

■ 原著

最大運動回復時の酸素吸入が呼吸循環および 運動筋酸素動態に与える影響

Influence of hyperoxic recovery on cardiopulmonary and muscle
oxygenation following maximal dynamic exercise in healthy adults

関川 清一¹⁾, 馬屋原 康高²⁾, 河江 敏広³⁾

Kiyokazu Sekikawa¹⁾ Yasutaka Umayahara²⁾ Toshihiro Kawae³⁾

1) 広島大学大学院医系科学研究科 〒734-8553 広島県広島市南区霞 1-2-3
電話番号：082-257-5426 FAX 番号：082-257-5426
E-mail アドレス：sekikawa@hiroshima-u.ac.jp

2) 広島都市学園大学健康科学部リハビリテーション学科

3) 東都大学幕張ヒューマンケア学部理学療法学科

1) Department of Physical Analysis and Therapeutic Sciences, Graduate School of Biomedical & Health Sciences, Hiroshima University

2) Department of Rehabilitation, Faculty of Health Science, Hiroshima Cosmopolitan University

3) Department of Physical Therapy, Faculty of Makuhari Human Care, Tohto University

保健医療学雑誌 11 (1): 1-8, 2020. 受付日 2018年12月21日 受理日 2019年9月24日

JAHS 11 (1): 1-8, 2020. Submitted Dec. 21, 2018. Accepted Sep. 24, 2019.

ABSTRACT:

Purpose: The purpose of this study was to investigate the influence of hyperoxic recovery on cardiopulmonary and muscle oxygenation following maximal dynamic exercise.

Subjects: Eleven healthy male subjects performed cycle ergometer step exercise for 10 min at 50% predicted maximal oxygen consumption after 10 min of recovery breathing with either room air or a 100% oxygen gas mixture (random order) following maximal exercise. Pulmonary gas exchange was measured and was computed breath-by-breath among the subjects. Continuous measurements of stroke volume and cardiac output were performed using the Portapres device. Venous blood for measurement of lactate was collected before and after step exercise following maximal exercise. Near-infrared spectroscopy was used to measure peripheral tissue saturation in the right vastus lateralis muscle.

Results: Repeated measures analysis of variance demonstrated that the interaction (recovery breathing × time) was statistically significant with regard to maximal oxygen consumption ($P < 0.05$) and tissue saturation ($P < 0.05$).

Conclusion: Our findings suggest that muscle oxygenation during exercise at 50% predicted maximal oxygen consumption might be influenced by the hyperoxic recovery condition following maximal exercise.

Key words: Hyperoxia, muscle oxygenation, recovery

要旨：

最大運動後の回復期における酸素吸入がその後の一定負荷運動中の運動筋酸素動態に与える影響について明らかにすることを目的とした。対象は、健常男性 11 名（年齢：21.7±1.3 歳）とした。最大運動後に 10 分間、100%酸素濃度もしくは室内空気吸入下で安静回復し、その後 50%予測最大酸素摂取量にて 10 分間の一定負荷運動を実施した。その結果、運動回復期における酸素吸入は、その後の一定負荷運動中の血中乳酸値および循環諸量には影響しないが、運動筋酸素飽和度の経時変化に影響することが明らかとなった。

キーワード：酸素吸入 運動筋酸素動態 運動回復

はじめに

全身運動後の能動的回復法として、軽運動¹⁻⁵⁾やストレッチング²⁾、マッサージ²⁾があり、運動によって高まった血中乳酸濃度、換気量や心拍数をより早期に安静状態に近づける効果が報告されている。また、これら能動的回復法が全身運動後の運動パフォーマンスによりよい維持につながるという仮説を検証した報告⁶⁻¹²⁾があり、スポーツ競技において試合間やハーフタイムでの回復方法が、次の試合におけるパフォーマンスに影響を与える可能性を示唆している。他の全身運動後の回復を促進する方法として、運動回復期の酸素吸入がある。スポーツ競技において、酸素摂取や酸素運搬、酸素供給を人為的に促進することは禁じられているが、酸素吸入による酸素自体の補給は除外されており、酸素カプセルや酸素ボンベなどによる酸素吸入はドーピング行為とならないことと明言されている¹³⁾。酸素吸入の影響については、約 30%酸素¹⁴⁾、60%酸素¹⁵⁾や 100%酸素¹⁶⁾を使用して検討され、血中乳酸濃度や心拍数といった生理的な効果を認めなかったと報告している。一方、健常成人における酸素吸入は心拍数以外の血行動態に影響することが報告されており^{17,18)}、安静時や運動中の心拍数のみならず拍出量といった血行動態に着目した検討が必要である。近年では、非侵襲的にリアルタイムで心拍数のみならず 1 回拍出量や心拍出量を計測する機器が開発され、運動時の血行動態の応答について検討されている^{19,20)}。また、近赤外分光法（以下 NIRS : near infrared spectroscopy）を用いて非侵襲的に脳や運動筋における酸素動態が検討されている。NIRS を使用して、常圧高酸素が局所筋疲労の回復に与える効果について検討した報告^{21,22)}や、酸素吸入下での運動筋酸素動態について報告されている^{23,24)}。また、繰り返される最大短時間ランニングの回復法の影響を運動筋酸素

動態の観点から検討した報告²⁵⁾がある。しかし、運動時の心拍数以外の血行動態や運動筋酸素動態に着目して、全身運動の後の酸素吸入がその後の運動への影響を検討した報告はない。

そこで本研究は、最大運動負荷後の運動回復期における酸素吸入が、その後の一定負荷運動中の呼吸循環および運動筋酸素動態に影響するかを明らかにすることを目的とした。

対象と方法

対象は、運動および喫煙習慣のない健常男性 11 名（年齢：21.7±1.3 歳、身長：169.8±4.2cm、体重：64.6±7.9kg）とした。研究に先立ち、対象者に対して、ヘルシンキ宣言に則り、本研究の内容について口頭ならびに書面にて説明を行い、同意が得られた上で実施した。

一定運動負荷における運動強度を決定するために、自転車エルゴメーター（STB-2400・コンビ）を用いた最大運動負荷試験を実施した。この場合、呼気ガス分析装置（AE-280S・ミナト医科学）および心拍計（DS-3140・フクダ電子）を用いて酸素摂取量を経時的に測定した。運動終了基準は自覚的には下肢疲労感および呼吸困難感により運動継続が困難、他覚的には、回転数 50rpm に維持できない、年齢予測最大心拍数（220-年齢）と同等かそれ以上の場合とした。得られたデータから酸素摂取量-心拍数関係式を算出し、50%予測最大酸素摂取量となる目標ワット数を算出し、これを一定運動負荷における負荷強度とした。

最大運動負荷試験実施から 2 日以上の間隔を空けて一定運動負荷を実施した。室内空気にて、事前に実施した最大運動負荷試験によって得られた最高到達負荷量まで運動を行い、その後、ダグラスバッグを用いて異なる酸素吸入条件（室内空気、100%酸素濃度吸入）にて 10 分間の安静を行い、室内空気下にて予測最大酸素摂取量の 50%

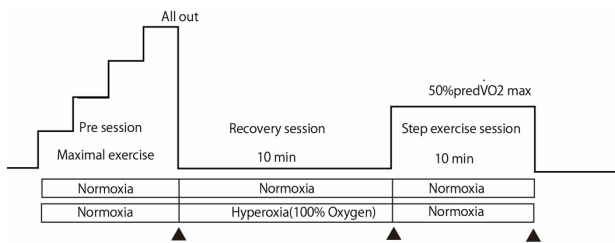


Figure1. Experimental protocol

The measurement point of lactate present as triangle symbols (▲).

の運動強度にて 10 分間の一定負荷運動を実施した (図 1)。一連の運動負荷 (図 1) は、回復期における吸入条件下で各 1 回実施し、この場合の吸入条件は、ランダムに実施した。

一定負荷運動中は、呼吸循環代謝諸量、運動筋酸素動態を連続的に測定した。呼吸循環代謝諸量は、呼気ガス分析装置を使用して酸素摂取量を、連続指血圧装置 (Portapres Model-2・TNO-TPD) を使用して心拍数、1 回拍出量および心拍出量を測定した。連続指血圧測定装置では、指尖における動脈圧波形の計測をし得られたデータから専用解析ソフトウェア (Beatscope ver.1.0・TNO-TPD) を使用して各指標を算出した。

運動筋酸素動態は、組織血液酸素モニター (BOM-LITR・オメガウェーブ) を使用し、組織酸素飽和度を測定した。測定プローブは近赤外光の受光部と送光部との間隔を 3cm に設定し、膝蓋骨上方約 7cm の右外側広筋部位にテープを用いて固定した。得られたデータはアナログ-デジタル変換器 (Power Lab 8s・AD Instrument) を介し、サンプリング周波数 10Hz でパーソナルコンピュータに取り込み、専用解析ソフトウェア (Chart v 5.01・AD Instrument) にて解析を行った。

携帯型簡易乳酸測定器 (アクスポーツ・ベーリンガーマンハイム) を用いて血中乳酸値を測定した。測定は、最大運動後の回復期開始時および一定運動負荷の実施前後の合計 3 回実施した。採血は指先から行い、測定中に採血箇所が重複することのないよう、一本の指につき一回の採血に限定した。

一定運動負荷 1 分前の数値を安静データとして算出した。一定運動における呼吸循環諸量および組織酸素飽和度は 1 分ごとの数値を算出した。回復期における吸入条件が一定運動期における呼吸循環諸量、組織酸素飽和度および乳酸値の経時変化への影響を検討するために、回復条件 (室内

空気、100%酸素吸入) と経過時間を要因とする繰り返しのある二元配置分散分析を用いた。

血中乳酸値の経時変化の比較には、各回復条件にて最大運動後の回復期開始期を対照としたダネット多重比較検定を用いた。また各測定タイミングにおける回復条件の違いを検討するために対応のある t 検定を用いた。

統計処理には統計解析ソフトウェア (SPSS 21.0J for Windows・SPSS Inc.) を使用した。二元配置分散分析および多重比較検定は、有意水準は全て 5%未満とし、対応のある t 検定は、比較の繰り返しを考慮し、有意水準を 1%未満と調整した。

結果

1. 呼吸循環諸量

酸素摂取量は回復条件の主効果に有意性を認めなかったが ($F(1, 10)=1.27, P=0.21$)、経過時間の主効果で有意差を認めた ($F(10, 100)=292.799, P<0.01$)。また、交互作用が有意であった ($F(10, 100)=4.21, P<0.01$) (図 2A)。

心拍数は、回復条件の主効果に有意性を認めなかったが ($F(1, 10)=0, P=0.98$)、経過時間には主効果を認めた ($F(10, 100)=100.72, P<0.01$)。また、交互作用を認めなかった ($F(10, 100)=0.74, P=0.68$) (図 2C)。

一回拍出量は、回復条件の主効果に有意性を認めなかったが ($F(1, 10)=0, P=0.99$)、経過時間には、主効果を認めた ($F(10, 100)=4.33, P<0.05$)。また、交互作用に有意差を認めなかった ($F(10, 100)=1.15, P=0.89$) (図 2D)。

心拍出量は、回復条件の主効果に有意性を認めなかったが ($F(1, 10)=0.01, P=0.97$)、経過時間には、主効果を認めた ($F(10, 100)=26.19, P<0.05$)。また、交互作用に有意差を認めなかった ($F(10, 100)=0.88, P=0.55$) (図 2E)。

2. 運動筋酸素飽和度

組織酸素飽和度は回復条件の主効果に有意性を認めなかったが ($F(1, 10)=2.75, P=0.12$)、経過時間において主効果を認めた ($F(10, 100)=17.28, P<0.01$)。また、交互作用が有意であった ($F(10, 100)=13.09, P<0.01$) (図 2B)。

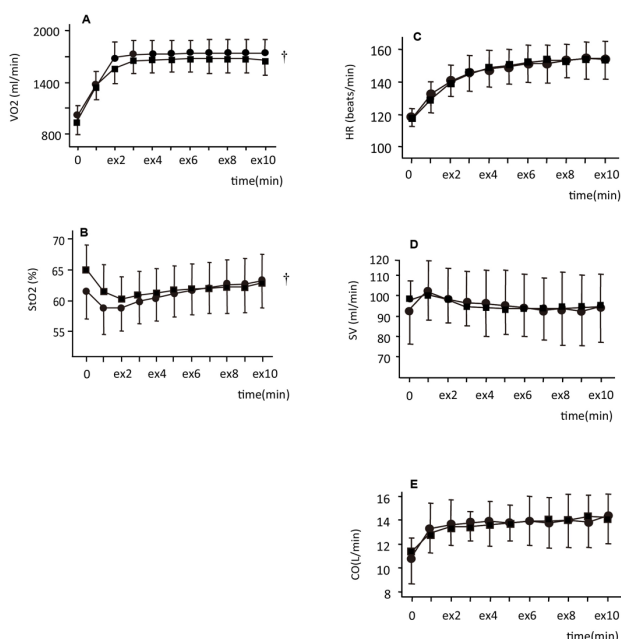


Figure 2. Time course of step exercise at 50%predVO₂max
A time course of each parameter during step exercise after recovery breathing in 100% oxygen is shown by the square solid lines (■), and breathing in room air is shown by circle solid lines (●).
Dots, squares=mean Bars=SD.

†; P < 0.05, two way ANOVA, interaction

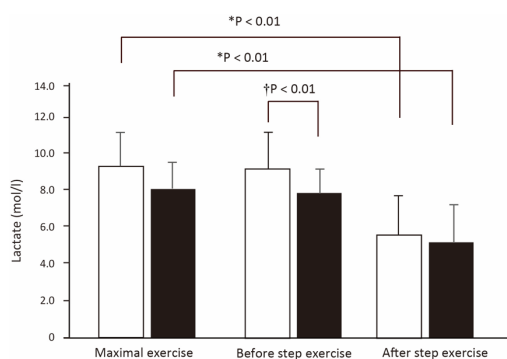


Figure 3. Time course of Lactate

□ Recovery breathing in room air
■ Recovery breathing in 100% oxygen

†; P < 0.01, compared to room air

*; P < 0.01, compared to post maximal exercise

3. 血中乳酸

最大運動後の回復期開始時では、回復条件の違いによる有意差は認めなかった(室内空気: 9.3 ± 1.9 , 100%酸素吸入 8.1 ± 1.4 mol/l, $P=0.05$)。一定運動負荷開始前において、室内空気呼吸では、 9.2 ± 2.0 mol/l, 100%酸素吸入では、 7.9 ± 1.3 mol/l であり、二群間に有意差を認めた($P < 0.01$) (図 3)。一定運動負荷において 5.7 ± 2.1 mol/l, 100%酸素吸入では、 5.2 ± 2.0 mol/l であり、二群間に有意差

を認めなかった ($P=0.441$)。

回復期室内空気条件において、最大運動後の回復期開始期時から一定運動負荷前で有意差を認めなかったが、一定運動負荷直後と比較して有意に低下した ($P < 0.01$) (図 3)。回復期酸素吸入条件では、最大運動後の回復期開始期時から一定運動負荷前で有意差を認めなかったが、一定運動負荷直後と比較して有意に低下した ($P < 0.01$) (図 3)。

考察

本研究では、回復条件の違いにより、一定運動期における酸素摂取量の経時変化に有意な変化を認めた。酸素摂取量は、心拍出量といった中枢性要因と動静脈酸素較差といった末梢性要因とで規定されており²⁶⁾、全身の酸素摂取量の動態を検討するうえで、この両要因を考慮することが重要である。近年では、非侵襲的に運動中の心拍出量測定^{19, 20)}や組織酸素飽和度^{27, 28)}を測定することが可能となり、本研究においてこれらの機器を使用した。

本研究では、回復期の吸入条件により運動時の心拍数、1回拍出量および心拍出量に有意な違いを認めなかった。健康成人において、高酸素状態は心拍数や心拍出量の低下^{17, 18)}や血圧の上昇^{17, 18, 29)}といった循環動態や心拍変動に影響する³⁰⁾報告があり、高濃度酸素吸入下での運動が、運動時循環動態に影響する可能性がある。しかし、本研究では、最大運動後の回復期に高濃度酸素吸入を実施し、その後の一定負荷運動では酸素吸入を行わず一定運動負荷運動を実施したため、回復条件の違いによって心臓における循環動態に影響しないと考える。

末梢性要因である組織酸素飽和度に回復条件による有意差は認められなかったが、交互作用を認めた。NIRS から得られる組織酸素飽和度の指標は、運動筋への酸素供給と運動筋での酸素消費のバランスを反映する²⁷⁾。組織の酸素供給量は、動脈酸素含量と運動筋血流量によって規定される。動脈血酸素含量はヘモグロビン量、酸素飽和度および動脈血酸素分圧で規定され、血中溶解酸素量よりもヘモグロビン結合酸素量が大部分を占める。健康者において高濃度酸素吸入をし、肺

における酸素濃度が増加しても、すでに血液中のヘモグロビンの大部分が酸素と飽和状態となっているため、酸素含量に影響しない。よって、低酸素血症を呈していない健常成人では、回復期酸素吸入によっても酸素供給能力に影響しない可能性がある。また、酸素吸入によって運動筋酸素消費が影響しない³¹⁾という報告があり、本研究においても酸素吸入により引き起こされる安静時筋酸素消費に影響しなかったと推察される。組織への酸素供給の他の規定要因である筋血流量がある。筋血流は、運動開始とともに筋収縮とともに増加する³²⁾。NIRSを使用して筋血流量を計測するためには、静脈閉塞法もしくは動脈閉塞法を併用する必要があるが^{33,34)}、本研究において実施しておらず、筋血流量は不明であった。微小血管の血流は、低酸素や高酸素状態によって変化し³⁵⁾、安静時において、正常酸素状態と比較して高酸素状態では、安静時の筋血流量が減少する報告がある³⁶⁻³⁸⁾。よって、安静時に高酸素状態が運動開始時に増大する運動筋血流量に影響する可能性があり、この影響が一定運動負荷開始時の組織酸素飽和度に影響し、2群間の変化が異なった一要因と考えられる。

組織酸素飽和度と同様に酸素摂取量において、回復条件によって運動時の経時変化が異なる結果となった。末梢における運動筋の酸素動態は、全身の酸素摂取量と関連することが報告されている³⁷⁾。回復期における高濃度酸素吸入が、その後の一定負荷運動時の運動筋酸素動態に影響し、全身の酸素摂取量の動態に有意な変化を認めたものと考えられる。

今回は運動回復期のみ酸素吸入であり、その後の運動中には高濃度酸素吸入を実施していないが、高濃度酸素吸入は運動開始時の呼吸循環代謝応答にも影響することが考えられるため、今後は酸素摂取応答特性などを詳細に検討する必要がある。

運動の開始時にはグリコーゲンが分解され、その過程で酸素の供給が充分であると、ピルビン酸が酸化されることにより、二酸化炭素と水と共にアデノシン三リン酸が産生される。さらに、運動強度が上昇するに伴い、ミトコンドリアでの酸化がグリコーゲンの分解に追いつかなくなると、細胞質でピルビン酸が乳酸となり一時的に貯蓄され、ミトコンドリアでの酸化の調節を行う。その

結果、血中乳酸濃度が上昇する³⁸⁾。一方、運動回復期や運動強度の低下に伴い、この反応過程の中で乳酸が生成されるよりも乳酸がピルビン酸となる過程の作用が高まり、その結果、血中乳酸濃度が減少する。血中乳酸濃度は、この生成過程と除去過程の両要因のバランスで決定される³⁸⁾。筋運動を行っていない回復期や低強度運動中では、乳酸の生成過程よりも除去過程が主として起こり³⁸⁾、高強度の運動後にクーリングダウンとして運動を行うことが、乳酸の除去に影響すると報告されている^{39,40)}。本研究では、最大運動後の回復期に100%酸素吸入を行い、各回復条件において回復前後の乳酸値に有意な低値を認めなかった。これは本研究において、最大運動後の回復期にクーリングダウンや低強度運動を実施しておらず、乳酸を早期に除去する試行^{39,40)}を導入しておらず、10分間の安静状態では有意に低下しなかったと考える。Winterら⁴¹⁾は、サッカー選手を対象として回復期に100%高濃度酸素吸入を行ったが、血中乳酸濃度の動態に影響しないと報告している。さらに、村松ら¹⁴⁾は、高濃度酸素発生器(30%酸素)による回復期の疲労回復効果を検討し、血中乳酸濃度の動態には影響しないと報告しており、運動回復期による酸素吸入は乳酸除去に影響しない可能性がある。しかし、本研究において、10分の安静回復後である一定運動負荷前において、回復期での酸素吸入により乳酸が有意に低下したことから、最大運動後の酸素吸入が、乳酸除去機能に影響する可能性がある。今後は、最大運動後の回復時間の影響や酸素吸入下での低強度運動といった乳酸除去に関係する要因を踏まえて検討する必要がある。

文献

- 1) 池上晴夫, 稲沢見矢子, 近藤徳彦: 乳酸消失からみたクーリング・ダウンに関する研究-特に漸減強度の回復期運動の効果について. 筑波大学体育科学紀要 9: 151-156, 1986.
- 2) 山本正嘉, 山本利春: 激運動後のストレッチング, スポーツマッサージ, 軽運動, ホットパックが疲労回復におよぼす効果-作業能力および血中乳酸の回復を指標として. 体力科学 42(1): 82-92, 1993.
- 3) 神林勲, 塚本未来, 木本理可・他: 最大運動

- 後のクーリング・ダウン運動実施の有無が好中球スーパーオキシド生成能に与える影響. 北海道教育大学紀要 68 (1): 47-54, 2017.
- 4) 郡司康平, 小宮秀明: 高強度運動後のクーリングダウンが血糖や血中乳酸濃度の低下率に及ぼす影響. 日本運動生理学雑誌 23(2): 45-52, 2016.
 - 5) Van Hooren B., Peake J.M.: Do We Need a Cool-Down After Exercise? A Narrative Review of the Psychophysiological Effects and the Effects on Performance, Injuries and the Long-Term Adaptive Response. *Sports Med* 48(7): 1575-1595, 2018.
 - 6) Dupont G., Moalla W., Guinhouya C. et al.: Passive versus active recovery during high-intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* 36(2): 302-308, 2004.
 - 7) Hemmings B., Smith M., Graydon J., et al.: Effects of massage on physiological restoration, perceived recovery, and repeated sports performance. *Br J Sports Med* 34(2): 109-114; discussion 115, 2000.
 - 8) Heyman E., B D. E. Geus, Mertens I., et al.: Effects of four recovery methods on repeated maximal rock climbing performance. *Med Sci Sports Exerc* 41(6): 1303-1310, 2009.
 - 9) Hunter A. M., Watt J. M., Watt V., et al.: Effect of lower limb massage on electromyography and force production of the knee extensors. *Br J Sports Med* 40(2): 114-118, 2006.
 - 10) Lattier G., Millet G. Y., Martin A., et al.: Fatigue and recovery after high-intensity exercise. Part II: Recovery interventions. *Int J Sports Med* 25(7): 509-515, 2004.
 - 11) McAinch A. J., Febbraio M. A., Parkin J. M., et al.: Effect of active versus passive recovery on metabolism and performance during subsequent exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 14(2): 185-196, 2004.
 - 12) Spencer M., Bishop D., Dawson B., et al.: Metabolism and performance in repeated cycle sprints: active versus passive recovery. *Med Sci Sports Exerc* 38(8): 1492-1499, 2006.
 - 13) World-Anti-Doping-Agency: The prohibited list. Available from: <https://www.wada-ama.org/> 閲覧日 2019年7月31日
 - 14) 村松茂, 有本守男, 木島晃: 換気量, 心拍数および血中乳酸値からみた高濃度酸素発生器の疲労回復効果. 日本生理人類学会誌 9(2): 67-70, 2004.
 - 15) 藤瀬武彦, 橋本麻里, 長崎浩爾: 短時間激運動後の回復期における高濃度酸素ガス吸入の効果-血中乳酸値及び運動能力の回復から. 新潟国際情報大学情報文化学部紀要 6: 143-158, 2003.
 - 16) Robbins M.K., Gleeson K., Zwillich C. W.: Effect of oxygen breathing following submaximal and maximal exercise on recovery and performance. *Med Sci Sports Exerc* 24(6): 720-725, 1992.
 - 17) Bak Z., Sjoberg F., Rousseau A., et al.: Human cardiovascular dose-response to supplemental oxygen. *Acta Physiol (Oxf)* 191(1): 15-24, 2007.
 - 18) Waring W. S., Thomson A. J., Adwani S. H., et al.: Cardiovascular effects of acute oxygen administration in healthy adults. *J Cardiovasc Pharmacol* 42(2): 245-250, 2003.
 - 19) Goreham J. A., Kimmerly D. S., Ladouceur M.: Using the Portapres((R)) for the measurement of toe arterial blood pressure during movement: is it valid and reliable? *Physiol Rep* 5(15), 2017.
 - 20) Wibmer T., Denner C., Fischer C., et al.: Blood pressure monitoring during exercise: comparison of pulse transit time and volume clamp methods. *Blood Press* 24(6): 353-360, 2015.
 - 21) Yokoi Y., Yanagihashi R., Morishita K., et al.: Effects of Exposure to

- Normobaric Hyperoxia on the Recovery of Local Muscle Fatigue in the Quadriceps Femoris of Young People. *J Phys Ther Sci* 26(3): 455-460, 2014.
- 22) Shimoda M., Enomoto M., Horie M., et al.: Effects of hyperbaric oxygen on muscle fatigue after maximal intermittent plantar flexion exercise. *J Strength Cond Res* 29(6): 1648-1656, 2015.
- 23) Larsson A., Uusijarvi J., Eksborg S., et al.: Tissue oxygenation measured with near-infrared spectroscopy during normobaric and hyperbaric oxygen breathing in healthy subjects. *Eur J Appl Physiol* 109(4): 757-761, 2010.
- 24) Sekikawa K., Tabusadani M., Tabira K., et al.: Influence of mild hypoxia on cardiorespiratory responses and muscle oxygenation during incremental exercise. *Journal of Health Science, Hiroshima University* 2(1): 85-89, 2002.
- 25) Buchheit M., Cormie P., Abbiss C.R., et al.: Muscle deoxygenation during repeated sprint running: Effect of active vs. passive recovery. *Int J Sports Med* 30(6): 418-425, 2009.
- 26) Myers J.N.: *Essentials of Cardiopulmonary Exercise Testing* ppl-36, Human Kinetics, 1996.
- 27) McCully K.K., Hamaoka T.: Near-infrared spectroscopy: what can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle? *Exerc Sport Sci Rev* 28(3): 123-117., 2000.
- 28) Ferrari M., Quaresima V.: Near Infrared Brain and Muscle Oximetry: From the Discovery to Current Applications. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 20(1): 1-14, 2012.
- 29) Gole Y., Gargne O., Coulange M., et al.: Hyperoxia-induced alterations in cardiovascular function and autonomic control during return to normoxic breathing. *Eur J Appl Physiol* 111(6): 937-946, 2011.
- 30) Graff B., Szyndler A., Czechowicz K, et al.: Relationship between heart rate variability, blood pressure and arterial wall properties during air and oxygen breathing in healthy subjects. *Auton Neurosci* 178(1-2): 60-66, 2013.
- 31) Lai N., Saidel G. M., Grassi B., et al.: Model of oxygen transport and metabolism predicts effect of hyperoxia on canine muscle oxygen uptake dynamics. *J Appl Physiol* 103(4): 1366-1378, 2007.
- 32) Radegran G., Saltin B.: Muscle blood flow at onset of dynamic exercise in humans. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 274(1): H314-H322, 1998.
- 33) Boushel R., Langberg H., Olesen J., et al.: Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease. *Scand J Med Sci Sports* 11(4): 213-222, 2001.
- 34) Lucero A. A., Addae G., Lawrence W., et al.: Reliability of muscle blood flow and oxygen consumption response from exercise using near-infrared spectroscopy. *Exp Physiol* 103(1): 90-100, 2018.
- 35) Jia Y., Li P., Dziennis S., et al.: Responses of peripheral blood flow to acute hypoxia and hyperoxia as measured by optical microangiography. *PLoS One* 6(10): e26802, 2011.
- 36) Casey D. P., Joyner M. J., Claus P.L., et al.: Hyperbaric hyperoxia reduces exercising forearm blood flow in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 300(5): H1892-1897, 2011.
- 37) Kawaguchi K., Tabusadani M., Sekikawa K., et al.: Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake? *Eur J Appl Physiol* 84(1-2): 158-161., 2001.
- 38) 八田秀雄: 新版 乳酸を活かしたスポーツト

レーニング, pp33-55, 講談社, 東京, 2015.

- 39) Devlin J., Paton B., Poole L., et al. :
Blood lactate clearance after maximal
exercise depends on active recovery
intensity. J Sports Med Phys Fitness
54(3): 271-278, 2014.
- 40) Menzies P., Menzies C., McIntyre L., et
al. : Blood lactate clearance during
active recovery after an intense running
bout depends on the intensity of the
active recovery. J Sports Sci 28 (9):
975-982, 2010.
- 41) Winter F.D. Jr., Snell P.G., Stray-
Gundersen J. : Effects of 100% oxygen on
performance of professional soccer
players. JAMA 262 (2): 227-229, 1989.