

休息時間が異なるレペティションスプリントのエネルギー代謝特性

白木 駿佑¹⁾ 尾縣 貢²⁾ 山元 康平³⁾ 木越 清信²⁾

SHIRAKI Shunsuke¹, OGATA Mitsugi², YAMAMOTO Kohei³ and KIGOSHI Kiyonobu²: Energy profile of repetition sprint exercises with different rest durations. *Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.*

Abstract: The present study aimed to examine the profile of energy metabolism during repetition sprint exercises with different rest durations. Nine competitive male track and field athletes performed a submaximal-intensity increment exercise and 4 kinds of 2 consecutive 30-s sprints tests with rest durations of 4, 10, 15, and 20 min, respectively. The mean power output during these sprints was evaluated as the average value over the entire 30-s period. Aerobic and anaerobic energy during these sprints was determined from the extrapolated linear regression between power and the steady-state O₂ uptake obtained during the submaximal-intensity increment exercise. During 2nd sprints compared with 1st sprints in the respective tests, the mean power output decreased significantly in the tests with rest durations of 4, 10, and 15 min; in all the tests, the aerobic energy increased significantly and the anaerobic energy decreased significantly. These results suggest that the 1st sprint in a repetition sprint exercise causes activation of aerobic metabolism and inhibition of anaerobic metabolism during the 2nd sprint. On the other hand, it is also suggested that recovery of anaerobic metabolism after the 1st sprint requires a longer rest duration than that for recovery of performance in the repetition sprint exercise.

Key words : high-intensity exercise, pedaling, aerobic energy, anaerobic energy

キーワード : 高強度運動, 自転車運動, 有酸素性エネルギー, 無酸素性エネルギー

I 緒言

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, 2013), 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おり, 数多くの研究が行われている (Buchheit and Laursen, 2013). その中で, スプリントインターバルトレーニングに着目すると反復スプリント (Repeated sprints, 10 秒以下の運動を 60 秒以下の休息で反復する) についても多くの研究がなされている (Girard et al.,

2011). 一方, レペティションスプリントに関しては, 十分な研究がなされていない. レペティションスプリントとは, スプリント(短時間全力運動)を長い休息時間で複数回行う方法であり (Hoffman, 2002), 本研究では反復スプリントと区別して 30—60 秒の運動を 3—30 分の休息で 2 回以上行うものとする. レペティションスプリントは, 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, 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). 特に陸上競技の短距離走においては代表的なトレーニング方法であり, 250—450m

1) 茨城キリスト教大学
〒319-1295 茨城県日立市大みか町6-11-1
2) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
3) 福井工業大学スポーツ健康科学部
〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1
連絡先 白木駿佑

1. Ibaraki Christian University
6-11-1 Omika, Hitachi, Ibaraki 319-1295
2. University of Tsukuba, Faculty of Health and Sport Sciences
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
3. Fukui University of Technology, Faculty of Sports and Health Sciences
3-6-1 Gakuen, Fukui, Fukui, 910-8505
Corresponding author shunsuke_run@yahoo.co.jp

走（約30—60秒）をパフォーマンスが十分に回復する休息時間（15—30分）で行われている（山元，2019；山崎，2009）。また，テニスにおいては比較的短い休息時間（3—10分）で行われることもある（遠藤，2009）。ただし，休息時間は多くの指導書で明記されておらず（Hoffman，2002；村木，1994；高松，2009；結城，2009），前述したように長短様々な休息時間が用いられている。しかしながら，休息時間によってレペティションスプリントの生理的負荷が異なる可能性があるため（Buchheit and Laursen，2013），その設定には慎重になる必要がある。それにもかかわらず，様々な休息時間でのレペティションスプリントのエネルギー代謝について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回目より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，スポーツ現場でよく用いられる前述したようなレペティションスプリントと比較して休息時間が短く，それがエネルギー代謝に影響する可能性があるため，長い休息時間でも検討する必要がある。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を30秒全力自転車運動前後（6分後まで）に分析した先行研究では，クレアチンリン酸は運動直後で有意に低下し，1.5分後，3分後，6分後ではそれぞれの1時点前よりそれぞれ有意に増加（回復）しているものの運動前より有意に小さい値であったことが報告されている（Bogdanis et al.，1995）。また，筋pHについても同様の推移を示している（Bogdanis et al.，1995）。すなわち，それらの指標は運動により低下し，運動後，回復に転じるものの安静時の値まで戻っていないことを示している。このことから，レペティションスプリントにおいて更に長い休息時間を用いた場合に筋pHやクレアチンリン酸がより回

復する可能性があり，休息時間が短い場合と比較して2回目運動中のエネルギー代謝が異なると考えられる。

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関する先行研究は，Bogdanis et al.（1995）のみのようである。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，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回目より有意に小さ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見当たらず，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，休息時間が異なるレペティションスプリントのパフォーマンスおよびエネルギー代謝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，本研究ではスプリント種目を専門とする競技者を対象に30秒全力自転車運動2回を異なる休息時間で行わせ，レペティションスプリントのパフォーマンスおよびエネルギー代謝を明らかにすることを目的とし，スポーツ現場でのレペティションスプリントの実施方法について検討することとした。

II 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、本研究は筑波大学倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号：体29-99）。

2. 実験手順

レペティションプリントとして2回の30秒全力自転車運動（以下「30秒連続テスト」と略す）を異なる休息時間で4試技行わせた。運動中のエネルギー供給量を算出するために、プレテストとして間欠的漸増負荷運動（以下「最大下テスト」と略す）を行わせ、発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式を対象者ごとに作成した。さらに、体力指標として最大酸素摂取量の測定（以下「 $\dot{V}O_{2max}$ テスト」と略す）を最大下テスト終了20分後に行わせた。

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、セッション間は中1日以上の間隔をあけ、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週間前までの間に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時間前まで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 \pm 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、休息中にマスク再着用の時間的余裕がある場合は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. 測定項目および測定方法

本実験のすべての運動は、自転車エルゴメータ（PowermaxVIII, コンビウエルネス社）を用いて行われた。運動中の発揮パワーは、自転車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10msec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。サドルは事前練習の際に個人ごとに決定した高さですべての試技を行った。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。呼気ガス指標は、自動呼気ガス分析器（AE310SRC, ミナト医科学社）を用いて、呼気のみを分析するEXPモード（呼気ガス採集法）により酸素摂取量を5秒毎に計測した。心拍数は、心拍モニター（S610i, Polar社）を用い、5秒毎に計測した。血中乳酸濃度は、最大下テストでは、簡易型血中乳酸測定器（Lactate-Pro, アークレイ社）を用い、30秒連続テストでは、自動血中分析器（Model 1500 SPORT, YSI社）を用い、指尖より血液サンプルを採取し分析した。

3.1 最大下テスト

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。

最大下テストは、最大下強度で4分間の運動を2分間の休息を挟み5ステージ行わせ、強度は0.5—3.5W/kg（20—70% $\dot{V}O_{2max}$ 相当）の範囲内とした。それらの運動強度、運動時間、休息時間は、先行研究（Finn et al., 2000; Green and Dawson, 1996）を参考にした。運動強度と運動時間に関して、より高い強度および長い時間で行われている先行研究も存在するが（Buck and Naughton, 1999; Medbø and Tabata, 1993）、運動強度が乳酸性作業

閾値、換気性作業閾値、呼吸交換比 1.0 を超える場合や運動時間が長い場合では、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（Hill and Vingren, 2011; Poole and Jones, 2012; Wilkerson et al., 2004）、酸素需要量が過大評価される可能性がある。本研究では、それらを勘案して運動強度と運動時間を設定した。さらに、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最終ステージの呼吸交換比と運動後血中乳酸濃度を測定し、先行研究（Hill and Vingren, 2011; Wilkerson et al., 2004）をもとに呼吸交換比 1.0、血中乳酸濃度 4.0 mmol/L を基準値に設定した。いずれかの基準を超えていた場合、負荷を見直し、別日に再度最大下テストを行わせた。なお、ペダル回転数は負荷に対する至適回転数（負荷に対して酸素摂取量が最小となるペダル回転数（Böning et al., 1984; Coast and Welch, 1985））を考慮した白木ほか（2018）の式によって決定された。式 1 は、運動強度に対し直線的に至適回転数が高まることを想定して作成されたものであり、酸素需要量を過大評価する可能性が低くなる（白木ほか, 2018）。

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

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

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。

3.2 $\dot{V}O_2\text{max}$ テスト

$\dot{V}O_2\text{max}$ テストを最大下テスト終了 20 分後に行わせた。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—0.2 kp（約 9—18 W）ずつ増加させた。ペダル回転数は、90 rpm 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、85 rpm 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。

$\dot{V}O_2\text{max}$ の判定は、先行研究（Midgley et al., 2007; Poole and Jones, 2017）を参考に、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）を必須条件とし、①呼吸交換比が 1.1 以上、②運動時最大心拍数が予測最大心拍数（220 - 年齢）の 90% 以上、③主観的運動強度（6—20 段階の Borg スケール）が 18 以上、のうち 2 つ以上を満たすものとした。そして、酸素摂取量を 5 秒毎に出力したうちの最も大きい 30 秒平均の値を $\dot{V}O_2\text{max}$ とした。最大心拍数は、心拍数を 5 秒毎に出力したうちの最も大きい 30 秒平均の値とした。

3.3 30 秒連続テスト

W-up は、1.0 kp, 90 rpm（約 90 W）で 10 分間の運動を行わせた後、30 秒の休息をはさみ、体重の 7.5%kp の負荷で 6 秒間の全力運動を行わせた。W-up の内容は、複数の先行研究を参考に設定した（前村ほか, 2005；三秋ほか, 2005）。W-up で高まった血中乳酸濃度が十分に低下するよう 20 分の休息をはさみ、その間に呼気ガス分析用マスクを装着し、30 秒連続テストを行わせた（図 1）。

30 秒連続テストは、2 回の 30 秒間の全力運動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 試技とした（以下「4—20 分試技」と略す）。休息時間の設定に関して、事前の実験で平均パワーは 15 分程度で回復することが複数人で確認されたため、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 分を用いることで発揮パワーの変動を十分に観測できると想定し、設定した。全力運動間の休息は、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。また、運動中には絶え間なく声援を送った。

運動中の平均パワーは、1, 2 回目ともに 30 秒間の平均値で算出し、最高パワーは 1 秒平均の最も大きい値として算出し、それぞれ体重で規格化した。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) をそれぞれ 2nd4', 2nd10', 2nd15', 2nd20' と表記した。酸素借の算出方法は、Tabata et al. (1997) を参考に、最大下テストで得られた個々の発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式を用いて、当該運動の発揮パワーから外挿法によって酸素需要量を算出し、酸素需要量に運動中の酸素摂取量を減じることで算出した (図 2)。そして、それらの割合をエネルギー供給比率 (それぞれ有酸素性比率、無酸素性比率と表記) として算出した。なお、それらの酸素需要量、酸素摂取量、酸素借を分時 (ml/kg/min) から 30 秒間の量 (ml/kg) として算出し、それぞれエネルギー供給量、有酸素性エネルギー、無酸素性エネルギーとした。また、算出された酸素需要量と $\dot{V}O_2\max$ の値を用いて $\% \dot{V}O_2\max$ を算出した (図 2)。血中乳酸濃度は、各試技の 2nd 開始 1 分前と終了 1, 3, 5, 7 分後に測定し、2nd 終了後の最も大きい値を最高血中乳酸濃度とした。なお、2nd 終了 5 分後の測定値が 1, 3 分後の値と比較して明らかな低下傾向にあった場合、7 分後の測

定は行わなかった。また、20 分試技のみ 1st 開始 1 分前と終了 1, 3, 5, 7, 10, 14 分後も測定した。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。

そのため、1st の最高血中乳酸濃度は、20 分試技の値を代表値とした。心拍数は、1st 開始 3 分前から 2nd 終了 7 分後まで測定し、1st および 2nd 前後については血中乳酸濃度と同時点で分析し、各時点までの 1 分間の平均値で算出した。

4. 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。また、2nd の血中乳酸濃度と心拍数については、一元配置分散分析 (時間) を行い、有意な主効果が認められた場合、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。

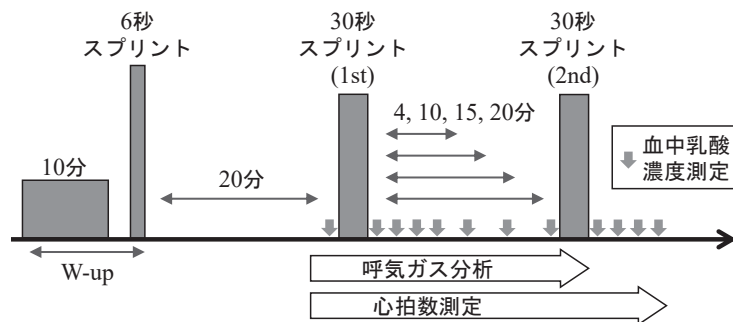


図 1 30 秒連続テストの実験プロトコル

血中乳酸濃度は、20 分試技以外では 1st 開始 1 分前と終了 1, 3, 5, 7, 10, 14 分後の測定を行わなかった。呼吸ガスおよび心拍数は、1st 開始 3 分前から測定した。

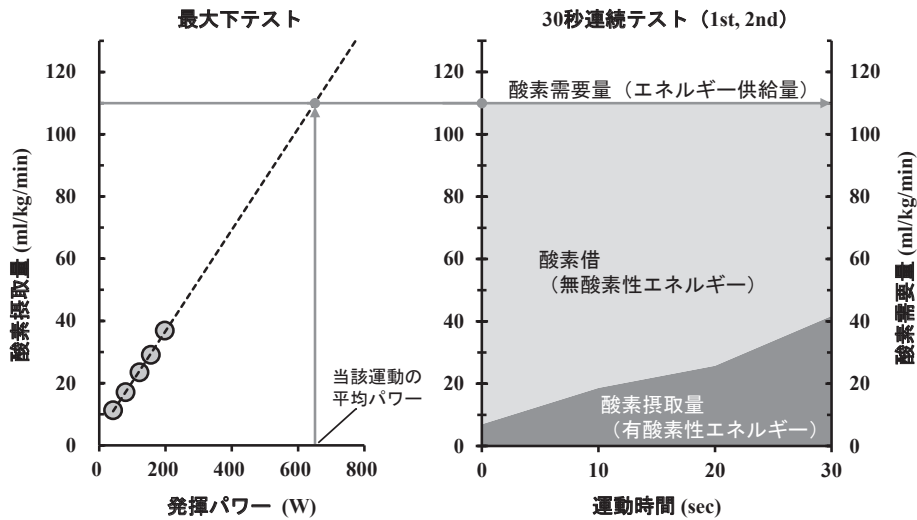


図2 エネルギー供給量の算出方法 (Tabata et al., 1997 をもとに著者改変)

- 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、残りの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
- % $\dot{V}O_2\max$ は、酸素需要量に対し個別の $\dot{V}O_2\max$ を除し、100 倍して算出

III 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 bpm であった。また、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1, 図3-6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1stが2ndより有意に大きい値を示し ($p < 0.05$)、休息時間間の比較では2nd4'より2nd10', 2nd15', 2nd20'が有意に大きい値を示した ($p < 0.05; p < 0.05; p < 0.01$)。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分試技で1stが2ndより有意に大きい値を示し ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05$)、休息時間間の比較では2nd4'より2nd10', 2nd15', 2nd20'が、2nd10'より2nd20'が有意に大きい値を示した ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01$) (p

< 0.05)。平均心拍数は、回数にのみ有意な主効果が認められ ($F = 36.7, p < 0.01$)、全試技で1stより2ndが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分試技で1stが2ndより有意に大きな値を示し ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05$)、休息時間間の比較では2nd4'より2nd10', 2nd15', 2nd20'が、2nd10'より2nd20'が有意に大きい値を示した ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01$) ($p < 0.05$)。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 ($F = 55.2, p < 0.01$)、全試技で1stより2ndが有意に大きな値を示した ($p < 0.01; p < 0.05; p < 0.01; p < 0.01$)。無酸素性エネルギーは、有意な交互作用が認められ ($F = 28.3, p < 0.01$)、回数間の比較では全試技で1stが2ndより有意に大きい値を示し ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01$)、休息時間間の比較では2nd4'より2nd10', 2nd15', 2nd20'が、2nd10'より2nd20'が有意に大きい値を示した ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01$) ($p < 0.05$)。有酸素性比率は、有意

な交互作用が認められ ($F = 11.0, p < 0.01$), 回数間の比較では全試技で 1st より 2nd が有意に大きい値を示し ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05; p < 0.05$), 休息時間間の比較では 2nd4' が 2nd10', 2nd15', 2nd20' より有意に大きい値を示した ($p < 0.01; p < 0.05; p < 0.01$). 反対に, 無酸素性比率は, 有意な交互作用が認められ ($F = 11.0, p < 0.01$), 回数間の比較では全試技で 1st が 2nd より有意に大きい値を示し ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05; p < 0.05$), 休息時間間の比較では 2nd4' より 2nd10', 2nd15', 2nd20' が有意に大きい値を示した ($p < 0.01; p < 0.05; p < 0.01$). 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 分試技で 1st が 2nd より有意に大きい値を示し ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.05$), 休息時間間の比較では 2nd4' より 2nd10', 2nd15', 2nd20' が, 2nd10' より 2nd20' が有意に大きい値を示した. ($p < 0.01; p < 0.01; p < 0.01$)

($p < 0.05$). 運動前血中乳酸濃度は, 回数間の比較では t 検定を用い, 1st20' より 2nd20' が有意に大きい値を示し ($p < 0.01$), 休息時間間の比較では一元配置分散分析を用い, 有意な主効果が認められ ($F = 15.9, p < 0.01$), 2nd4' と 2nd10' が 2nd20' より有意に大きな値を示した ($p < 0.01; p < 0.01$). 最高血中乳酸濃度は, 回数間の比較では t 検定を用い, 1st20' より 2nd20' が有意に大きい値を示した ($p < 0.01$), 休息時間間の比較では一元配置分散分析を用い, 有意な主効果が認められなかった ($F = 2.4, p = 0.09$). 20 分試技の血中乳酸濃度動態および心拍数動態をそれぞれ図 5 と図 6 に示した. 血中乳酸濃度は, 有意な主効果が認められ ($F = 186, p < 0.01$), 1st20' 開始 1 分前は他の全ての時点より有意に小さい値を示し ($p < 0.01$), 1st20' 終了 3 分後は 1st20' 終了 1, 14, 19 分後より有意に大きい値を示し ($p < 0.01 - 0.05$), 2nd20' 終了 5 分後は 2nd20' 後の値を

表 1 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	151 ± 12 **	141 ± 5	152 ± 8 **	141 ± 5	150 ± 9 **	142 ± 5	151 ± 8 *
運動前血中乳酸濃度 (mmol/L)	-	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 (mmol/L)	-	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)	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	190 ± 18 **	220 ± 22	207 ± 21 **††	220 ± 22	211 ± 20 **††	221 ± 21	216 ± 20 ††‡

1. 平均値 ± 標準偏差

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

3. †, ††: 4 分試技の 2nd との有意差 ($p < 0.05, p < 0.01$)

4. ‡, ‡‡: 10 分試技の 2nd との有意差 ($p < 0.05$)

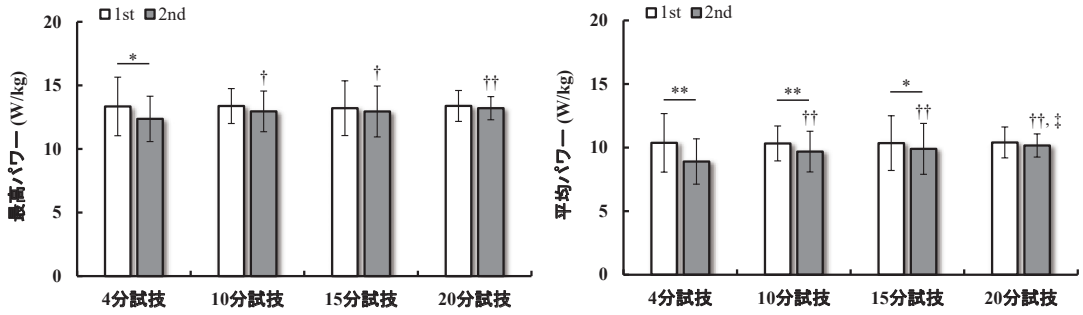


図3 30秒連続テストにおける発揮パワー

***: 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 ($p < 0.05$)

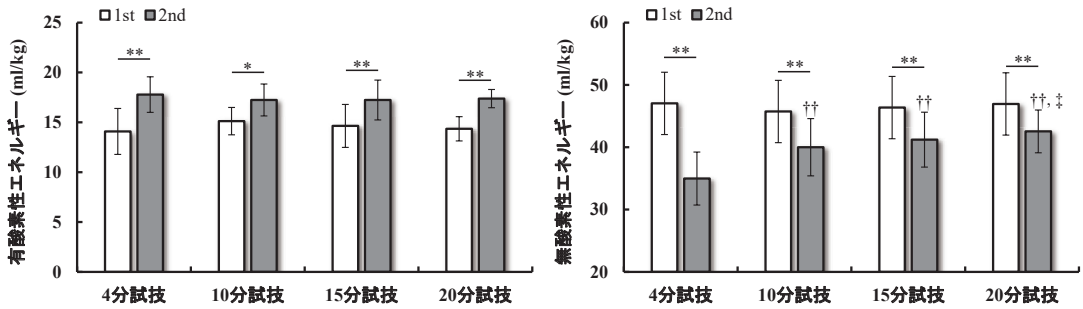


図4 30秒連続テストにおけるエネルギー代謝

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

††: 4分試技の 2nd との有意差 ($p < 0.01$)

‡: 10分試技の 2nd との有意差 ($p < 0.05$)

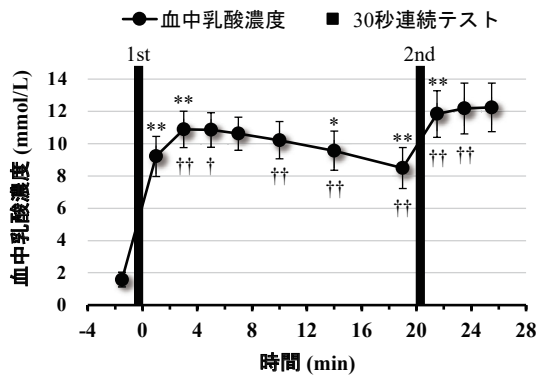


図5 30秒連続テストの20分試技における血中乳酸濃度動態

*, **: 1時点前との有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

†, ††: 2時点前との有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

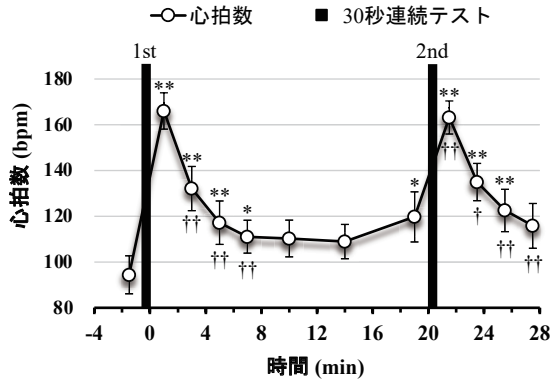


図6 30秒連続テストの20分試技における心拍数動態

*, **: 1時点前との有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

†, ††: 2時点前との有意差 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)

除く全ての時点より有意に大きい値を示した ($p < 0.01-0.05$). 心拍数は、有意な主効果が認められ ($F = 132$, $p < 0.01$), 1st20' 開始1分前は他の全ての時点より有意に小さい値を示し ($p < 0.01-0.05$), 1st20' 終了1分後は2st20' 終了1分後を除く全ての時点より有意に大きい値を示し ($p < 0.01$), 2nd20' 終了1分後は1st20' 終了1分後を除く全ての時点より有意に大きい値を示した ($p < 0.01$).

IV 考察

本研究の目的は、2回の30秒全力自転車運動を異なる休息時間で4試技行わせ、休息時間の異なるレペティションプリントのパフォーマンスおよびエネルギー代謝を明らかにすることであった。最高パワーは2nd4'が1st4'より有意に小さい値を示し、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1, 図3)。これらのことは、10分間の休息で瞬間的なパワー発揮能力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より有意に小さい値を示し、2nd20'は1st20'と比較して有意差は認められなかった(表1, 図3)。これらのことは、20分間の休息で30秒間のパワー発揮能力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より有意に大きい値を示し(図4)、無酸素性エネルギーは全試技で2ndが1stより有意に小さい値を示し(図4)、その結果、無酸素性比率は全試技で2ndが1stより有意に小さい値を示した(表1)。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、2回目で無酸素性エネルギーが減少することを示唆している。ただし、無酸素性エネルギーは、2nd10', 2nd15', 2nd20'が2nd4'より、また、2nd20'が2nd4', 2nd10'より有意に大きい値を示したことから(表1, 図4)、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。

パフォーマンスの変化に関して、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、本研究の結果から(表1, 図3)、10分以上の休息時間を用いることで最高パワーはほぼ回復し、20分以上の休息時間を用いることで30秒間の平均パワーについてもほぼ回復することが示唆された。先行研究で用いられている休息時間は最長6分であり(Bogdanis et al., 1995)、それよりも長い休息時間を用いた場合に最高パワーと平均パワーの回復動態に差がみられたことは新たな知見である。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、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ATP-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。ATP-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秒間の全力自転車運動でATP-PCr系が53%、解糖系が44%であったのに対し (Serresse et al., 1988)、30秒間の全力自転車運動ではATP-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)。そして、2回の30秒全力自転車運動を4分休息で行った研究では、ATP-PCr系によるエネルギー供給は1回目と比較して2回目では78%に低下し、解糖系によるエネルギー供給は56%に低下したことを報告している (Bogdanis et al., 1996)。クレアチンリン酸は約10秒で実質枯渇するため (Bogdanis et al., 1995; Gastin, 2001)、4分の休息で78%まで回復したともいえる。実際に、クレアチンリン酸は休息時の回復が早く、6分の休息で安静時の $85.5 \pm 3.5\%$ まで回復したことが報告されている (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) ことも考えられる。一方、前述した先行研究において2回目の解糖系によるエネルギー供給は、4分の休息で1回目の56%に留まる (Bogdanis et al., 1996)。これらのことから、運動時間によってATP-PCr系と解糖系のエネルギー供給の貢献度に相違があり、またそれぞれの回復速度にも相違があることで、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る。

エネルギー代謝に関して、Bogdanis et al. (1996) は30秒全力自転車運動を4分の休息時間で2回行かせた際、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、平均パワーが低下したことを報告している。本研究でも同様に、全試技で有酸素性エネルギーは1stより2ndで有意に増加し、無酸素性エネルギーは有意に減少し、4—15分試技で平均パワーおよびエネルギー供給量は有意に低下した (表1, 図3)。一方、2nd20'での無酸素性エネルギーは、2nd4', 2nd10'より有意に大きい値を示し、2nd20'での平均パワーおよびエネルギー供給量は1st20'と比較して有意差は認められなかった (表1, 図3)。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、結果的に平均パワーは1回目と同等の値になったといえる。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回目と2回目では運動中のエネルギー代謝が異なることを示唆している。これまで、30秒のレペティションスプリントで1回目と同等のパフォーマンスが発揮できるまで休息時間を設け、そのエネルギー代謝を検討した研究はなく新たな知見である。さらに、レペティションスプリントは無酸素性能力を高める目的として用いられることが多い (遠藤, 2009; 結城, 2009)、2回目で無酸素性エネルギーが減少することはトレーニング処方観点で重要な知見であるといえる。無酸素性エネルギーが1st20'より2nd20'で有意に減少した要因には、ATPやATP-PCr系の加水分解などで生じる水素イオン濃度の増加が挙げられる。3回の30秒全力自転車運動を行かせた先行研究では、水素イオンの増加によって、解糖系の律速酵素であるグリコーゲンホスホリラーゼの活性化が阻害されたと推察されている (Parolin et al., 1999)。実際に、Paroline et al. (1999)の研究において1回目より3回目で筋中の水素イオン濃度が有意に高く (2回目の分析無し)、グリコーゲンホスホリラーゼのa型が有意に小さい値であったことを報告している。また、高強度運動後の筋pHや筋中乳酸濃度は安静時の値に戻るまで1時間以上かかるとも指摘されており (Karlsson and Saltin, 1971; Tomlin and Wenger, 2001)、筋中の水素イオン濃度

も安静時まで低下するのには同様の時間がかかると考えられる。上記のような機序で、本研究において20分という休息时间であっても解糖系による無酸素性エネルギーが減少したものと考えられる。一方、全試技において2回目で1回目より有酸素性エネルギーが有意に増加したことに関して（表1, 図3）、水素イオン濃度や乳酸が影響した可能性がある。水素イオン濃度の増加によって、酸化リン酸化に関わるピルビン酸脱水素酵素が活性化し、酸素摂取量が高まったものと考えられる（Paroline et al., 1999）。実際に、既出のParoline et al. (1999)の研究では、1回目より3回目でピルビン酸脱水素酵素が有意に大きい値であったことを報告している。また、pHの低下や乳酸などによる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））により換気量や筋血流量が高まり、呼吸機能が活性化されることが知られている（Cairns, 2006）。実際に、2nd20'開始1分前の心拍数と血中乳酸濃度、各2ndの平均心拍数は、1stのそれらより有意に大きい値を示した（表1, 図5, 図6）。したがって、有酸素性エネルギーの増加は、水素イオン濃度増加によるピルビン酸脱水素酵素の活性化や、Bohr効果などによって引き起こされたと考えられる。

レペティションスプリントの有効性と実施方法について、本研究で得られた結果をもとに論じる。本研究において運動後最高血中乳酸濃度は1stより2ndで有意に大きい値を示した（表1, 図5）。血中乳酸濃度は身体的負荷の指標としても解釈できるため（八田, 2008）、この結果は、間欠的に複数回運動を行うことで単一で行うよりも大きな負荷が与えられることを示唆している。また、複数回行う際、最高パワーと平均パワーでは回復に要する休息时间に相違があり（表1, 図3）、その背景には前述した通りATP-PCr系と解糖系エネルギー供給の回復速度に相違があると推察されるため、解糖系のエネルギー供給を最大限に引き出したい場合には比較的長い休息时间を用いると合目的なトレーニングになると考えられ

る。その休息时间の設定に関して、山崎（2009）は「生理的完全回復」を基準としており、その指標には心拍数120—130 bpmもしくは血中乳酸濃度5 mmol/Lを提示している。ただし、必ずしもそれらの数値が「生理的完全回復」を示していない可能性がある。本研究において心拍数は、2nd10'終了3分後には132 ± 10 bpmに低下し、5分後には117 ± 9 bpmまで低下した（図6）。また、2ndの無酸素性エネルギーは全試技で1stより有意に小さかったことから（表1, 図4）、20分の休息でも「生理的完全回復」に至ったとはいえず、心拍数を用いてそれを評価することは難しいと考えられる。一方、血中乳酸濃度5 mmol/Lについては、本研究で観察出来なかった部分である。ただし、そもそも乳酸は、水素イオン濃度増加に起因する疲労の原因ではないことが明らかとなっている（Robergs et al., 2004）。その上で、疲労の間接的指標として有用という指摘もあり（八田, 2008; Robergs et al., 2004）、基準値の妥当性を含め今後検討する必要があるだろう。したがって、スポーツ現場でレペティションスプリントを実施する際には、目的によって休息时间に注意する必要がある。その判断材料として心拍数は適切ではないことが示唆された。

以上のことから、レペティションスプリントは、用いる休息时间によってパフォーマンスおよびエネルギー代謝に相違があり、休息时间が長いほど2回目の無酸素性エネルギー供給および平均パワーは回復した。ただし、1回目の運動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。

V 要約

本研究の目的は、2回の30秒全力自転車運動を異なる休息时间（4—20分）で4試技行わせ、休息时间の異なるレペティションスプリントのパフォーマンスおよびエネルギー代謝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) 最高パワーは、4分休息時では1回目より2

- 回目で有意に低下したが、10—20分休息時では1回目と2回目で有意差は認められなかった。
- 2) 平均パワーは、4—15分休息時では1回目より2回目で有意に低下したが、20分休息時では1回目と2回目で有意差は認められなかった。
 - 3) エネルギー供給比率は、全試技で1回目より2回目で無酸素性エネルギー供給比率が有意に低下した。その内訳として、有酸素性エネルギー供給量は全試技で1回目より2回目でも有意に増加し、無酸素性エネルギー供給量は全試技で1回目より2回目でも有意に減少した。
 - 4) 2回目の無酸素性エネルギー供給量は、4分休息時より10—20分休息時でも有意に大きく、4—10分休息時よりも20分休息時でも有意に大きい値を示した。

以上の結果より、レペティションスプリントにおいて、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回目の運動によって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。

文 献

- 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. (2013) High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med.*, 43(5): 313-338.
- 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.
- Cairns, S. P. (2006) Lactic acid and exercise performance: culprit or friend? *Sports Med.*, 36(4): 279-291.
- 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.
- 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.
- 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.
- Gastin, P. B. (2001) Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med.*, 31(10): 725-741.
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A., and Bishop, D. (2011) Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med.*, 41(8): 673-694.
- 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.
- 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.
- Hill, D. W. and Vingren, J. L. (2011) Maximal accumulated oxygen deficit in running and cycling. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 36(6): 831-838.
- Hoffman, J. (2002) Metabolic system and exercise. *Physiological aspects of sport training and performance*. Human Kinetics, pp.27-37.
- Karlssohn, J. and Saltin, B. (1971) Oxygen deficit and muscle metabolites in intermittent exercise. *Acta. Physiol. Scand.*, 82(1):115-22.
- 前村公彦・鈴木康弘・高松薫 (2005) 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.
- Medbø, 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.
- 三秋欣彦・脇本敏裕・中嶋雅子・長尾光城・松枝秀二・長尾憲樹 (2005) 広範囲の負荷設定で30秒間全力自転車駆動を実施した時のパフォーマンスと血中乳酸濃度との関係。川崎医療福祉学会誌, 15 : 201-208.
- 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.
- 村木征人 (1994) トレーニングの基本的側面とトレーニング課題 (2). 村木征人著, スポーツ・トレーニング理論. ブックハウス・エイチディ, pp.102-136.
- 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.
- Poole, D. C. and Jones, A. M. (2012) Oxygen uptake kinetics. *Compr. Physiol.*, 2: 933-996.
- Poole, D. C. and Jones, A. M. (2017) Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$: $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable. *J. Appl. Physiol.*, 122(4): 997-1002.
- 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.
- Robergs, R. A., Ghiasvand, F., and Parker, D. (2004) Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 287(3): R502-R516.
- 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.
- 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.
- Tabata, I., Irisawa, K., Kouzaki, M., Nishimura, K., Ogita, F., and Miyachi, M. (1997) Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 29(3): 390-395.
- 高松薫 (2019) 「競技者の体力トレーニングのあり方」を考える. 高松薫著, 体力トレーニング論. 大修館書店. pp.73-157.
- Tomlin, D. L. and Wenger, H. A. (2001) The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. *Sports Med.*, 31(1):1-11.
- 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.
- 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. pp.206-209.
- 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—速く走る・泳ぐ・滑るを科学する—. 朝倉書店, pp.104-114.
- 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—速く走る・泳ぐ・滑るを科学する—. 朝倉書店, pp.131-138.

(2021年7月14日受付)
(2022年1月27日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2022/2/8