごとに測定し5秒ごとに平均して算出した。血中乳酸濃度の測定には、指尖より血液サンプルを採取し、自動血中分析器 (Model 1500 SPORT, YSI 社製)を用いて分析した。なお、間欠的漸増負荷テストにおける血中乳酸濃度測定には、低値域において妥当性および信頼性が高い (小林, 2016) 簡易型血中乳酸測定器 (Lactate-Pro, アークレイ社)を用いて分析した。

4. 自転車運動中のペダル回転数

本研究では、一部を除く一定ペース運動の実験において強度に応じて異なるペダル回転数を用いた。一般的には、強度によらず定めた回転数を用いることが多い。それは内的仕事量が等しくなる一方で、低強度・高回転数や高強度・低回転数などの強度とペダル回転数が不釣合な設定では運動中の効率が低下する (Böning et al., 1984)。これにより、必要なエネルギー供給量が増大し、低強度運動時の酸素需要量は過大評価され、高強度運動では発揮できるパワーが制限される。本研究では酸素借法を用いるため低強度運動時の酸素需要量を可能な限り正確に測定する必要があり、高強度運動においても幅広い強度を扱うことから、運動強度に合わせた回転数を設定することが望ましいといえる。そこで、先行研究で報告されている至適回転数の概念を用いてペダル回転数を設定した。

まず至適回転数とは、自転車運動における強度に対して酸素摂取量が最も小さくなる至適なペダル回転数である (Böning et al., 1984; Coast and Welch, 1985)。この至適回転数は運動強度に対し直線的に高まることが報告されている (Coast and Welch, 1985)。また、至適回転数はペダリング技術などの個人差に影響を受けるものの (Böning et al., 1984)、至適回転数から大きく逸脱しない場合には酸素摂取量に与える影響は小さいことがわかっている (Böning et al., 1984; Coast and Welch, 1985)。したがって、至適回転数に近いペダル回転数を用いることで、低強度運動であっても高強度運動であっても実験試技をより適切に遂行できるといえる。

そこで、先行研究の値を参考に (Coast and Welch, 1985), 至適回転数を簡易的に算出する式を作成し、運動中のペダル回転数を設定した。

$$\text{Pedal frequency (rpm)} = 0.14 \times \text{power (W)} + 37 \quad (\text{式 1})$$

$$\text{Load (kp)} = \text{Power (W)} / \text{Pedal frequency (rpm)} \times 0.98 \quad (\text{式 2})$$

式 1 は、ペダル回転数が強度 (パワー) の増加に応じて直線的に高まることを前提として作成された直線回帰式である。式 2 は、パワーの算出式を移項した式である。式 1 によって目標パワーから目標ペダル回転数を算出し、それらの値を用いて負荷 (kp) を決定した。

(1) 強度に応じて異なるペダル回転数を用いることの妥当性の検証

式 1 を用いることの妥当性を確認するために事前実験を行った。その妥当性は、2つの観点から検証した。1つ目は、間欠的漸増負荷テスト (以下、最大下テスト) において作成される発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式の相関係数である。先行研究で示されている 0.990 以上を基準とした (Pizza et al., 1996)。2つ目は、短時間高強度一定ペース運動の遂行可否である。30 秒全力運動を行わせ、その時の平均パワーを 100%とし、90%を超える高強度一定ペース運動を式 1 により算出されたペダル回転数で完遂することを基準とした。対象者は、前述の「本研究の対象者」に相当する者 2 名とし、実験試技は、最大下テスト、30 秒全力運動、30 秒一定ペース運動とした。30 秒一定ペース運動は、50~99%強度の範囲内で 4 試技ずつ行わせた。その結果、前述した 2つの基準を満たした。まず、最大下テストで作成された直線回帰式の相関係数は、0.9983 と 0.9991 であった。そして、30 秒一定ペース運動では、すべての運動が完遂され、最も高い強度はそれぞれ 93 %と 99 %であった。これらの結果から、式 1 によって算出されるペダル回転数を用いて、最大下テストと高強度一定ペース運動が問題なく実施可能であることを確認した。

5. 酸素需要量および酸素借の算出方法と間欠的漸増負荷テスト

運動中の無酸素性エネルギー供給量を測定するために、酸素借の算出を行った。その算出方法を図3に示した。まず、最大下テストを行わせ、対象者ごとに発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式を作成し、当該運動の発揮パワーから酸素需要量を推定する。その酸素需要量から当該運動中の酸素摂取量を減じることで酸素借を算出した。

最大下テストのプロトコルを図4に示した。W-upは、最大下テストにおける個別に設定された1~5ステージの負荷をそれぞれ30秒ずつ、計2分30秒間の自転車運動を行わせた。その後、呼気ガス分析に用いるマスクを装着させ、最大下テストを行わせた。最大下強度で4分間の運動を2分間の休息を挟み最低5ステージ行わせた。運動後血中乳酸濃度が4mMを超えた時点でテストを終了させた。運動強度、運動時間、休息時間は、先行研究（Finn et al., 2000; Green and Dawson, 1996）を参考にし、負荷は0.5~3.5 W/kgの範囲内とした。また、無酸素性代謝の動員が最小限であることを確認するために、呼吸交換比と運動後血中乳酸濃度を分析し、先行研究（Hill and Vingren, 2011; Wilkerson et al., 2004）をもとに基準値をそれぞれ1.0と4mMに設定した。これらの基準を下回る少なくとも4ステージ分の値を用いて直線回帰式を作成した。なお、ペダル回転数は、至適回転数を考慮し強度に応じて異なるペダル回転数を用いた（式1）。

各ステージでの酸素需要量は、4分間のうち後半の2分間の酸素摂取量を平均することで算出し、同様の時間で発揮パワーの平均値も算出した。

6. $\dot{V}O_2\text{max}$ テストと生理的相対強度の算出方法

各研究課題において、有酸素性能力の指標や生理的相対強度の基準となる $\dot{V}O_2\text{max}$ を測定するために、漸増負荷テスト（以下、 $\dot{V}O_2\text{max}$ テスト）を実施した。開始負荷は、8~12分程度で疲労困憊に至るよう対象者ごとに設定し、負荷は1分ごとに0.1~0.2kpずつ増加させた。ペダル回転数は、90rpmに規定し、疲労困憊に至るまで行った。疲労困憊の基準には、85rpmを下回った時点で、5秒間のカウントダウン

を始め、その間に 85 rpm を上回らなかった場合とした。なお、85 rpm を再度上回った場合でも数秒間維持できなかった場合は、疲労困憊に至ったとみなした。

$\dot{V}O_{2max}$ の判定は、先行研究 (Midgley et al., 2007) を参考に、①酸素摂取量のレベリングオフ (前の負荷段階と比較した酸素摂取量の増加幅が 2.1 ml/kg/min 以下)、②呼吸交換比が 1.1 以上、③運動時最大心拍数が予測最大心拍数 ($220 - \text{年齢}$) の 90% 以上、④主観的運動強度が 18 以上、のうち 3 つ以上を満たすものとし、30 秒平均の最も高い値を $\dot{V}O_{2max}$ とした。また、最大心拍数として 30 秒平均の最も高い値を算出した。

生理的相対強度は、 $\dot{V}O_{2max}$ と当該運動の発揮パワーと最大下テストで得られた直線回帰式を用いて算出された (図 3)。すなわち、対象者ごとに作成された発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式に当該運動の発揮パワーを外挿することによって、当該運動の酸素需要量を推定し、対象者ごとの $\dot{V}O_{2max}$ で除し 100 倍することで相対値として算出した。

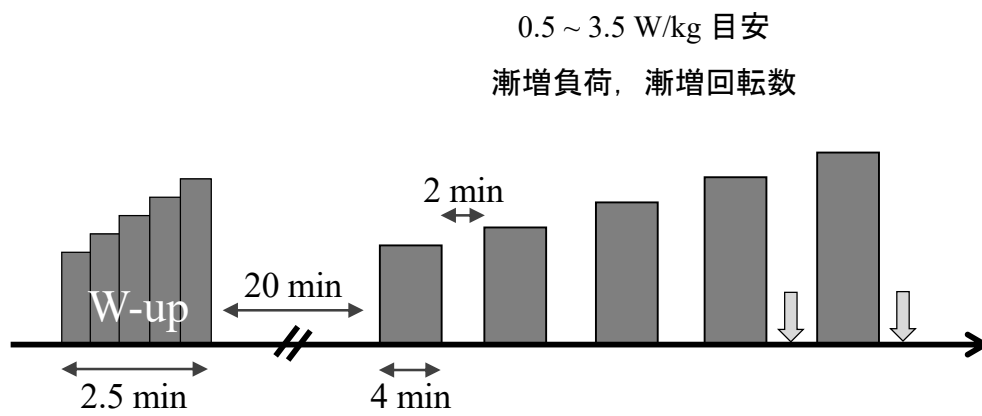


図4 最大下テストの実験プロトコル

↓ : 血中乳酸濃度測定

第6章 30秒運動における運動強度がエネルギー代謝に与える影響（研究課題 1-1）

1. 目的

近年、酸素借法を用いて短時間高強度運動のエネルギー代謝を検討した研究が多数報告されている（Gastin, 2001）。Medbø and Tabata (1989) は、30秒、60秒、2~3分で疲労困憊に至る運動を行わせ、有酸素性比率はそれぞれ $30 \pm 1\%$ 、 $47 \pm 2\%$ 、 $65 \pm 2\%$ であったことを報告している。このことは、運動時間が長いほど有酸素性代謝の貢献が高まることを示している。また、走運動（Duffield and Dawson, 2003）や水泳運動（Ogita et al., 2003）などでも同様の結果が報告されている。しかしながら、これらの先行研究では、いずれもオールアウト強度での運動を用いており、運動強度がエネルギー供給比率に与える影響は不明である。実際のトレーニング現場では、必ずしも全力運動だけが用いられるわけではなく（山崎, 2009）、競技者のコンディションやトレーニング計画、気象条件等により全力を下回る強度の運動が用いられる。運動強度がエネルギー代謝に与える影響を詳しく検討するためには、異なる強度で運動を複数試技行わせ、運動時間ごとに比較する必要がある。

運動強度がエネルギー供給比率に与える影響について検討した研究はほぼないが、先行研究からデータを比較することができる。Spencer and Gastin (2001) は、トレッドミル上で200m走、400m走、800m走、1500m走のオールアウト運動を行わせ、その時の運動開始から20秒間の有酸素性比率を算出している。その値は、それぞれ34.4%、32.0%、39.5%、59.1%であったことを報告しており、このことは、運動強度が高いほど無酸素性比率が高いことを示唆している。しかしながら、この研究の対象者は、試技ごとに専門とする競技者が対象となっており、その身体特性がエネルギー供給比率に影響を与えていると考えられ（Calbet et al., 2003; Granier et al., 1995）、同一対象者で比較する必要がある。同一対象者を用いたGastin et al. (1995) の研究では、一般男性を対象に一定強度の運動を異なる強度で2種類行わせ（ $107 \pm 1\% \dot{V}O_{2max}$ 、 $125 \pm 2\% \dot{V}O_{2max}$ ）、有酸素性比率がそれぞれ38.1%と34.1%であったことを報告し

ている。このことは Spencer and Gastin (2001) の結果を支持している。一方, Peyrebrune et al. (2014) は, 水泳競技者を対象に 30 秒の水泳運動を異なる強度で 2 種行わせ ($154 \pm 6\% \dot{V}O_{2\max}$, $165 \pm 2\% \dot{V}O_{2\max}$), 有酸素性比率がそれぞれ $25 \pm 4\%$ と $33 \pm 8\%$ であったことを報告しており, 統一した見解が得られていない。統一した見解が得られていない要因としては, 実験プロトコルや対象者の特性が研究間で異なることが挙げられる。

以上のことから本研究課題では, スプリント種目を専門とする競技者を対象に 30 秒運動を異なる強度で複数試技行わせ, 短時間運動における運動強度がエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) 研究対象者

対象者は, 陸上競技を専門に行っている男子大学生および大学院生 8 名とした。対象者の選定は, 自転車エルゴメータのペダリング運動に慣れていること, スプリント種目を含むことを条件に短距離走競技者および十種競技競技者とした。対象者の年齢, 身長, 体重は, それぞれ 22.3 ± 1.0 歳, 176.7 ± 3.9 cm, 70.1 ± 6.1 kg であった。なお, 実験は競技シーズン終了後に行われた。実験を行うにあたり, 対象者には本研究課題の目的, 運動に伴う苦痛, 不快感および危険性などを詳細に説明し, いかなる時でも実験の中断ができるという条件の下で参加の同意を得た。なお, 本研究課題は, 筑波大学研究倫理委員会の承認を得て行われた (承認番号: 体 28-96 号)。

(2) 実験手順

実験は, プレテスト, 7 強度の 30 秒自転車運動テスト (以下, 30 秒テスト), 30 秒間の全力自転車運動テスト (以下, WAnT: Wingate Anaerobic Test) を合わせた計 8 セッションとし, セッション間には中 1 日以上の間隔をあげ, 対象者ごとに 3 週間以内にすべての実験を終えた。ペダリング技術や体力の向上による影響を小さくするため,

プレテストを除く7セッションの実施順は、対象者ごとにランダム化された(表1)。なお、対象者には実験までの24時間は激しい運動を控えるよう指示した。また、実験前日から当日のアルコール摂取および当日のカフェイン摂取を控えるよう指示した。食事は実験開始2時間前に終わるよう指示し、代謝の日内変動を考慮して対象者ごとに実験開始の時間を固定した(変動は ± 30 分以内)。実験環境は、室温24~26度、湿度60%以下になるよう調節した。実験中の水分補給に関して、対象者には実験室来室の際に市販の飲料水を渡し、可能な限りいつでも水分補給ができるよう配慮した。なお、呼気ガス分析用のマスクを装着している間の水分補給は不可能であるが、休息中はマスク再着用の時間的余裕がある場合に対象者の要望に応じマスクを一時的に外し、水分補給を行わせた。

(3) プレテスト

実験の初回に最大下テストと $\dot{V}O_2\max$ テストを行わせた。それらの測定方法は、「共通する測定方法」に準じて行われ、テスト間の休息は20分とした。

(4) 30秒テスト

30秒の自転車運動を異なる強度で7試技行わせた。図5に実験プロトコルを示した。ウォーミングアップは負荷1.0kpおよびペダル回転数90rpmの設定で10分間行わせ、20分の休息中に呼気ガス分析用のマスクを装着し、30秒テストを行わせた。30秒テストは、Minahan et al. (2007)を参考にローリングスタートで行われた。すなわち、対象者には負荷がかかる10秒前からゆっくりとペダリングを開始し、負荷がかかる時点で100rpm前後になるよう指示した。また、負荷開始直後から5秒以内に目標ペダル回転数まで調整し、それを維持するよう指示した。なお、1回目の実験開始前までにローリングスタートの練習を行わせ、安定して試技が行えるよう準備させた。

運動強度は酸素需要量によって決定した(40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ml/kg/min,

以下それぞれ D40~D100)。すなわち、最大下テストで得られた発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式に各酸素需要量を外挿し、目標とする発揮パワーを対象者ごと、試技ごとに算出した。その目標とする発揮パワーでペダリングさせるため、式1（「共通する測定方法」参照）を用いて負荷と目標回転数を算出した。なお、試技の達成率を対象試技の酸素需要量から変動5%未満で評価した。この範囲を超えた試技は、実験予備日にて再度行うこととした。

(5) Wingate Anaerobic Test

力学的相対強度の指標および30秒全力運動の試技として30秒間のWAnTを行わせた。対象者は、D50試技の20分後に行った。負荷は体重の7.5%kpとし、30秒テストと同様にローリングスタートを用いて行わせた。また、負荷開始直後から運動終了まで全力でペダリングするよう指示した。

(6) 分析項目

プレテストの最大下テストにおける発揮パワーと酸素需要量、それらの直線回帰式は、「共通する測定方法」に準じて分析、算出した。同様に、 $\dot{V}O_2\max$ テストにおける $\dot{V}O_2\max$ と最大心拍数についても「共通する測定方法」に準じて分析、算出した。

30秒テストおよびWAnTにおける平均パワーは30秒間の発揮パワーを平均値で算出し、体重で規格化した。また、WAnTにおける最高パワーは30秒間のうち1秒間ごとの最も高い値とし、体重で規格化した。それら運動中の心拍数、酸素摂取量、酸素借、血中乳酸濃度は、前述した「共通する測定方法」に準じて分析、算出した。運動中の平均心拍数、酸素摂取量、酸素借は、30秒間の平均値を算出した。算出した酸素摂取量を有酸素性エネルギー (ml/kg)、酸素借を無酸素性エネルギー (ml/kg)、そのエネルギー供給比率を有酸素性比率と無酸素性比率として算出した。血中乳酸濃度は、運動前と運動後1, 3, 6分に測定し、最高値を最高血中乳酸濃度とした。運動強度の指標として、力学的相対強度と生理的相対強度を算出した。力学的相対強度は

WAnTにおける平均パワーを基準とする相対値とし、生理的相対強度は、算出した酸素需要量と $\dot{V}O_2\max$ の値を用いて算出した（「共通する測定方法」参照）。また、20秒および30秒間での60、70、80、90、100%力学的相対強度における有酸素性エネルギー、無酸素性エネルギー、有酸素性比率、無酸素性比率を30秒テストとWAnTの値を用いて、算出した。その算出方法は、各強度水準をはさむ2試技の値を用いて、直線回帰式により有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーを算出し、それらの割合を有酸素性比率と無酸素性比率として算出した。100%水準のみ、WAnTの値を直接用いた。なお、20秒間の値は、30秒テストおよびWAnTにおける運動開始から20秒間の平均パワー、酸素需要量、酸素摂取量、酸素借を算出し、30秒間の各強度水準と同様の方法で算出した。

(7) 統計処理

値は平均値±標準偏差で示した。30秒テストにおける強度間（7水準、組み合わせ数21）の分析と力学的相対強度間（5水準、組み合わせ数10）の分析には、一元配置分散分析を用い、有意な主効果が認められた項目には多重比較検定（Holmによる調整）を行った。有意水準は危険率 $p < 0.05$ で判定した。

表1 実験スケジュール

| Day 1 (プレテスト) | ランダム順 | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Day 2 | Day 3 | Day 4 | Day 5 | Day 6 | Day 7 | Day 8 | |
| 最大下テスト | D40 | D50 | D60 | D70 | D80 | D90 | D100 |
| $\dot{V}O_{2max}$ テスト | WAnT | | | | | | |

3週間以内に遂行され、それぞれ1日以上以上の休息が挟まれた。

D40~D100: 30秒テストの各試技 (40~100 ml/kg/min O_2 demand)

WAnT: 30秒間の Wingate Anaerobic Test (全力自転車運動)

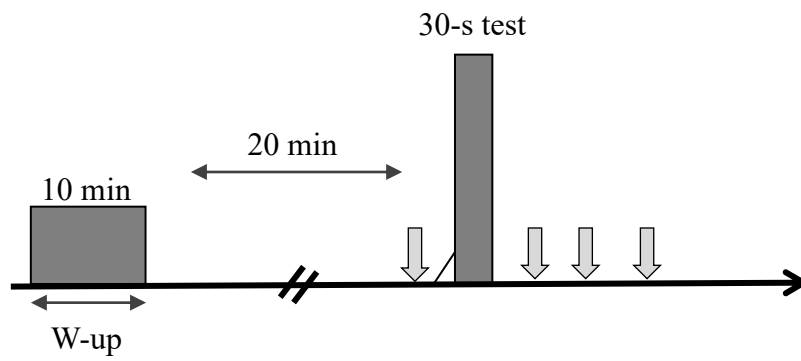


図5 30秒テストの実験プロトコル

△：ローリングスタート

↓：血中乳酸濃度測定

3. 結果

対象者の身体特性として、 $\dot{V}O_2\max$ と最大心拍数はそれぞれ 56.0 ± 5.6 ml/kg/min と 188.7 ± 8.3 bpm であった。WAnT の平均パワー、最高パワー、最高血中乳酸濃度はそれぞれ 10.3 ± 0.3 W/kg, 13.1 ± 0.4 W/kg, 10.6 ± 0.9 mM であった。最大下テストによって得られた発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式の決定係数は、 0.994 ± 0.005 であった。

表 2 に 30 秒テストの結果を示した。有酸素性比率に対する酸素需要量（運動強度）は、有意な主効果が認められたものの（ $F=7.4, p<0.01$ ），強度間で有意差は認められなかった。有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーに対する酸素需要量（運動強度）は、いずれも有意な主効果が認められ（ $F=72.1, p<0.01$; $F=727.1, p<0.01$ ），酸素需要量（運動強度）が高いほど有意に高い値を示した（ $40\sim 50D < 70\sim 100D$, $60D < 80\sim 90D < 100D$, $70D < 90\sim 100D$, すべて $p<0.01$ ）（ $40D < 50D < 60D < 70D < 80D < 90D < 100D$, すべて $p<0.01$ ）。

表 3, 図 6, 図 7 に 20 秒間, 30 秒間における各力学的相対強度水準のエネルギー代謝を示した。20 秒間の値に関して、有酸素性比率（無酸素性比率）に対する力学的相対強度は、有意な主効果が認められたものの（ $F=3.2, p<0.05$ ），強度間で有意差は認められなかった。有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーに対する力学的相対強度は、いずれも有意な主効果が認められ（ $F=44.7, p<0.01$; $F=914.8, p<0.01$ ），力学的相対強度が高いほど有意に高い値を示した（ $60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, $p<0.01\sim 0.05$ ）（ $60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, すべて $p<0.01$ ）。30 秒間の値に関して、有酸素性比率（無酸素性比率）に対する力学的相対強度は、有意な主効果が認められたものの（ $F=4.0, p<0.05$ ），強度間で有意差は認められなかった（図 6）。有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーに対する力学的相対強度は、いずれも有意な主効果が認められ（ $F=55.2, p<0.01$; $F=705.1, p<0.01$ ），力学的相対強度が高いほど有意に高い値を示した（ $60\sim 70\% < 80\% < 90\sim 100\%$, すべて $p<0.01$ ）（ $60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, すべて $p<0.01$ ）（図 7）。

表2 30秒テストの結果

| | 酸素需要量 (ml/kg/min) | | | | | | | F値 | 多重比較 |
|---------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------|---|
| | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | | |
| 酸素需要量 (ml/kg/min) | 40.8 ± 0.5 | 50.9 ± 0.8 | 60.5 ± 0.5 | 70.1 ± 0.7 | 80.5 ± 1.2 | 90.0 ± 1.1 | 100.5 ± 1.3 | 5023.6** | 40<50<60<70< 80<90<100 |
| 力学的相対強度 (%) | 33.7 ± 1.0 | 43.1 ± 1.3 | 51.9 ± 1.4 | 60.8 ± 1.4 | 70.4 ± 2.0 | 79.1 ± 1.5 | 88.8 ± 2.7 | 3387.4** | 40<50<60<70< 80<90<100 |
| 生理的相対強度 (% $\dot{V}O_2$ max) | 73.6 ± 7 | 91.7 ± 10 | 108.9 ± 11 | 126.3 ± 14 | 145.0 ± 16 | 162.1 ± 17 | 180.9 ± 18 | 675.4** | 40<50<60<70< 80<90<100 |
| 平均パワー (W/kg) | 3.5 ± 0.1 | 4.4 ± 0.2 | 5.4 ± 0.2 | 6.3 ± 0.2 | 7.3 ± 0.3 | 8.2 ± 0.3 | 9.2 ± 0.4 | 2083.1** | 40<50<60<70< 80<90<100 |
| 平均回転数 (rev/min) | 70.1 ± 7.5 | 81.1 ± 3.2 | 89.7 ± 4.3 | 98.4 ± 4.9 | 108.3 ± 5.8 | 116.9 ± 5.8 | 127.4 ± 7.3 | 396.5** | 40<50<60<70< 80<90<100 |
| 平均心拍数 (beats/min) | 96.8 ± 4.4 | 101.6 ± 7.5 | 105.5 ± 9.8 | 107.9 ± 5.9 | 112.8 ± 6.7 | 116.6 ± 10.9 | 121.7 ± 13.6 | 12.6** | 40<70~100, 50<70 |
| 最高血中乳酸濃度 (mM) | 1.5 ± 0.2 | 2.3 ± 0.6 | 2.9 ± 0.5 | 3.7 ± 0.6 | 4.9 ± 0.8 | 5.8 ± 0.7 | 7.7 ± 1.0 | 180.2** | 40<50<60<70< 80<90<100 |
| 有酸素性エネルギー (ml/kg) | 6.9 ± 1.0 | 7.5 ± 0.8 | 8.7 ± 0.8 | 10.0 ± 1.2 | 10.9 ± 0.8 | 12.0 ± 0.7 | 13.4 ± 1.0 | 72.1** | 40~50<70~100, 60<80~90<100, 70<90~100 |
| 無酸素性エネルギー (ml/kg) | 13.4 ± 1.0 | 17.9 ± 0.6 | 21.6 ± 0.8 | 25.0 ± 1.3 | 29.4 ± 1.0 | 33.0 ± 0.9 | 36.8 ± 1.1 | 760.9** | 40<50<60<70< 80<90<100 |
| 有酸素性比率 (%) | 34.1 ± 5.1 | 29.6 ± 2.8 | 28.7 ± 2.6 | 28.6 ± 3.5 | 27.1 ± 1.9 | 26.6 ± 1.6 | 26.7 ± 2.0 | 7.4** | n. s. |
| 無酸素性比率 (%) | 65.9 ± 5.1 | 70.4 ± 2.8 | 71.3 ± 2.6 | 71.4 ± 3.5 | 72.9 ± 1.9 | 73.4 ± 1.6 | 73.3 ± 2.0 | 7.4** | n. s. |

平均値 ± 標準偏差

** : p < 0.01

< (>) : p < 0.05

表3 力学的相対強度ごとの20, 30秒間のエネルギー代謝

| | | 力学的相対強度 (%) | | | | | F値 | 多重比較 |
|----------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|---------------------|
| | | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | | |
| 有酸素性エネルギー (ml/kg) | 20秒 | 8.0 ± 0.5 | 8.9 ± 0.8 | 9.8 ± 1.1 | 10.9 ± 1.1 | 11.7 ± 1.1 | 44.7** | 60<70<80< 90<100 |
| | 30秒 | 9.8 ± 1.2 | 10.9 ± 0.7 | 12.1 ± 0.7 | 13.5 ± 1.0 | 14.2 ± 1.4 | 55.2** | 60~70<80< 90~100 |
| 無酸素性エネルギー (ml/kg) | 20秒 | 29.6 ± 1.1 | 34.6 ± 1.4 | 39.5 ± 1.8 | 44.4 ± 2.1 | 49.4 ± 2.2 | 914.8** | 60<70<80< 90<100 |
| | 30秒 | 24.8 ± 1.4 | 29.1 ± 1.0 | 33.3 ± 1.3 | 37.3 ± 1.5 | 42.0 ± 1.8 | 705.1** | 60<70<80< 90<100 |
| 有酸素性比率 (%) | 20秒 | 21.3 ± 1.4 | 20.4 ± 1.7 | 19.9 ± 2.1 | 19.7 ± 2.2 | 19.2 ± 1.9 | 3.2* | n. s. |
| | 30秒 | 28.4 ± 3.4 | 27.2 ± 1.6 | 26.7 ± 1.7 | 26.6 ± 2.0 | 25.3 ± 2.5 | 4.0* | n. s. |
| 無酸素性比率 (%) | 20秒 | 78.7 ± 1.4 | 79.6 ± 1.7 | 80.1 ± 2.1 | 80.3 ± 2.2 | 80.8 ± 1.9 | 3.2* | n. s. |
| | 30秒 | 71.6 ± 3.4 | 72.8 ± 1.6 | 73.3 ± 1.7 | 73.4 ± 2.0 | 74.7 ± 2.5 | 4.0* | n. s. |

平均値 ± 標準偏差

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

< (>): $p < 0.05$

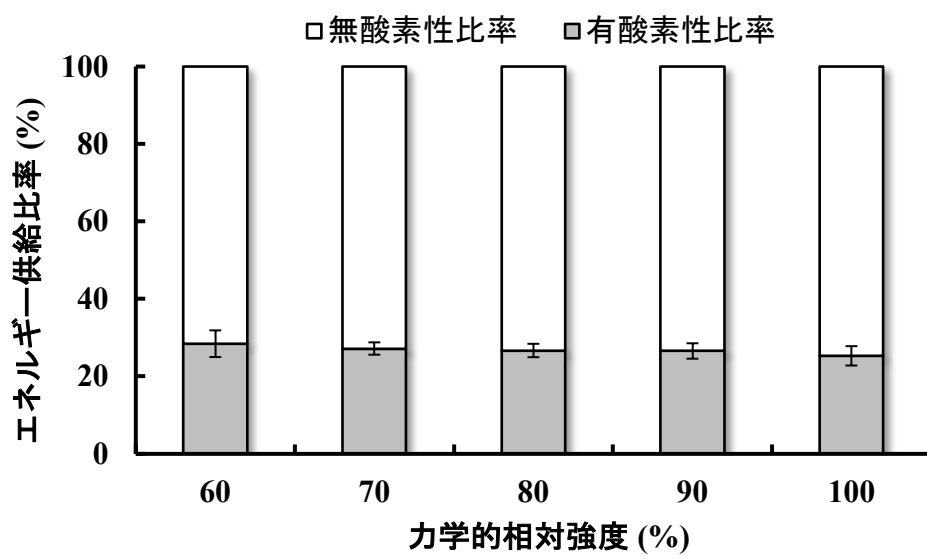


図6 力学的相対強度ごとの30秒間のエネルギー供給比率

F = 4.0 (p < 0.01)

多重比較検定：有意差なし

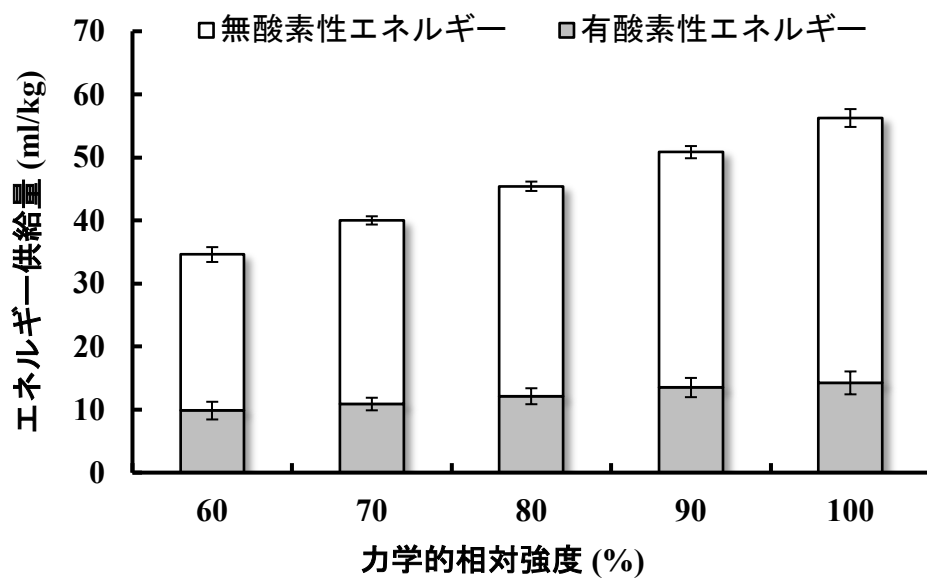


図7 力学的相対強度ごとの30秒間の各エネルギー供給量
 有酸素性エネルギー：F = 55.2 ($p < 0.01$), 60~70<80<90~100
 無酸素性エネルギー：F = 705.1 ($p < 0.01$), 60<70<80<90<100
 <: $p < 0.01$

4. 考察

本研究課題の目的は、30秒運動の運動強度がエネルギー供給比率に与える影響を明らかにすることであった。そして、運動強度（酸素需要量）が高まるにつれて、運動中の有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーが増加した。一方で、エネルギー供給比率は強度間で有意差が認められず、ほぼ一定の値を示すことが明らかとなった。

30秒テストのエネルギー供給比率は、運動強度間で有意差が認められなかった（表2）。また、力学的相対強度で算出した場合でも20秒間と30秒間のエネルギー供給比率は、運動強度間で有意差は認められなかった（表3, 図6）。そのため、20~30秒間の運動において運動強度がエネルギー供給比率に与える影響は小さいことが示唆された。一般的に、運動強度の増加に伴い無酸素性比率は高まると考えられており（Hoffman, 2002; 尾縣, 2007; 宮丸・宮丸, 1978）、本研究課題の結果はその定説を一部覆すこととなった。高強度で無酸素性比率が高まると考えられてきた論拠として、荻田（2000）の見解を踏まえると $\dot{V}O_2\max$ を超える強度の運動では運動強度が高い運動ほど無酸素性エネルギー供給量のみ大きくなると考えられてきたためであると推測される。それに関して、有酸素性エネルギーは高い強度ほど高値を示した（表3, 図7）。このことは、運動中の酸素摂取量が運動強度に影響を受けていることを示唆している。先行研究においても Wilkerson et al. (2004) は、異なる運動強度（ $\sim 120\% \dot{V}O_2\max$ ）で7試技行わせ、強度が高い運動ほど運動開始から80秒時点の酸素摂取量が高かったことを報告している。さらに、Sousa et al. (2017) は、 $95\sim 105\% \dot{V}O_2\max$ の範囲で異なる強度の運動を比較し、強度が高い運動ほど運動開始から30秒間の酸素摂取量が高かったことを報告している。それらの先行研究は、本研究の結果を支持しており、本研究では更に広範囲の運動強度（ $73.4 \pm 7.4 \sim 180.9 \pm 18.2\% \dot{V}O_2\max$ ）で同様の結果が認められた。したがって、運動開始初期（ ~ 30 秒間）の有酸素性エネルギーは、運動強度に依存していることが示唆された。

30秒テストの無酸素性エネルギーについても、有酸素性エネルギーと同様に強度の増加に応じて高い値を示した（表2）。このことについて、無酸素性代謝の指標とし

て考えられてきた血中乳酸濃度 (Jacobs, 1986) も同様の結果を示した。したがって、これらのことは、無酸素性エネルギーも運動強度の影響を受けることを示唆している。

前述した通り、エネルギー供給比率が運動強度間で有意差が認められなかった背景には、運動強度の増加に伴い有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーが両方とも増加したことが挙げられる。しかしながら、本研究で測定した項目だけでは運動強度の増加に伴い有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーが増加した要因を明らかにすることはできない。一方、酸素摂取量が無酸素性代謝や ATP 加水分解の影響を受けることが複数の研究で報告されている。Whipp et al. (1999) は無酸素性エネルギーであるクレアチンリン酸の増減と酸素摂取量の増減が対応関係にあることを報告している。ほかの先行研究も同様の結果を報告している (Barstow et al., 1994; Rossiter et al., 2002)。また、有酸素性エネルギー供給を担うミトコンドリアの活性は、代謝物 (ADP, クレアチンリン酸, 無機リン酸) に応答することが報告されている (Korzeniewski and Zoladz, 2004)。したがって、酸素摂取量の応答は、無酸素性代謝や全体のエネルギー利用に影響を受ける (Korzeniewski and Zoladz, 2004; Rossiter et al., 2002; Sahlin et al., 1988) といえる。加えて、筋温の増加がエネルギー代謝に影響を与えた可能性も考えられる。本研究において筋温の測定は行っていないが、運動強度の増加に伴い筋温が高まったと仮定すると、無酸素性代謝が亢進し (Febbraio et al., 1996)、ヘモグロビンの酸素解離曲線が右にシフトするため (山口・狩野, 1999)、酸素供給が高まり、酸素摂取量は増加すると考えられる。以上のことから、強度が高い運動ほど有酸素性エネルギーや無酸素性エネルギーの供給が高まるといえる。そして、その結果エネルギー供給比率がほぼ一定の値を示したと推察される。

本研究課題では、30 秒テストおよび WAnT の値を用いて 20 秒間および 30 秒間のエネルギー代謝について力学的相対強度ごとに算出した (表 3, 図 6, 図 7)。20 秒間の有酸素性比率は、力学的相対強度による有意な主効果が認められているものの強度間に有意差は認められなかった (表 3)。これらのことは、30 秒テストの結果と同様の結果を示しており、エネルギー供給比率がほぼ一定であることを示唆している。

20 秒間の無酸素性比率は 80%前後であり、30 秒間の値は 73%前後であった。総説によると 20 秒間および 30 秒間全力運動における無酸素性比率はそれぞれ約 82 %と約 73 %であることが示されており (Gastin, 2001), 本研究課題と同様の値を示している。なお、これまで全力を下回る強度での 20 秒間および 30 秒間のエネルギー代謝を明確に示した研究はなく、新しい知見であるといえる。

5. 要約

本研究課題の目的は、30 秒運動を異なる強度で複数試技行わせ、運動強度がエネルギー供給比率に与える影響を明らかにすることであった。得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 30 秒運動においてエネルギー供給比率に対する運動強度の有意な主効果が認められたものの、すべての強度間で有意差が認められなかった。
- (2) エネルギー供給比率を構成する有酸素性エネルギー供給量と無酸素性エネルギー供給量は、運動強度の増加に伴い両エネルギーとも有意に増加した。
- (3) 30 秒間の運動における運動開始から 20 秒間および 30 秒間のエネルギー供給比率を相対強度ごとに算出したところ、いずれも運動強度の有意な主効果が認められたものの、すべての強度間で有意差が認められなかった。

以上の結果より、20 秒および 30 秒運動において運動強度がエネルギー供給比率に与える影響は小さいことが示唆された。その背景として有酸素性エネルギー供給量と無酸素性エネルギー供給量が運動強度の増加に伴い高まることが示された。

第7章 60秒運動における運動強度がエネルギー代謝に与える影響（研究課題 1-2）

1. 目的

前述したように、時間が長い運動ほど有酸素性比率が高くなることが知られている（Duffield and Dawson, 2003; Gastin, 2001; Medbø and Tabata, 1989; Ogita et al., 2003）。一方、短時間運動における運動強度がエネルギー供給比率に与える影響については十分に検討されていない。

そこで、研究課題 1-1 では、30 秒間の自転車運動を異なる強度で複数回行わせ、そのときのエネルギー代謝を検討した。その結果、強度によらずエネルギー供給比率はほぼ一定の値を示した。この結果は、運動強度がエネルギー供給比率に影響を与えると考えられていた定説（Hoffman, 2002; 尾縣, 2007; 宮丸・宮丸, 1978）を一部覆すものであった。一方で、前述した通りエネルギー供給比率は運動時間に強い影響を受けることから、30 秒より更に長い運動時間を用いた場合には結果が異なる可能性がある。特に 60 秒以下の運動は、酸素摂取量が急激に高まる局面であることから（Wilkerson et al., 2004）、エネルギー供給比率がダイナミックに変化する運動時間だと考えられる。しかしながら、研究課題 1-1 と同様に 60 秒間の運動時間を対象に異なる強度でエネルギー供給比率を検討した研究はなく、さらに 60 秒時点でのエネルギー代謝指標を部分的に報告した研究もほとんどなく、先行研究のデータから運動強度ごとに比較することは困難である。

そこで、本研究課題では、60 秒運動を異なる強度で複数試技行わせ、短時間運動における運動強度がエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) 研究対象者

対象者は、陸上競技を専門に行っている男子大学生および大学院生 9 名とした。対象者の選定は、自転車エルゴメータのペダリング運動に慣れていること、スプリン

ト種目を含むことを条件に短距離競技者および十種競技競技者とした。対象者の年齢、身長、体重はそれぞれ 21.7 ± 2.6 歳、 174.6 ± 5.5 cm、 65.6 ± 5.7 kg であった。なお、実験は競技シーズン終了後に行われた。実験を行うにあたり、対象者には本研究課題の目的、運動に伴う苦痛、不快感および危険性を詳細に説明し、いかなる時でも実験の中断ができるという条件の下で参加の同意を得た。なお、これらの手順は、筑波大学研究倫理委員会の承認を得て行われた（承認番号：体 28-96 号）。

(2) 実験手順

実験は、最大下テスト、 $\dot{V}O_2\max$ テスト、5 強度の 60 秒自転車運動テスト（以下、60 秒テスト）、60 秒間の全力自転車運動テスト（以下、60WAnT）を合わせた計 6 セッションとし、セッション間には中 1 日以上の間隔をあげ、対象者ごとに 3 週間以内にすべての実験を終えた。ペダリング技術や体力の向上による影響を最小化するため、最大下テストおよび 60WAnT を除く 5 セッションは、ランダム化された（表 4）。なお、対象者には実験までの 24 時間は激しい運動を控えるよう指示した。また、実験前日から当日のアルコール摂取および当日のカフェイン摂取を控えるよう指示した。食事は、実験開始 2 時間前に終わるよう指示し、代謝の日内変動を考慮して対象者ごとに実験開始の時間を固定した（変動は ± 30 分以内）。実験環境は、室温 24~26 度、湿度 60 %以下になるよう調節した。実験中の水分補給に関して、対象者には実験室来室の際に市販の飲料水を渡し、可能な限りいつでも水分補給ができるよう配慮した。なお、呼気ガス分析用のマスクを装着している間の水分補給は不可能であるが、休息中はマスク再着用の時間的余裕がある場合に対象者の要望に応じマスクを一時的に外し、水分補給を行わせた。

(3) 最大下テストと $\dot{V}O_2\max$ テスト

最大下テストと $\dot{V}O_2\max$ テストの測定方法は、「共通する測定方法」に準じて行われた。最大下テストは初回の実験で行われ、 $\dot{V}O_2\max$ テストは、60 秒テストの 55%試

技終了 20 分後に行われた。

(4) 60 秒テスト

60 秒の自転車運動を異なる強度で 5 試技行わせた。図 8 に実験プロトコルを示した。ウォーミングアップは負荷 1.0 kp, ペダル回転数 90 rpm の設定で 10 分間行わせ、20 分の休息中に呼気ガス分析用のマスクを装着し、60 秒テストを行わせた。60 秒テストは、Minahan et al. (2007) を参考にローリングスタートで行われた。すなわち、対象者には負荷がかかる 10 秒前からゆっくりとペダリングを開始し、負荷がかかる時点で 100 rpm 前後になるよう指示した。また、負荷開始直後から 5 秒以内に目標ペダル回転数まで調整し、それを維持するよう指示した。なお、1 回目の実験開始前までにローリングスタートの練習を行わせ、安定して試技が行えるよう準備させた。

運動強度は 60WAnT の平均パワーをもとにした力学的相対強度によって決定した (55%, 65%, 75%, 85%, 95%)。すなわち、60WAnT の平均パワーを 100% とし、目標とする発揮パワーを試技ごとに算出した。その目標とする発揮パワーでペダリングさせるため、式 1 (「共通する測定方法」参照) を用いて負荷と目標回転数を算出した。運動強度について、研究課題 1-1 では酸素需要量を基準に設定したが、本研究課題では力学的相対強度を用いて設定した。その理由としては、30 秒間と比較して 60 秒間の運動では酸素需要量で規定した場合に相対強度の個人差が大きくなり試技数が多くなってしまふことを事前に確認したためである。また、研究課題 1-1 では、力学的相対強度で算出し比較した場合に統計分析の結果に大きな相違がなかったため、本研究課題では力学的相対強度によって運動強度を設定した。なお、試技の達成率を対象試技の力学的相対強度から変動 5 %未満で評価した。この範囲を超えた試技は、実験予備日にて再度行うこととした。

(5) 60-s Wingate Anaerobic Test

力学的相対強度の指標および 60 秒全力運動の試技として 60WAnT を行わせた。

対象者は、最大下テストの20分後に行った。負荷は体重の7.5%kpとし、60秒テストと同様にローリングスタートを用いて行わせた。また、負荷開始直後から運動終了まで全力でペダリングするよう指示した。

(6) 分析項目

最大下テストにおける発揮パワーと酸素需要量、それらの直線回帰式は、「共通する測定方法」に準じて分析、算出した。 $\dot{V}O_{2max}$ テストにおける $\dot{V}O_{2max}$ と最大心拍数についても同様に「共通する測定方法」に準じて分析、算出した。

60秒テストおよび60WAnTにおける平均パワーは60秒間の平均値で算出し、体重で規格化した。また、60WAnTにおける最高パワーは60秒間のうち1秒間ごとの最も高い値とし、体重で規格化した。それら運動中の心拍数、酸素摂取量、酸素借、血中乳酸濃度は、前述した「共通する測定方法」に準じて分析、算出した。運動中の平均心拍数、酸素摂取量、酸素借は、60秒間の平均値を算出した。算出した酸素摂取量を有酸素性エネルギー (ml/kg)、酸素借を無酸素性エネルギー (ml/kg)、そのエネルギー供給比率を有酸素性比率と無酸素性比率として算出した。血中乳酸濃度は、運動前と運動後1, 3, 6分に測定し、最高値を最高血中乳酸濃度とした。運動強度の指標として、力学的相対強度と生理的相対強度 ($\% \dot{V}O_{2max}$) を算出した。力学的相対強度は、60WAnTにおける平均パワーを基準とする相対値とし、生理的相対強度は、算出した酸素需要量と $\dot{V}O_{2max}$ の値を用いて算出した（「共通する測定方法」参照）。

60秒テスト中の酸素摂取動態として、5秒ごとに分析された酸素摂取量を10秒ごとに平均化して算出した。

40, 50, 60秒間での60, 70, 80, 90, 100%力学的相対強度水準における有酸素性エネルギー、無酸素性エネルギー、有酸素性比率、無酸素性比率を60秒テストと60WAnTの値を用いて、算出した。それらの算出方法に関して、有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーについては、各強度水準をはさむ強度の2試技の値を用いて直線回帰式によって算出し、それらの割合を有酸素性比率および無酸素性比率として算

出した。100%水準のみ、60WAnT の値を直接用いた。なお、40、50 秒間の値は、60 秒テストおよび60WAnT における運動開始から40 秒間および50 秒間の平均パワー、酸素需要量、酸素摂取量、酸素借を算出し、60 秒間の各強度水準と同様に算出した。

(7) 統計処理

値は平均値±標準偏差で示した。60 秒テストにおける強度間（5 水準，組み合わせ数 10）の分析と力学的相対強度間（5 水準，組み合わせ数 10）の分析には，一元配置分散分析を用い，有意な主効果が認められた項目には多重比較検定（Holm による調整）を行った。また，60 秒テストにおける酸素摂取動態（10 秒ごとの酸素摂取量）の分析には，二元配置分散分析（運動時間×運動強度）を用い，有意な交互作用もしくは主効果が認められた項目には，多重比較検定（Holm 法による調整）を行った。すべての有意水準は，危険率 $p < 0.05$ で判定した。

表4 実験スケジュール

| Day 1 (プレテスト) | ランダム順 | | | | |
|------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Day 2 | Day 3 | Day 4 | Day 5 | Day 6 |
| 最大下テスト 60WAnT | 60-sT 55% | 60-sT 65% | 60-sT 75% | 60-sT 85% | 60-sT 95% |
| | VO ₂ maxテスト | | | | |

3週間以内に遂行され、それぞれ1日以上以上の休息が挟まれた。

60-sT: 60秒テスト (55~95%力学的相対強度)

60WAnT: 60秒間の Wingate Anaerobic Test (全力自転車運動)

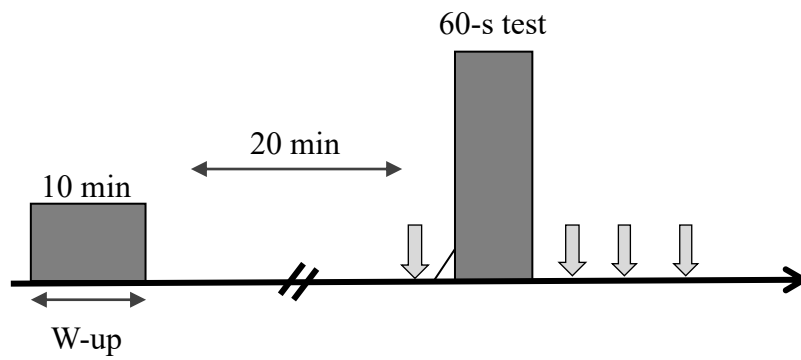


図8 60秒テストの実験プロトコル

△：ローリングスタート

↓：血中乳酸濃度測定

3. 結果

対象者の身体特性として、 $\dot{V}O_2\max$ と最大心拍数はそれぞれ 57.0 ± 4.2 ml/kg/min と 188.9 ± 7.5 bpm であった。60WAnT の平均パワー、最高パワー、最高血中乳酸濃度はそれぞれ 12.6 ± 1.0 W/kg, 8.2 ± 0.3 W/kg, 12.1 ± 1.1 mM であった。最大下テストによって得られた発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式の決定係数は、 0.997 ± 0.001 であった。

表 5 に 60 秒テストの結果を示した。有酸素性比率に対する力学的相対強度は、有意な主効果が認められ ($F = 21.2, p < 0.01$)、力学的相対強度が高いほど有意に低い値を示した ($55\% > 75\sim 95\%, 65\% > 85\sim 95\%, 75\% > 95\%; p < 0.01\sim 0.05$)。有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーに対する力学的相対強度は、いずれも有意な主効果が認められ ($F = 107.3, p < 0.01; F = 457.8, p < 0.01$)、力学的相対強度が高いほど有意に高い値を示した (いずれも $55\% < 65\% < 75\% < 85\% < 95\%$, いずれもすべて $p < 0.01$)。

図 9 に 60 秒テストにおける各試技中の酸素摂取動態 (10 秒ごとの酸素摂取量) を示した。二元配置分散分析の結果、有意な交互作用が認められた ($F = 3.1, p < 0.01$)。多重比較検定の結果、10 秒時点では、85% と 95% が有意に高い値を示した ($55\sim 65\% < 95\%, 55\% < 85\%$, いずれもすべて $p < 0.01$)。20 秒時点では、95% が 55% と比較して有意に高い値を示した ($55\% < 95\%, p < 0.05$)。30 秒時点では、95% が最も高い値を示した ($55\sim 75\% < 85\% < 95\%$, いずれもすべて $p < 0.01$)。40 秒時点では、85% と 95% が有意に高い値を示した ($55\% < 75\% < 85\sim 95\%, 65\% < 85\sim 95\%, p < 0.01\sim 0.05$)。50 秒時点では、75% と 85% と 95% が有意に高い値を示した ($55\% < 75\sim 95\%, 65\% < 95\%, p < 0.01\sim 0.05$)。60 秒時点では、75% と 85% と 95% が有意に高い値を示した ($55\% < 65\sim 95\%, 65\% < 85\%, p < 0.01\sim 0.05$)。運動時間は、それぞれの強度 (55%~95%) に対し有意な単純主効果が認められた ($F = 264.7, p < 0.01; F = 94.7, p < 0.01; F = 164.0, p < 0.01; F = 86.2, p < 0.01; F = 87.2, p < 0.01$)。多重比較検定の結果、55% 試技では、50 秒と 60 秒時点での値が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($10s < 20s < 30s < 40s < 50s\sim 60s, p < 0.01\sim 0.05$)。65% 試技では、60 秒時点での値が最も高い値を示し

た ($10s < 20s < 30s < 40s < 60s$, $30s < 50s$, $p < 0.01\sim 0.05$)。75%試技では、50秒と60秒時点での値が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($10s < 20s < 30s < 40s < 50s\sim 60s$, $p < 0.01\sim 0.05$)。85%試技では、40秒と50秒と60秒時点での値が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($10s < 20s < 30s < 40s\sim 60s$, すべて $p < 0.01$)。95%試技では、40秒と50秒と60秒時点での値が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($10s < 20s < 30s < 40s\sim 60s$, すべて $p < 0.01$)。

表6, 図10, 図11に40秒間, 50秒間, 60秒間における各力学的相対強度の結果を示した。40秒間の値に関して, 有酸素性比率(無酸素性比率)に対する力学的相対強度は, 有意な主効果が認められなかった ($F=3.9$, $p=0.06$)。有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーに対する力学的相対強度は, いずれも有意な主効果が認められ ($F=82.9$, $p < 0.01$; $F=399.4$, $p < 0.01$), 力学的相対強度が高いほど有意に高い値を示した (いずれも $60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, すべて $p < 0.01$)。50秒間の値に関して, 有酸素性比率(無酸素性比率)に対する力学的相対強度は, 有意な主効果が認められ ($F=10.9$, $p < 0.01$), 60%と比較して80~100%での有酸素性比率が有意に低い値を示した ($60\% > 80\sim 100\%$; $p < 0.05$)。また, 有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーに対する力学的相対強度は, いずれも有意な主効果が認められ ($F=74.6$, $p < 0.01$; $F=410.4$, $p < 0.01$), 力学的相対強度が高いほど有意に高い値を示した ($60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, $p < 0.01\sim 0.05$) ($60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, すべて $p < 0.01$)。60秒間の値に関して, 有酸素性比率(無酸素性比率)に対する力学的相対強度は, 有意な主効果が認められ ($F=24.4$, $p < 0.01$), 強度が高いほど有酸素性比率が有意に低い値を示した ($60\% > 70\% > 80\% > 90\%$, $60\sim 70\% > 100\%$; $p < 0.01\sim 0.05$) (図10)。また, 有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーに対する力学的相対強度は, いずれも有意な主効果が認められ ($F=98.9$, $p < 0.01$; $F=521.2$, $p < 0.01$), 力学的相対強度が高いほど有意に高い値を示した ($60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, $p < 0.01\sim 0.05$) ($60\% < 70\% < 80\% < 90\% < 100\%$, すべて $p < 0.01$) (図11)。

表5 60秒テストの結果

| | 力学的相対強度 (%) | | | | | F値 | 多重比較 |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------|---------------------------------|
| | 55 | 65 | 75 | 85 | 95 | | |
| 酸素需要量 (ml/kg/min) | 56.6 ± 2.8 | 65.4 ± 3.2 | 74.5 ± 3.3 | 84.4 ± 4.0 | 92.8 ± 4.4 | 2161.1** | 55<65<75 <85<95 |
| 力学的相対強度 (%) | 55.4 ± 0.9 | 65.1 ± 1.3 | 75.0 ± 0.6 | 85.7 ± 1.4 | 94.8 ± 0.9 | 4569.3** | 55<65<75 <85<95 |
| 生理的相対強度 (% $\dot{V}O_2$ max) | 99.5 ± 6.9 | 115.2 ± 8.6 | 131.2 ± 8.9 | 148.5 ± 11.2 | 163.3 ± 11.3 | 1220.9** | 55<65<75 <85<95 |
| 平均パワー (W/kg) | 4.6 ± 0.2 | 5.3 ± 0.3 | 6.2 ± 0.3 | 7.0 ± 0.3 | 7.8 ± 0.3 | 3301.9** | 55<65<75 <85<95 |
| 平均回転数 (rev/min) | 79.2 ± 4.7 | 86.4 ± 5.6 | 93.8 ± 6.3 | 101.8 ± 7.4 | 108.5 ± 7.3 | 645.6** | 55<65<75 <85<95 |
| 平均心拍数 (beats/min) | 127.2 ± 4.3 | 129.0 ± 7.3 | 133.5 ± 8.7 | 140.9 ± 8.1 | 150.4 ± 8.2 | 29.4** | 55<65<75 <85<95 |
| 最高血中乳酸濃度 (mM) | 4.3 ± 0.6 | 5.7 ± 0.4 | 7.2 ± 0.8 | 8.6 ± 0.6 | 10.1 ± 0.7 | 296.9** | 55<65<75 <85<95 |
| 有酸素性エネルギー (ml/kg) | 25.4 ± 1.4 | 28.5 ± 2.7 | 30.6 ± 1.9 | 33.5 ± 2.3 | 35.7 ± 2.6 | 107.3** | 55<65<75 <85<95 |
| 無酸素性エネルギー (ml/kg) | 31.2 ± 2.7 | 37.0 ± 2.8 | 44.0 ± 2.6 | 50.9 ± 3.3 | 57.1 ± 4.1 | 457.8** | 55<65<75 <85<95 |
| 有酸素性比率 (%) | 44.9 ± 2.7 | 43.5 ± 3.5 | 41.0 ± 2.1 | 39.7 ± 2.3 | 38.5 ± 2.6 | 21.2** | 55>75-95, 65>85-95, 75>95 |
| 無酸素性比率 (%) | 55.1 ± 2.7 | 56.5 ± 3.5 | 59.0 ± 2.1 | 60.3 ± 2.3 | 61.5 ± 2.6 | 21.2** | 55<75-95, 65<85-95, 75<95 |

平均値 ± 標準偏差

** : p < 0.01

< (>) : p < 0.05

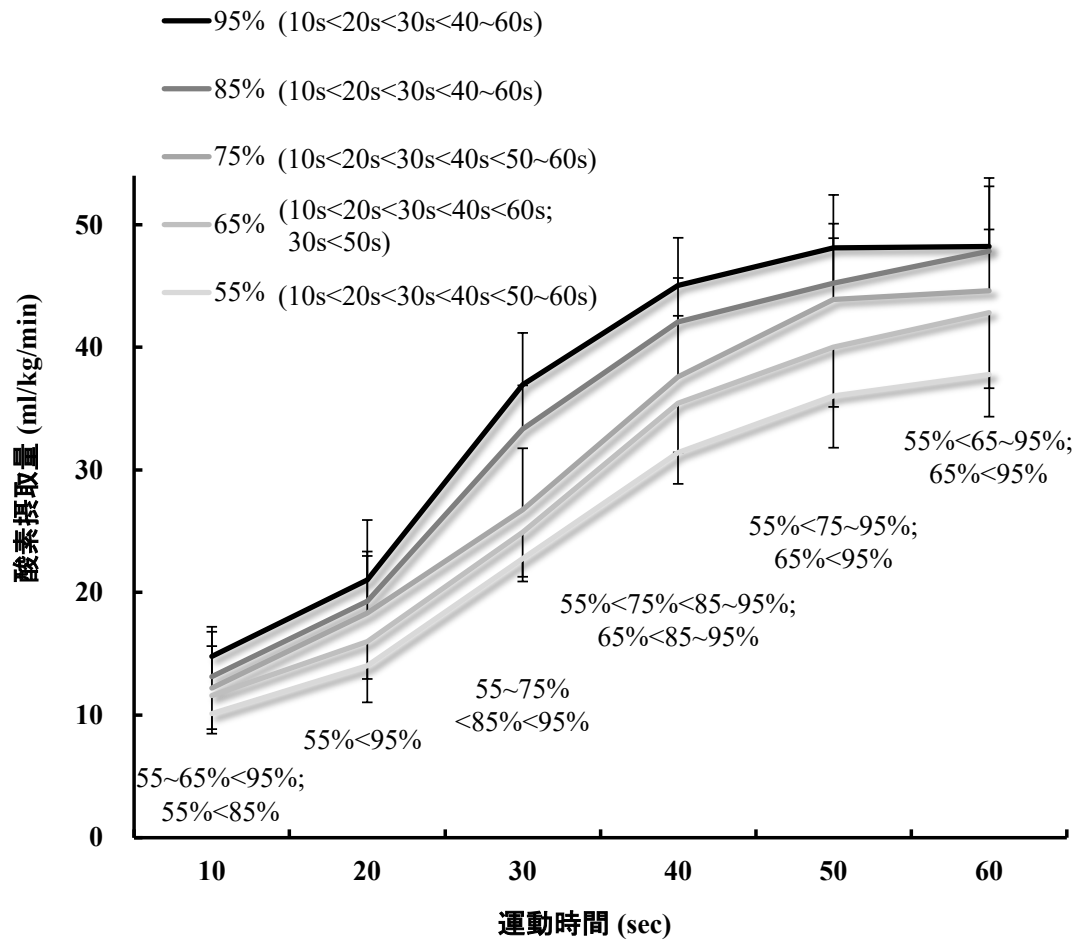


図9 60秒テスト各試技中の酸素摂取動態（10秒ごとの酸素摂取量）

交互作用：F = 3.1 (p < 0.01)

標準偏差範囲は、55~65%試技は負方向、75~95%試技は正方向で記載

表6 力学的相対強度ごとの40, 50, 60秒間のエネルギー代謝

| | | 力学的相対強度 (%) | | | | | F値 | 多重比較 |
|----------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------------------|
| | | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | | |
| 有酸素性エネルギー (ml/kg) | 40秒 | 15.2 ± 1.5 | 17.1 ± 1.4 | 19.2 ± 1.4 | 20.9 ± 1.5 | 22.5 ± 2.1 | 82.9** | 60<70<80< 90<100 |
| | 50秒 | 21.2 ± 2.0 | 23.2 ± 1.9 | 25.6 ± 1.8 | 27.9 ± 2.0 | 30.0 ± 2.7 | 74.6** | 60<70<80< 90<100 |
| | 60秒 | 26.8 ± 2.0 | 29.5 ± 2.3 | 32.0 ± 2.0 | 34.6 ± 2.4 | 37.7 ± 3.6 | 98.9** | 60<70<80< 90<100 |
| 無酸素性エネルギー (ml/kg) | 40秒 | 31.3 ± 1.8 | 36.6 ± 2.3 | 41.5 ± 2.8 | 47.0 ± 3.4 | 52.5 ± 4.2 | 399.4** | 60<70<80< 90<100 |
| | 50秒 | 33.0 ± 1.9 | 39.2 ± 2.5 | 45.0 ± 2.8 | 51.0 ± 3.6 | 57.2 ± 4.0 | 410.4** | 60<70<80< 90<100 |
| | 60秒 | 33.9 ± 2.3 | 40.5 ± 2.4 | 47.2 ± 2.6 | 53.7 ± 3.0 | 59.9 ± 4.2 | 521.2** | 60<70<80< 90<100 |
| 有酸素性比率 (%) | 40秒 | 32.7 ± 2.6 | 31.8 ± 2.3 | 31.7 ± 2.1 | 30.8 ± 2.4 | 30.1 ± 3.1 | 3.9 (n. s.) | |
| | 50秒 | 39.1 ± 2.6 | 37.2 ± 2.5 | 36.3 ± 2.1 | 35.4 ± 2.4 | 34.4 ± 2.9 | 10.9** | 60>80~100 |
| | 60秒 | 44.2 ± 2.5 | 42.1 ± 2.4 | 40.4 ± 1.8 | 39.2 ± 2.1 | 38.6 ± 3.3 | 24.4** | 60>70~100, 70>80~100, 80>90 |
| 無酸素性比率 (%) | 40秒 | 67.3 ± 2.6 | 68.2 ± 2.3 | 68.3 ± 2.1 | 69.2 ± 2.4 | 69.9 ± 3.1 | 3.9 (n. s.) | |
| | 50秒 | 60.9 ± 2.6 | 62.8 ± 2.5 | 63.7 ± 2.1 | 64.6 ± 2.4 | 65.6 ± 2.9 | 10.9** | 60<80~100 |
| | 60秒 | 55.8 ± 2.5 | 57.9 ± 2.4 | 59.6 ± 1.8 | 60.8 ± 2.1 | 61.4 ± 3.3 | 24.4** | 60<70~100, 70<80~100, 80<90 |

平均値 ± 標準偏差

*: p<0.05, **: p < 0.01

< (>): p < 0.05

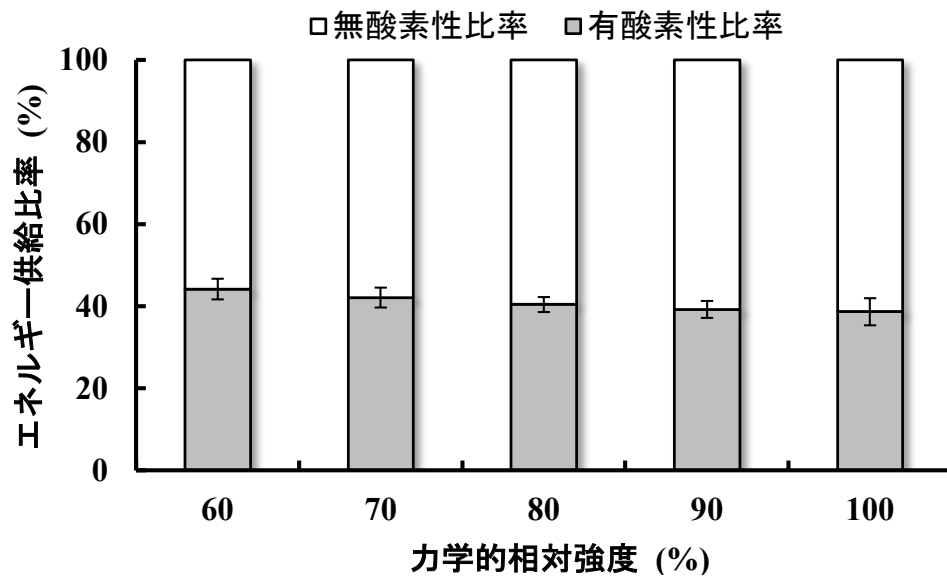


図 10 力学的相対強度ごとの 60 秒間のエネルギー供給比率

$F = 24.4$ ($p < 0.01$), $60 < (>) 70 < (>) 80 < (>) 90$, $60 \sim 70 < (>) 100$

< (>): $p < 0.01 \sim 0.05$

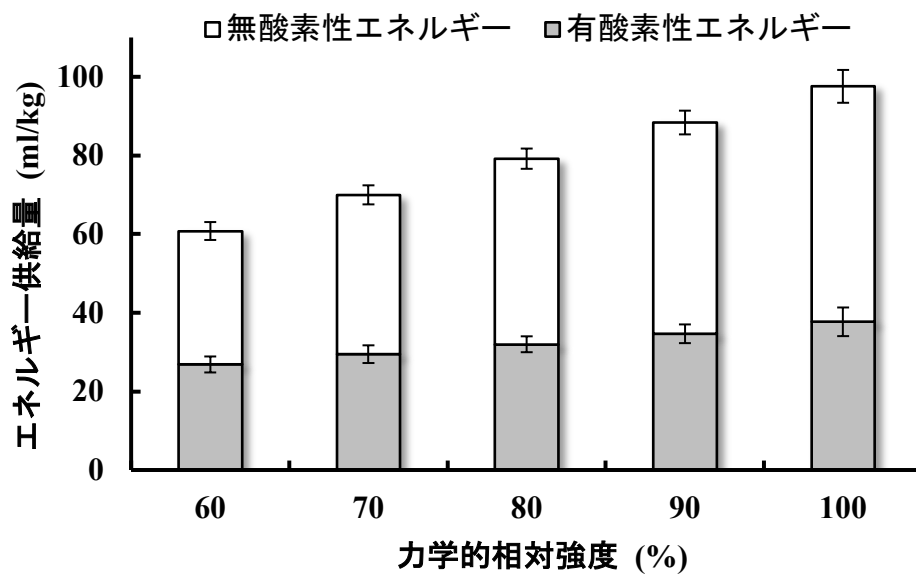


図 11 力学的相対強度ごとの 60 秒間の各エネルギー供給量
 有酸素性エネルギー : $F = 98.9$ ($p < 0.01$), $60 < 70 < 80 < 90 < 100$
 無酸素性エネルギー : $F = 521.2$ ($p < 0.01$), $60 < 70 < 80 < 90 < 100$
 <: $p < 0.01$

4. 考察

本研究課題の目的は、60秒運動における運動強度がエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることであった。そして、60秒テストにおいて力学的相対強度が高いほど、無酸素性比率が有意に高い値を示した。このことから、60秒間の運動において運動強度がエネルギー供給比率に影響を与えることが示唆された。その要因は、運動強度の増加に伴い有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーはどちらも有意に増加したものの、特に無酸素性エネルギーの増加が大きかったためと推察される。

エネルギー供給比率に関して、本研究課題における60秒運動では運動強度が高いほど、無酸素性比率が有意に高い値を示した(表5)。先行研究との比較はできないが、研究課題1-1の30秒運動において運動開始から20秒間および30秒間のエネルギー供給比率を測定したところ、異なる運動強度であっても強度間に有意差は認められずほぼ一定の値を示した(表3, 図6)。そして、本研究課題では、60秒運動における運動開始から40秒間および50秒間のエネルギー供給比率についても算出した(表6)。その結果、40秒間では有酸素性比率に対して運動強度は有意な主効果が認められなかったものの、50秒間においては、有意な主効果が認められ、一部の強度間に有意差も認められている(表6)。なお、運動時間に関しては、前述した通り長い運動ほど有酸素性比率が高値を示す(Gastin, 2001)。これらのことを鑑みると、運動強度と運動時間がエネルギー供給比率に影響を与えるものの、40秒以下の短時間運動では運動強度による影響は小さいといえる。

エネルギー供給比率は、有酸素性エネルギー(酸素摂取量)と無酸素性エネルギー(酸素借)の割合で算出される。研究課題1-1の30秒運動においては、運動強度の増加に伴い両方のエネルギー供給が高まり、エネルギー供給比率は一定の値を示した(表2, 図6, 図7)。本研究課題の60秒テストにおいても運動強度の増加に伴い両方のエネルギー供給が高まったが、エネルギー供給比率は一定の値を示さず、無酸素性比率の増加が認められた(表5)。これらのことから、30秒運動と60秒運動では運動強度の増加に対する有酸素性エネルギーの増加率が異なるといえる。このような

差異が生じた要因として、酸素摂取動態の特性による影響が挙げられる。運動中の酸素摂取量は運動開始から対数関数的に増加することが知られており (Poole and Jones, 2012), 運動開始直後の酸素摂取量は急激に高まるが、その後緩やかに増加し、定常状態に達するか少しずつ増加し続ける (Poole and Jones, 2012)。本研究における酸素摂取動態は、先行研究と比較して運動強度と運動時間が大きく異なるものの同様の様相を呈した。実際に、60秒テスト中における10秒ごとの酸素摂取量は、すべての試技で運動開始から40秒まで有意に増加していき、50秒と60秒時点との間には有意差が認められなかった(図9)。先行研究によると、最大下強度 ($< 100\% \dot{V}O_{2max}$) の運動では運動開始から2~3分程度で定常状態に達するが (Jones and Burnley, 2009; Poole and Jones, 2012), 超最大強度 ($\geq 100\% \dot{V}O_{2max}$) の運動ではそれよりも早期に定常状態に近い値まで達することが示されており (Sousa et al., 2017), 本研究の結果を支持している。Sousa et al. (2017) は、 $105\% \dot{V}O_{2max}$ の一定負荷水泳運動を行わせ、運動開始30秒時点での酸素摂取量が $82.6 \pm 9.4\% \dot{V}O_{2max}$ であり、60秒時点では $94.7 \pm 5.5\% \dot{V}O_{2max}$ まで高まったことを報告している。このことは、30秒時点までに急激に酸素摂取量が高まり、60秒時点では酸素摂取量が最高値近くまで達したことを示している。同様に、60秒全力自転車運動中の酸素摂取量を分析した研究では (Wittekind and Beneke, 2011), 運動開始から約40秒までで急激に高まり、そこから定常かやや低下したことを示している。全力強度以外の超最大強度運動での酸素摂取動態や運動開始後60秒までの値を示した研究がほぼないが、本研究課題の結果を含めて考えると超最大強度の運動において酸素摂取量は運動開始約40秒時点までは急激に高まり、それ以降は定常に達するか、わずかに増加するものと考えられる。そのため、研究課題1-1の30秒運動や60秒テストにおける40秒間までは、酸素摂取量の急激な増加局面に当たるため酸素摂取量が強度依存 (Korzeniewski and Zoladz, 2004; Rossiter et al., 2002; Sahlin et al., 1988) で急激に高まり、エネルギー供給比率がほぼ一定の値を示したと推察される。一方、酸素摂取量が定常近くまで達する60秒テストでは、40~60秒での酸素摂取量の増加が小さく(図9)、強度が高いほど酸素借

(無酸素性エネルギー)の占める量が大きくなる。したがって、60秒テストでは、酸素摂取動態の特性により運動強度が高いほど無酸素性比率が高くなったと推察される。

運動中の酸素摂取量がそのような動態を示す機序については、様々な研究がなされている。運動初期の酸素摂取量の増加に関しては、研究課題 1-1 で記述した通り無酸素性代謝や ATP の加水分解による生成物が酸素摂取量の調整をしていることが知られている (Korzeniewski and Zoladz, 2004; Rossiter et al., 2002; Sahlin et al., 1988)。一方、その後の局面では、対象者の有酸素性能力が酸素摂取量に影響を与えること (de Aguiar et al., 2015; Pringle et al., 2003)、また、酸化系酵素活性が既に十分高まっていることが知られている (Parolin et al., 1999; 澁谷・大柿, 2001)。これらのことから運動初期の急激に酸素摂取量が増加する局面とそれ以降では、酸素摂取量の増加に関する機序が異なるといえる。したがって、酸素摂取量増加に関わる要因の相違によって酸素摂取動態が対数関数的増加の様相を呈したと推察される。

本研究課題では、60秒テストおよび60WAnTの値を用いて40秒間、50秒間、60秒間のエネルギー代謝を力学的相対強度ごとに算出した(表6, 図10, 図11)。前述した通り、40秒間の無酸素性比率は力学的相対強度による有意な主効果は認められずエネルギー供給比率がほぼ一定の値を示し、その一方で50秒間および60秒間では、運動強度が高いほど無酸素性比率が高まった(表6, 図10)。100%力学的相対強度における60秒間の無酸素性比率は $61.4 \pm 3.3\%$ であった。総説によると60秒間全力運動における無酸素性比率は約55%(95%信頼区間で10%の誤差)であることが示されており (Gastin, 2001)、本研究課題の値は比較的高値を示した。これには対象者の身体特性が関わっていると考えられる。すなわち、スプリンターは無酸素性比率が比較的高値を示すことが報告されている (Calbet et al., 2003; Granier et al., 1995)。一方、研究課題 1-1 の20秒間および30秒間のエネルギー供給比率は先行研究 (Gastin, 2001)と同様の値であった。これらとの相違については、酸素摂取動態について前述した通り急激に酸素摂取量が増加する後の局面では、特に対象者の有酸素性能力が酸

素摂取量に影響を与えるため (de Aguiar et al., 2015; Pringle et al., 2003) であると考えられる。すなわち、50 秒間や 60 秒間の運動時間では、それより短い運動時間と比較して身体特性がより影響したものと推察される。なお、これまで全力を下回る強度での 40 秒間、50 秒間、60 秒間のエネルギー代謝を明確に示した研究はなく、新しい知見であるといえる。

5. 要約

本研究課題の目的は、60 秒運動を異なる強度で複数試技行わせ、運動強度がエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることであった。得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 60 秒運動においてエネルギー供給比率に対する運動強度の有意な主効果が認められ、運動強度が高いほど無酸素性比率は有意に高い値を示した。
- (2) エネルギー供給比率を構成する有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーは、運動強度の増加に伴い両エネルギーとも有意に増加した。また、10 秒間ごとの酸素摂取量を分析したところ、すべての試技で運動開始から 40 秒まで有意に増加したものの、40-50 秒間と 50-60 秒間との間には有意差が認められなかった。
- (3) 60 秒運動における運動開始から 40、50、60 秒間のエネルギー供給比率を相対強度ごとに算出したところ、40 秒間において運動強度の主効果が認められず、強度間の有意差も認められなかった。一方、50、60 秒間においては運動強度の有意な主効果が認められ、運動強度が高いほど無酸素性比率が有意に高い値を示した。

以上の結果より、40 秒間の運動では運動強度がエネルギー供給比率に与える影響は小さく、50 秒間と 60 秒間の運動では運動強度が高いほど無酸素性比率が高まることが示唆された。その背景として、運動中の酸素摂取量が 40 秒以降ほぼ一定の値を示し、運動強度の増加に伴い特に無酸素性エネルギーの増加が大きいことが示された。

第 8 章 連続する短時間全力運動における休息時間の相違がエネルギー代謝に与える影響（研究課題 2-1）

1. 目的

近年、高強度インターバルトレーニング（単一の運動が最大乳酸定常強度を超える間欠的高強度運動（Buchheit and Laursen, 2013a）、通称 HIIT や HIT）が再注目され、様々なスポーツの競技者がトレーニングに取り入れている（田畑, 2015）。その中でも特に短時間運動を用いたレペティショントレーニングは、スプリント能力（短時間パワー発揮能力）や無酸素性能力を高める目的で（高松, 2019）、陸上競技短距離競技者、スピードスケート競技者、テニス選手などに用いられている（遠藤, 2009；山崎, 2009；結城, 2009）。書籍によると、レペティショントレーニングは、全力もしくは全力に近い強度での運動を長い休息時間で複数回行うものとして紹介されており（Hoffman, 2002；遠藤, 2009；高松, 2019；森井, 2003；山崎, 2009）、競技種目や目的によりその構成は異なる。特に短時間運動を用いたものはレペティションスプリントと呼ばれる（Hoffman, 2002）。テニス選手では、無酸素性パワーの改善を目的に 10~30 秒の運動が 3 分以内の休息時間で行われることもあれば（高松, 2019）、無酸素性持久力の改善を目的に 30~120 秒の運動が 3~10 分の休息時間で行われることもある（遠藤, 2009）。陸上競技 400m 走競技者に対しては、試合的負荷を想定してパフォーマンスが十分に回復する休息時間（15~30 分）で 250~450m 走（約 30~60 秒）などが行われている（山元, 2019）。しかしながら、運動時間と休息時間との組み合わせは無数に存在し、その組み合わせによって生理的負荷が異なりトレーニング効果に相違が生じることが指摘されている（Buchheit and Laursen, 2013a）。レペティションスプリントの有効性を示唆した研究はあるものの（MacInnis and Gibala, 2017）、運動中のエネルギー代謝は十分に検討されていない。

Bogdanis et al. (1996) は、30 秒全力自転車運動 2 回を 4 分の休息時間で行わせ、2 回目の運動では有酸素性エネルギー供給量が増加し、無酸素性エネルギー供給量は

顕著に減少したことで、無酸素性比率が $71 \pm 2\%$ から $56 \pm 2\%$ まで低下したことを報告している。このことは、休息をはさんだ 2 回目の運動では 1 回目と比較して無酸素性代謝の貢献が小さくなることを示唆している。しかしながら、先行研究で用いられている運動プロトコルは、実際にスポーツ現場で用いられるレペティションスプリントと比較して休息時間が短く、より長い休息時間でも検討する必要がある。すなわち、より長い休息時間を設定することで短い場合と比較して無酸素性エネルギー供給量やその貢献が高まる可能性がある。実際に、エネルギー代謝に関わる筋 pH やクレアチンリン酸が 30 秒全力運動後 1.5 分と比較して 6 分では回復途中にあるものの、安静時の値まで回復していないことが示されている (Bogdanis et al., 1995)。そのため、より長い休息時間を用いることで 2 回目の運動におけるエネルギー代謝に相違が生じる可能性がある。

また、レペティションスプリントにおけるパフォーマンスの回復については、ほとんど検討されていない。Bogdanis et al. (1995) は、30 秒全力運動 2 回を異なる休息時間 (1.5, 3, 6 分) で 3 試技行わせ、発揮パワー回復率を検討している。そして、休息時間 6 分の試技であっても、2 回目の 30 秒間平均パワーが 1 回目と比較して有意に低い値であったことを報告している。しかしながら、レペティションスプリントにおいてこれよりも長い休息時間で検討した研究はなく、その際のエネルギー代謝との関連は当然ながら不明である。スポーツ現場において休息時間を設定する際、パフォーマンスの回復およびそれに伴うエネルギー代謝の変動に関する知見は重要な判断材料になり得る。したがって、レペティショントレーニングにおける休息時間の相違がパフォーマンスおよびエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることは、合目的なトレーニングの立案や処方にも有用であると考えられる。

そこで、本研究課題の目的はスプリント種目を専門とする競技者を対象に、レペティションスプリントとして 30 秒全力運動 2 回を異なる休息時間で行わせ、休息時間の相違が 2 回目の運動におけるパフォーマンスおよびエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることとした。

2. 方法

(1) 研究対象者

対象者は、陸上競技を専門に行っている男子大学生および大学院生 9 名とした。対象者の選定は、自転車エルゴメータのペダリング運動に慣れていること、スプリント種目を含むことを条件に短距離競技者および十種競技競技者とした。対象者の年齢、身長、体重はそれぞれ 22.3 ± 2.2 歳、 178.9 ± 4.5 cm、 72.3 ± 7.1 kg であった。なお、実験は競技シーズン終了後に行われた。実験を行うにあたり、対象者には本研究課題の目的、運動に伴う苦痛、不快感および危険性を詳細に説明し、いかなる時でも実験の中断ができるという条件の下で参加の同意を得た。なお、本研究課題は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号：体 29-99 号）。

(2) 実験手順

連続する短時間全力運動として 30 秒の全力自転車運動 2 回（以下、30 秒連続テスト）を異なる休息時間で 4 試技行わせた。プレテストとして最大下テスト、 $\dot{V}O_2\max$ テストを行わせた。

実験は、プレテストと 30 秒連続テストの 4 試技の計 5 セッションとし、セッション間には中 1 日以上の間隔をあげ、対象者ごとに 3 週間以内にすべての実験を終えた。なお、ペダリング技術や体力の向上による影響などを最小化するため 30 秒連続テスト 4 試技の試技順は、対象者ごとにランダム化された。また、事前練習として実験開始から 1 週間前の間に 40 秒の全力自転車運動（負荷：体重 $\times 7.5\%$ kp）を 1 回行わせた。その内容に関して、時間的拘束を短くするため単発回数にし、その中でも負荷を高めるため運動時間を 30 秒より長い 40 秒に選定した。なお、対象者には各試技までの 24 時間は激しい運動を控えるよう指示した。また、各試技前日から当日のアルコール摂取および当日のカフェイン摂取を控えるよう指示した。食事は、試技開始 2 時間前に終わるよう指示し、代謝の日内変動を考慮して対象者ごとに試技開始の時間を固定した（変動は ± 30 分以内）。実験環境は、室温 24~26 度、湿度 60%以下にな

るよう調節した。実験中の水分補給に関して、対象者には実験室来室の際に市販の飲料水を渡し、可能な限りいつでも水分補給ができるよう配慮した。なお、呼気ガス分析用のマスクを装着している間の水分補給は不可能であるが、休息中はマスク再着用の時間的余裕がある場合に対象者の要望に応じマスクを一時的に外し、水分補給を行わせた。

(3) プレテスト

実験の初回に最大下テストと $\dot{V}O_2\max$ テストを行わせた。それらの測定方法は「共通する測定方法」に準じて行われ、テスト間の休息は 20 分とした。

(4) 30 秒連続テスト

ウォーミングアップは負荷 1.0 kp、ペダル回転数 90 rpm の設定で 10 分間行わせ、30 秒の休息後、体重の 7.5 %kp の負荷で 6 秒間の全力運動を行わせた。ウォーミングアップ後、20 分の休息中に呼気ガス分析用のマスクを装着し、30 秒連続テストを行わせた (図 12)。

30 秒連続テストは、30 秒間の全力運動 2 回を異なる休息時間で 4 試技行わせた。負荷は体重の 7.5 %kp とし、休息時間は 4, 10, 15, 20 分の 4 種類とした (以下、4~20 分試技)。なお、30 秒連続テストにおける各試技の 1 回目 (1st) を 1st4', 1st10', 1st15', 1st20', 各試技の 2 回目 (2nd) を 2nd4', 2nd10', 2nd15', 2nd20' とそれぞれ表記した。休息時間の設定に関して、事前実験で平均パワーが 15 分程度で回復する者が複数確認されたため、先行研究で多く用いられている 4 分の休息時間に加え 10 分, 15 分, 20 分を用いることでパフォーマンスの変動を十分観測できると想定し設定した。回数間の休息は、1 回目終了後すぐに自転車エルゴメータから降り、横に設置した背もたれ付きの椅子に着座し、座位姿勢で休息をとった後、2 回目開始 2 分前に退座し、ゆっくりとした動作で自転車エルゴメータに再度乗った。対象者には、運動中常に全力で漕ぐこと、腰を上げないこと、息を止めないことを指示した。

(5) 分析項目

最大下テストにおける発揮パワーと酸素需要量，それらの直線回帰式の算出方法は，「共通する測定方法」に準じて分析，算出した．同様に， $\dot{V}O_2\text{max}$ テストにおける $\dot{V}O_2\text{max}$ と最大心拍数についても「共通する測定方法」に準じて分析，算出した．

30 秒連続テストにおける平均パワーは，1st, 2nd とともに 30 秒間の平均値で算出し，最高パワーは 30 秒間のうち 1 秒平均の最も高い値として算出し，それぞれ体重で規格化した．運動中の酸素需要量，酸素摂取量，酸素借，血中乳酸濃度，生理的相対強度 ($\% \dot{V}O_2\text{max}$) は，前述した「共通する測定方法」に準じて分析，算出した．算出した酸素需要量をエネルギー供給量 (ml/kg)，酸素摂取量を有酸素性エネルギー (ml/kg)，酸素借を無酸素性エネルギー (ml/kg) とし，そのエネルギー供給比率を有酸素性比率と無酸素性比率として算出した．各試技中の最高酸素摂取量は，運動中の酸素摂取量を回数ごとに運動開始から 10 秒ごとに算出し，そのうち最も高い値として算出し， $\dot{V}O_2\text{max}$ で規格化した．一定水準を超える酸素摂取量の累積時間を算出するために，各試技における運動中の酸素摂取量を 10 秒ごとに算出し，酸素摂取量が $80\% \dot{V}O_2\text{max}$ と $90\% \dot{V}O_2\text{max}$ を超えた累積時間を試技ごとに算出した．血中乳酸濃度は，2nd 開始 1 分前と終了 1, 3, 5, 7 分後に測定し，20 分休息の試技のみ 1st 開始 1 分前と終了 1, 3, 5, 7, 10, 14, 19 分後も測定した．そして，2nd 終了後の最も高い値を最高血中乳酸濃度とした．なお，20 分試技以外で 1st 前後の測定を行わなかったのは，対象者の負担を考慮したことによる．また，2nd 終了 5 分後の測定値が 3 分後の値と比較して明らかな減少傾向にあった場合，7 分後の測定は行わなかった．

(6) 統計処理

測定項目は，平均値±標準偏差で示した．30 秒連続テストにおける項目に対して 2 要因（回数×休息时间）の二元配置分散分析を行い，有意な交互作用もしくは主効果が認められた項目には多重比較検定（Holm による調整）を行った．なお，血中乳酸濃度の項目に関しては，4~15 分試技における 1st 前後の測定を行っていないため，

二元配置分散分析は行わず，20 分試技における 1st と 2nd の比較には対応のある t 検定を用い，2nd における試技間の比較には一元配置分散分析を用い，有意な主効果が認められた場合には多重比較検定（Holm による調整）を行った．すべての有意水準は危険率 $p < 0.05$ で判定した．

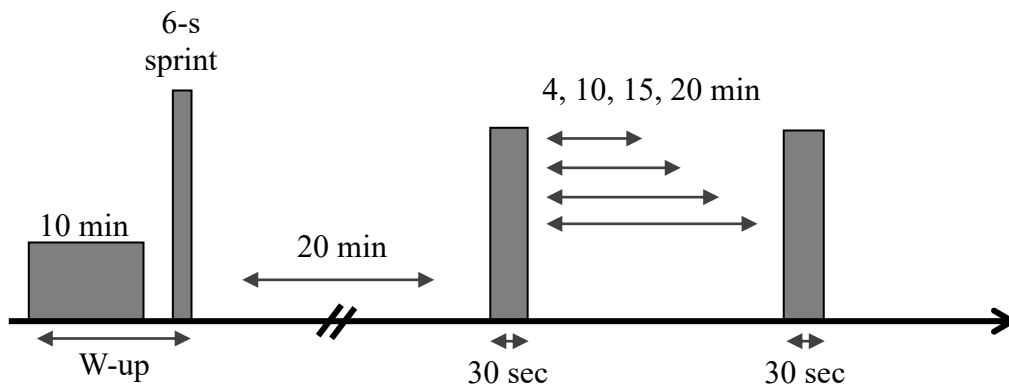


図 12 30 秒連続テストの実験プロトコル

3. 結果

$\dot{V}O_2\max$ テストにおける $\dot{V}O_2\max$ と最大心拍数は、それぞれ 55.7 ± 4.8 ml/kg/min, 191 ± 9.2 bpm であった。 $\dot{V}O_2\max$ と 30 秒連続テストにおける各試技中の最高酸素摂取量との差を多重比較検定によって分析した結果、 $\dot{V}O_2\max$ は 10~20 分試技よりも有意に高い値を示し ($p < 0.01, p < 0.01, p < 0.05$)、最高酸素摂取量は試技間に有意差が認められなかった。最大下テストにおける発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式における決定係数は 0.997 ± 0.002 であった。

表 7 と図 13 に 30 秒連続テストの結果を示した。最高パワーは有意な交互作用が認められ ($F = 11.0, p < 0.01$)、回数間の比較では 4 分試技のみ有意差が認められ ($2nd < 1st, p < 0.05$)、休息時間間の比較では 2 回目において $2nd4'$ と $2nd10'$, $2nd15'$, $2nd20'$ との間に有意差が認められた ($2nd4' < 2nd10\sim20', p < 0.05; p < 0.05; p < 0.01$)。平均パワーは、有意な交互作用が認められ ($F = 32.7, p < 0.01$)、回数間の比較では 4~15 分試技において有意差が認められ ($2nd < 1st, p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05$)、休息時間間の比較では 2 回目において $2nd4'$ と $2nd10'$, $2nd15'$, $2nd20'$ との間および $2nd10'$ と $2nd20'$ との間に有意差が認められた ($2nd4' < 2nd10\sim20', p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01$) ($2nd10' < 2nd20', p < 0.05$)。平均心拍数は、回数のみ主効果が認められ ($F = 36.7, p < 0.01$)、4~20 分試技で 2nd が 1st より有意に大きな値を示した ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05$)。エネルギー供給量は、有意な交互作用が認められ ($F = 33.3, p < 0.01$)、回数間の比較では 4~15 分試技において有意差が認められ ($2nd < 1st, p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05$)、休息時間間の比較では 2 回目において $2nd4'$ と $2nd10'$, $2nd15'$, $2nd20'$ との間および $2nd10'$ と $2nd20'$ との間に有意差が認められた ($2nd4' < 2nd10\sim20', p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01$) ($2nd10' < 2nd20', p < 0.05$)。有酸素性エネルギーは、回数にのみ有意な主効果が認められ ($F = 55.2, p < 0.01$)、4~20 分試技で 2nd が 1st より有意に大きな値を示した (すべて $p < 0.01$)。無酸素性エネルギーは、有意な交互作用が認められ ($F = 28.3, p < 0.01$)、回数間の比較では 4~20 分試技において有意差が認められ ($2nd < 1st, p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05; p < 0.01$)、休息時間間の比較では 2 回目において $2nd4'$ と

2nd10', 2nd15', 2nd20' との間および 2nd10' と 2nd20' との間に有意差が認められた (2nd4' < 2nd10~20', $p < 0.01$; $p < 0.01$; $p < 0.01$) (2nd10' < 2nd20', $p < 0.05$). 有酸素性比率 (無酸素性比率) は, 有意な交互作用が認められ ($F = 11.0, p < 0.01$), 回数間の比較では 4~20 分試技において有意差が認められ ($p < 0.01$; $p < 0.01$; $p < 0.05$; $p < 0.05$), 休息時間間の比較では 2 回目において 2nd4' と 2nd10', 2nd15', 2nd20' との間に有意差が認められた ($p < 0.01$; $p < 0.05$; $p < 0.01$). 生理的相対強度は, 有意な交互作用が認められ ($F = 33.3, p < 0.01$), 回数間の比較では 4~15 分試技において有意差が認められ (2nd < 1st, $p < 0.01$; $p < 0.01$; $p < 0.05$), 2 回目において 2nd4' と 2nd10', 2nd15', 2nd20' との間および 2nd10' と 2nd20' との間に有意差が認められた (2nd4' < 2nd10~20', $p < 0.01$; $p < 0.01$; $p < 0.01$) (2nd10' < 2nd20', $p < 0.05$). 運動前血中乳酸濃度は, 2 回目において全試技で測定し, 一元配置分散分析の結果, 有意な主効果が認められ ($F = 15.9, p < 0.01$), 2nd4' と 2nd20' および 2nd10' と 2nd20' との間に有意差が認められた (2nd20' < 2nd4~10', $p < 0.01$). 1 回目においては 20 分試技のみ測定し, 対応のある t 検定の結果, 2nd20' が 1st20' より有意に高い値を示した ($p < 0.01$). 最高血中乳酸濃度は, 2 回目において全試技で測定し, 一元配置分散分析の結果, 有意な主効果が認められなかった ($F = 2.4, p = 0.09$). 1 回目においては 20 分試技のみ測定し, 対応のある t 検定の結果, 2nd20' が 1st20' より有意に高い値を示した ($p < 0.01$).

図 14 に 30 秒連続テストの運動中における一定水準を超える酸素摂取量の累積時間を示した. 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ 水準および 90% $\dot{V}O_2\text{max}$ 水準の累積時間に対し一元配置分散分析を行った結果, 両方とも有意な主効果が認められなかった ($F = 1.9, p = 0.15$; $F = 2.0, p = 0.14$).

表7 30秒連続テストの結果

| | 4分試技 | | 10分試技 | | 15分試技 | | 20分試技 | |
|-----------------------------------|---------------|------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|---------------------|
| | 1st | 2nd | 1st | 2nd | 1st | 2nd | 1st | 2nd |
| 最高パワー (W/kg) | 13.3 ± 0.6 | 12.4 ± 0.5 * | 13.4 ± 0.7 | 13.0 ± 0.6 † | 13.2 ± 0.7 | 13.0 ± 0.6 † | 13.4 ± 0.6 | 13.2 ± 0.4 †† |
| 平均パワー (W/kg) | 10.4 ± 0.4 | 8.9 ± 0.4 ** | 10.3 ± 0.4 | 9.7 ± 0.4 **†† | 10.4 ± 0.4 | 9.9 ± 0.4 **†† | 10.4 ± 0.4 | 10.2 ± 0.3 ††‡ |
| 平均心拍数 (bpm) | 141 ± 5.4 | 151 ± 11.6 ** | 141 ± 4.9 | 152 ± 7.6 ** | 141 ± 5.1 | 150 ± 8.8 ** | 142 ± 4.9 | 151 ± 8.3 * |
| 運動前血中乳酸濃度 (mM) | - | 10.5 ± 0.9 | - | 10.5 ± 1.3 | - | 9.4 ± 1.5 | 1.6 ± 0.5 | 8.5 ± 1.3 **††‡ |
| 最高血中乳酸濃度 (mM) | - | 13.1 ± 0.9 | - | 13.4 ± 1.6 | - | 12.7 ± 1.7 | 11.1 ± 1.0 | 12.5 ± 1.4 ** |
| エネルギー供給量 (ml/kg/min) | 61.1 ± 3.8 | 52.8 ± 3.9 ** | 60.9 ± 3.7 | 57.2 ± 4.3 **†† | 61.0 ± 3.8 | 58.5 ± 4.1 **†† | 61.3 ± 3.6 | 59.9 ± 3.3 ††‡ |
| 有酸素性エネルギー (ml/kg) | 14.1 ± 2.3 | 17.8 ± 1.8 ** | 15.1 ± 1.4 | 17.2 ± 1.6 * | 14.6 ± 2.2 | 17.2 ± 2.0 ** | 14.4 ± 1.2 | 17.4 ± 0.9 ** |
| 無酸素性エネルギー (ml/kg) | 47.0 ± 4.3 | 35.0 ± 4.2 ** | 45.7 ± 3.9 | 40.0 ± 4.6 **†† | 46.4 ± 4.1 | 41.2 ± 4.4 **†† | 46.9 ± 3.6 | 42.5 ± 3.4 **††‡ |
| 有酸素性比率 (%) | 23.1 ± 4.0 | 33.8 ± 3.9 ** | 24.9 ± 2.6 | 30.3 ± 3.6 **†† | 24.1 ± 3.7 | 29.6 ± 3.7 **†† | 23.5 ± 2.3 | 29.1 ± 2.2 **†† |
| 無酸素性比率 (%) | 76.9 ± 4.0 | 66.2 ± 3.9 ** | 75.1 ± 2.6 | 69.7 ± 3.6 **†† | 75.9 ± 3.7 | 70.4 ± 3.7 **†† | 76.5 ± 2.3 | 70.9 ± 2.2 **†† |
| 生理的相対強度 (% $\dot{V}O_{2max}$) | 221 ± 22.2 | 190 ± 17.8 ** | 220 ± 22.3 | 207 ± 20.6 **†† | 220 ± 21.6 | 211 ± 20.4 **†† | 221 ± 21.3 | 216 ± 20.2 ††‡ |

平均値 ± 標準偏差

***: 同試技内の1stとの有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

†,††: 4分試技の2ndとの有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

‡: 10分試技の2ndとの有意差 ($p < 0.05$)

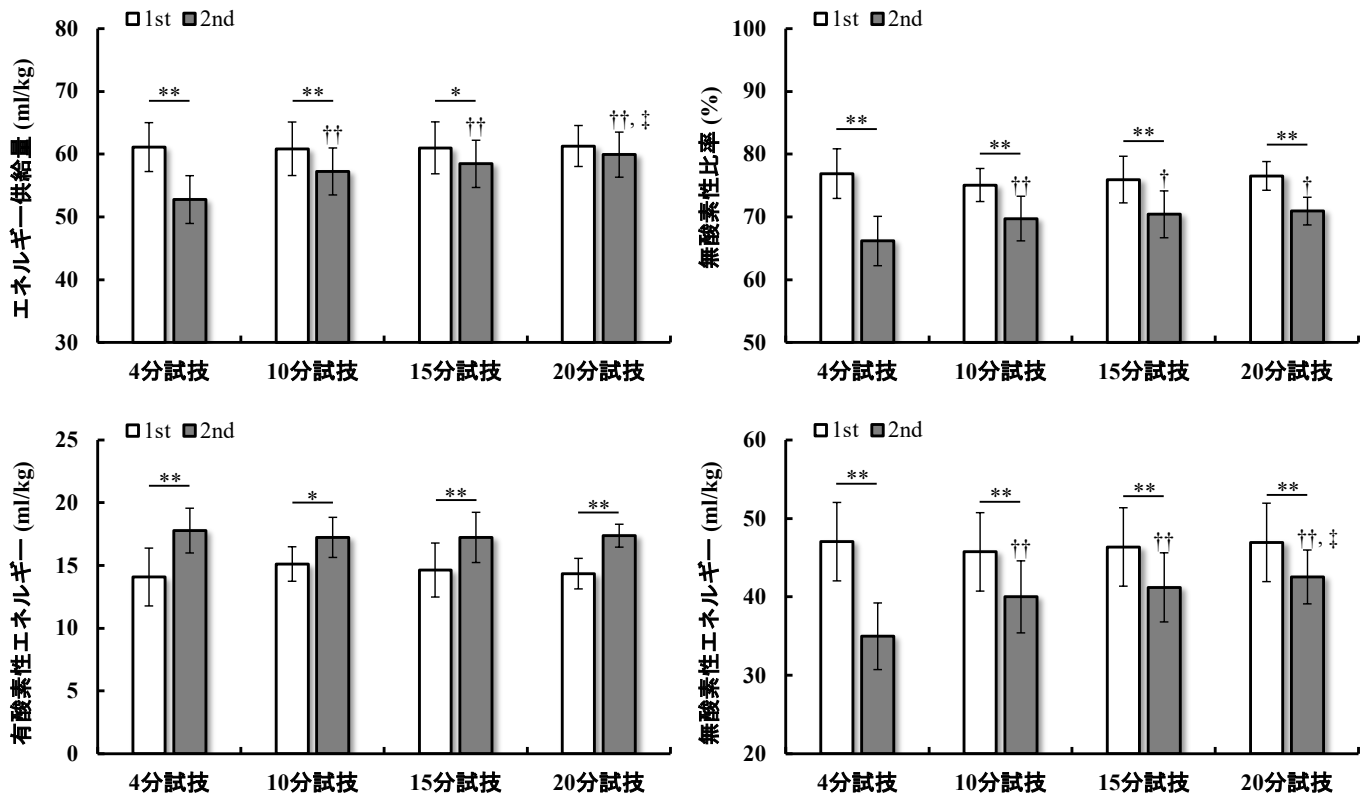


図 13 30 秒連続テストにおけるエネルギー代謝

*, **: 同試技内の 1st と 2nd との有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

†, ††: 4 分試技の 2nd との有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

‡: 10 分試技の 2nd との有意差 ($p < 0.05$)

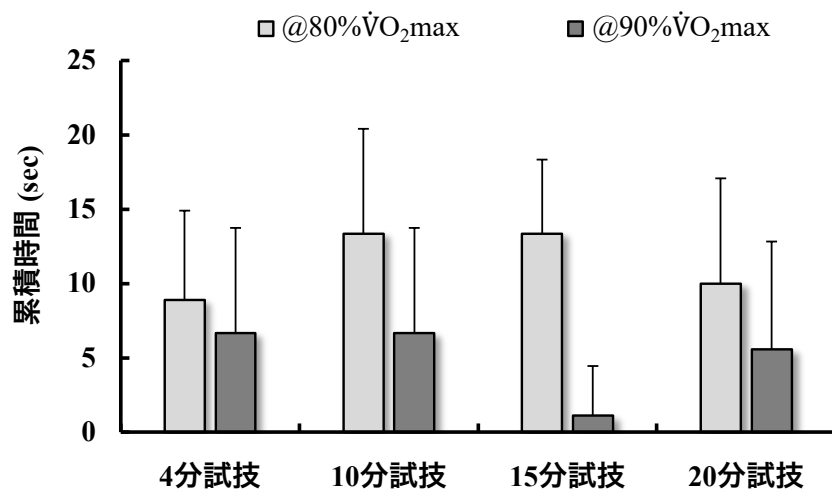


図 14 30 秒連続テストにおける一定水準を超える酸素摂取量の累積時間

@80% $\dot{V}O_2$ max: F = 1.9 (n. s.)

@90% $\dot{V}O_2$ max: F = 2.0 (n. s.)

4. 考察

本研究課題の目的は、30 秒全力運動 2 回を異なる休息時間で行わせ、休息時間の相違が 2 回目の運動におけるパフォーマンスおよびエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることであった。最高パワーは 2nd4' が 1st4' と比較して有意に低い値を示し、2nd10'、2nd15'、2nd20' はそれぞれの 1st と比較して有意差は認められなかった（表 7）。これらのことは、10 分の休息時間でパフォーマンスの最高値が十分に回復していたことを示唆している。一方、平均パワーは、2nd4'、2nd10'、2nd15' がそれぞれの 1st と比較して有意に低い値を示し、2nd20' は、1st20' と比較して有意差は認められなかった（表 7）。これらのことは、20 分の休息時間でパフォーマンスが十分に回復していたことを示唆している。また、エネルギー代謝に関して、有酸素性エネルギーは全試技で 2nd が 1st と比較して有意に大きい値を示し、無酸素性エネルギーは全試技で 2nd が 1st と比較して有意に小さい値を示し、その結果、無酸素性比率は全試技で 2nd が 1st と比較して有意に低い値を示した（表 7, 図 13）。これらのことは、レペティションプリントにおいて、パフォーマンスが十分に回復する休息時間を用いた場合でも、1 回目によって生じた代謝変動が 2 回目のエネルギー代謝に影響を与えることを示唆している。ただし、無酸素性エネルギーにおいては、2nd10'、2nd15'、2nd20' が 2nd4' と比較して、また、2nd20' が 2nd4'、2nd10' と比較して有意に大きい値を示したことから（表 7, 図 13）、休息時間が長いほど、無酸素性エネルギーの回復が進むことが示唆された。

30 秒連続テストの身体負荷に関して、最高血中乳酸濃度は、2nd で試技間に有意差は認められなかったものの、1st20' より 2nd20' で有意に高い値を示した（1st の最高血中乳酸濃度は、1st20' のみ測定）（表 7）。血中乳酸濃度は身体負荷の指標として解釈でき（八田, 2008）、この結果は、30 秒全力運動 1 回よりも 2 回行うことでより大きな負荷が与えられることを示唆している。そして、その負荷は休息時間によって大きな差はないといえる。その中で、有酸素性代謝に着目すると、最高酸素摂取量は、10~20 分試技で $\dot{V}O_2\max$ より有意に低い値を示し、試技間に有意差は認められなかった。4

分試技の最高酸素摂取量は、 $\dot{V}O_{2\max}$ との間に有意差が認められなかったものの、試技間に有意差がなく、その値 ($87.5 \pm 12.5 \% \dot{V}O_{2\max}$) から、30 秒連続テストは有酸素性代謝に対して最大限の負荷を与えていたとはいえない。また、 $90\% \dot{V}O_{2\max}$ を超える酸素摂取量の累積時間は全試技で 10 秒以下であり (図 14)、先行研究で議論されている範囲 (1~10 分) と比較して著しく短い (Buchheit and Laursen, 2013a)。したがって、30 秒連続テストは、有酸素性代謝に対する負荷が小さかったと推察される。

一方、無酸素性代謝に着目すると最高血中乳酸濃度は、前述した通り 1st20' より 2nd20' で有意に高い値を示し (表 7)、30 秒連続テストは、30 秒全力運動を 1 回行うよりも解糖系によるエネルギー供給が大きかったといえる (Jacobs, 1986)。また、無酸素性代謝に対する負荷を評価する他の指標としては、最大酸素借に対する総無酸素性エネルギー (総酸素借) の割合が度々用いられている (Tabata et al., 1997; 森ほか, 2011; 森ほか, 2012)。本研究課題において最大酸素借は測定していないが、参考値として研究課題 1-2 における 60 秒全力運動中の酸素借 ($59.9 \pm 4.2 \text{ ml/kg}$, 表 6) を最大酸素借として用いると (Gastin et al., 1995)、4~20 分試技でそれぞれ 137 %, 143 %, 146 %, 150 %であった。この値は、最大酸素借とされる値を超えており、30 秒連続テストは、無酸素性代謝に対する負荷が大きかったと推察される。

パフォーマンスの変化に関して、最高パワーは 1st4' と比較して 2nd4' で有意に低い値を示し、平均パワーは同じ試技の 1st と比較して 2nd4', 2nd10', 2nd15' でそれぞれ有意に低い値を示した (表 7)。当然ながら、休息時間が短ければ短いほど身体の回復が不十分な状態で運動をすることになり、パフォーマンスは低下する。しかしながら、本研究課題と同様のプロトコルを行う際、10 分以上の休息時間を用いることでパフォーマンスの最高値はほぼ回復し、20 分以上の休息時間を用いることでパフォーマンスがほぼ回復することが示唆された。最高パワーと平均パワーの回復動態に差がみられた要因としては、瞬間的な最大パワーを出す局面と 30 秒間のパワー発揮では無酸素性エネルギー供給機構である PCr 系と解糖系の貢献が異なり、それらの回復速度の相違が影響したと考えられる。PCr 系は、クレアチンリン酸を連続的に分解

することで瞬間的に大きなエネルギー供給を行うため最大パワーに大きな影響を与え、解糖系は平均パワーに大きな影響を与えることが知られている (Gastin, 2001; Parolin et al., 1999). 実際に、それぞれのエネルギー供給比率は、10 秒間の全力運動で PCr 系が 53 %, 解糖系が 44 %であったのに対し (Serresse et al., 1988), 30 秒間の全力運動では PCr 系が 16 %, 解糖系が 55 %であったことが報告されている (Putman et al., 1995). また、クレアチンリン酸は約 10 秒で実質枯渇するが (Bogdanis et al., 1995; Gastin, 2001), 休息時の再合成が早く、6 分の休息で安静時の 85.5 ± 3.5 %まで回復する (Bogdanis et al., 1995). なお、この先行研究では非競技者を対象としており、有酸素性能能力がより高いと推測される競技者ではクレアチンリン酸の回復が更に早い (Bogdanis et al., 1995) と考えられる. これらのことから、最大パワー発揮に重要なクレアチンリン酸の回復が休息期の比較的早期に生じることによって、10 分試技では最高パワーの値がほぼ回復したものと考えられる. また、先行研究により、有酸素性代謝の亢進によって 30 秒全力運動中の最初の 6 秒間における有酸素性エネルギーが大きくなることが報告されている (Parolin et al., 1999). そのため、1 回目による有酸素性代謝の亢進 (エネルギー代謝に関する考察にて後述している) が 2 回目の有酸素性エネルギーを増加させ、平均パワーだけでなく最高パワーにも貢献したと考えられる. 一方、平均パワーの回復には 20 分を要したことから、PCr 系と比較して解糖系によるエネルギー供給量の回復が遅かったものと推察される. 以上によって最高パワーと平均パワーの回復動態に相違がみられたと考えられ、クレアチンリン酸の再合成が早いことによって比較的短い休息時間であってもパフォーマンスの最高値が引き出されたといえる.

エネルギー代謝に関して、先行研究において 30 秒全力運動を 4 分の休息時間で 2 回行わせた場合、2 回目の運動で有酸素性エネルギーが増加するものの、無酸素性エネルギーが顕著に減少し、パフォーマンスが低下したことが報告されている (Bogdanis et al., 1996). 本研究課題でも同様に、2 回目において全試技で有酸素性エネルギーの有意な増加と無酸素性エネルギーの有意な減少が認められ、4~15 分試技

で平均パワーおよびエネルギー供給量が有意に低下した（表7，図13）。一方，20分試技の2回目では，無酸素性エネルギーが4~10分試技の2回目と比較して有意に大きい値を示し，1回目に対する平均パワーおよびエネルギー供給量の有意な低下も認められなかった（表7）。すなわち20分試技において，2回目の無酸素性エネルギーは1回目より小さいながらも4~10分間の休息時よりも回復し，有酸素性エネルギーの増加分と相まって，結果的に1回目と同等のパフォーマンスを発揮したといえる。一方，このことは，パフォーマンスを十分に回復させ得る休息時間を用いた場合であっても1回目の運動が，2回目の運動中におけるエネルギー代謝に影響を与えることを示唆している。1回目により生じる代謝変動に関して，Putman et al. (1995) は30秒全力自転車運動によって有酸素性代謝に関わる酸化系酵素活性が高まることを報告している。すなわち，その酵素活性が1回目によって高まり，休息時間内に安静時の値まで低下せずに次の運動を行うことで運動中の酸素摂取量が高まったことを報告している。一方，無酸素性代謝に関わる解糖系酵素活性は，1回目の30秒全力自転車運動と比較して3回目で有意に低い値を示し（2回目の分析は行われていない），これにより解糖系による無酸素性エネルギー供給量が減少したと報告されている（Parolin et al., 1999）。また，無酸素性エネルギー供給に強く関わるクレアチンリン酸が1回目の30秒全力自転車運動によって実質枯渇まで至ること，そして，その回復には，6分の休息で安静時の85.5%が回復し，95%まで回復するには推定で13.6分要することが報告されている（Bogdanis et al., 1995）。これらのことを鑑みると，本研究課題で用いたプロトコルにおいて1回目で生じる酵素活性の変化が2回目のエネルギー代謝に影響を与えており，短い休息時間では，特にクレアチンリン酸の不完全な回復が無酸素性エネルギーの減少に大きな影響を与えたと考えられる。

以上のことから，レペティションプリントにおいて休息時間の相違は，パフォーマンスおよびエネルギー代謝に大きな影響を与えており，特にエネルギー代謝に関して，1回目で生じる代謝変動はパフォーマンスが完全に回復するよりも長い間影響を与えることが明らかとなった。

5. 要約

本研究課題の目的は、連続する短時間全力運動を異なる休息時間で行わせ、休息時間の相違が 2 回目の運動中におけるパフォーマンスおよびエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることであった。得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 2 回目の最高パワーは、4 分休息時では 1 回目と比較して有意に低い値を示したが、10~20 分休息時では 1 回目と比較して有意差は認められなかった。2 回目の平均パワーは、4~15 分休息時では 1 回目と比較して有意に低い値を示したが、20 分休息時では 1 回目と比較して有意差は認められなかった。
- (2) 4~20 分休息時では、いずれも 1 回目と比較して 2 回目で有酸素性エネルギー供給量が大きくなり、無酸素性エネルギー供給量が小さくなり、無酸素性比率が低下した。
- (3) 2 回目の無酸素性エネルギー供給量は、4 分休息時よりも 10~20 分休息時の場合で有意に大きく、4~10 分休息時よりも 20 分休息時の場合で有意に大きい値を示した。

以上の結果より、連続する短時間高強度運動において、パフォーマンスを十分に回復させ得る休息時間を用いても、1 回目の運動による有酸素性代謝の亢進および無酸素性代謝の抑制が生じ、2 回目運動中の無酸素性エネルギー供給量および比率が小さくなることが示唆された。一方で、休息時間が長いほど、無酸素性エネルギー供給量の回復が進むことが示唆された。

第9章 間欠的スプリントにおける運動強度、運動時間、休息時間がエネルギー代謝に与える影響（研究課題 2-2）

1. 目的

高強度インターバルトレーニングは様々な競技者に用いられており、特に全力もしくは全力に近い強度の短時間運動を用いたトレーニングは、スプリント競技者によく用いられている（山元，2019；山崎，2009；結城，2009）。研究課題 1-1 で扱ったレペティションスプリントはその代表的なトレーニングの一つであるが、全力をやや下回る強度で比較的短い休息時間を挟んで繰り返し行う間欠的スプリントもスピード持久力や無酸素性能力を高める目的でトレーニング現場ではよく用いられている（Reilly and Bangsbo, 1999; 山元，2019；山崎，2009）。近年、高強度インターバルトレーニング再流行のきっかけとなったタバタプロトコル（田畑，2015）も間欠的スプリントに含まれ（MacInnis and Gibala, 2017）、間欠的スプリントは 11~45 秒程度の運動を 10 分以内の休息時間で行われることが多い（Buchheit and Laursen, 2013a; MacInnis and Gibala, 2017）。タバタプロトコルに関する研究は複数報告されているが（Foster et al., 2015; Tabata et al., 1996; Tabata et al., 1997）、間欠的スプリントに分類される範囲は広く、ほかのプロトコルに関する研究が不足していると指摘されている（Iaia and Bangsbo, 2010）。

タバタプロトコル（ $170\% \dot{V}O_2\max$ 強度で 20 秒間の運動を 10 秒間の休息で 6-7 回反復）のエネルギー代謝を検討した研究では、最大酸素摂取量および最大酸素借と同等の酸素摂取量および酸素借が動員されたと報告されている（Tabata et al., 1997）。このことは、間欠的スプリントであるタバタプロトコルは有酸素性代謝および無酸素性代謝に大きな負荷が与えられることを示唆している。実際に、そのトレーニングの有効性についても報告されている（Tabata et al., 1996）。また、水泳運動においては間欠的スプリント中の運動 1 回ごとのエネルギー代謝を検討した研究もある。Peyrebrune et al. (2014) は、全力に近い強度（ $154\% \dot{V}O_2\max$ 前後、約 93% 力学的相対強度）での

30 秒間水泳運動を 30 秒の休息で 4 回行わせ、1 回目と比較して 2 回目以降および 2 回目と比較して 4 回目の無酸素性比率が有意に低値を示したことを報告している。このことは、回数ごとに無酸素性比率が低下する（有酸素性比率が高まる）ことを示唆している。しかしながら、この研究のプロトコルおよびタバタプロトコルは、実際にトレーニング現場で用いられている間欠的スプリントと比較して極端に休息時間が短い。山元（2019）は、20~40 秒の運動時間を繰り返す場合には 3~10 分の休息時間で行うことを推奨している。しかしながら、2 つの先行研究（Peyrebrune et al., 2014; Tabata et al., 1997）以外に間欠的スプリント中のエネルギー代謝について検討した研究は見当たらない。トレーニング現場では、トレーニングの目的や競技者のコンディションなどに応じてトレーニング中の構成要因（運動強度、運動時間、休息時間など）が調節されるが、その組み合わせは無数に存在し、その組み合わせによって生理的負荷が異なりトレーニング効果に相違が生じると指摘されている（Buchheit and Laursen, 2013a）。したがって、間欠的スプリント中における構成要因がエネルギー代謝に与える影響を検討することで、競技者や指導者に対しトレーニングの考案や計画に対して有益な知見が得られる。

そこで、本研究課題の目的は、様々な間欠的スプリントを行わせ、構成要因となる運動強度、運動時間、休息時間が運動中のエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることとした。

2. 方法

(1) 研究対象者

対象者は、陸上競技を専門に行っている男子大学生および大学院生 9 名を対象とした。対象者の選定は、自転車エルゴメータのペダリング運動に慣れていること、スプリント種目を含むことを条件に短距離走競技者および十種競技競技者とした。対象者の年齢、身長、体重はそれぞれ 22.0 ± 2.7 歳、 173.7 ± 3.6 cm、 66.3 ± 6.4 kg であった。なお、実験は競技シーズン終了後に行われた。実験を行うにあたり、対象者には

本研究課題の目的、運動に伴う苦痛、不快感および危険性などを詳細に説明し、いかなる時でも実験の中断ができるという条件の下で参加の同意を得た。なお、これらの手順は、筑波大学研究倫理委員会の承認を得て行われた（承認番号：体 29-99 号）。

(2) 実験手順

実験は、プレテストと4種類の間欠的スプリント（以下、SIT テスト、Sprint Interval Training）の計5セッションとし、セッション間には中1日以上の間隔をあげ、対象者ごとに3週間以内にすべての実験を終えた。なお、SIT テストの運動強度を対象者ごとに設定するため間欠的強度漸増スプリントテストを初回の実験前に別日を設け行わせた。ペダリング技術や体力の向上による影響を小さくするため、SIT テスト4試技の実施順は対象者ごとにランダム化された。対象者には実験までの24時間は激しい運動を控えるよう指示した。また、実験前日から当日のアルコール摂取および当日のカフェイン摂取を控えるよう指示した。食事は、実験開始2時間前に終わるよう指示し、代謝の日内変動を考慮して対象者ごとに実験開始の時間を固定した（変動は±30分以内）。実験環境は、室温24~26度、湿度60%以下になるよう調節した。実験中の水分補給に関して、対象者には実験室来室の際に市販の飲料水を渡し、可能な限りいつでも水分補給ができるよう配慮した。なお、呼気ガス分析用のマスクを装着している間の水分補給は不可能であるが、休息中はマスク再着用の時間的余裕がある場合に対象者の要望に応じマスクを一時的に外し、水分補給を行わせた。

(3) 間欠的強度漸増スプリントテスト

SIT テストで用いる2種類の運動強度（Low と High）を個別に設定するために、本実験に先立ち間欠的強度漸増スプリントテストを行わせた。図15に、運動プロトコルを示した。30秒間の運動を2分間の休息で繰り返し行わせ、ステージごとに強度を漸増させた。そして、疲労困憊となった時点でテストを終了させた。運動強度は、表8に示した。すなわち、第1ステージの強度は対象者の体重に応じて強度段階を決

定し、負荷 (kp) と目標回転数 (rpm) を決定した。第2ステージ以降は、ステージごとに強度段階を順々に繰り上げ、疲労困憊に至るまで行わせた。負荷と回転数の算出には、至適回転数を考慮した式1を用い(「共通する測定方法」参照)、回転数をステージごとに5 rpm ずつ漸増させるよう設定し、それに応じて負荷(kp)を算出した。SIT テストの強度設定にこのテストを実施した理由は、実験計画の段階において他の方法で強度設定を試みた際、スプリントを繰り返す能力を適切に評価できなかったためである。すなわち、30秒全力自転車運動中の平均パワーを用いた力学的相対強度や有酸素性能の指標をもとにした生理的相対強度を用いた際、SIT テストでの疲労困憊に至るタイミングに大きな個人差が確認された。試行錯誤した結果、SIT テストと同様のプロトコルで強度を漸増するテストが強度設定に対し比較的優れていたため、図15のように間欠的強度漸増スプリントテストを開発し、行わせた。

ウォーミングアップは負荷 1.0 kp、ペダル回転数 90 rpm で10分間行わせ、30秒の休息後、体重の7.5%kpの負荷で6秒間の全力運動を行わせた。ウォーミングアップ後、十分な休息をはさみ、対象者の準備が整い次第、試技を行わせた。各ステージの運動は、すべてローリングスタートで行われた (Minahan et al., 2007)。すなわち、対象者には負荷がかかる10秒前からゆっくりとペダリングを開始し、負荷がかかる時点で100 rpm 前後になるよう指示した。また、負荷開始直後から5秒以内に目標ペダル回転数まで調整し、それを維持するよう指示した。なお、事前にローリングスタートの練習を行わせ、安定して試技が行えるよう準備させた。各ステージ間の2分間の休息は、自転車エルゴメータのサドル上での座位姿勢で行われた。疲労困憊の判定には、目標回転数から10 rpm 以上下回りすぐに復帰できない状態を基準としたが、下回った時点が30秒運動中の開始10秒以内であった場合は15秒時点まで運動させ、開始10~20秒であった場合は25秒時点まで運動させ、開始20~25秒であった場合には30秒まで運動させ、そのステージで終了とした。開始25~30秒であった場合には、30秒まで運動させ、次のステージも行わせた。

間欠的強度漸増スプリントテストにおける最終ステージ、最終-1ステージ、最

終-2 ステージの値を用いて 2 種の運動強度 (Low と High) を以下のように算出した。

$$\text{Low (W)} = \text{終了前運動 60 秒間の平均パワー (W)} \times 95 \% \quad (\text{式 3})$$

$$\text{High (W)} = \text{終了前運動 60 秒間の平均パワー (W)} \times 105 \% \quad (\text{式 4})$$

$$\begin{aligned} & \text{終了前運動 60 秒間の平均パワー (W)} \\ & = \{(\text{最終ステージの平均パワー (W)} \times x / 30 (\text{sec})) + \\ & \quad (\text{最終-1 ステージの平均パワー (W)}) + \\ & \quad (\text{最終-2 ステージの平均パワー (W)} \times (30-x) / 30 (\text{sec}))\} / 2 \quad (\text{式 5}) \end{aligned}$$

x: 最終ステージの運動時間(sec)

すなわち、最終ステージの運動終了時点から逆算して終了前運動 60 秒間の平均パワーを算出し (式 5)、その 60 秒間平均パワーの 105% を High (式 4)、95% を Low (式 3) として運動強度を設定した。なお、最終ステージの平均パワーは、運動開始から運動終了時点までの平均パワーとして算出し、最終-1 および最終-2 ステージの平均パワーは、運動開始から 30 秒間の平均パワーとして算出した。

(4) プレテスト

実験の初回に最大下テストと $\dot{V}O_{2\max}$ テストを行わせた。その測定方法は、「共通する測定方法」に準じて行われ、テスト間の休息は 20 分とした。

(5) SIT テスト

間欠的スプリントの運動として、間欠的高強度運動を 2 つの運動強度 (Low と High)、2 つの運動時間 (30 秒と 40 秒)、2 つの休息時間 (2 分と 4 分) を組み合わせて以下の 4 種類で SIT テストを行わせた。その 4 種類は、①運動強度 Low, 運動時間 30 秒, 休息時間 2 分の SIT テスト (以下, L32)、②運動強度 High, 運動時間 30 秒,

休息時間 2 分の SIT テスト（以下，H32），③運動強度 High，運動時間 30 秒，休息時間 4 分の SIT テスト（以下，H34），④運動強度 Low，運動時間 40 秒，休息時間 2 分の SIT テスト（以下，L42）とした。これら 4 種類の SIT テストを選定するに至った理由としては，3 回以上反復できることを条件に，運動強度，運動時間，休息時間の相違を対の組み合わせで比較するためである。すなわち，運動強度の比較には L32 と H32，運動時間の比較には L32 と L42，休息時間の比較には H32 と H34 の組み合わせで行った。各試技の 1 回目を 1st と表記し，以降 2nd，3rd，4th … とした。運動強度は，間欠的強度漸増スプリントテストによって個別に算出された Low と High の値（W）を用いて，至適回転数を考慮した式 1 により（「共通する測定方法」参照），負荷（kp）と目標回転数（rpm）を設定した。

図 16 に実験プロトコルを示した。ウォーミングアップは負荷 1.0 kp，ペダル回転数 90 rpm で 10 分間行わせ，30 秒の休息後，体重の 7.5 %kp の負荷で 6 秒間の全力運動を行わせた。ウォーミングアップ後，20 分の休息中に呼気ガス分析用のマスクを装着し，SIT テストを行わせた。間欠的強度漸増スプリントテストと同様にすべての運動は，ローリングスタートで行われた。各 SIT テストは，試技ごとに設定された運動強度，運動時間，休息時間で疲労困憊に至るまで繰り返させた。各回数間の休息は，自転車エルゴメータのサドル上での座位姿勢で行われた。疲労困憊の判定には，目標回転数から 10 rpm 以上下回りすぐに復帰できない状態を基準としたが，下回った時点が 30 秒運動中の開始 20 秒以内であった場合は直ちに試技を終了させ，開始 20~25 秒であった場合は 30 秒まで運動させ試技を終了させ，開始 25~30 秒の間であった場合には，30 秒まで運動させ，次の運動も行わせた。運動時間が 40 秒の試技では，目標回転数から 10 rpm 下回った時点が開始 30 秒以内であった場合は直ちに試技を終了させ，開始 30~35 秒であった場合は 40 秒まで運動させ試技を終了させ，開始 35~40 秒の間であった場合には 40 秒まで運動させ，次の運動も行わせた。なお，30 秒間もしくは 40 秒間の運動を完遂した回数のみ分析対象とした。

(6) 分析項目

プレテストの最大下テストにおける発揮パワーと酸素需要量，それらの直線回帰式の算出方法は，「共通する測定方法」に準じて分析，算出した．同様に， $\dot{V}O_2\max$ テストにおける $\dot{V}O_2\max$ と最大心拍数の算出方法についても「共通する測定方法」に準じて分析，算出した．

SIT テストにおける運動中の平均パワーは，30 秒もしくは 40 秒間の平均値を回数ごとに算出し，体重で規格化した．運動中の心拍数，酸素需要量，酸素摂取量，酸素借，血中乳酸濃度，生理的相対強度は，前述した「共通する測定方法」に準じて分析，算出した．運動中の平均心拍数，酸素需要量，酸素摂取量，酸素借は，30 秒もしくは 40 秒間の平均値を回数ごとに算出した．算出した酸素需要量をエネルギー供給量 (ml/kg)，酸素摂取量を有酸素性エネルギー (ml/kg)，酸素借を無酸素性エネルギー (ml/kg)，それらのエネルギー供給比率を有酸素性比率と無酸素性比率として回数ごとに算出した．なお，それらのエネルギー供給量，有酸素性エネルギー，無酸素性エネルギーは，試技ごとの総量も算出した．血中乳酸濃度は，各回数後 1 分に測定し，それぞれ運動後血中乳酸濃度とし，疲労困憊に至った際には 1, 3, 5, 7 分後に測定し，最高値を最高血中乳酸濃度とした．各試技中の最高酸素摂取量は，運動中の酸素摂取量を回数ごとに運動開始から 10 秒ごとに算出し，そのうち最も高い値として算出し， $\dot{V}O_2\max$ で規格化した．一定水準を超える酸素摂取量の累積時間を算出するために，各試技における運動中の酸素摂取量を 10 秒ごとに算出し，酸素摂取量が $80\%\dot{V}O_2\max$ と $90\%\dot{V}O_2\max$ を超えた累積時間を試技ごとに算出した．総トレーニング時間は，1st から最後に完遂した回数までの総時間として算出し，総運動時間は，1st から最後に完遂した回数までの間における運動時間の総時間として算出し，総休息時間は，1st から最後に完遂した回数までの間における休息時間の総時間として算出した．

(7) 統計処理

値は平均値±標準偏差で示した．SIT テストにおける各試技間の分析には一元配

置分散分析を用い、有意な主効果が認められた項目には多重比較検定（Holm による調整）を行った。また、SIT テストにおける各試技中の最高酸素摂取量と $\dot{V}O_{2\max}$ との比較には、Holm 法による多重比較検定を用いた。SIT テストにおける各試技内の回数間の分析には一元配置分散分析を用い、有意な主効果が認められた項目には多重比較検定（Holm による調整）を行った。各試技の 1st, 2nd, 3rd それぞれに対し試技間の分析として一元配置分散分析を行い、有意な主効果が認められた項目には多重比較検定（Holm による調整）を行った。すべての有意水準は危険率 $p < 0.05$ で判定した。

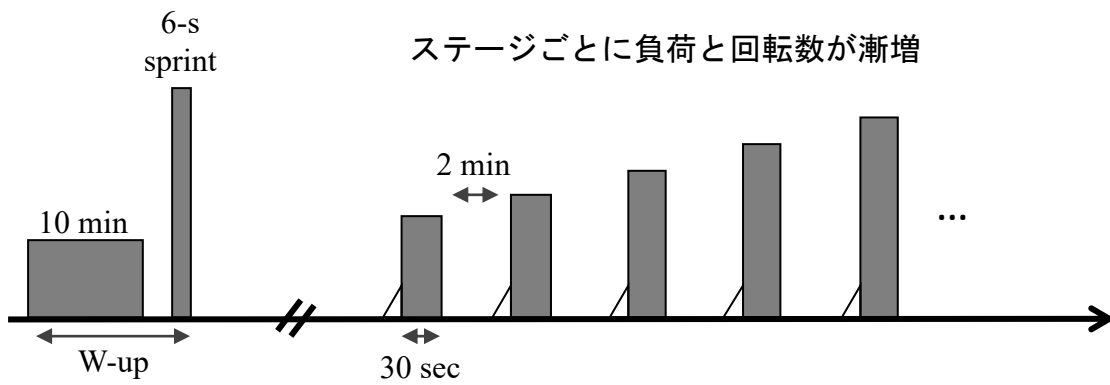


図15 間欠的強度漸増スプリントテストのプロトコル

△: ローリングスタート

表8 間欠的強度漸増スプリントテストの強度設定

| 強度段階 | 体重 (kg) | 負荷 (kp) | 回転数 (rpm) | 発揮パワー (W) |
|------|------------|------------|--------------|--------------|
| 1 | 50 | 3.9 | 80 | 306 |
| 2 | 55 | 4.1 | 85 | 342 |
| 3 | 60 | 4.3 | 90 | 379 |
| 4 | 65 | 4.5 | 95 | 419 |
| 5 | 70 | 4.6 | 100 | 451 |
| 6 | 75 | 4.7 | 105 | 484 |
| 7 | 80 | 4.8 | 110 | 517 |
| 8 | 85 | 4.9 | 115 | 552 |
| 9 | 90 | 5.0 | 120 | 588 |
| 10 | 95 | 5.1 | 125 | 625 |
| 11 | 100 | 5.2 | 130 | 662 |
| 12 | | 5.3 | 135 | 701 |
| 13 | | 5.4 | 140 | 741 |
| 14 | | 5.4 | 145 | 767 |
| 15 | | 5.5 | 150 | 809 |
| 16 | | 5.5 | 155 | 835 |

開始強度の設定：

- 1) 対象者の体重を5 kgごとに四捨五入し、それに相当する強度を第1ステージでの強度とする。
 - 2) 第2ステージ以降の強度は、強度段階を1つずつ繰り上げる。
- 例) 体重が62kgの対象者は、第1ステージを強度段階3とし、第2ステージは強度段階4にし、以降順々に繰り上げる。

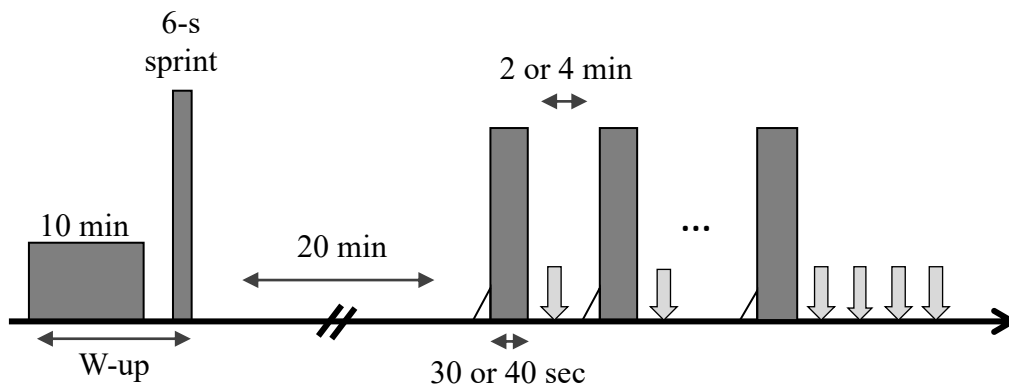


図16 SITテストの実験プロトコル

△: ローリングスタート

∇: 血中乳酸濃度測定

3. 結果

$\dot{V}O_{2\max}$ テストにおける $\dot{V}O_{2\max}$ と最大心拍数は、それぞれ 54.7 ± 4.7 ml/kg/min, 188.7 ± 9.9 bpm であった。なお、SIT テスト各試技における最高酸素摂取量は、対象者の9名のうち7名がいずれかの試技で $\dot{V}O_{2\max}$ を超え、L32で4名、H32で2名、H34で3名、L42で4名が $\dot{V}O_{2\max}$ を超えた。最大下テストにおける発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式における決定係数は 0.997 ± 0.001 であった。

表9と図17にSITテストにおける各試技の結果を示した。表9の各項目に対して一元配置分散分析を行った結果、総トレーニング時間に対して有意な主効果が認められ ($F=123.1, p<0.01$)、H34が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($H32 \& L42 < L32 < H34$, すべて $p < 0.01$)。総運動時間に対しては、有意な主効果が認められ ($F=52.0, p < 0.01$)、L32が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($H32 < L42 < H34 < L32$, すべて $p < 0.01$)。総休息时间に対しては、有意な主効果が認められ ($F=144.7, p < 0.01$)、H34が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($H32 \& L42 < L32 < H34, p < 0.01 \sim 0.05$)。反復回数に対しては、有意な主効果が認められ ($F=81.1, p < 0.01$)、H34が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($H32 \& L42 < L32 < H34$, すべて $p < 0.01$)。平均パワーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=296.9, p < 0.01$)、H32とH34が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($L42 < L32 < H32 \& H34$, すべて $p < 0.01$)。生理的相対強度に対しては、有意な主効果が認められ ($F=229.6, p < 0.01$)、H32とH34が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($L42 < L32 < H32 \& H34$, すべて $p < 0.01$)。最高血中乳酸濃度に対しては、有意な主効果が認められなかった ($F=0.5, p=0.71$)。総エネルギー供給量に対しては、有意な主効果が認められ ($F=35.1, p < 0.01$)、L32が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($H32 \& L42 < H34 < L32, p < 0.01 \sim 0.05$)。総有酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=22.3, p < 0.01$)、L32が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($H32 < H34 \& L42 < L32, p < 0.01 \sim 0.05$)。総無酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=46.7, p < 0.01$)、L32とH34が他の試技と

比較して有意に高い値を示した ($H32 \& L42 < L32 \& H34$, すべて $p < 0.01$)。有酸素性比率 (無酸素性比率) に対しては, 有意な主効果が認められ ($F = 61.1, p < 0.01$), $L42$ が他の試技と比較して有意に高い (低い) 値を示した (有酸素性比率: $H34 < H32 < L32 < L42$, すべて $p < 0.01$)。図 17 について, 各酸素摂取量累積時間に対して一元配置分散分析を行った結果, $80\% \dot{V}O_2\max$ 水準に有意な主効果が認められ ($F = 8.1, p < 0.01$), $L42$ が $H32$ と比較して有意に高い値を示した ($H32 < L42, p < 0.01$)。 $90\% \dot{V}O_2\max$ 水準には有意な主効果が認められなかった ($F = 3.0, p = 0.052$)。

図 18, 図 19, 図 20 にはそれぞれ試技内の回数ごとの値を各構成要因で比較した結果を示した。各試技の反復回数は, $L32$ で 5~7 回, $H32$ で 3~4 回, $H34$ で 4~6 回, $L42$ で 3~4 回であり, 試技内での比較は各試技の最小回数までとし, 試技間での比較は 1st, 2nd, 3rd のみとした。 $L32$ の試技内比較において, エネルギー供給量に対する有意な主効果が認められ ($F = 12.3, p < 0.01$), 4th と 5th が 1st と 2nd と比較して有意に大きい値を示した ($1st \& 2nd < 4th \& 5th, p < 0.01 \sim 0.05$)。無酸素性比率に対しては, 有意な主効果が認められ ($F = 165.6, p < 0.01$), 回数を追うごとに有意に低い値を示した ($1st > 2nd > 3rd > 4th > 5th, p < 0.01 \sim 0.05$)。有酸素性エネルギーに対しては, 有意な主効果が認められ ($F = 165.3, p < 0.01$), 回数を追うごとに有意に大きい値を示した ($1st < 2nd < 3rd < 4th < 5th, p < 0.01 \sim 0.05$)。無酸素性エネルギーに対しては, 有意な主効果が認められ ($F = 120.6, p < 0.01$), 4th と 5th が他と比較して有意に小さい値を示した ($1st > 2nd > 3rd > 4th \& 5th$, すべて $p < 0.01$)。平均心拍数に対しては, 有意な主効果が認められ ($F = 101.1, p < 0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st < 2nd < 3rd < 4th < 5th$, すべて $p < 0.01$)。運動後血中乳酸濃度に対しては, 有意な主効果が認められ ($F = 352.6, p < 0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st < 2nd < 3rd < 4th < 5th$, すべて $p < 0.01$)。 $H32$ の試技内比較において, エネルギー供給量に対する有意な主効果は認められなかった ($F = 0.7, p = 0.47$)。無酸素性比率に対しては, 有意な主効果が認められ ($F = 103.7, p < 0.01$), 回数を追うごとに有意に低い値を示した ($1st > 2nd > 3rd$, すべて $p < 0.01$)。有酸素性エネルギーに対し

では、有意な主効果が認められ ($F=120.3, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に大きい値を示した ($1st<2nd<3rd$, すべて $p<0.01$). 無酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=83.7, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に小さい値を示した ($1st>2nd>3rd$, すべて $p<0.01$). 平均心拍数に対しては、有意な主効果が認められ ($F=129.7, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st<2nd<3rd$ すべて $p<0.01$). 運動後血中乳酸濃度に対しては、有意な主効果が認められ ($F=252.5, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st<2nd<3rd$, すべて $p<0.01$). H34 の試技内比較において、エネルギー供給量に対する有意な主効果が認められ ($F=9.6, p<0.01$), 1st と比較して 4th が有意に大きい値を示した ($p<0.01$). 無酸素性比率に対しては、有意な主効果が認められ ($F=54.6, p<0.01$), 3rd と 4th が他と比較して有意に低い値を示した ($1st>2nd>3rd \& 4th, p<0.01\sim 0.05$). 有酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=78.2, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に大きい値を示した ($1st<2nd<3rd<4th, p<0.01\sim 0.05$). 無酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=44.4, p<0.01$), 3rd と 4th が他と比較して有意に小さい値を示した ($1st>2nd>3rd \& 4th, p<0.01\sim 0.05$). 平均心拍数に対しては、有意な主効果が認められ ($F=158.9, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st<2nd<3rd<4th$, すべて $p<0.01$). 運動後血中乳酸濃度に対しては、有意な主効果が認められ ($F=234.5, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st<2nd<3rd<4th$, すべて $p<0.01$). L42 の試技内比較において、エネルギー供給量に対する有意な主効果が認められたが ($F=6.3, p<0.01$), 回数間に有意差は認められなかった。無酸素性比率に対しては、有意な主効果が認められ ($F=264.1, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に低い値を示した ($1st>2nd>3rd$, すべて $p<0.01$). 有酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=162.8, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に大きい値を示した ($1st<2nd<3rd$, すべて $p<0.01$). 無酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F=98.3, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に小さい値を示した ($1st>2nd>3rd$, すべて $p<0.01$). 平均心拍数に対しては、有意な

主効果が認められ ($F=194.5, p<0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st < 2nd < 3rd$, すべて $p < 0.01$). 運動後血中乳酸濃度に対しては, 有意な主効果が認められ ($F=356.8, p < 0.01$), 回数を追うごとに有意に高い値を示した ($1st < 2nd < 3rd$, すべて $p < 0.01$). 1st の試技間比較において, エネルギー供給量に対して有意な主効果が認められ ($F=212.9, p < 0.01$), L42 が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 < H32 \ \& \ H34 < L42$, すべて $p < 0.01$). 無酸素性比率に対しては, 有意な主効果が認められ ($F=68.5, p < 0.01$), L32 と H32 と H34 が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($L42 < L32 \ \& \ H32 \ \& \ H34$, すべて $p < 0.01$). 有酸素性エネルギーに対しては, 有意な主効果が認められ ($F=232.6, p < 0.01$), L42 が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 < H32 \ \& \ H34 < L42, p < 0.01\sim 0.05$). 無酸素性エネルギーに対しては, 有意な主効果が認められ ($F=83.0, p < 0.01$), L42 が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 < H32 \ \& \ H34 < L42$, すべて $p < 0.01$). 平均心拍数に対しては, 有意な主効果が認められ ($F=4.7, p < 0.05$), H32 と H34 が L32 と比較して有意に高い値を示した ($L32 < H32 \ \& \ H34, p < 0.01\sim 0.05$). 運動後血中乳酸濃度に対しては, 有意な主効果が認められ ($F=11.8, p < 0.01$), H34 と L42 が L32 と比較して有意に高い値を示し ($L32 < H34 \ \& \ L42, p < 0.01\sim 0.05$), L42 が H32 と比較して有意に高い値を示した ($H32 < L42, p < 0.05$). 2nd の試技間比較において, エネルギー供給量に対して有意な主効果が認められ ($F=300.5, p < 0.01$), L42 が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 < H32 \ \& \ H34 < L42$, すべて $p < 0.01$). 無酸素性比率に対しては, 有意な主効果が認められ ($F=90.7, p < 0.01$), H34 が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($L42 < L32 \ \& \ H32 < H34$, すべて $p < 0.01$). 有酸素性エネルギーに対しては, 有意な主効果が認められ ($F=214.7, p < 0.01$), L42 が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 \ \& \ H34 < H32 < L42$, すべて $p < 0.01$). 無酸素性エネルギーに対しては, 有意な主効果が認められ ($F=90.3, p < 0.01$), L42 が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 < H32 < H34 < L42, p < 0.01\sim 0.05$). 平均心拍数に対しては, 有意な主効果が認められ ($F=8.9, p < 0.01$), H32 と L42 が L32 と

比較して有意に高い値を示した ($L32 < H32 \& L42$, すべて $p < 0.01$)。運動後血中乳酸濃度に対しては、有意な主効果が認められ ($F = 33.2, p < 0.01$)、 $L42$ が $L32$ および $H34$ と比較して有意に高い値を示し ($L32 < H34 < L42$, すべて $p < 0.01$)、 $H32$ が $L32$ と比較して有意に高い値を示した ($L32 < H32, p < 0.01$)。3rd の試技間比較において、エネルギー供給量に対して有意な主効果が認められ ($F = 195.9, p < 0.01$)、 $L42$ が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 < H32 \& H34 < L42$, すべて $p < 0.01$)。無酸素性比率に対しては、有意な主効果が認められ ($F = 84.7, p < 0.01$)、 $H34$ が他の試技と比較して有意に高い値を示した ($L42 < L32 \& H32 < H34, p < 0.01 \sim 0.05$)。有酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F = 200.2, p < 0.01$)、 $L42$ が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 \& H34 < H32 < L42$, すべて $p < 0.01$)。無酸素性エネルギーに対しては、有意な主効果が認められ ($F = 32.1, p < 0.01$)、 $H34$ が他の試技と比較して有意に大きい値を示した ($L32 < L42 < H34$, すべて $p < 0.01$; $L32 < H32 < H34$, すべて $p < 0.01$)。平均心拍数に対しては、有意な主効果が認められ ($F = 16.7, p < 0.01$)、 $H32$ および $L42$ が $L32$ および $H34$ と比較して有意に高い値を示した ($L32 \& H34 < H32 \& L42, p < 0.01 \sim 0.05$)。運動後血中乳酸濃度に対しては、有意な主効果が認められ ($F = 45.9, p < 0.01$)、 $L42$ が他と比較して有意に高い値を示した ($L32 < H34 < H32 < L42, p < 0.01 \sim 0.05$)。

表9 SITテストにおける構成要因ごとの各試技の結果

| | 運動強度 | | 運動時間 | | 休息時間 | |
|---------------------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|---------------|------------------|
| | L32 | H32 | L32 | L42 | H32 | H34 |
| 総トレーニング時間 (sec) | 780 ± 130 | 397 ± 79 ** | 780 ± 130 | 378 ± 53 ** | 397 ± 79 | 1050 ± 180 ** |
| 総運動時間 (sec) | 180 ± 26.0 | 103 ± 15.8 ** | 180 ± 26.0 | 124 ± 13.3 ** | 103 ± 15.8 | 143 ± 20.0 ** |
| 総休息時間 (sec) | 600 ± 104 | 293 ± 63 ** | 600 ± 104 | 253 ± 40 ** | 293 ± 63 | 907 ± 160 ** |
| 反復回数 (reps) | 6.0 ± 0.9 | 3.4 ± 0.5 ** | 6.0 ± 0.9 | 3.1 ± 0.3 ** | 3.4 ± 0.5 | 4.8 ± 0.7 ** |
| 平均パワー (W/kg) | 8.0 ± 0.6 | 8.7 ± 0.6 ** | 8.0 ± 0.6 | 7.8 ± 0.6 ** | 8.7 ± 0.6 | 8.7 ± 0.6 |
| 生理的相対強度 (% $\dot{V}O_2$ max) | 169 ± 10.0 | 184 ± 12.4 ** | 169 ± 10.0 | 166 ± 9.9 ** | 184 ± 12.4 | 185 ± 11.0 |
| 最高酸素摂取量 (% $\dot{V}O_2$ max) | 96.0 ± 10.2 | 95.3 ± 4.8 | 96.0 ± 10.2 | 98.1 ± 7.7 | 95.3 ± 4.8 | 95.0 ± 8.6 |
| 最高血中乳酸濃度 (mM) | 11.8 ± 1.1 | 11.8 ± 0.9 | 11.8 ± 1.1 | 12.2 ± 0.5 | 11.8 ± 0.9 | 11.9 ± 0.7 |
| 総エネルギー供給量 (ml/kg) | 280 ± 64.7 | 174 ± 36.4 ** | 280 ± 64.7 | 188 ± 24.5 ** | 174 ± 36.4 | 244 ± 48.0 ** |
| 総有酸素性エネルギー (ml/kg) | 101 ± 26.3 | 59 ± 14.2 ** | 101 ± 26.3 | 76 ± 9.9 * | 59 ± 14.2 | 78 ± 14.8 ** |
| 総無酸素性エネルギー (ml/kg) | 179 ± 40.9 | 115 ± 23.0 ** | 179 ± 40.9 | 112 ± 15.9 ** | 115 ± 23.0 | 166 ± 34.7 ** |
| 有酸素性比率 (%) | 36.1 ± 3.0 | 33.7 ± 2.2 ** | 36.1 ± 3.0 | 40.5 ± 2.2 ** | 33.7 ± 2.2 | 32.0 ± 2.2 ** |
| 無酸素性比率 (%) | 63.9 ± 3.0 | 66.3 ± 2.2 ** | 63.9 ± 3.0 | 59.5 ± 2.2 ** | 66.3 ± 2.2 | 68.0 ± 2.2 ** |

平均値 ± 標準偏差

*, **: 試技間の有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

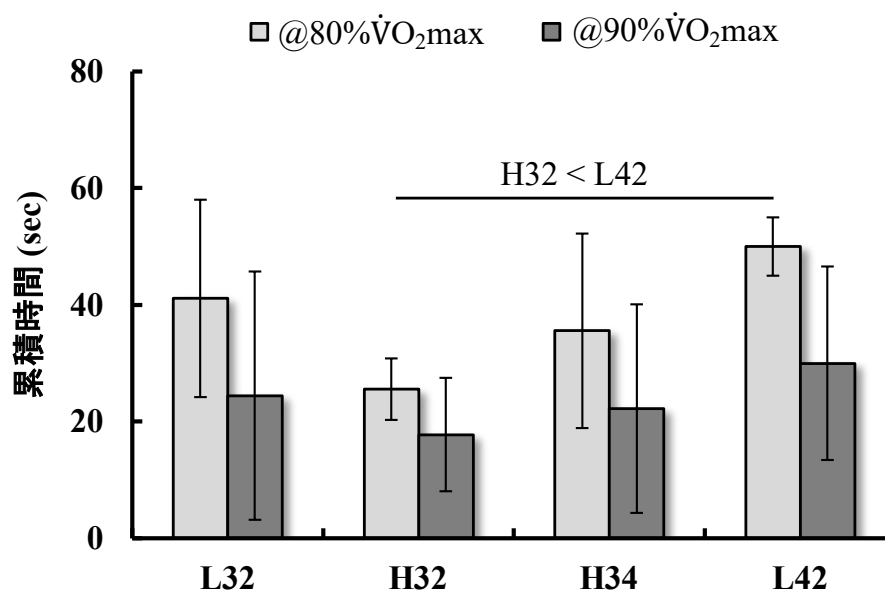


図 17 各 SIT テストにおける一定水準を超える酸素摂取量の累積時間

@80% $\dot{V}O_2$ max: $F = 8.1$ ($p < 0.01$), $H32 < L42$ ($p < 0.01$)

@90% $\dot{V}O_2$ max: $F = 3.0$ (n. s.)

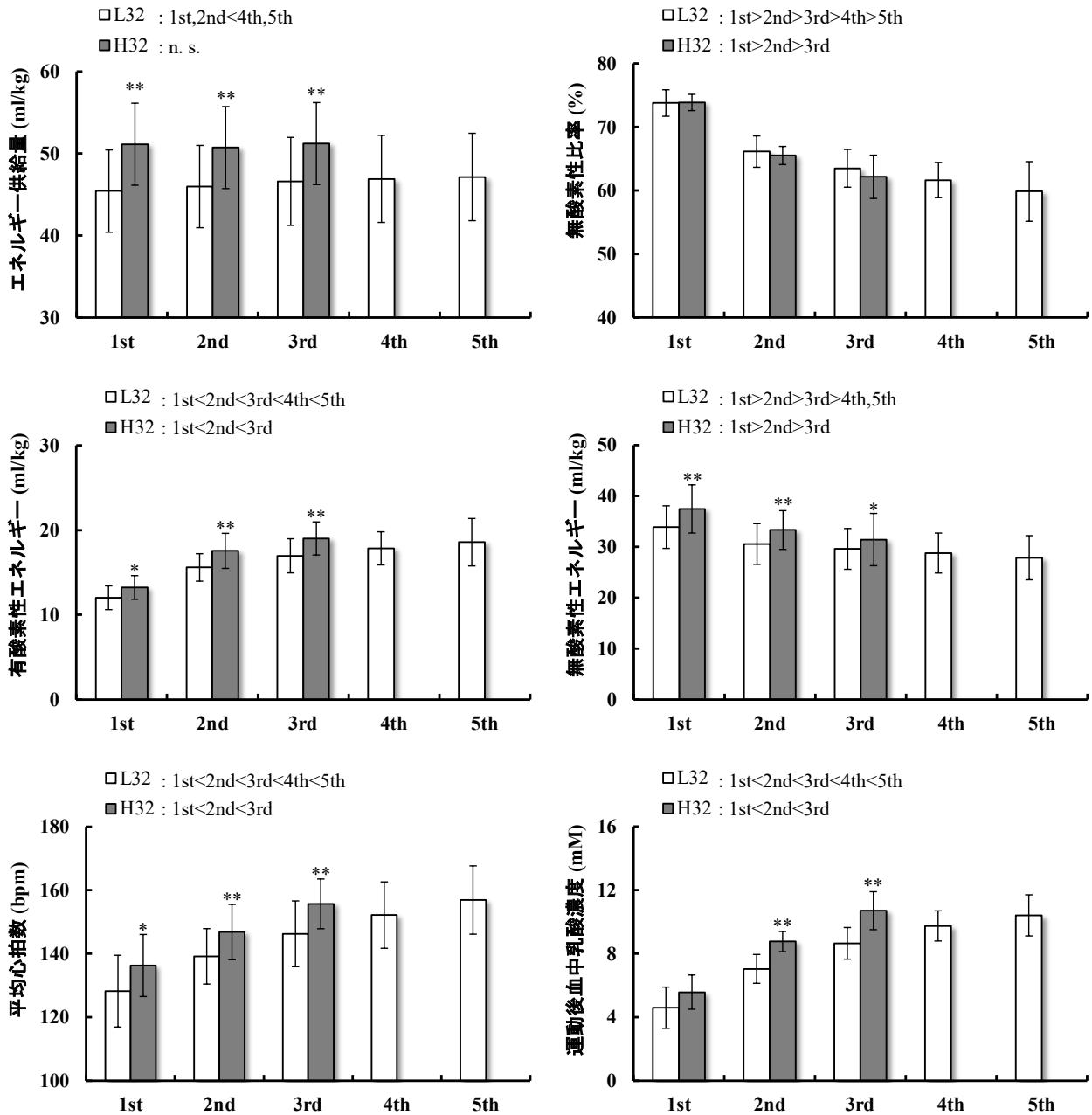


図 18 SIT テストにおける L32 と H32 の回数ごとの比較

*, **: 試技間比較 (p < 0.05, p < 0.01)

< (>): 試技内比較 (p < 0.01~0.05)

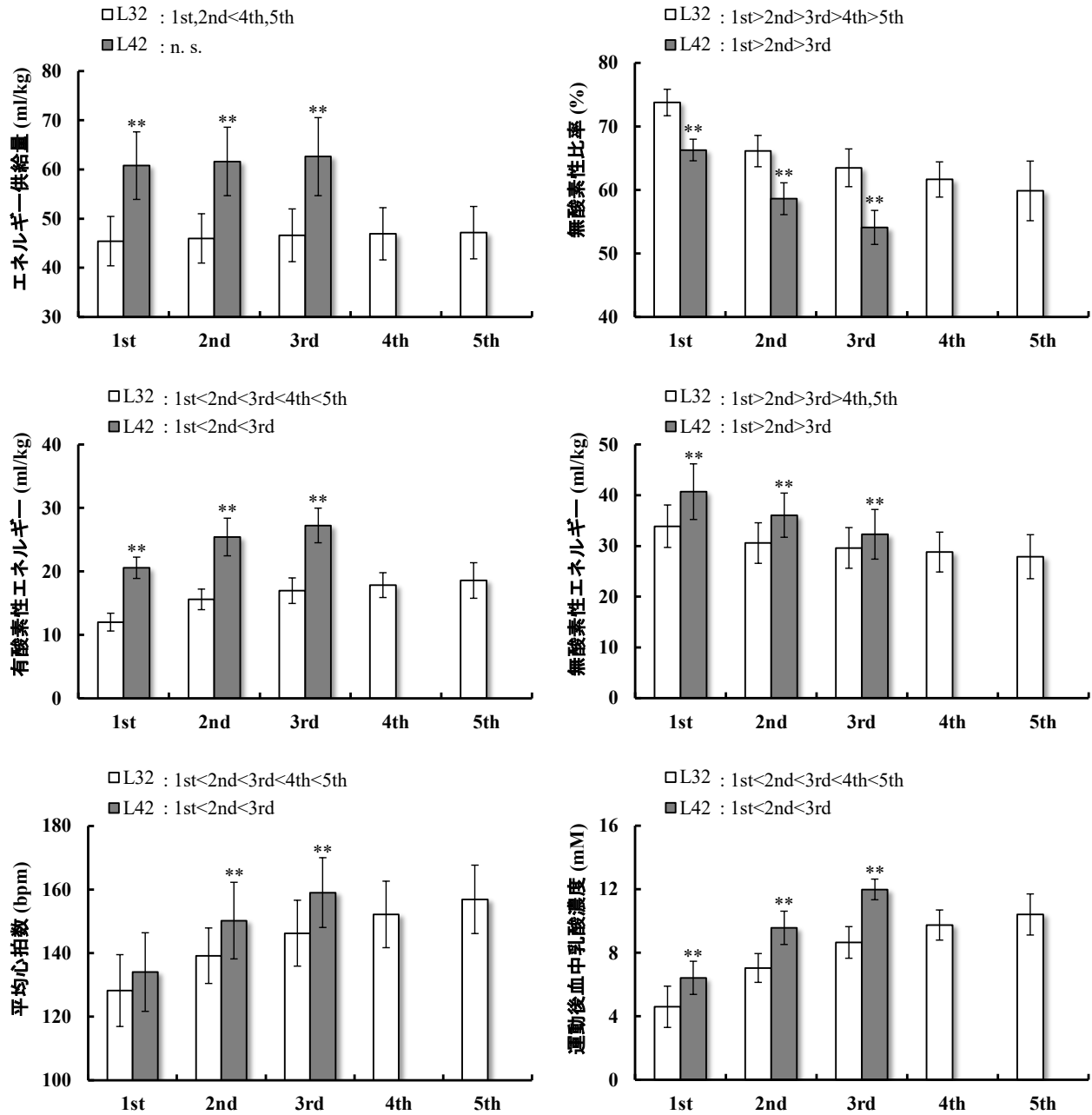


図19 SITテストにおけるL32とL42の回数ごとの比較

*, **: 試技間比較 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

<(>): 試技内比較 ($p < 0.01 \sim 0.05$)

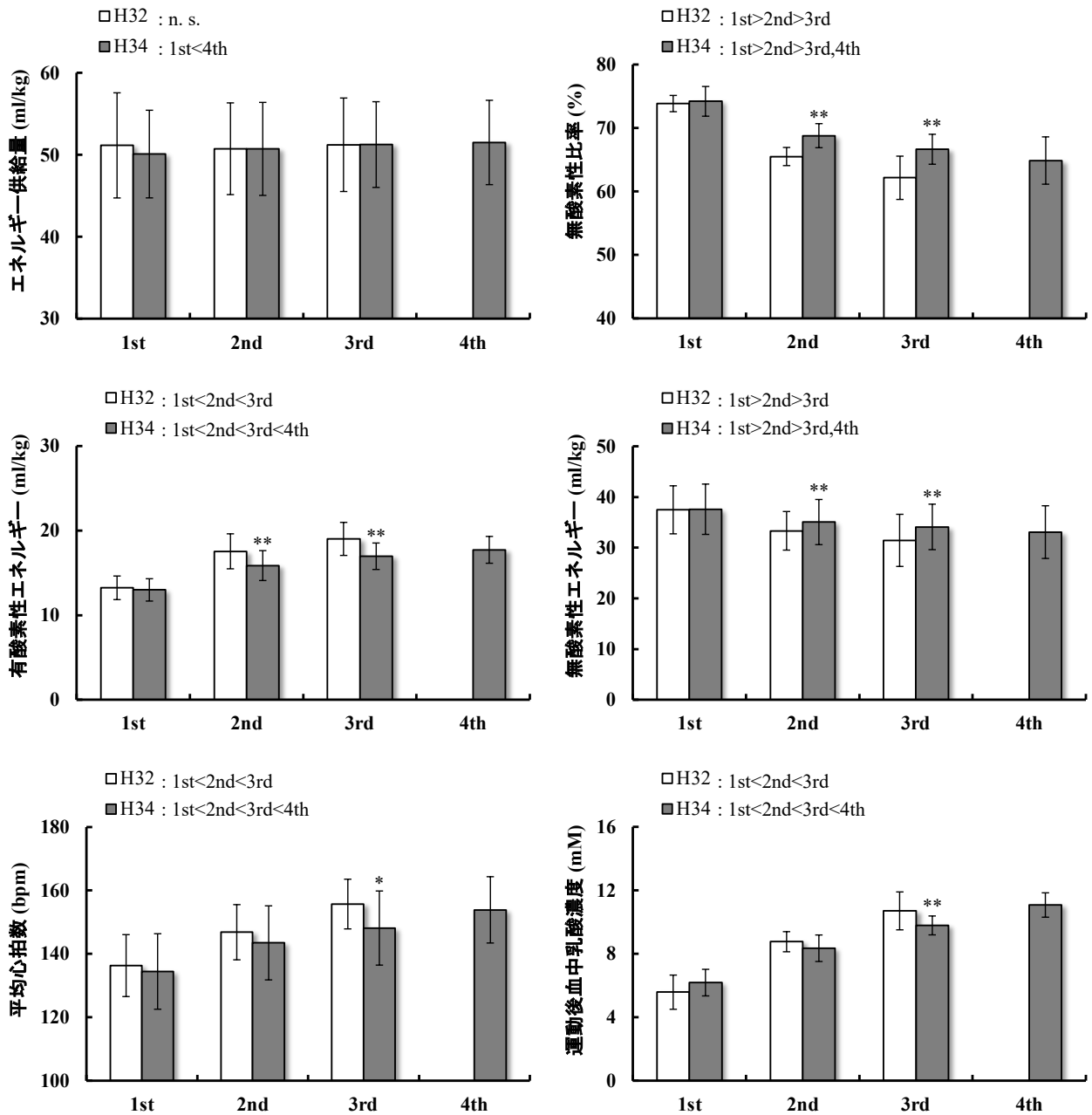


図 20 SIT テストにおける H32 と H34 の回数ごとの比較

*, **: 試技間比較 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

< (>): 試技内比較 ($p < 0.01 \sim 0.05$)

4. 考察

本研究課題の目的は、4種類の間欠的スプリントを行わせ、構成要因となる運動強度、運動時間、休息時間が運動中のエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることであった。

各SITテストにおけるエネルギー代謝の共通する点に関して、回数を追うごとに、有酸素性エネルギー、平均心拍数、血中乳酸濃度は有意に高まり、無酸素性エネルギー、無酸素性比率は有意に低下した(図18, 図19, 図20)。血中乳酸濃度は身体的負荷の指標でもあることから(八田, 2008)、間欠的スプリントにおいて回数を追うごとに身体的負荷が高まることが示唆された。また、回数を追うごとに有酸素性エネルギーは増加し、無酸素性エネルギーは減少することで、無酸素性代謝の貢献が徐々に低下することが示唆された。先行研究でも同様に、間欠的スプリントにおいて回数を追うごとに無酸素性比率が低下したことが報告されている(Peyrebrune et al., 2014)。一方、本研究課題で用いた運動プロトコルは、その先行研究と比較して休息時間が大きく異なる。すなわち、先行研究では30秒の運動を30秒の休息時間をはさみ4回行うプロトコルであったが(Peyrebrune et al., 2014)、本研究課題では30秒もしくは40秒の運動を2分もしくは4分の休息時間で行った。このような長さの休息時間を用いた間欠的スプリント中のエネルギー代謝を検討したものはなく、新しい知見である。また、各試技の最高血中乳酸濃度および試技中の最高酸素摂取量については試技間で有意差が認められなかった(表9)。前述した通り血中乳酸濃度は身体的負荷の指標として解釈でき(八田, 2008)、いずれの試技でも同程度の身体的負荷が与えられていたと推察される。また、試技中の最高酸素摂取量に関しては、 $\dot{V}O_2\max$ テストにおける $\dot{V}O_2\max$ と同等の値を示した。一方で、一定水準を超える酸素摂取量の累積時間に関しては、 $80\%\dot{V}O_2\max$ 水準においてのみL42がH32より高い値を示した(図17)。有酸素性代謝への刺激の基準として、最低でも $90\%\dot{V}O_2\max$ を超える酸素摂取量が1分以上の場合に議論の対象となっている(Buchheit and Laursen, 2013a)。そのため、本研究課題で用いた間欠的スプリントはすべての試技で有酸素性代謝に対し瞬間的に

高い負荷が与えられていたものの、量的な負荷は小さかったといえる。一方、無酸素性代謝に対する負荷を評価する指標としては、最大酸素借に対する総無酸素性エネルギー（総酸素借）の割合が度々用いられている（Tabata et al., 1997; 森ほか, 2011; 森ほか, 2012）。Tabata et al. (1997) は、前述したタバタプロトコル中の総無酸素性エネルギーを算出し、最大酸素借の 144%であったことを報告している。本研究課題において最大酸素借は測定していないが、参考値として研究課題 1-2 における 60 秒全力運動中の無酸素性エネルギー (59.9 ± 4.2 ml/kg, 表 6) を最大酸素借として用いると（Gastin et al., 1995）、最も総無酸素性エネルギーが大きい L32 で 299%であり、最も小さい L42 で 187%であった。このことから、本研究課題で用いた SIT テストは、無酸素性代謝に対する負荷が大きかったと推察される。

運動強度の異なる間欠的スプリントの比較において、H32 は、L32 と比較して、反復回数が有意に少なく、それに伴い総エネルギー供給量、総有酸素性エネルギー、総無酸素性エネルギーは有意に小さい値を示し、無酸素性比率は有意に高い値を示した（表 9）。一方、1st~3rd において、無酸素性比率は試技間で有意差が認められなかった（図 18）。なお、運動強度の指標である平均パワーと生理的相対強度は、L32 と比較して H32 で有意に高かった（表 9）。本研究課題では、WAnT を実施していないため力学的相対強度（WAnT の平均パワーを 100%とする相対強度）を算出することができないが、研究課題 1-1 の値を参考に算出すると L32 で約 78%、H32 で約 85%であった。生理的相対強度は、L32 で $169 \pm 10\% \dot{V}O_{2\max}$ 、H32 で $184 \pm 12.4\% \dot{V}O_{2\max}$ であった。「タバタプロトコル」で有名な 20 秒運動 10 秒運動を疲労困憊まで行わせる間欠的スプリントでは、運動強度が $170\% \dot{V}O_{2\max}$ に設定されており、それは 50 秒程度で疲労困憊に至る強度と説明されている（田畑, 2015）。このことから、L32 はタバタプロトコルと同等の強度であり、H32 は更に強度が高い。一般的に、運動強度が高いほど無酸素性比率が高いと考えられてきたが（Hoffman, 2002; 尾懸, 2007; 宮丸・宮丸, 1978）、研究課題 1 において 40 秒以下の運動では必ずしもそうではないことが明らかとなっている。その結果と同様に、L32 と H32 では単一運動の強度がそれ

それぞれ異なるが、1st~3rd では無酸素性比率に試技間で有意差は認められなかった。しかしながら、研究課題1は単一運動での結果であり、休息を挟んで行う間欠的スプリントであっても運動強度によってエネルギー供給比率が変わらなかったことは新しい知見である。一方、試技全体では、H32がL32より無酸素性比率が有意に高い値を示した。これについて、試技内における回数ごとのエネルギー供給比率に着目すると、L32では4回以上の反復が可能であるために4回目、5回目でも無酸素性比率が次第に低下したことが影響している（ $1st > 2nd > 3rd > 4th > 5th$ ，図18）。すなわち、L32とH32では、1~3回目までは無酸素性比率に差がないものの、L32では4回目、5回目と運動を繰り返すことで有酸素性代謝の貢献が次第に大きくなり、結果的に試技全体では無酸素性比率がH32より低い値を示したといえる。これらのことから、間欠的スプリントにおける強度設定に関して、運動強度は1回ごとのエネルギー供給比率に影響は与えないものの、より高い強度では1回あたりの無酸素性エネルギー供給量が大きくなり、強度を低くすることで反復回数が増え、総無酸素性エネルギー供給量が大きくなることが示唆された。

運動時間の異なる間欠的スプリントの比較において、L42はL32と比較して、反復回数が有意に少なく、それに伴い総エネルギー供給量、総有酸素性エネルギー、総無酸素性エネルギーは有意に小さい値を示し、無酸素性比率は有意に低い値を示した（表9）。一方、試技中の1st~3rdにおいてL42はL32と比較して、いずれも有酸素性エネルギー、無酸素性エネルギーが有意に大きく、無酸素性比率は有意に低い値を示した（図19）。なお、各試技における1回あたりの運動時間はL32が30秒でL42が40秒であった。先行研究により、運動時間の長い運動ほど無酸素性比率が小さいことが知られており（Duffield and Dawson, 2003; Gastin, 2001; Medbø and Tabata, 1989）、間欠的スプリントであっても同様にL42における1st~3rdそれぞれの無酸素性比率は、L32よりも有意に低い値を示した（図19）。それに関して、L42における1st~3rdそれぞれの有酸素性エネルギーおよび無酸素性エネルギーはいずれもL32よりも有意に大きい値を示したが、無酸素性比率が有意に低い値を示したことから、特に有酸

素性エネルギーが顕著に大きかったと推察される。また、L42 は L32 と比較して、反復回数が有意に少ないにもかかわらず、試技全体の無酸素性比率は有意に低い値を示した（表 9）。間欠的スプリントでは回数を追うごとに無酸素性比率が低下するため（図 18, 図 19, 図 20）、L32 と H32 との比較では反復回数の多い L32 で試技全体の無酸素性比率は有意に低い値を示した（表 9）。しかしながら、L42 と L32 との比較では反復回数の多い L32 で試技全体の無酸素性比率が有意に高かった。このことは、L42 における 1~3 回の無酸素性比率が顕著に低かったためだと考えられ、エネルギー供給比率に対する運動強度の影響が大きいといえる。これらのことから、間欠的スプリントにおける運動時間の設定に関して、1 回あたりの運動時間がより長い設定では運動中の有酸素性比率が高くなり、運動時間を短くすることで無酸素性比率は高くなり、総無酸素性エネルギー供給量もより大きくなることが示唆された。

休息時間の異なる間欠的スプリントの比較において、H34 は H32 と比較して、反復回数が有意に多く、それに伴い総エネルギー供給量、総有酸素性エネルギー、総無酸素性エネルギーは有意に大きい値を示し、無酸素性比率は有意に高い値を示した（表 9）。また、試技中の 2nd と 3rd において H34 は H32 と比較して、有酸素性エネルギーは有意に小さく、無酸素性エネルギーは有意に大きく、無酸素性比率は有意に高い値を示した。なお、各試技における回数間の休息時間は H32 が 2 分で H34 が 4 分であった。間欠的スプリントにおける休息時間の相違がエネルギー代謝に与える影響について検討した研究はこれまでなく、研究課題 2-1 でレペティションスプリント（30 秒全力運動 2 回）における休息時間（4~20 分）の影響について検証したのみである。その研究課題 2-1 において 2 回目での有酸素性エネルギーは試技間に有意差が認められなかった（表 7）。一方、本研究課題の 2nd と 3rd において H34 は H32 と比較して有酸素性エネルギーが有意に低い値を示した。（図 20）。これらのことは、レペティションスプリントとは異なり間欠的スプリントでは、2~3 回目での有酸素性エネルギー供給量が休息時間の長短に影響を受けることを示唆している。その要因として、間欠的スプリントとレペティションスプリントでは、運動強度およびペース配分の相

違が挙げられる。レペティションスプリントは全力強度のオールアウト運動であるため、1回目の運動で疲労困憊まで至るのに対し、間欠的スプリントでは全力を下回る強度（約85%力学的相対強度）での一定ペース運動であるため余力を残した状態で1回目や2回目を終える。そのため、レペティションスプリントでは、1回目での身体的負荷が大きいことから代謝変動も大きく生じることが推測される。実際に身体負荷への指標となる運動後血中乳酸濃度（八田，2008）は、間欠的スプリントの1回目終了時で6 mM前後（H32: 5.6 ± 1.1 mM; H34: 6.2 ± 0.8 mM）であったのに対し（図20）、レペティションスプリントの1回目終了時では 11.1 ± 1.0 mMであった（表7）。したがって、1回目による有酸素性代謝の亢進（Parolin et al., 1999）が強く引き起こされたために休息時間に関わらず2回目の有酸素性エネルギーに有意差がなかったものと推察される。また、H34はH32と比較して反復回数が有意に多かったが（表9）、4回目の無酸素性比率は3回目と有意差が認められなかった（図20）。他の試技では疲労困憊に至るまで無酸素性比率が回数を追うごとに有意に低下したが、H34でのみ3回目で下げ止まりが生じた。このことから、エネルギー供給比率に対する休息時間の影響は大きいといえる。これらのことから、間欠的スプリントにおける休息時間の設定に関して、回数間の休息時間がより長い設定では一回あたりの無酸素性比率が高くなり、総無酸素性エネルギー供給量も大きくなり、休息時間を短くすることで1回あたりの有酸素性エネルギー供給量は大きくなることが示唆された。

5. 要約

本研究課題の目的は、様々な間欠的スプリントを行わせ、構成要因となる運動強度、運動時間、休息時間が運動中のエネルギー代謝に与える影響を明らかにすることであった。得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 間欠的スプリントにおいて、回数を追うごとに、有酸素性エネルギー供給量、平均心拍数、血中乳酸濃度が有意に高まり、無酸素性エネルギー供給量、無酸素性

比率は有意に低下した。

- (2) 運動強度が高い間欠的スプリントは、低いものと比較して、反復回数が有意に少なく、それに伴い総エネルギー供給量、総有酸素性エネルギー供給量、総無酸素性エネルギー供給量は有意に小さい値を示し、試技全体の無酸素性比率は有意に高い値を示した。一方、試技中の1~3回目ごとの比較では、無酸素性比率は試技間で有意差が認められなかった。
- (3) 運動1回あたりの運動時間が長い間欠的スプリントは、短いものと比較して、反復回数が有意に少なく、それに伴い総エネルギー供給量、総有酸素性エネルギー供給量、総無酸素性エネルギー供給量は有意に小さい値を示し、試技全体の有酸素性比率は有意に高い値を示した。一方、試技中の1~3回目ごとの比較では、運動時間の長い試技で1~3回目での有酸素性および無酸素性エネルギー供給量は有意に大きい値を示し、無酸素性比率は有意に低い値を示した。
- (4) 回数間の休息時間が長い間欠的スプリントは、短いものと比較して、反復回数が有意に多く、それに伴い総エネルギー供給量、総有酸素性エネルギー供給量、総無酸素性エネルギー供給量は有意に大きい値を示し、試技全体の無酸素性比率は有意に高い値を示した。一方、試技中の1~3回目ごとの比較では、休息時間の長い試技で2~3回目の有酸素性エネルギー供給量は有意に小さく、無酸素性エネルギー供給量は有意に大きい値を示し、無酸素性比率は有意に高い値を示した。

以上の結果より、間欠的スプリントにおいて反復回数が多くなるような構成要因の設定をすることで有酸素性および無酸素性エネルギー供給量が大きくなることが示唆された。一方、エネルギー供給比率に着目すると運動時間と休息時間が大きな影響を与えており、長い運動時間を用いることで有酸素性比率は高くなり、長い休息時間を用いることで無酸素性比率が高くなることが示唆された。

第10章 討論

本研究の目的は、短時間運動および間欠的高強度運動におけるエネルギー代謝を分析し、スプリントトレーニングに用いられる運動のエネルギー代謝特性を包括的に明らかにすることであった。これまでトレーニング現場では、競技者のコンディションや環境要因、トレーニング計画などを踏まえ指導者や競技者の経験などによってトレーニング手段が考案、選択されてきた。そのため、スプリントトレーニングの種類は無限に存在し、そのすべてのエネルギー代謝を分析することは非現実的である。そこで本研究では、無数にあるスプリントトレーニングのエネルギー代謝を推測、理解するために、基礎的な短時間運動および代表的な間欠的運動を対象に分析した。本章では、本研究で得られた結果をもとにエネルギー代謝の観点から代表的なスプリントトレーニングの特徴について推察することとする。また、競技レベルと性差については、本研究で扱っていないが、コーチングにおいて重要な観点であるため、それらがエネルギー代謝に与える影響についても推察する。それらの推察によって、短時間高強度運動におけるエネルギー代謝の理解を深め、より合目的なトレーニングの考案や選択につながる示唆を得ることを本章の目的としたい。一方で、得られた結果や先行研究から類推することには限界も生じることから今後の課題についても記述する。

1. 対象とするスプリントトレーニングについて

スプリント種目は、陸上競技、スピードスケートや競泳などの競技に多く存在するが、著者の専門が陸上競技であること、また、具体的なトレーニング方法についての文献が比較的多いことから、陸上競技短距離走のトレーニングに絞って記述することとする。短距離走は走運動であり、本研究で用いた自転車運動とは運動様式が異なるが、運動時間に対するエネルギー供給比率の値は同様の様相を示すことが分かっており (Duffield and Dawson, 2003; Medbø and Tabata, 1989)、有酸素性代謝と無酸素性代謝の連関という生理学的機序 (de Aguiar et al., 2015; Korzeniewski and Zoladz, 2004;

Rossiter et al., 2002; Sahlin et al., 1988; Whipp et al., 1999) を考慮した上でも運動様式でエネルギー代謝が大きく異なるとは考えにくい。この点については、「運動様式による限界」に前述した通りである。したがって、運動様式は異なるものの本研究で得られた値や先行研究を用いて推察を行う。

短距離走には、数多くのスプリントトレーニングが存在し、運動時間は数秒から 90 秒程度の運動が単発もしくは間欠的に複数回行われる。運動強度は、努力度として 50~100% の範囲で用いられており (山元, 2019), 生理的相対強度に換算すると少なくとも $100\% \dot{V}O_2\max$ を超える強度と考えられる。文献によってトレーニング方法の呼称が様々であるが、代表的なトレーニングとしてテンポ走, セット走, レペティショントレーニングの 3 つを取り挙げる。なお, 本研究で対象とした運動は 20 秒以上であったため, 10 秒以下の運動を用いたトレーニングについては, 割愛した。

各スプリントトレーニングについて記述する上で, 本研究の主要な結果を図表にまとめた。値はすべて平均値である。図 21 は, 短時間運動における運動強度, 運動時間ごとの有酸素性比率である。値は, 研究課題 1-2 における 60 秒全力運動時の 20, 30, 40, 50, 60 秒時点の総エネルギー供給量と研究課題 1-1 および研究課題 1-2 で示した有酸素性比率を用いて算出した。表 10 には, 短時間運動におけるエネルギー代謝を値で示した。エネルギー供給比率は, 研究課題 1-1 および研究課題 1-2 の値を記載し, その比率を用いて研究課題 1-2 における 60 秒テストと 60WAnT の総エネルギー供給量から有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーを運動強度, 運動時間ごとに算出した。表 11 は, 間欠的高強度運動における有酸素性エネルギー, 無酸素性エネルギー, エネルギー供給比率の回数ごとの変化率である。値は, 研究課題 2-1 と 2-2 から算出した。表 12 は, 短時間運動および間欠的高強度運動における最高酸素摂取量と一定水準を超える酸素摂取量の累積時間である。それらの算出には各運動中における 10 秒ごとの酸素摂取量を分析し, 最も高い値を最高酸素摂取量とし, $90\% \dot{V}O_2\max$ と $80\% \dot{V}O_2\max$ の水準を超えた累積時間を 1 秒単位でそれぞれ算出した。表 13 は, 短時間運動および間欠的高強度運動における運動後最高血中乳酸濃度と総無酸素性

エネルギー（総酸素借）である。運動後最高血中乳酸濃度は、研究課題 1-1 の 30 秒テストと WAnT, 研究課題 2-2 の 60 秒テストと 60WAnT の値を用いて算出した。20, 40, 50 秒の値は、それら 30 秒運動と 60 秒運動の値を用い、回帰直線式によって算出した。総無酸素性エネルギーは、最大酸素借との相対値で示した。その最大酸素借の値は、研究課題 1-2 における 60 秒全力運動中の無酸素性エネルギーを参考値として利用した (Gastin et al.,1995)。

(1) テンポ走

テンポ走とは、100~600m 程度の距離を全力強度以下のスピードでリズムよく（余裕を持って）走るトレーニング方法である（尾縣，2007）。休息をはさみ複数回行われることが多いが、単発でも用いられる。短距離走にとって、頻繁に用いられるトレーニング方法の一つであり、走技術習得や持久力向上を目的として行われることが多い（山元，2019）。特に、オフシーズンのトレーニングや 400m 走競技者にとっては、有酸素性能力の向上を目的として、長めの距離（300~600m）がよく用いられる（阿部，2004；高野，2007）。ここでは、走技術について言及しないため、300m 以上を扱うテンポ走についてエネルギー代謝の観点から検討する。特に単発のテンポ走には、運動強度、運動時間ごとのエネルギー代謝一覧が参考になる（表 10）。運動時間が長いほど、有酸素性比率が大きくなり、50~60 秒の運動では、強度が低いほど有酸素性比率がさらに大きくなる（図 21，表 10）。300m のテンポ走では、40 秒程度の運動時間になるため、有酸素性比率が約 30%になる。400m のテンポ走では、およそ 50~60 秒の運動になるため、有酸素性比率が 35~40%程度になる。ただし、運動強度が低いほど、運動時間は長くなるため、運動強度の影響と相まって有酸素性代謝の割合が大きくなる。しかしながら、有酸素性代謝への負荷という観点では、非常に弱い可能性がある。表 12 は、各運動の最高酸素摂取量と一定水準を超える酸素摂取量の累積時間である。その累積時間における有酸素性代謝への刺激の基準として、最低でも 90% $\dot{V}O_2\max$ を超える酸素摂取量が 1 分以上の場合に議論の対象となっている

(Buchheit and Laursen, 2013a). このことから、それが 1 分未満である場合は、最大酸素摂取量と同等の高い最高酸素摂取量を引き出す必要があると考えられるため (Tabata et al., 1997), 60 秒までの単発運動では有酸素性代謝への負荷が弱いといえる。一方、テンポ走は、600m で行われることもある。運動時間にして 90 秒程度であることから、運動強度によっては、高い酸素摂取量が得られる可能性がある。実際に、90 秒程度で疲労困憊に至る運動では、最大酸素摂取量の $94 \pm 3\%$ まで達したことが報告されている (Wilkerson et al., 2004)。全力強度以下で 70~90 秒間の運動は十分に検証されていないものの、Wilkerson et al. (2004) が示している代表的な対象者 1 名のデータでは、運動強度が低いほど最高酸素摂取量が低い値を示している。研究課題 1-1 の考察で前述した通り、酸素摂取量は無酸素性代謝と関連しているため (Korzeniewski and Zoladz, 2004; Rossiter et al., 2002; Sahlin et al., 1988), 運動強度が低ければその分だけ酸素摂取量も低くなる可能性は高い。そのため、600m のテンポ走を行った場合でも、有酸素性代謝への負荷が弱い可能性がある。したがって、テンポ走を単発で行う際に有酸素性能力の向上を見込むのは難しいと言える。

一方、複数回行わせる場合には、2 回目および 3 回目に有酸素性代謝の貢献が高まり、高い酸素摂取量が引き出される可能性がある。実際に、テンポ走複数回に類似する運動である間欠的スプリントでは、試技中の最高酸素摂取量が 90% を超える (表 12)。各試技は、運動時間 30~40 秒で休息时间 2~4 分であり、テンポ走と比較すると休息時間は比較的短い (テンポ走複数回での休息时间: 3~15 分, 山崎, 2009)。比較的長い休息時間が用いられる理由としては、テンポ走では余裕を持って走るために身体を十分回復させる必要があるからであると考えられる。全力強度以下のテンポ走を長い休息時間で複数回行わせた場合に、どの程度高い酸素摂取量が引き出されるのかについては不明であるが、1 回の運動により酸化系酵素活性が高まるため (Putman et al., 1995), 2 回目以降では、酸素摂取量が高くなると考えられる。特に 1 回目の運動が高い負荷 (長い運動時間や高い運動強度) になるほど、その酵素活性は高まる可能性があり (Wittekind and Beneke, 2011), 長い休息时间 (~20 分) を挟んだ場合でも 2

回目の運動における酸素摂取量に影響を与え（研究課題 2-1, 表 7), 最高酸素摂取量は高くなると推察される. 60 秒の運動では, 80 %の相対強度であっても酸素摂取量は $80\% \dot{V}O_{2\max}$ を超えるため (表 10), 2 回目では, 更に高い酸素摂取量を引き出す可能性は高い. したがって, 明確な運動距離 (運動時間) を示すことはできないものの, テンポ走であっても長い距離で複数回行うことで高い酸素摂取量を引き出すことができ, それが有酸素性代謝に対する負荷になる可能性がある.

(2) セット走 (間欠的スプリント)

セット走とは, 約 80 %強度で 200~600m 走を複数回行うトレーニングである (土江, 2011). 名称は様々であるが, 休息時間は 3~10 分が用いられ, 内容としては間欠的スプリントと同様である. このトレーニングは, 解糖系能力の改善などによってスピード持久力を高める目的で行われている (山元, 2019). 特に, オフシーズンのトレーニングや 400m 走競技者に用いられることが多く, 前 400m 走世界記録保持者のマイケル・ジョンソンは, 頻繁に用いていたようである (Friedlander, 2005). 表 13 は, 本研究で行った実験における各運動の最高血中乳酸濃度と総無酸素性エネルギーを示したものである. 間欠的スプリントにおける最高血中乳酸濃度は, 60 秒全力運動に匹敵する高い値であるといえる. 一方, レペティションスプリントは, さらに高い値を示している. そのため, 間欠的スプリントでは, 解糖系エネルギー代謝に対し, 高い負荷を与えることができるものの, 最大限の負荷までは到達しないといえる. 一方, 総無酸素性エネルギー (総酸素借) の観点では, レペティションスプリントと比較しても大きい値を示している. Tabata et al. (1996) は, 最大酸素借を基準としてトレーニング負荷の評価をしており, 研究課題 1-2 における 60 秒全力運動中の酸素借を参考値とすると (Gastin et al., 1995), 間欠的スプリントは最大酸素借と比較して 2~3 倍の負荷に相当する. したがって, セット走 (間欠的スプリント) は, 無酸素性代謝に対して量的に非常に大きな負荷を与えることができ, 瞬間的な負荷という点では, レペティションスプリントに次ぐ強い負荷が与えられるといえる.

休息時間が 2 分の間欠的スプリントは、ベース持久力トレーニングとして有酸素性能力の向上を目的に行われることもある（ハート，2001）。実際に，最高酸素摂取量は，約 95% $\dot{V}O_2\text{max}$ に達することから（表 12），有酸素性代謝に対し強い負荷を与えることができる。一方，酸素摂取量の累積時間は，90% $\dot{V}O_2\text{max}$ 水準で 1 分にも及ばないため，量的なトレーニング負荷は小さいといえる。したがって，有酸素性代謝により大きな負荷を与えるためには，運動強度を低くして運動時間または反復回数を増大させる必要があるだろう。

(3) レペティショントレーニング（レペティションスプリント）

レペティショントレーニングとは，レース形式に近い走行距離および運動時間に設定し，最大努力の運動を 2~3 回繰り返す方法であり，完全回復するような長い休息时间（15~30 分）が用いられる（山元，2019；山崎，2009）。最大スピードや種目に特異的なスピード持久力を高める目的で行われるものの（村木，1994），試合と同等のかなり高い負荷であることから（山元，2019），トレーニングに用いられる頻度は多くなく，シーズン中に用いられることが大半である。実際に，レペティションスプリントにおける最高血中乳酸濃度は，単発運動や間欠的スプリントと比較して高い値を示しており（表 13），血中乳酸濃度は身体負荷を反映する指標であることから（八田，2008），負荷が非常に大きいことがわかる。また，研究課題 2-1 で行ったレペティションスプリントは，運動時間が 30 秒であったことから，より長い運動時間ではより高い血中乳酸濃度が測定される可能性もある。総無酸素性エネルギー（総酸素借）の観点では，研究課題 1-2 における 60 秒全力運動中の酸素借を参考値とすると（Gastin et al., 1995），間欠的スプリントは，最大酸素借と比較して約 1.5 倍の負荷に相当する（表 13）。したがって，無酸素性代謝に対する負荷としては瞬間的および量的な負荷がともに高いと考えられ，間欠的スプリントと比較すると特に瞬間的な負荷が大きく，量的な負荷はそれに次ぐといえる。しかしながら，レペティションスプリントは，負荷が高いため，バーンアウトや故障につながりやすいという指摘もあることから（山

崎, 2009), トレーニングに組み込むことには注意が必要である。

有酸素性代謝に対する負荷としては, 最高酸素摂取量は $90\% \dot{V}O_{2\max}$ を下回り, $90\% \dot{V}O_{2\max}$ 水準の酸素摂取量累積時間も当然ながら少ないため (表 12), 有酸素性能力の改善はあまり見込めない。しかしながら, 運動時間が長い分だけ酸素摂取量は高まると推測されるため, 40~60 秒などのような比較的長い運動で行わせた場合には, 最高酸素摂取量が $90\% \dot{V}O_{2\max}$ を上回る可能性がある。また, 乳酸がシグナルとなって末梢 (筋) の有酸素性能力が高まる可能性もある (MacInnis and Gibala, 2017)。すなわち, 血中乳酸濃度が高いことは, 乳酸産生が筋内のミトコンドリアによる酸化速度を大きく上回っていることになり (八田, 2008), 負荷がかかっていることになる。実際に, レペティションスプリントでミトコンドリアの合成が高まったとする報告は複数あり (MacInnis and Gibala, 2017), 末梢の有酸素性能力が最高酸素摂取量の制限要因になっている場合には改善される余地があるといえる。これについては, 高い血中乳酸濃度がシグナルとなるため (MacInnis and Gibala, 2017), レペティションスプリントに限らず, 間欠的スプリントや単発の運動でも適応が起こりうる。その中で, 総運動時間の長い間欠的スプリントは, 長い間高い血中乳酸濃度を維持することになるため, 刺激としての作用時間は長くなる。ただし, それが直接トレーニング効果の差となるかは現在のところ不明である。

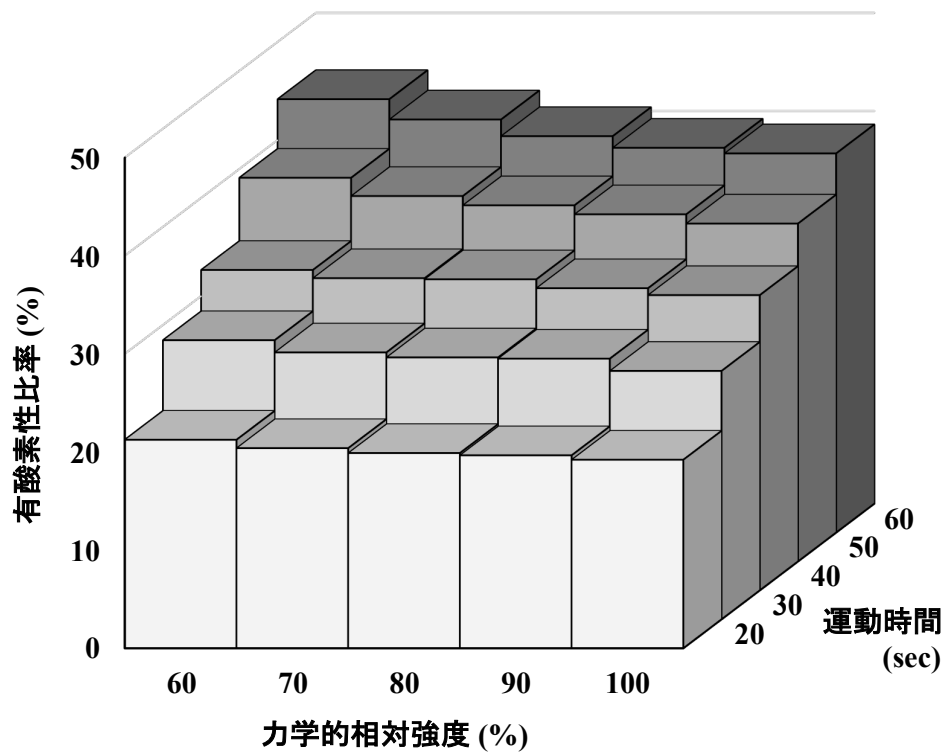


図 21 短時間運動における運動強度，運動時間ごとの有酸素性比率

表10 短時間運動における運動強度，運動時間ごとのエネルギー代謝

| | | 力学的相対強度 (%) | | | | |
|----------------------|-----|-------------|----|----|----|-----|
| | | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 有酸素性エネルギー (ml/kg) | 20秒 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 |
| | 30秒 | 10 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| | 40秒 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 |
| | 50秒 | 20 | 23 | 25 | 28 | 30 |
| | 60秒 | 26 | 29 | 32 | 34 | 38 |
| 無酸素性エネルギー (ml/kg) | 20秒 | 20 | 24 | 28 | 31 | 35 |
| | 30秒 | 26 | 31 | 35 | 40 | 45 |
| | 40秒 | 30 | 36 | 41 | 47 | 52 |
| | 50秒 | 32 | 38 | 44 | 51 | 57 |
| | 60秒 | 33 | 40 | 47 | 53 | 60 |
| 有酸素性比率 (%) | 20秒 | 21 | 20 | 20 | 20 | 19 |
| | 30秒 | 28 | 27 | 27 | 27 | 25 |
| | 40秒 | 33 | 32 | 32 | 31 | 30 |
| | 50秒 | 39 | 37 | 36 | 35 | 34 |
| | 60秒 | 44 | 42 | 40 | 39 | 39 |
| 無酸素性比率 (%) | 20秒 | 79 | 80 | 80 | 80 | 81 |
| | 30秒 | 72 | 73 | 73 | 73 | 75 |
| | 40秒 | 67 | 68 | 68 | 69 | 70 |
| | 50秒 | 61 | 63 | 64 | 65 | 66 |
| | 60秒 | 56 | 58 | 60 | 61 | 61 |

表 11 間欠的高強度運動における各指標の変化率(%)

| レペティションプリント 30秒全力×2回 | | 回数間の休息时间 | | | |
|-------------------------|---------|----------|--------|--------|-------|
| | | 4min | 10 min | 15 min | 20min |
| 有酸素性エネルギー | 1st-2nd | 28 | 15 | 19 | 22 |
| 無酸素性エネルギー | 1st-2nd | -26 | -13 | -11 | -9 |
| 有酸素性比率 | 1st-2nd | 49 | 22 | 24 | 24 |
| 無酸素性比率 | 1st-2nd | -14 | -7 | -7 | -7 |

| 間欠的スプリント 30 or 40秒×疲労困憊まで | | 試技 | | | |
|------------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|
| | | L32 | H32 | H34 | L42 |
| 有酸素性エネルギー | 1st-2nd | 30 | 33 | 22 | 23 |
| | 2nd-3rd | 9 | 9 | 7 | 7 |
| | 1st-3rd | 41 | 44 | 31 | 32 |
| 無酸素性エネルギー | 1st-2nd | -10 | -11 | -7 | -11 |
| | 2nd-3rd | -3 | -6 | -3 | -11 |
| | 1st-3rd | -13 | -16 | -9 | -21 |
| 有酸素性比率 | 1st-2nd | 29 | 32 | 21 | 23 |
| | 2nd-3rd | 8 | 10 | 7 | 11 |
| | 1st-3rd | 39 | 45 | 30 | 36 |
| 無酸素性比率 | 1st-2nd | -10 | -11 | -7 | -12 |
| | 2nd-3rd | -4 | -5 | -3 | -8 |
| | 1st-3rd | -14 | -16 | -10 | -18 |

L32: 30秒一定強度間欠的運動 (約170 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息H32: 30秒一定強度間欠的運動 (約185 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息H34: 30秒一定強度間欠的運動 (約185 % $\dot{V}O_2$ max) 4分休息L42: 40秒一定強度間欠的運動 (約170 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息

表 12 各運動の最高酸素摂取量と一定水準を超える酸素摂取量の累積時間

| 短時間運動 | 力学的相対強度 (%) | | | | | |
|--|-------------|----------|--------|--------|--------|----|
| | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| 最高酸素摂取量 (% $\dot{V}O_2$ max) | 20秒 | 26 | 30 | 33 | 35 | 48 |
| | 30秒 | 42 | 45 | 53 | 62 | 73 |
| | 40秒 | 59 | 64 | 70 | 76 | 79 |
| | 50秒 | 67 | 74 | 78 | 82 | 79 |
| | 60秒 | 71 | 77 | 81 | 84 | 81 |
| 酸素摂取量累積時間 @90% $\dot{V}O_2$ max (sec) | 20秒 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 30秒 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 40秒 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 50秒 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 |
| | 60秒 | 0 | 1 | 1 | 3 | 2 |
| 酸素摂取量累積時間 @80% $\dot{V}O_2$ max (sec) | 20秒 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 30秒 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 40秒 | 0 | 0 | 0 | 2 | 9 |
| | 50秒 | 0 | 1 | 5 | 9 | 12 |
| | 60秒 | 0 | 4 | 11 | 16 | 19 |
| レペティションプリント | | 回数間の休息时间 | | | | |
| 30秒全力×2回 | | 4 min | 10 min | 15 min | 20 min | |
| 最高酸素摂取量 (% $\dot{V}O_2$ max) | | 87 | 86 | 85 | 89 | |
| 酸素摂取量累積時間 @90% $\dot{V}O_2$ max (sec) | | 7 | 7 | 1 | 6 | |
| 酸素摂取量累積時間 @80% $\dot{V}O_2$ max (sec) | | 9 | 13 | 13 | 10 | |
| 間欠的スプリント | | 試技 | | | | |
| 30 or 40秒×疲労困憊まで | | L32 | H32 | H34 | L42 | |
| 最高酸素摂取量 (% $\dot{V}O_2$ max) | | 96 | 95 | 95 | 98 | |
| 酸素摂取量累積時間 @90% $\dot{V}O_2$ max (sec) | | 24 | 18 | 22 | 30 | |
| 酸素摂取量累積時間 @80% $\dot{V}O_2$ max (sec) | | 41 | 26 | 36 | 50 | |
| L32: 30秒一定強度間欠的運動 (約170 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息 | | | | | | |
| H32: 30秒一定強度間欠的運動 (約185 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息 | | | | | | |
| H34: 30秒一定強度間欠的運動 (約185 % $\dot{V}O_2$ max) 4分休息 | | | | | | |
| L42: 40秒一定強度間欠的運動 (約170 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息 | | | | | | |

表13 各運動の運動後最高血中濃度と総無酸素性エネルギー

| 短時間運動 | | 力学的相対強度 (%) | | | | |
|------------------|-----|-------------|-----|-----|-----|------|
| | | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 最高血中乳酸濃度 (mM) | 20秒 | 3.2 | 4.3 | 5.3 | 7.5 | 10.1 |
| | 30秒 | 3.6 | 4.9 | 5.9 | 8.0 | 10.6 |
| | 40秒 | 4.1 | 5.4 | 6.6 | 8.4 | 11.1 |
| | 50秒 | 4.6 | 5.9 | 7.3 | 8.9 | 11.6 |
| | 60秒 | 5.0 | 6.5 | 7.9 | 9.3 | 12.1 |
| 酸素借 (%60AOD) | 20秒 | 34 | 40 | 46 | 52 | 58 |
| | 30秒 | 43 | 51 | 59 | 67 | 75 |
| | 40秒 | 51 | 60 | 68 | 78 | 88 |
| | 50秒 | 53 | 64 | 74 | 85 | 96 |
| | 60秒 | 55 | 66 | 78 | 89 | 100 |

| レペティションプリント 30秒全力×2回 | 回数間の休息时间 | | | |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|
| | 4 min | 10 min | 15 min | 20 min |
| 最高血中乳酸濃度 (mM) | 13.1 | 13.4 | 12.7 | 12.5 |
| 総無酸素性エネルギー (%60AOD) | 137 | 143 | 146 | 150 |

| 間欠的プリント 30 or 40秒×疲労困憊まで | 試技 | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| | L32 | H32 | H34 | L42 |
| 最高血中乳酸濃度 (mM) | 11.8 | 11.8 | 11.9 | 12.2 |
| 総無酸素性エネルギー (%60AOD) | 299 | 193 | 277 | 187 |

60AOD: 60秒全力運動時の総無酸素性エネルギー

L32: 30秒一定強度間欠的運動 (約170 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息

H32: 30秒一定強度間欠的運動 (約185 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息

H34: 30秒一定強度間欠的運動 (約185 % $\dot{V}O_2$ max) 4分休息

L42: 40秒一定強度間欠的運動 (約170 % $\dot{V}O_2$ max) 2分休息

2. 競技レベルが運動中のエネルギー代謝に与える影響について

本研究では、競技レベルとエネルギー代謝の関係については検証していないが、運動中のエネルギー代謝に影響を与える一つの要因だと考えられているため (Hanon et al., 2011; Okudaira et al., 2019), それについて言及する。予め留意すべき点として、運動時間が短いほど無酸素性比率が高くなるため (Gastin 2001), 対象とする運動が走行距離もしくは運動時間のどちらで規定されているのか分けて検討する必要がある。走行距離で規定される場合は、かかった時間に関わらず総エネルギー供給量がほぼ同一になるため (八田, 2009), エネルギー供給比率に着目して推察する。運動時間で規定される場合は、運動パフォーマンスによって総エネルギー供給量が異なるため、各エネルギー供給量にも着目して推察する。

運動が走行距離で規定される場合、運動パフォーマンスが高いほど、それだけ運動時間は短くなり、競技レベルが高いほど運動中の無酸素性比率は高くなると予想される。実際に、Arcelli et al. (2008) は、400m 走における文献をまとめ、パフォーマンスが高いほど、400m 走中の無酸素性比率が高かったことを報告している。また、同一個人内においても 400m 走のパフォーマンスが高まった際に、400m 走中の無酸素性比率も高まったことが報告されている (Reis and Miguel, 2007)。したがって、走行距離が規定された運動では、競技レベルが高いほど、無酸素性比率が高いといえる。このことに関して、トレーニング現場では、走行距離を基準としてトレーニングプログラムを設定することが圧倒的に多い。競技の特性上、走行距離を基準とすることは自然であるが、特に集団でトレーニングする場合に、競技レベルによって運動時間が異なり、運動中のエネルギー代謝が異なってしまう可能性がある。これは、トレーニング効果に差異が生じる要因にもなり得るため、運動中のエネルギー代謝を適切に把握するためには、運動時間を基準としてトレーニングを組むことが望ましい。

運動が運動時間で規定される場合、競技レベルがエネルギー供給量やエネルギー供給比率に与える影響は比較的複雑であり、それに関する先行研究がほぼないことから著者の持つデータを用いて検討する。まず、運動中のパフォーマンスと各エネルギー

一供給量およびエネルギー供給比率との関係を検討した研究は見当たらない。そこで、研究課題 1-1 と 1-2 の値を用いて、30 秒と 60 秒 WAnT についてそれらの関係を検討したところ、すべての組み合わせで有意な相関関係が認められなかった。したがって、運動時間を規定した際に競技レベルがエネルギー代謝に与える影響は小さいと考えられる。また、この結果は、パフォーマンスの高さが必ずしも片方のエネルギー供給量の大きさで決定されるわけではないことを示唆している。このことから、運動中のエネルギー代謝における個人差は、競技レベルに起因しないともいえ、個々の体力特性が影響している可能性がある。先行研究では、特に有酸素性能力がエネルギー供給比率に影響を与えることが報告されている（森ほか、2011）。著者の修士論文においても、無酸素性能力（最大酸素借）と 30 秒運動における無酸素性比率との間には有意な相関関係は認められなかった一方で、有酸素性能力（最大酸素借を測定した高強度運動中の最高酸素摂取量）と 30 秒運動中の有酸素性比率との間には有意な相関関係が認められたことを報告している（白木、2017）。これらのことから、短時間運動中のエネルギー代謝は、パフォーマンスや無酸素性能力よりも有酸素性能力に影響を受けるといえる。したがって、対象とする運動を運動時間で規定する場合、競技レベルがエネルギー代謝に与える影響は小さく、それよりも有酸素性能力を考慮して運動中のエネルギー代謝を推測すべきである。

また、エネルギー代謝に与える影響という議論からは少し逸脱するが、前述した通り運動を走行距離で規定する場合、かかった時間に関わらず総エネルギー供給量はほぼ一定になる（八田、2009）。すなわち、運動パフォーマンスが比較的優れていても運動時間がその分短くなる影響で、動員される総エネルギー供給量はパフォーマンスが比較的劣る場合と大きく変わらない。ここで、トレーニングにおける漸進性の原則という観点では、走行距離が同じであれば、パフォーマンスが高まっても与えられている負荷の総量として増えていかないため、負荷の漸進性を達成できない。一方で、対象とする運動を運動時間で規定する場合、パフォーマンスが高いほど時間内での走行距離は長くなり、動員される総エネルギー供給量も大きくなる。これは、漸進性の

原則に一致することになり、トレーニング効果を生み出しやすい形式であると考えられる。

3. 性差が運動中のエネルギー代謝に与える影響について

本研究では、性差の影響について取り上げていないが、コーチングの観点からは重要な要因である。短距離走におけるエネルギー供給比率を男女で検討した研究は3編あり、いずれの研究でも無酸素性比率は男性で有意に高いことが報告されている (Duffield et al., 2005; Hill, 1999; Weyand et al., 1994)。ただし、この結果は前述した運動時間による影響が大きいと考えられる。すなわち、運動時間が短いほど無酸素性比率は高くなることが知られていることから (Duffield et al., 2005; Gastein, 2001)、走記録がより優れている男性競技者で無酸素性比率が高い値を示したといえる。したがって、対象とする運動が距離で規定されている場合は、運動能力の優れた男性競技者で無酸素性比率が高くなる。一方、運動時間で規定した場合の短時間運動中のエネルギー供給比率について性差を検討した研究は見当たらず、十分な知見は得られていない。そこで、有酸素性エネルギーに関わる酸素摂取動態の性差を検討した研究では、中強度の運動 (80%換気性作業閾値) において酸素摂取量の立ち上がり速度に性差が認められなかったことが報告されている (Fawcner et al., 2002)。そのため、短時間運動であっても運動中の酸素摂取量に性差はない可能性があり、そうであれば無酸素性エネルギー供給量は酸素摂取量の差引によって算出されることから、エネルギー代謝に影響を与えないことになる。また、有酸素性能力および無酸素性能力の性差については、体重もしくは除脂肪体重で規格化した際に有意差が認められなかったとする結果が報告されている (Sandbakk et al., 2018; Weber and Schneider, 2000)。したがって、必ずしも性別によって、どちらか一方のエネルギー供給能力が優れているとはいえず、前述した通り有酸素性代謝と無酸素性代謝は連関していることから、運動中のエネルギー供給比率に性差が生じるとは考えにくい。そのため、性差よりも前述した通り有酸素性能力の個人差が比較的大きな影響を与えると推察される。

4. 今後の課題

本研究では、無数にあるスプリントトレーニングのエネルギー代謝を理解、推測するために、基礎的な短時間運動および代表的な間欠的運動を対象に分析を行った。当然ながら本研究の結果だけでは、スプリントトレーニングのエネルギー代謝を理解するには限界がある。更なる基礎研究による生理学的機序の解明や応用研究による実際のエネルギー代謝の解明を経て、独創的かつ合目的、効果的なスプリントトレーニングの構築が可能になると考えられる。

生理学的機序という観点では、まず研究課題 1-1 での 30 秒運動における運動強度に関わらずエネルギー供給比率が一定の値を示したメカニズムを明らかにする必要がある。当該箇所の考察では、先行研究を引用して有酸素性代謝と無酸素性代謝の連関による影響であると推察したが、先行研究の運動と本研究で用いた運動、対象者には乖離があり、必ずしもその解釈が真実であるとは限らない。有酸素性代謝が亢進する生理的機序について詳細が明らかになれば、有酸素性代謝の刺激に特化させたトレーニングや有酸素性代謝の亢進を抑えて無酸素性代謝の刺激に特化させたトレーニングを開発することが出来るかもしれない。

応用研究という観点では、まず本研究で扱いきれなかった部分を今後の課題としたい。一つ目は、60 秒より長い運動の運動強度、運動時間ごとのエネルギー代謝である。本研究ではスプリント（短時間運動）を対象にしたため、60 秒までの運動を分析したが、実際のトレーニング現場では、それよりも長い運動時間がしばしば用いられるため（ハート，2001；山元，2019；山崎，2009；結城，2009），その際のエネルギー代謝を検討することには意義があると考えられる。研究課題 1-2 の結果から、60 秒より長い運動であっても酸素摂取量が定常に近い様相を呈することにより、運動強度の増加に伴い無酸素性比率は高まると予想されるが、エネルギー代謝の具体的な数値については不明である。

二つ目は、レペティションスプリントや間欠的スプリントにおける多種多様なパターンの検証である。本研究の結果から、特に運動時間と休息時間はエネルギー代謝

に大きな影響を与えることが明らかとなったため、より長い運動時間と休息時間で検証する必要があるだろう。実際に、村木（1994）は乳酸産生に特化したトレーニングとして、400mを4回行わせる間欠的スプリントを紹介しており、より長い運動時間を用いた場合に血中乳酸濃度がさらに高くなる可能性がある。レペティションスプリントにおいても、1回目で生じる代謝変動が安静時まで戻るような更に長い休息時間を用いることで2回目の運動が1回目と同様のエネルギー代謝になる可能性がある。実際に、短時間運動ではないが、約230秒の全力運動を45分の休息時間で4回繰り返し行わせた場合に、1回目と4回目との比較でパフォーマンスに有意差がなかったこと、無酸素性比率が同等の値であったこと（ $20 \pm 5\%$ vs. $19 \pm 5\%$ 、有意差の分析なし）が報告されている（Gejl et al., 2016; Gejl et al., 2017）。この研究では、運動時間が長いため、レペティションスプリントで用いられている範囲内（~60秒）で検証する必要がある。

三つ目は、代謝負荷の指標とトレーニング効果との関係である。本研究では、エネルギー供給量とエネルギー供給比率を用いて運動のエネルギー代謝特性を評価し、最高酸素摂取量や一定水準を超える酸素摂取量の累積時間、血中乳酸濃度、最大酸素借に対する総無酸素性エネルギーの割合を用いて、運動の負荷特性について推察した。しかしながら、それら指標の妥当性とトレーニング効果を引き出す閾値については十分に検証されていない。すなわち、①適応を引き起こすトレーニングの評価として有用な指標、さらに、②その指標を用いた場合に適応を引き起こすための最低値（閾値）、について明らかとなっていない。一定水準を超える酸素摂取量の累積時間については①に対して一定の知見が得られているものの（Buchheit and Laursen, 2013a）、②の検証には至っていないようである。一方、スプリント種目に重要な無酸素性代謝に関わる指標についてはほとんど明らかとなっていない。特に①を経て、②（閾値）が明らかとなれば、最低限のトレーニング量でトレーニング効果を引き出せる可能性がある。これは、オーバートレーニングの予防やトレーニング時間の節約にもつながるため、非常に有益な知見となりうる。ただし、②について適切に検証することは、対象者の

身体特性やトレーニング状況がトレーニング効果に大きな影響を与えるため実験方法上、困難である。

したがって、現状では、運動のエネルギー代謝を理解し、トレーニングの原理・原則を踏まえ、論理的思考によって合目的かつ効果的なトレーニングを考案、選択する必要がある。つまり、運動中のエネルギー代謝を明らかにすることは、そのトレーニングの考案、選択に至るヒントになり得るため、更なる研究が求められる。

第 11 章 結論

本研究の目的は、短時間運動および間欠的高強度運動におけるエネルギー代謝を分析し、スプリントトレーニングに用いられる運動のエネルギー代謝特性を包括的に明らかにすることであった。そのために、4つの実験を行い、短時間運動では、運動強度、運動時間ごとにエネルギー代謝を検討し、間欠的高強度運動では、レペティションスプリントと間欠的スプリントの形式に分けてそれぞれ分析し、構成要因である運動強度、運動時間、休息時間に着目してエネルギー代謝を検討した。本研究によって得られた知見は以下の通りである。

- (1) 短時間運動において、20~40秒間の運動では、同じ運動時間で比較した場合に運動強度に関わらずエネルギー供給比率はほぼ一定の値を示し、50~60秒間の運動では、運動強度が高いほど無酸素性比率は高値を示した。【研究課題 1】
- (2) 間欠的高強度運動における30秒全力運動2回では、休息時間が長いほど2回目のパフォーマンスと無酸素性エネルギー供給量は次第に回復し、20分の休息でパフォーマンスはほぼ完全に回復したものの無酸素性エネルギー供給量は完全回復に至らず、1回目と比較して有酸素性比率は高値を示した。【研究課題 2-1】
- (3) 間欠的高強度運動として全力をやや下回る強度で3回以上疲労困憊に至るまで短時間運動を行わせた結果、運動強度はエネルギー供給比率に直接影響を与えなかったものの、運動時間の長い運動を用いると有酸素性比率が高まり、長い休息時間を用いると無酸素性比率が高まった。【研究課題 2-2】

以上の結果から、スプリントトレーニングの短時間運動および間欠的高強度運動におけるエネルギー代謝特性が明らかとなった。本研究によって得られた知見は、スプリントトレーニングを用いる競技者や指導者に対し、合目的かつ効果的なトレーニングの考案や選択に貢献するものであると考えられる。

参考文献

【海外文献】

- Arcelli, E., Mambretti, M., Cimadoro, G., and Alberti, G. (2008) The aerobic mechanism in the 400 metres. *New Studies In Athletics*, 23: 15-23.
- Åstrand, I., Åstrand, P.O., Christensen, E.H., and Hedman, R. (1960) Intermittent muscular work. *Acta. Physiol. Scand.*, 48: 448-453.
- Åstrand, P. O. (1981) Aerobic and anaerobic energy sources in exercise. *Med. Sport Sci.*, 13: 22-37.
- Bangsbo, J. (1998) Quantification of anaerobic energy production during intense exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 30(1): 47-52.
- Bar-Or, O. (1987) The Wingate anaerobic test. An update on methodology, reliability and validity. *Sports Med.*, 4(6): 381-394.
- Barstow, T. J., Buchthal, S., Zanconato, S., and Cooper, D. M. D. (1994) Muscle energetics and pulmonary oxygen uptake kinetics during moderate exercise. *J. Appl. Physiol.*, 77(4): 1742-1749.
- Bishop, D., Girard, O., and Mendez-Villanueva, A. (2011) Repeated-sprint ability - part II: recommendations for training. *Sports Med.*, 41: 741-756.
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Boobis, L. H, Lakomy, H. K., and Nevill, A. M. (1995) Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man. *J. Physiol.*, 482: 467-480.
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Boobis, L. H., and Lakomy, H. K. (1996) Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J. Appl. Physiol.*, 80: 876-884.
- Böning, D., Gönen, Y., and Maassen, N. (1984) Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *Int. J. Sports Med.*, 5: 92-97.
- Buchheit, M., and Laursen, P.B. (2013a) High-intensity interval training, solutions to the

- programming puzzle. Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med.*, 43(5): 313-338.
- Buchheit, M., and Laursen, P.B. (2013b) High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part II: anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports Med.*, 43(10): 927-954.
- Buck, D., and Naughton, L. R. (1999) Changing the number of submaximal exercise bouts effects calculation of MAOD. *Int. J. Sports Med.*, 20: 28-33.
- Bundle, M. W., Hoyt, R. W., and Weyand, P. G. (2003) High-speed running performance: a new approach to assessment and prediction. *J. Appl. Physiol.*, 95(5): 1955-1962.
- Burke, L. M., Hawley, J. A., Wong, S. H., and Jeukendrup, A. E. (2011) Carbohydrates for training and competition. *J. Sports Sci.*, 29(Suppl 1): S17-S27.
- Cairns, S. P. (2006) Lactic acid and exercise performance: culprit or friend? *Sports Med.*, 36(4): 279-291.
- Calbet, J. A., Chavarren, J., and Dorado, C. (1997) Fractional use of anaerobic capacity during a 30- and a 45-s Wingate test. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 76: 308-313.
- Calbet, J. A., De Paz, J. A., Garatachea, N., Cabeza de Vaca, S., and Chavarren, J. (2003) Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J. Appl. Physiol.*, 94: 668-676.
- Christensen, E. H., Hedman, R., and Saltin, B. (1960) Intermittent and continuous running. (A further contribution to the physiology of intermittent work.). *Acta. Physiol. Scand.*, 50: 269-286.
- Coast, J. R., and Welch, H. G. (1985) Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 53: 339-342.
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., Abraham, L. D., and Petrek, G. W. (1991) Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23(1): 93-107.

- Craig, I. S., and Morgan, D. W. (1998) Relationship between 800-m running performance and accumulated oxygen deficit in middle-distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 30: 1631-1636.
- de Aguiar, R. A., Lisbôa, F. D., Turnes, T., Cruz, R. S., and Caputo, F. (2015) The effects of different training backgrounds on VO₂ responses to all-out and supramaximal constant-velocity running bouts. *PLoS One*, 10: e0133785.
- Duffield, R., and Dawson, B. (2003) Energy system contribution in track running. *New Studies in Athletics*, 18(4): 47-56.
- Fawkner, S. G., Armstrong, N., Potter, C. R., and Welsman, J. R. (2002) Oxygen uptake kinetics in children and adults after the onset of moderate-intensity exercise. *J. Sports Sci.*, 20(4): 319-26.
- Febbraio, M. A., Carey, M. F., Snow, R. J., Stathis, C. G., and Hargreaves, M. (1996) Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise. *Am. J. Physiol.*, 271(5): R1251-R1255.
- Finn, J., Gastin, P., Withers, R., and Green, S. (2000) The estimation of peak power and anaerobic capacity of athletes. In: Gore, C. J. (eds.) *Physiological tests for elite athletes*. Human kinetics, pp. 37-49.
- Foster, C., Farland, C.V., Guidotti, F., Harbin, M., Roberts, B., Schuette, J., Tuuri, A., Doberstein, S.T., and Porcari, J.P. (2015) The Effects of High Intensity Interval Training vs Steady State Training on Aerobic and Anaerobic Capacity. *J. Sports Sci. Med.*, 14(4): 747-755.
- Friedlander, A. (2005) Clyde Hart on the 400: Train S-L-O-W-E-R to Race Faster. Merit Rankings Issue, American Track & Field.
- Fukuba, Y., Hayashi, N., Koga, S., Yoshida, T. (2002) VO₂ kinetics in heavy exercise is not altered by prior exercise with a different muscle group. *J. Appl. Physiol.*, 92(6): 2467-2474.

- Gastin, P. B., Costill, D. L., Lawson, D. L., Krzeminski, K., and McConell, G. K. (1995) Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27(2): 255-263.
- Gastin, P. B. (2001) Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med.*, 31(10): 725-741.
- Gejl, K. D., Hvid, L. G., Willis, S. J., Andersson, E., Holmberg, H. C., Jensen, R., Frandsen, U., Hansen, J., Plomgaard, P., and Ørtenblad, N. (2016) Repeated high-intensity exercise modulates Ca²⁺ sensitivity of human skeletal muscle fibers. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 26(5): 488-497.
- Gejl, K. D., Ørtenblad, N., Andersson, E., Plomgaard, P., Holmberg, H.C., and Nielsen, J. (2017) Local depletion of glycogen with supramaximal exercise in human skeletal muscle fibres. *J. Physiol.*, 595(9): 2809-2821.
- Gladden, L. B., and Welch, H. G. (1978) Efficiency of anaerobic work. *J. Appl. Physiol.*, 44: 564-570.
- Glaister, M. (2005) Multiple sprint work: physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med.*, 35(9): 757-77.
- Granier, P., Mercier, B., Mercier, J., Anselme, F., and Préfaut, C. (1995) Aerobic and anaerobic contribution to Wingate test performance in sprint and middle-distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 70: 58-65.
- Green, S., and Dawson, B. T. (1996) Methodological effects on the VO₂-power regression and the accumulated O₂ deficit. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28: 392-397.
- Hanon, C., Rabate, M., and Thomas, C. (2011) Effect of expertise on postmaximal long sprint blood metabolic responses. *J. Strength Cond. Res.*, 25: 2503-2509.
- Hermansen, L., Ekblom, B., and Saltin, B. (1970) Cardiac output during submaximal and maximal treadmill and bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.*, 29(1): 82-86.
- Hermansen, L., Medbø, J. I., Mohn, A. C., Tabata, I., and Bahr, R. (1984) Oxygen deficit during

- maximal exercise of short duration. *Acta. Physiol. Scand.*, 121: 39A.
- Hill, D. W. (1999) Energy system contribution in middle-distance running events. *J. Sports Sci.*, 17(6): 477-483.
- Hill, D. W., and Vingren, J. L. (2011) Maximal accumulated oxygen deficit in running and cycling. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 36 (6): 831-838.
- Hirvonen, J., Rehunen, S., Rusko, H., and Härkönen, M. (1987) Breakdown of high-energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 56(3): 253-259.
- Hoffman, J. (2002). Metabolic system and exercise. *Physiological aspects of sport training and performance. Human Kinetics*, pp. 27-37.
- Howald, H., Giutz, G., and Billeter, R. (1978) Energy stores and substrates utilization in muscle during exercise. In: Fernand, L., and William, A. R. O. (eds.) 3rd international symposium on biochemistry of exercise: regulatory mechanisms in metabolism during exercise. *Symposia Specialists*, pp. 75-86.
- Hultman, E., and Sjöholm, H. (1986) Biochemical cause of fatigue. In: Jones et al. (eds.) *Human muscle power: Human Kinetics*, pp. 215-238.
- Iaia, F. M., and Bangsbo, J. (2010) Speed endurance training is a powerful stimulus for physiological adaptations and performance improvements of athletes. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, suppl. 2: 11-23.
- Jacobs, I. (1986) Blood lactate. Implications for training and sports performance. *Sports Med.*, 3 (1): 10-25.
- Jones, A. M., and Burnley, M. (2009) Oxygen uptake kinetics: an underappreciated determinant of exercise performance. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 4(4): 524-532.
- Korzeniewski, B., and Zoladz, J. A. (2004) Factors determining the oxygen consumption rate (VO_2) on-kinetics in skeletal muscles. *Biochem. J.*, 379 (3): 703-710.
- Kreider, R. B., Kalman, D. S., Antonio, J., Ziegenfuss, T. N., Wildman, R., Collins, R., Candow,

- D. G., Kleiner, S. M., Almada, A. L., and Lopez, H. L. (2017) International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, 14:18.
- Krogh, A., and Lindhard, J. (1920) The change in respiration at the transition from work to rest. *J. Physiol.*, 53: 431-437.
- Kuno, S., Akisada, M., and Mitsumori, F. (1992) Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance study on the effects of endurance training in rat skeletal muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 65: 197-201.
- Li, Y., Niessen, M., Chen, X., and Hartmann, U. (2015) Overestimate of relative aerobic contribution with maximal accumulated oxygen deficit: a review. *J. sports. Med. Phys. Fitness.*, 55: 377-382.
- Luhtanen, P., Rahkila, P., Rusko, H., and Viitasalo, J. T. (1987) Mechanical work and efficiency in ergometer bicycling at aerobic and anaerobic thresholds. *Acta. Physiol. Scand.*, 131: 331-337.
- MacInnis, M. J., and Gibala, M. J. (2017) Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity. *J. Physiol.*, 595: 2915-2930.
- Medbø, J. I. (2010) Accumulated oxygen deficit issues. In Connes, P. et al. (eds.) *Exercise Physiology: from a Cellular to an Integrative Approach*. IOS Press, pp. 367-384.
- Medbø, J. I., and Tabata, I. (1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.*, 67: 1881-1886.
- Medbø, J. I., and Burgers, S. (1990) Effect of training on the anaerobic capacity. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 22: 501-507.
- Medbo, J. I., and Tabata, I. (1993) Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *J. Appl. Physiol.*, 75(4): 1654-1660.
- Medbø, J. I., Mohn, A. C., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., and Sejersted, O. M. (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J. Appl. Physiol.*, 64:

50-60.

- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., Polman, R., and Marchant, D. (2007) Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. *Sports Med.*, 37: 1019-1028.
- Minahan, C., Chia, M., and Inber, O. (2007) Does power indicate capacity? 30-s Wingate anaerobic test vs. maximal accumulated O₂ deficit. *Int. J. Sports Med.*, 28: 836-843.
- Neptune, R. R., and van den Bogert, A. J. (1998) Standard mechanical energy analyses do not correlate with muscle work in cycling. *J. Biomech.*, 31(3): 239-245.
- Newsholme, E. A., and Leech, A. R. (1984) *Biochemistry for the medical sciences*. Wiley.
- Noordhof, D. A. D. Koning, J. J., and Foster, C. (2010) The maximal accumulated oxygen deficit method: a valid and reliable measure of anaerobic capacity? *Sports Med.*, 40: 285-302.
- Nummela, A., and Rusko, H. (1995) Time course of anaerobic and aerobic energy expenditure during short-term exhaustive running in athletes. *Int. J. Sports Med.*, 16: 522-527.
- Ogita, F., Onodera, T., Tamaki, H., Toussaint, H., Hollander, P., and Wakayoshi, K. (2003) Metabolic profile during exhaustive arm stroke, leg kick and whole body swimming lasting 15 s to 10 min. *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, 361-366.
- Ogita, F., Onodera, T., Tanaka, T., and Tabata, I. (1999) The relative contribution of aerobic and anaerobic energy release in the first minute of supramaximal swimming. *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, 5: 133.
- Ogura, Y., Katamoto, S., Uchimaru, J., Takahashi, K., and Naito, H. (2006) Effects of low and high levels of moderate hypoxia on anaerobic energy release during supramaximal cycle exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 98: 41-47.
- Ohkuwa, T., and Miyamura, M. (1984) Peak blood lactate after 400m sprinting in sprinters and long-distance runners. *Jap. J. Physiol.*, 34: 553-556.
- Okudaira, M., Kuki, S., Yoshida, T., Fukuda, D. H., and Tanigawa, S. (2019) Load

- Characteristics of Sprint Interval Training According to 400m Running Performance: Competitive Level Comparison. *Int. J. Sport Health Sci.*, 17: 148-154.
- Ørtenblad, N., Westerblad, H., and Nielsen, J. (2013) Muscle glycogen stores and fatigue. *J. Physiol.*, 591(18): 4405-4413.
- Parolin, M. L., Chesley, A., Matsos, M. P., Spriet, L. L., Jones, N. L., and Heigenhauser, G. J. (1999) Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am. J. Physiol.*, 277: E890-E900.
- Parra, J., Cadefau, J. A., Rodas, G., Amigó, N., and Cussó, R. (2000) The distribution of rest periods affects performance and adaptations of energy metabolism induced by high-intensity training in human muscle. *Acta. Physiol. Scand.*, 169(2): 157-165.
- Peyrebrune, M. C., Toubekis, A.G., Lakomy, H.K., and Nevil, M.E. (2014) Estimating the energy contribution during single and repeated sprint swimming. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 24 (2): 369-376.
- Pizza, F. X., Naglieri, T. A., Holtz, R. W., Mitchell, J. B., Starling, R. D., Phillips, M. D., Cavender, D. L., and Braun, W. A. (1996) Maximal accumulated oxygen deficit of resistance-trained men. *Can. J. Appl. Physiol.*, 21(5): 391-402.
- Poole, D. C., and Jones, A. M. (2012) Oxygen uptake kinetics. *Compr. Physiol.*, 2: 933-996.
- Pringle, J. S., Doust, J. H., Carter, H., Tolfrey, K., Campbell, I. T., Sakkas, G. K., and Jones, A. M. (2003) Oxygen uptake kinetics during moderate, heavy and severe intensity "submaximal" exercise in humans: the influence of muscle fibre type and capillarisation. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 89(3-4): 289-300.
- Putman, C.T., Jones, N.L., Lands, L.C., Bragg, T.M., Hollidge-Horvat, M.G., and Heigenhauser, G.J. (1995) Skeletal muscle pyruvate dehydrogenase activity during maximal exercise in humans. *Am. J. Physiol.*, 269: E458-E468.
- Ramsbottom, R., Nevill, A. M., Nevill, M. E., Newport, S., and Williams, C. (1994) Accumulated oxygen deficit and short-distance running performance. *J. Sports Sci.*

- 12(5): 447-453.
- Reilly, T., and Bangsbo, J. (1999) Anaerobic and aerobic training. In: Elliott, B. (ed.) *Training in sport: Applying sport science*. Wiley, pp. 351-409.
- Reis, V. M., Duarte, J. A., Espirito, S. J., and Russel, A. P. (2004) Determination of Accumulated oxygen deficit during a 400m run. *Official Journal of the American Society of Exercise Physiologists*, 7: 77-83.
- Reis, V. M., and Miguel, P. P. (2007) Changes in the accumulated oxygen deficit and energy cost of running 400 metres. *New Studies in Athletics*, 22: 49-56.
- Ross, A., and Leveritt, M. (2001) Long-term metabolic and skeletal muscle adaptations to short-sprint training: implications for sprint training and tapering. *Sports Med.*, 31(15): 1063-1082.
- Rossiter, H. B., Ward, S. A., Kowalchuk, J. M., Howe, F. A., Griffiths, J. R., and Whipp, B. J. (2002) Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate- and high-intensity exercise in humans. *J Physiol.*, 541(3): 991-1002.
- Sahlin, K., Ren, J. M., and Broberg, S. (1988) Oxygen deficit at the onset of submaximal exercise is not due to a delayed oxygen transport. *Acta. Physiol. Scand.*, 134: 175-180.
- Sandbakk, Ø., Solli, G. S., and Holmberg, H. C. (2018) Sex Differences in World-Record Performance: The Influence of Sport Discipline and Competition Duration. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 13(1): 2-8.
- Scott, C. B., Roby, F. B., Lohman, T. G., and Bunt, J. C. (1991) The maximally accumulated oxygen deficit as an indicator of anaerobic capacity. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23: 618-24.
- Serresse, O., Lortie, G., Bouchard, C., and Boulay, M. R. (1988) Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration. *Int. J. Sports Med.*, 9(6): 456-460.
- Sousa, A., Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. J., and Figueiredo, P. (2017) VO₂ at Maximal and

- Supramaximal Intensities: Lessons to High-Intensity Interval Training in Swimming. *Int. J. Sports physiol. Perform.*, 12(7): 872-877.
- Spencer, M. R., and Gatin, P. B. (2001) Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33 (1): 157-162.
- Stein, N. (1999) Speed training in sport. In: Elliott, B. (ed.) *Training in sport: Applying sport science*. Wiley, pp. 287-349.
- Stringer, W., Wasserman, K., Casaburi, R., Porszasz, J., Maehara, K., and French, W. (1994) Lactic acidosis as a facilitator of oxyhemoglobin dissociation during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 76(4): 1462-1467.
- Tabata, I., Irisawa, K., Kouzaki, M., Nishimura, K., Ogita, F., and Miyachi, M. (1997) Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(3): 390-395.
- Tabata, I., Nishimura, K., Kouzaki, M., Hirai, Y., Ogita, F., Miyachi, M., and Yamamoto, K. (1996) Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO_{2max} . *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28(10): 1327-1330.
- Weber, C. L., and Schneider, D. A. (2000) Maximal accumulated oxygen deficit expressed relative to the active muscle mass for cycling in untrained male and female subjects. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82(4): 255-61.
- Weyand, P. G., Cureton, K. J., Conley, D. S., and Sloniger, M. A. (1993) Percentage anaerobic energy utilized during track running events. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 25: S105.
- Weyand, P. G., Cureton, K. J., Conley, D. S., Sloniger, M. A., and Liu, Y. L. (1994) Peak oxygen deficit predicts sprint and middle-distance track performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 26: 1174-1180.
- Whipp, B. J., Rossiter, H. B., Ward, S. A., Avery, D., Doyle, V. L., Howe, F. A., and Griffiths, J. R. (1999) Simultaneous determination of muscle ^{31}P and O_2 uptake kinetics during whole body NMR spectroscopy. *J. Appl. Physiol.*, 86 (2): 742-747.

- Wilkerson, D. P., Koppo, K., Barstow, T. J., and Jones, A. M. (2004) Effect of work rate on the functional 'gain' of Phase II pulmonary O₂ uptake response to exercise. *Respir. Physiol. Neurobiol.*, 142(2-3): 211-223.
- Withers, R. T., Sherman, W. M., Clark, D. G., Esselbach, P. C., Nolan, S. R., Mackay, M. H. and Brinkman, M. (1991) Muscle metabolism during 30, 60, and 90 s of maximum cycling on an air-braked ergometer. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 63: 354-62.
- Wittekind, A., and Beneke, R. (2011) Metabolic and performance effects of warm-up intensity on sprint cycling. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 21(6): e201-207.
- Yunoki, T., Horiuchi, M., and Yano, T. (1999) Kinetics of excess CO₂ output during and after intensive exercise. *Jpn. J. Physiol.*, 49: 139-144.
- Yunoki, T., Horiuchi, M., and Yano, T. (2000) Excess CO₂ output response during and after short-term intensive exercise in sprinters and long-distance runners. *Jpn. J. Physiol.*, 50: 199-205.
- Zouhal, H., Jabbour, G., Jacob, C., Duvigneau, D., Botcazou, M., Ben Abderrahaman, A., Prioux, J., and Moussa, E. (2010) Anaerobic and aerobic energy system contribution to 400-m flat and 400-m hurdles track running. *J. Strength Cond. Res.*, 24: 2309-2315.
- Zouhal, H., Le Douairon, L. S., Ben Abderrahaman, A., Minter, G., Herbez, R., and Castagna, C. (2012) Energy system contribution to Olympic distances in flat water kayaking (500 and 1,000 m) in highly trained subjects. *J. Strength Cond. Res.*, 26: 825-831.

【国内文献】

- 麻場一徳 (2012) ロングスプリントの技術とトレーニング. 宮下憲編, スプリント & ハードル. 陸上競技社, pp. 91-94.
- 阿部征次 (2004) 改訂版 スプリント・トレーニング・マニュアル. ベースボール・マガジン社.
- 石毛勇介 (2009) スキーにおけるスプリントトレーニング. 日本トレーニング科学会編, スプリントトレーニング-速く走る・泳ぐ・滑るを科学する-. 朝倉書店, pp. 122-131.
- 磯繁雄・高倉正樹 (1998) 400m 種目の有酸素トレーニング導入に関する研究. スポーツ科学・健康科学研究, 1: 37-41.
- 榎木泰介 (2008) 血中乳酸濃度をどう活かすか～JISS の事例から～. 八田秀雄編著, 乳酸をどう活かすか. 杏林書院, pp. 51-63.
- 遠藤愛 (2009) テニスにおけるスプリントトレーニング. 日本トレーニング科学会編, スプリントトレーニング-速く走る・泳ぐ・滑るを科学する-. 朝倉書店, pp. 146-152.
- 大西崇仁・水野増彦・中川一紀・江田茂行・上田太・植木貴頼・黄仁官・堀居昭 (1998) 陸上競技 400m 走の記録向上を目的としたインターバルトレーニング内容の検討: 血中乳酸濃度を指標として. 日本体育大学紀要, 27: 259-267.
- 大森肇 (1999) 運動時の糖質・脂質・蛋白質代謝とホルモン作用. 勝田茂編著, 第2版運動生理学 20 講. 朝倉書店, pp. 40-47.
- 尾縣貢・福島洋樹・大山圭悟・安井年文・鍋倉賢治・宮下憲・関岡康雄・永井純 (1998) 下肢の筋持久性と 400m 走中の疾走速度逡減との関係. 体育学研究, 42: 370-379.
- 尾縣貢 (2007) ぐんぐん強くなる陸上競技. ベースボール・マガジン社.
- 荻田太・小野寺丈晴・若吉浩二 (1998) 超最大強度におけるプル、キック、スイム中の代謝特性. 水泳水中運動科学, 1: 13-18.
- 荻田太 (1999) 水泳中の無酸素性エネルギー供給動態. Japanese Journal of Sciences in

Swimming and Water Exercise, No. 2.

荻田太 (2000) 時間と強度、エネルギー供給の関係 3. 月刊トレーニング・ジャーナル. ブックハウス・エイチデイ, No. 250, pp. 59-63.

荻田太 (2009) エナジェティクスを改善するトレーニングの考え方. 日本トレーニング科学会編, スプリントトレーニング-速く走る・泳ぐ・滑るを科学する-. 朝倉書店, pp. 57-67.

川本和久 (2012) ロングスプリントのエネルギーとトレーニング. 宮下憲編, スプリント & ハードル. 陸上競技社, pp. 86-91.

木越清信・加藤彰浩・前村公彦 (2011) 間欠的スプリントトレーニングの負荷特性— 休息時間と 400m 走能力に着目して—. 陸上競技学会誌, 9: 7-13.

久野譜也 (1999) 運動と筋 ATP 代謝. 勝田茂編著, 運動生理学 20 講 (第 2 版). 朝倉書店, pp. 21-28.

小林雄志 (2016) 血中乳酸濃度測定信頼性・妥当性. 八田秀雄編, 乳酸をどう活かすか II. 杏林書店, pp. 25-39.

佐伯徹郎・三本木温・高松薫 (1998) 一定速度による無氣的・有氣的最大走行の後半局面における酸素摂取量の変化量と血中乳酸濃度の変化量との関係. 体力科学, 47: 327-332.

坂本啓・増田和実 (2015) 運動と筋 ATP 代謝. 勝田茂・征矢英昭編, 運動生理学 20 講 (第 3 版). 朝倉書店, pp. 24-34.

品田貴恵子・吉岡利貢・服部聡士・白井祐介・鍋倉賢治 (2012) 800m 走中の有酸素性および無酸素性エネルギー供給量の推移. 陸上競技研究, 91: 12-22.

澁谷顕一・大柿哲朗 (2001) 運動開始時の酸素摂取動態を制限する要因. 健康科学, 23: 1-8.

白木駿佑 (2017) 短時間運動における運動強度とエネルギー供給比率との関係およびその決定要因. 平成 28 年度筑波大学修士学位論文.

白木駿佑, 尾縣貢, 木越清信 (2018) 短時間高強度運動における運動強度とエネルギー

- ー供給比率との関係. 個人内変動に着目して. 体育学研究, 63(1): 433-440.
- 図子浩二 (2009) スプリントトレーニングのマネジメント. 日本トレーニング科学会編, スプリントトレーニング-速く走る・泳ぐ・滑るを科学する-. 朝倉書店, pp. 1-9.
- 高野進 (2007) スプリント革命! 高野進流日本人のための二軸走法. スキージャーナル株式会社.
- 高松薫 (2019) 体カトレーニング論. 大修館書店.
- 田畑泉 (1989) 身体運動における疲労. 宮下充正監, 身体運動のエナジェティクス. 高文堂出版社, pp. 72-112.
- 田畑泉 (1994) 無酸素性エネルギーの定量法. J. J. Sports Sci., 13: 559-566.
- 田畑泉 (2015) 究極の科学的肉体改造メソッド タバタ式トレーニング. 扶桑社.
- 土江寛裕 (2011) 陸上競技入門ブック 短距離・リレー. ベースボール・マガジン社.
- 中垣浩平・吉岡利貢・鍋倉賢治 (2008) カヤックパドリング中の無酸素性及び有酸素性エネルギー代謝の貢献比. 体育学研究, 57: 261-270.
- 野村由実・杉田正明 (2020) 自転車エルゴメーターにおける負荷精度の検討. トレーニング科学, 32(1): 33-39.
- 八田秀雄 (2008) 血中乳酸濃度はどんな意味があるのか. 八田秀雄編著, 乳酸をどう活かすか. 杏林書院, pp. 1-11.
- 八田秀雄 (2009) 乳酸と運動生理・生化学ーエネルギー代謝の仕組みー. 市村出版.
- ハート: 陸上競技研究誌 (2001) 量より質 マイケルジョンソンの 400m のトレーニング. 陸上競技研究, 46: 59-63.
- 平井雄介・小笠原悦子・田畑泉 (1993) 超最大強度の水泳運動における無酸素性及び有酸素性エネルギー供給機構の貢献度. Jpn. J. Sports Sci., 12: 124-129.
- 前村公彦・鈴木康弘・伊藤穰・蒲原一之・高松薫 (2003) 短時間高強度運動における過剰 CO₂ 排出量の評価法およびパフォーマンスとの関係. 体育学研究, 48: 679-690.

- 前村公彦・鈴木康弘・高松薫 (2005a) 過剰 CO2 排出量と短時間高強度運動パフォーマンスとの関係：過剰 CO2 排出量の測定方法の相違に着目して. 体育学研究, 50: 27-35.
- 前村公彦・鈴木康弘・高松薫 (2005b) スプリントトレーニングが重炭酸緩衝能力および無酸素性能力に及ぼす影響. 体育学研究, 50: 415-424.
- 前村公彦 (2012) ロングスプリントのトレーニングと評価法. 宮下憲編, スプリント&ハードル. 陸上競技社, pp. 94-97.
- 宮丸凱史・宮丸郁子 (1978) 短距離競走. 金原勇編著, 陸上競技のコーチング(I). 大修館書店, pp. 171-298.
- 村木征人 (1994) スポーツ・トレーニング理論. ブックハウス・エイチディ.
- 森健一 (2009) 自転車エルゴメーターにおける発揮パワーとエネルギー供給能力の関係. 平成 20 年度筑波大学大学院体育研究科修士論文.
- 森健一・吉岡利貢・白松宏輔・苅山靖・尾縣貢 (2011) 有酸素能力の相違が Wingate test におけるエネルギー供給比に及ぼす影響. 体力科学, 60(5): 503-510.
- 森健一・吉岡利貢・苅山靖・尾縣貢 (2012) 短距離走者における無酸素性能力および走パフォーマンス評価としての Wingate test の有用性. 体育学研究, 57: 275-284.
- 森井秀樹 (2003) 有酸素運動のプログラムデザイン. NSCA ジャパン編, ストレングス&コンディショニング I 【理論編】. 大修館書店, pp. 126-136.
- 森丘保典 (2008) 血中乳酸濃度をどう活かすか～陸上競技 2～. 八田秀雄編著, 乳酸をどう活かすか. 杏林書院, pp: 79-92.
- 安井年文・尾縣貢・福島洋樹・宮下憲・関岡康雄 (1998) 400m 疾走中の速度逡減に影響を及ぼす体力的要因について. 陸上競技研究, 35: 2-15.
- 山口明彦・狩野豊 (1999) 運動と末梢循環. 勝田茂編著, 運動生理学 20 講 (第 2 版). 朝倉書店, pp. 63-70.
- 山崎一彦 (2009) ロングスプリントのトレーニング. 日本トレーニング科学会編, スプリントトレーニングー速く走る・泳ぐ・滑るを科学するー. 朝倉書店, pp. 104-

114.

山地啓司（2001）最大酸素摂取量の科学．杏林書院．

山元康平（2019）400m 走における「基準値」～それぞれに最良のレースパターンを見つけるために～．月刊陸上競技 9月号．講談社，pp. 206-209.

結城匡啓（2009）スピードスケートにおけるスプリントトレーニング．日本トレーニング科学会編，スプリントトレーニングー速く走る・泳ぐ・滑るを科学するー．朝倉書店，pp. 131-138.

吉岡利貢・前村公彦・井上洋祐・宮下 憲・鍋倉賢治（2009）400m スプリンターを対象とした自転車運動による体力評価の有用性．陸上競技研究，77: 10-16.

吉田祐子（2008）乳酸の代謝のメカニズム．八田秀雄編著，乳酸をどう活かすか．杏林書院，pp. 13-25.

謝辞

本研究の執筆にあたり，副指導教官であり世話教員である木越清信助教には，構想から執筆に至るまで懇切丁寧なご指導を賜りました。また，本実験には生理学的手法を用いていることから同陸上競技研究室の他学生と比較して実験費用が高いにもかかわらず限られた研究費を割いて頂き，また研究費用の捻出に関わる申請書の執筆に至るまで多方面でご指導やご協力を頂きました。ここに記し，深く感謝の意を表します。

尾縣貢教授には，博士論文の査読をお引き受け頂き，研究の進行や実験デザインの計画など多面的な視点でご指摘を頂きました。ご多用の中，論文の添削はいつでも迅速に着手して頂き，滞りなく執筆活動および雑誌への投稿処理をすることができました。ここに，心から感謝の意を表します。

副指導教官である岡田弘隆准教授には，常にトレーニング現場への還元を意識したご助言を頂き，コーチング専攻にありながら生理学的手法を用いた本研究に対し欠かせないエッセンスを加えて頂きました。深く感謝致します。

本学運動生理学研究室の藤井直人助教には，関連論文の執筆にあたり論文の添削から投稿雑誌の選定に至るまで多大なるご指導を頂きました。また，本研究に対して，基礎的な運動生理学の視点からご指摘頂き，本論文の価値を高めて頂きました。深く感謝致します。

本学の大山下圭悟准教授，谷川聡准教授，鍋倉賢治教授，前村公彦准教授をはじめとする諸先生方には，貴重なご指導とご助言を頂きました。感謝申し上げます。

福井工業大学講師の山元康平氏には，本研究の構想から論文の添削までトレーニ

ング現場での視点を交えてクリティカルなご指摘を何度も頂き、本論文の価値を高めて頂きました。修士課程で筑波大学大学院に入学してから公私に渡りお世話になり、研究の基礎から研究に対する態度まで様々なことを学びました。ここに感謝の意を表します。

本学特任助教の吉田拓矢氏には、実験に際して多大なるご協力を頂きました。

本学陸上競技部および陸上競技同好会所属の学生および大学院生には、高強度かつ拘束時間の長い運動プロトコルにもかかわらず本研究の対象者として被験者を快く引き受けて頂きました。

家族には、修士課程を含めこの6年間で多大なる迷惑をかけたが、大学院生活および留学生生活を支援し、常に温かく見守ってくれました。ここに記し、深く感謝申し上げます。

本研究の一部（研究課題 2-2）は、筑波大学体育系ヒューマン・ハイ・パフォーマンス先端研究センター（ARIHHP）の助成を受けて行われたものである。

最後に、

改めて皆様に心から感謝申し上げます。

今後ともご指導ご鞭撻よろしくお願い致します。

令和3年3月 白木駿佑