

低酸素トレーニングが、短時間・高強度運動のパフォーマンスと運動後の血中乳酸濃度 の変化動態に与える影響について

竹井尚也^{1,2)}、八田秀雄¹⁾

¹⁾東京大学大学院総合文化研究科、²⁾日本学術振興会特別研究員-DC2

1. 序論

高地トレーニングを始めとする低酸素トレーニングはこれまでアスリートの競技能力を向上させるために利用されてきた¹⁾。低酸素環境への曝露は血中ヘモグロビン濃度およびヘマトクリット値を増大させ、酸素運搬能力を向上させることが知られている²⁾。近年では、低酸素環境下でのスプリントトレーニングが短時間・高強度運動のパフォーマンスを高める報告が相次いでなされている^{3,4,5,6)}。このような低酸素トレーニングによる短時間・高強度運動のパフォーマンスの向上には、筋への血流量の増大や緩衝能の向上、筋のPCr量の増加など、必ずしも血液性状の変化を伴わない適応が関与している可能性が示されている^{4,6)}。また、低酸素曝露により解糖系酵素活性が高まる可能性や乳酸輸送に関わるMCT4タンパク質量が増加する可能性が示されている^{7,8)}。

一方で、低酸素環境下でのスプリントトレーニングが乳酸代謝に与える影響を検討した研究は少ない。そこで、本研究では急性の低酸素環境下での短時間・高強度運動時の乳酸代謝および間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングが短時間・高強度運動時の乳酸代謝に与える影響について検討することを目的とした。また、著者はこれまでに400m全力走後に高頻度かつ連続的に採血を行うことにより運動後の血中乳酸濃度増加率を算出し、パフォーマンスの指標としての可能性を検討してきた。これまでに大学陸上競技選手を対象とした実験で、400m走のパフォーマンス（平均走速度）と運動後の血中乳酸濃度増加率との間に有意な正の相関関係があることを見出した。本研究では従来から糖分解の指標として用いられている最大血中乳酸濃度とともに、運動後の血中乳酸濃度増加率も測定項目に加え、低酸素環境への曝露および低酸素環境下でのスプリントトレーニングが乳酸代謝に与える影響について検討することとした。そこで、実験1では急性の低酸素環境への曝露に関する検討を、実験2では間欠的な低酸素環境下でのトレーニング効果に関する検討を行った。なお、本研究では計画の立案段階では、400m全力走を運動課題とすることを検討していたが、運動課題の再現性やパフォーマンス評価の妥当性をより高めるために、運動課題を30秒間全力ペダリング運動に変更した。

2. 研究方法

2.1 実験1

大学陸上競技選手5名を被験者として、常圧通常酸素条件下 ($FiO_2 : 0.209$) 及び常圧低酸素条件下 ($FiO_2 : 0.145$) において運動負荷試験を実施した。低酸素曝露は低酸素発生装置 (YHS-C10、ハイポテック社、東京) から発生した低酸素空気をダクトとマスクを介して吸気することで得た。運動負荷試験は30秒間全力ペダリング運動 (ウインゲートテスト) として、単純盲検法にて実施した。ウインゲートテス

トのペダル負荷は体重 1 kgあたり 0.75Nとした。ウインゲートテストでのパフォーマンスを評価するために、平均パワー値、最大パワー値、疲労指数を測定および算出した。ウインゲートテストの前に各条件での酸素濃度の空気を吸気しながらウォーミングアップ (100 W, 90 rpm) を 10 分間実施した。ウインゲートテスト及びウォーミングアップは、競技用の自転車と固定負荷台 (Jet Fluid Pro、Cycleops、USA) パワーメーター (Powertap、Cycleops、USA) を用いて行った。各条件での運動負荷試験は、疲労の影響を排除するため、少なくとも 48 時間の間隔をあけて実施した。運動時の糖分解を評価するため、運動負荷試験前後に高頻度かつ連続的に採血を実施し、血中乳酸濃度を測定した。血中乳酸濃度測定には簡易乳酸濃度測定器 (Lactate Pro2、アークレイ、京都) を使用した。採血は運動負荷試験の開始 1 分前および終了から 0.5、1、2、3、4、5、7、10 分後に実施した。被験者は、実験開始前に実験の目的や方法、考えられるリスクについて書面及び口頭での説明を受け、実験参加同意書に署名したものとした。本研究は、東京大学内の倫理審査委員会の承認を受け実施された。

2.2 実験 2

大学自転車競技選手 7 名 (男性 6 名、女性 1 名) を対象として、6 日間のトレーニング介入実験を実施した。トレーニング介入は、常圧低酸素環境下 (FiO_2 : 0.145) での自転車スプリント運動として、30 秒間全力ペダリング運動を 5 分間の休止を挟み 3 回反復した。低酸素曝露は低酸素発生装置 (YHS-C10、ハイポテック社、東京) から発生した低酸素空気をダクトとマスクを介して吸気することで得た。トレーニング介入期間の前後に運動負荷試験として、常圧通常酸素条件下でウインゲートテストを実施した。ウインゲートテストのペダル負荷は体重 1 kgあたり 0.75Nとした。ウインゲートテストでのパフォーマンスを評価するために、実験 1 と同様の項目を測定および算出した。ウインゲートテスト及びウォーミングアップは各被験者が普段使用している競技用の自転車と固定負荷台 (Jet Fluid Pro、Cycleops、USA)、パワーメーター (Powertap、Cycleops、USA) あるいはペダリングモニター (ペダリングモニターセンサー、パイオニア、東京) を用いて実施した。運動負荷試験は初日のトレーニングの少なくとも 24 時間前および最終トレーニング日から 7-10 日後に実施した。運動時の糖分解を評価するため、実験 1 と同様の方法で採血および血中乳酸濃度測定を実施した。被験者は、実験開始前に実験の目的や方法、考えられるリスクについて書面及び口頭での説明を受け、実験参加同意書に署名したものとした。本研究は、東京大学内の倫理審査委員会の承認を受け実施された。

2.3 データ分析

ウインゲートテスト中の発揮パワーはパワーメーターおよびペダリングモニターを用いて 60Hz のサンプリングレートにて測定した。30 秒間のウインゲートテストを 6 分割し、5 秒毎の発揮パワーの平均を求め、最も平均パワーの低い区間での測定値を、最も平均パワーの高い区間の測定値で除して 100 倍したものを疲労指数 (%) とした。運動前の血中乳酸濃度をベースラインとして血中乳酸濃度の曲線下面積

(mmol・min/l) を求めた。また、運動終了 0.5 分後から血中乳酸濃度の増加が“プラトー”に至るまでの増加量を運動終了 0.5 分後から“プラトー”に至るまでの時間で除すことにより血中乳酸濃度増加率 (mmol/l/min) を算出した。連続する 2 点間の血中乳酸濃度の増加量が 1mmol/l を下回った時、前者の時点を“プラトー”と定義した。

2.4 統計処理

各条件間の測定値の有意差について Student's T-test を用いて検討した。各測定項目間の相関関係について Pearson の相関係数を用いて検討した。測定値はすべて平均値±標準誤差で示した。本研究での有意水準は 5% とし、危険率が 5% 以上 10% 未満ものについては傾向差とした。

3. 結果

3.1 実験 1

常圧通常酸素条件下 (NOR 条件) 及び常圧低酸素条件下 (HYP 条件) での平均パワー値、最大パワー値、疲労指数は 665 ± 34 W、 960 ± 50 W、 50.4 ± 6.3 % 及び 677 ± 32 W、 952 ± 35 W、 51.2 ± 5.0 % であり、いずれも条件間での有意差は認められなかった (図 1)。各条件での運動前後の血中乳酸濃度の変化動態を図 2 に示す。運動前から運動 10 分後の血中乳酸濃度の曲線下面積 (AUC) は、HYP 条件で NOR 条件に比較して有意に高い値を示した (103.2 ± 7.6 mmol・min/l および 98.2 ± 7.7 mmol・min/l、 $p < 0.05$ 、図 3)。また、最大血中乳酸濃度は HYP 条件で NOR 条件に比較して有意に高い値を示した (13.2 ± 0.9 mmol/l および 14.3 ± 0.9 mmol/l、 $p < 0.05$ 、図 3)。血中乳酸濃度増加率について、条件間での有意差は認められなかった (図 3)。一方で、HYP 条件においてのみ血中乳酸濃度増加率と平均パワー値との間に相関傾向が確認された ($r = 0.84$, $p = 0.08$ 、図 4)

3.2 実験 2 : トレーニング介入前後での平均パワー値、最大パワー値、疲労指数は、 685 ± 45 W、 969 ± 67 W、 58.2 ± 3.3 % 及び 707 ± 37 W、 987 ± 42 W、 58.5 ± 2.8 % であり、いずれも介入前後での有意差は認められなかった (図 5)。トレーニング介入前後での運動前後の血中乳酸濃度の変化動態を図 6 に示す。運動前から運動 10 分後までの血中乳酸濃度の AUC は、トレーニング介入後でトレーニング介入前に比較して有意に低い値を示した (107.8 ± 11.5 mmol・min/l および 93.7 ± 9.1 mmol・min/l、 $p < 0.05$ 、図 7)。最大血中乳酸濃度および血中乳酸濃度増加率についてトレーニング介入前後において有意差は認められなかった (図 7)。また、最大血中乳酸濃度および血中乳酸濃度増加率とパフォーマンスとの有意な相関関係はトレーニング介入前後どちらにおいても認められなかった。

4. 考察

4.1 急性の低酸素環境への曝露による影響

実験 1 において、NOR 条件および HYP 条件での短時間・高強度運動のパフォーマンスと血中乳酸濃度の変化について検討した。両条件間でウインゲートテストのパフォーマンスが同様であったことから、本研究で用いた条件において、短時間・高強度運動のパフォーマンスは損なわれないことが示された。一方で、運動前から運動 10 分後までの血中乳酸濃度の AUC は HYP 条件で NOR 条件に比較して有意に高い値を示した。また、運動後の最大血中乳酸濃度は HYP 条件で NOR 条件に比較して有意に高い値を示した。これらのことは急性の低酸素環境への曝露により短時間・高強度運動時の糖分解が亢進している可能性を示している。先行研究では、急性の低酸素曝露により交感神経活動が活性化しカテコラミン分泌が亢進することが報告されている⁹⁾。こうした交感神経系を介した要因が、急性の低酸素曝露による短時間・高強度運動時の糖分解亢進の一因を担っている可能性が考えられる。一方で、ウインゲートテストのパフォーマンスが両条件で同様であることから、急性の低酸素環境への曝露による短時間・高強度運動時の糖分解亢進はパフォーマンスに影響していないと考えられる。糖の体内での貯蔵量は、脂肪に比べてそれほど多くなく枯渇しやすいため、運動中の過剰な糖分解は、反復する高強度運動の遂行に悪影響を及ぼしかねない。先行研究では 6 秒間のスプリント運動を 10 回反復する課題において、急性の低酸素環境への曝露により通常酸素条件と比較して、有意に血中乳酸濃度が上昇し、なおかつ試行の後半における有意な仕事率の低下を報告している³⁾。以上のことから、急性の低酸素環境への曝露より過剰な糖分解の亢進が起こることが示され、このことにより短時間・高強度運動の繰り返し能力が損なわれる可能性があると考えられる。

4.2 間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングによる影響

実験 2 において、6 日間の間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングが短時間・高強度運動のパフォーマンスと血中乳酸濃度の変化について検討した。本研究では、6 日間のスプリントトレーニングの前後でのウインゲートテストのパフォーマンスについての有意な差は認められなかった。したがって、本研究のトレーニング条件では運動パフォーマンスを向上させるには至らなかった。先行研究では、間欠的な低酸素環境下での反復スプリントトレーニングが、スプリントの繰り返し能力を向上させることを報告している^{3,4,5,6)}。本研究では間欠的な低酸素環境下での反復スプリントトレーニングが単回の短時間・高強度運動のパフォーマンスを向上させるかを検討した。単回の短時間・高強度運動のパフォーマンスを向上させるためには、本研究とは異なるトレーニング条件が必要となるかもしれない。一方で、本研究での 6 日間の間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングにより、運動前から運動 10 分後までの血中乳酸濃度の AUC が有意に低下する効果が確認された。このことは、トレーニング介入後においてトレーニング介入前と比較して、少ない糖分解量で同等の仕事をしていることを示唆している。実験 1 では、急性の低酸素環境への曝露により短時間・高強度運動時の糖分解が過剰になる可能性が示唆されたが、間欠的な低酸素環境下での 6 日間のスプリントトレーニングが過剰な糖分解を抑制し、さらに介入前よりも少ない糖分解で同様の仕事量の短時間・高強度

運動を完遂している可能性が考えられる。このことは、短時間・高強度運動での過剰な糖分解を抑制することにより、筋グリコーゲンの利用を節約し、短時間・高強度運動を反復する場合に有利に働く可能性が考えられる。また、この糖分解の抑制が、先行研究で報告されているような低酸素環境下でのスプリントトレーニングによるスプリントの繰り返し能力向上の一因となっている可能性も考えられる。今後、間欠的低酸素環境下でのスプリントトレーニングにより単回の短時間・高強度運動のパフォーマンスを改善させるトレーニング方法の検討や間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングによる糖分解の抑制がスプリントの繰り返し能力に与える影響などについてさらなる検討を行う予定である。

4.3 急性および間欠的な低酸素曝露が運動後の血中乳酸濃度増加率に与える影響

急性の低酸素環境への曝露や間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングによる運動後の血中乳酸濃度増加率への影響は確認されなかった。先行研究では、主に骨格筋から血中への乳酸輸送に関わる MCT4 が、低酸素曝露によって増加する可能性が報告されていたが^{4,8)}、本研究において乳酸の骨格筋から血中への輸送能力を反映し得る運動後の血中乳酸濃度増加率に対する変化はなかった。MCT4 での乳酸輸送は細胞内外の乳酸濃度やプロトン濃度の勾配による影響を強く受ける¹⁰⁾。実験 2 では、トレーニング介入により血中乳酸濃度の AUC が有意に低下したことから、骨格筋での乳酸の産生量自体が低下し、結果的に細胞内外の乳酸やプロトンの濃度勾配差が小さくなり、運動後の血中乳酸濃度増加率に影響を与えた可能性が考えられる。一方で、実験 1 では運動後の血中乳酸濃度増加率の条件間での有意な差は確認されなかったものの、HYP 条件でのみ運動後の血中乳酸濃度増加率とウインゲートテストのパフォーマンスとの間に相関傾向が認められた。実験 1 での HYP 条件では、運動中に過剰な糖分解の亢進が起きていることが示唆されている。先行研究では、細胞内の乳酸の過剰な蓄積が解糖系酵素活性を阻害する可能性が示されている¹¹⁾。このことから HYP 条件のように糖分解が過剰に亢進する条件でのみ、骨格筋から血中への乳酸の輸送速度が短時間・高強度運動のパフォーマンスに関係する可能性が示唆されている。一方で、著者はこれまでに 400m 全力走後の血中乳酸濃度増加率と 400m 走のパフォーマンス（平均走速度）の間に有意な正の相関関係を見出している。400m 全力走課題では、各被験者に対し、400m のゴールタイムが最も早くなるようなペース配分を心掛けるように指示した。一方で、ウインゲートテストではスタートから最大努力でペダリングし続けるため戦略的なペース配分を行うことはできない。また、先行研究における 400m 走は、およそ 50 秒の運動であり、30 秒間のウインゲートテストよりも運動時間が長い。一般に運動時間は長くなるほど、ミトコンドリアによる乳酸などの基質の酸化によるエネルギー産生の貢献度が高くなるため¹²⁾、50 秒ほどの 400m 走では 30 秒間ウインゲートテストに比べ、乳酸を速やかに細胞外に放出し全身に分配し、再利用する能力がより重要である可能性が考えられる。これらのことから、本研究では運動後の血中乳酸濃度増加率と短時間・高強度運動のパフォーマンスとの関係性が必ずしも確認されなかったのかもしれない。

5. 結論

急性の低酸素環境への曝露は、短時間・高強度運動のパフォーマンスに影響を及ぼさない一方で、運動時の糖分解を亢進することが示された。また、急性の低酸素環境への曝露は過剰な糖分解により短時間・高強度運動の繰り返し能力を阻害する可能性が示唆された。一方で、間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングによって、パワー発揮についてのトレーニング効果は認められなかったものの、同一の仕事をする際の糖分解が抑制されることが示された。このことから、間欠的な低酸素環境下でのスプリントトレーニングは短時間・高強度運動時の筋グリコーゲン利用を節約し、短時間・高強度運動時の繰り返し能力を高める可能性が示された。これまでの研究で短時間・高強度運動時パフォーマンスを評価しうる指標として注目していた血中乳酸濃度増加率は本研究の条件の運動では、指標として必ずしも有効ではなかった。低酸素環境下でのスプリントトレーニングの効果や様々な条件下での血中乳酸濃度増加率の指標としての有効性を検証するために、今後さらなる研究が必要となる。

6. 参考文献

- 1) Levine BD, Stray-Gundersen J, Gore CJ and Hopkins WG. 2005. Point:counterpoint: positive effects of intermittent hypoxia (live high:train low) on exercise are/are not mediated primarily by augmented red cell volume. *J Appl Physiol* 99: 2053-2055.
- 2) Berglund B. 1992. High-altitude training. *Sports Med* 14: 289-303.
- 3) Galvin H, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, and Bowtell JL. 2013. Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br J Sports Med* 47: i74-i79.
- 4) Faiss R, Leger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Deriaz O and Millet GP. 2013. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS ONE* 8: e56522.
- 5) Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M and Goto K. 2015. Effect of training in hypoxia on repeated sprint performance in female athletes. *SpringerPlus* 4: 310.
- 6) Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Kurihara T, Kurosawa Y and Goto K. 2017. Impact of 6 consecutive days of sprint training in hypoxia on performance in competitive sprint runners. *J Strength Con Res*.
- 7) Robin ED, Murphy BJ and Theodore J. 1984. Coordinate regulation of glycolysis by hypoxia in mammalian cells. *J cellular Physiol* 118: 287-290.
- 8) Ullah MS, Davies AJ and Halestrap AP. 2006. The plasma membrane lactate transporter MCT4, but not MCT1, is up-regulated by hypoxia through a HIF-1 α -dependent mechanism. *J Biol Chem* 281: 9030-9037.
- 9) Leuenberger U, Gleeson K, Wroblewski K, Prophet S, Zeils R, Zwillich C and Sinoway L. 1991. Norepinephrine clearance is increased during acute hypoxemia in humans. *Am J Physiol* 261: H1659-H1664.

- 10) Dimmer KS, Friedrich B, Lang F, Deitmer JW, and Bröer S. 2000. The low-affinity monocarboxylate transporter MCT4 is adapted to the export of lactate in highly glycolytic cells. *Biochem J* 350: 219–227.
- 11) Leite TC, Coelho RG, Silva DD, Coelho WS, Marinho-Carvalho MM and Sola-Penna M. 2011. Lactate downregulates the glycolytic enzymes hexokinase and phosphofructokinase in diverse tissues from mice. *FEBS letters* 585: 92–98.
- 12) Spencer MR and Gustin PB. 2001. Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 33: 157–162.

図1 ウィンゲートテストの結果

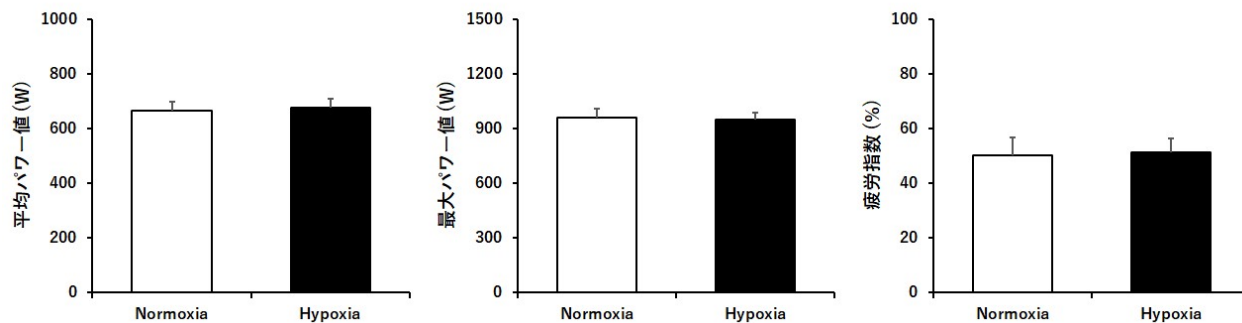


図2 ウィンゲートテスト前後の血中乳酸濃度の変化動態

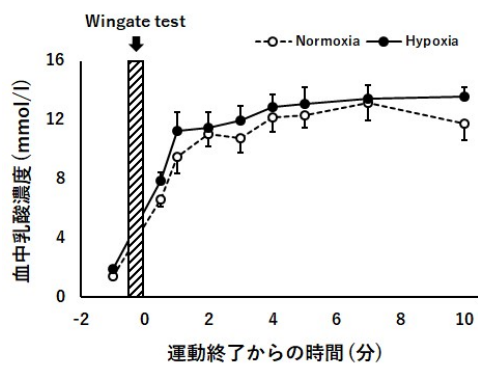


図3 乳酸代謝に関する測定項目

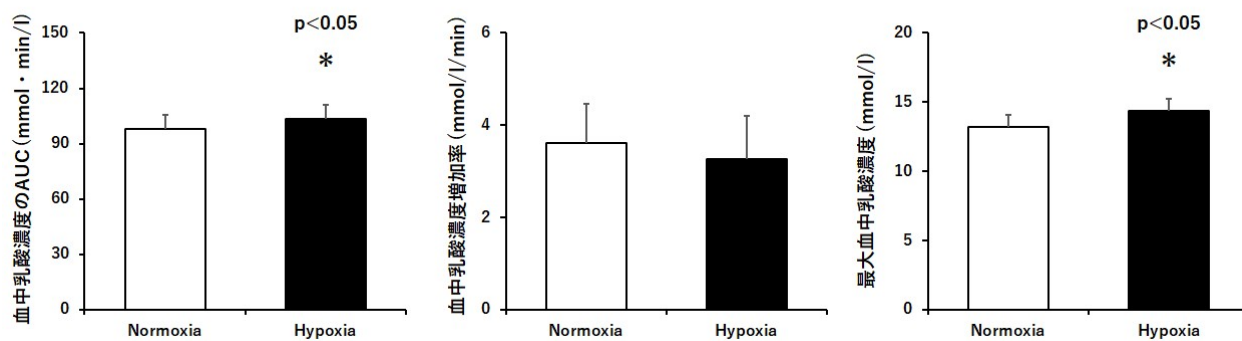


図4 血中乳酸濃度増加率とパフォーマンスとの関係

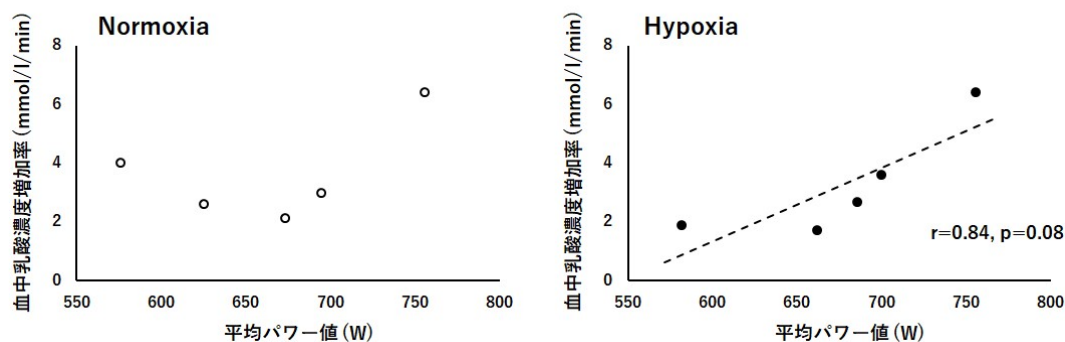


図5 トレーニング前後のウインゲートテストの結果

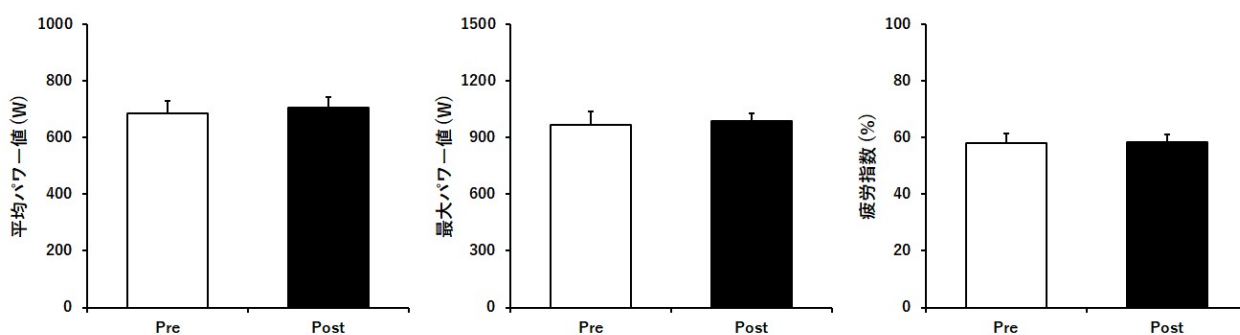


図6 トレーニング前後におけるウインゲートテスト前後の血中乳酸濃度の変化動態

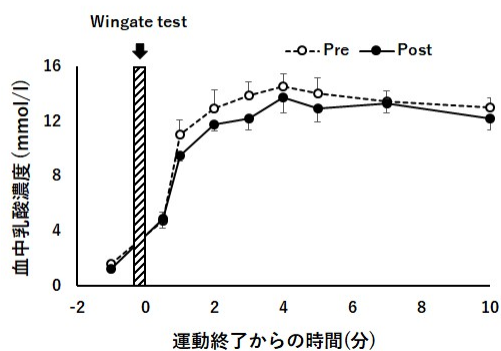


図7 トレーニング前後の乳酸代謝に関する測定項目

