

平成 26 年度

順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科 修士論文

長距離走のパフォーマンスを推定する
生理的指標に関する研究

氏 名 村田 亮馬

論文指導教員 内藤 久士 教授

合格年月日 平成 27 年 2 月 23 日

論文審査員 主査 町田 修一

副査 齋藤 博之

副査 内藤 久士

目次

	項
第1章 諸言	1
第2章 関連文献の考証.....	2
第1節 長距離走のパフォーマンスと全身性の有気的能力の指標.....	2
(1) 長距離走のパフォーマンスと最大酸素摂取量.....	2
(2) 長距離走のパフォーマンスと乳酸性作業閾値.....	3
(3) 長距離走のパフォーマンスとランニングエコノミー.....	3
第2節 筋酸素化レベル.....	4
(1) NIRSによる筋酸素化レベルの測定.....	4
(2) 一般人とスポーツ競技者の筋酸素化レベル.....	5
(3) スポーツ競技のパフォーマンスと筋酸素化レベル.....	5
第3章 方法.....	8
第1節 測定期間および環境.....	8
第2節 被験者.....	8
第3節 測定プロトコル.....	8
第4節 測定項目.....	9
(1) 酸素摂取量.....	9
(2) 血中乳酸濃度.....	9
(3) 筋酸素化レベル.....	10
第5節 統計解析.....	10
第4章 結果.....	11
第1節 各生理的指標の値.....	11
第2節 長距離走のパフォーマンスを推定する生理的指標.....	11
第5章 考察.....	12
第1節 長距離走のパフォーマンスを推定する生理的指標.....	12
(1) 乳酸性作業閾値.....	12
(2) 筋酸素化レベル.....	13
(3) 最大酸素摂取量およびランニングエコノミー.....	15
第2節 本研究のリミテーション.....	16

第6章 結論	17
第7章 要約	18
謝辞.....	19
引用文献	20

Table 1-4

Figure 1-7

第1章 諸言

スポーツ選手の評価およびタレントの発掘のためには、その種目を競技する上で求められる能力を表した、パフォーマンス(競技記録)を推定する生理的指標を確立することが重要となる。これまでに、陸上競技の長距離走のパフォーマンスには、エネルギー出力の大きさに関連する最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)¹⁵⁾²³⁾⁴³⁾および乳酸性作業閾値(LT)¹³⁾、出力されたエネルギーをいかに効率良く使えるかを評価したランニングエコノミー(RE)⁷⁾³⁶⁾などの、有気的能力の指標が強く関連することが報告されてきた。 $\dot{V}O_{2max}$ および RE は呼気から酸素摂取量を算出することにより、LT は血液中の乳酸濃度を測定することによりそれぞれ評価されることから、これらは全身性の有気的能力の指標であると考えられる⁴⁹⁾。Midgley ら³⁵⁾は、これら3つの指標を用いれば、長距離走のタイムの70%程度を推定できることを報告したが、それは裏を返せば、全身性の有気的能力の指標だけでは長距離走のタイムの30%程度を説明できないことを意味する。

一方、近赤外線分光法(near-infrared spectroscopy ; NIRS)を活用すれば、全身ではなく、局所骨格筋の酸素動態を非侵襲的に測定することが可能となる¹⁷⁾。近年、この方法を用いて得られる筋酸素化レベルの指標と全身性の有気的能力の指標を組み合わせ、持続的なスポーツ競技のパフォーマンスとの関連性を検討した研究がいくつか報告されている。Wang ら⁴⁹⁾は、自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷テストによって、主働筋である外側広筋における酸素化レベルの減少速度が遅い選手ほど、フィンスイミング800mのタイムが速かったことを報告した。また Ferri ら¹⁴⁾は、トレッドミルを用いた漸増負荷テストおよび固定負荷テストにより、疲労困憊(オールアウト)に達した際の酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)ではなく、外側広筋の酸素化レベル(deoxy-Hb/Mb_{max})が、1500m走のパフォーマンス決定因子の1つであることを報告した。これらの研究は、局所における筋酸素化レベルが、持続的なスポーツ競技のパフォーマンスを推定する重要な生理的指標になり得ることを示唆している。

しかしながら今日まで、筋酸素化レベルと長距離走のパフォーマンスとの関連性は明らかにされていない。そこで本研究では、確立された全身性の有気的能力の指標に NIRS で測定した筋酸素化レベルの指標を加えることで、長距離走のパフォーマンスをより正確に推定できるか否かを明らかにすることを目的とする。

第2章 関連文献の考証

長距離走のパフォーマンスと生理的指標との関連性を検討した先行研究は多く存在するが、全身性の有気的能力の指標に着目したものが大半を占めていることから⁷⁾¹¹⁾²³⁾³¹⁾⁴³⁾、その重要性がうかがえる。そこで本章では研究に先立ち、まず長距離走のパフォーマンスに関連する全身性の有気的能力の指標について報告した文献の考証を行う。次に、局所における酸素化レベルの測定を可能にする近赤外線分光法 (near-infrared spectroscopy;NIRS)の特質に関して報告した文献と、一般人と競技者の筋酸素化レベルに関して報告した文献の考証を行い、最後に筋酸素化レベルとスポーツ競技のパフォーマンスとの関連性について報告した文献の考証を行う。

第1節 長距離走のパフォーマンスと全身性の有気的能力の指標

(1) 長距離走のパフォーマンスと最大酸素摂取量

5000m 以上の距離で競われる陸上競技長距離走において高いパフォーマンスを発揮するためには、酸素を利用してエネルギーを生成し続ける能力、すなわち有気的能力に優れていなければならない³⁵⁾。したがって、長距離走のパフォーマンスと有気的エネルギー発生能力の定量的尺度である最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)との間に密接な関連性があることが、多くの研究により報告されてきた¹⁵⁾²³⁾⁴³⁾。一般的に、漸増負荷テスト時に得られた呼気を分析することで算出される $\dot{V}O_{2max}$ は、全身の活動筋における酸素消費量を反映した指標であると考えられている。

長距離走のパフォーマンスが高い選手ほど $\dot{V}O_{2max}$ も高い傾向にあることを報告した文献が多く存在する一方で、そのような関連性がみられなかったことを報告した研究もある。Kenney&Hodgson²⁹⁾は、オリンピック選手の5000m 走および3000mSCのタイムと $\dot{V}O_{2max}$ との間に関連性はみられなかったことを報告し、一流長距離選手を対象としたCostillら⁸⁾の研究においても、3マイルおよび6マイル、マラソンのタイムを $\dot{V}O_{2max}$ で説明できなかった。同様の結果は、鍛錬されたクロスカントリー選手を対象としたBulbulianら⁶⁾の論文においても報告されている。

これらのことから、 $\dot{V}O_{2max}$ が長距離走のパフォーマンスを左右する有力な生理的指標であるということは確かであるものの、ある限られた競技レベルの集団における長距離走のパフォーマンスを $\dot{V}O_{2max}$ のみで説明するには限界があると考えられる。

(2) 長距離走のパフォーマンスと乳酸性作業閾値

血中乳酸濃度の曲線的な上昇開始点である乳酸性作業閾値(lactate threshold ; LT)は、ランニング中に維持できる $\dot{V}O_{2max}$ の割合、すなわち酸素摂取水準($\% \dot{V}O_{2max}$)と密接に関連することなどから⁴⁵⁾、重要な長距離走のパフォーマンス決定因子とみなされている。また、LT も全身を循環する血液中の乳酸濃度の測定により算出されるため、全身性の生理的指標であると考えられ、通常は血中乳酸濃度上昇開始点の走速度(V)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、心拍数(HR)等で表される¹³⁾⁵³⁾。

Kumagai ら³¹⁾は高校生ランナーを対象とした研究において、5000m 走のタイムには $\dot{V}O_{2max}$ よりも LT が強く関わっていることを報告した。中高年のランナーを対象とした Takeshima & Tanaka⁴⁵⁾も、 $\dot{V}O_{2max}$ と関連しなかったマラソンのタイムを LT で説明できることを報告した。その他多数の文献において、長距離走のパフォーマンスに優れている選手ほど、LT あるいは血中乳酸濃度が $4\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ のときの運動強度である血中乳酸蓄積開始点(onset of blood lactate accumulation ; OBLA)が高いことが報告されている¹²⁾¹³⁾³⁶⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾⁴⁸⁾。

このように、LT や OBLA は長距離走のパフォーマンスに密接に関わっていることが報告されているものの、大学生ランナーを対象とした Iwaoka ら²⁶⁾の研究では、5000m 走および 10000m 走のタイムと LT との間に関連性はみられていない。したがって、LT さえ測定すれば、全てのランナーのパフォーマンスを推定できる訳ではない。

(3) 長距離走のパフォーマンスとランニングエコノミー

$\dot{V}O_{2max}$ および LT が、長距離走のレース中に維持可能な酸素摂取量を反映する、有気的なエネルギー出力の大きさを表す指標であるのに対して、ランニングエコノミー(走の経済性 ; RE)は、出力されたエネルギーをいかに有効に推進力へ変換できるかを評価した指標である³⁵⁾。Daniels ら⁹⁾が RE を、ある走速度における酸素摂取量と定義して、その重要性を主張して以降、多くの論文により長距離走のパフォーマンスと RE との関連性が報告された¹⁹⁾²⁷⁾³²⁾⁴⁰⁾。

Conley & Krahenbuhs⁷⁾や Morgan ら³⁶⁾は、同程度の $\dot{V}O_{2max}$ を有するランナーにおいては、RE がタイム (10km)の決定因子の 1 つとなること報告している。しかし裏を返せば、ある程度 $\dot{V}O_{2max}$ の差がある集団においては、RE の重要性は低いということが考えられる。例えば、36 人の長距離ランナー(マラソン・ハーフマラソン)を対象とし

て $\dot{V}O_{2max}$ 、LT、RE を測定した Prampero ら¹¹⁾の研究では、 $\dot{V}O_{2max}$ (43.0—74.0ml · kg⁻¹ · min⁻¹)のみで長距離走のタイムの 50%程度を説明できるのに対して(R²=0.52)、RE のみでは 10%程度しか説明のつかないことが示されている(R²=0.13)。

第2節 筋酸素化レベル

(1) NIRS による筋酸素化レベルの測定

一般的に、呼気ガス分析によって算出される酸素摂取量は、全身の骨格筋における酸素消費量を反映していると考えられるため、主働筋のような特定の骨格筋における酸素消費量に関する情報をもたらさない。Knight ら³⁰⁾は、自転車運動時の大腿部の血流量および動静脈酸素較差を測定することで、下肢筋群全体の酸素消費量を算出しているが、この方法は侵襲的であり、ヒトを対象とした測定では限界があると思われる。しかし近赤外線分光法(near-infrared spectroscopy ; NIRS)を用いれば、非侵襲的に局所骨格筋の酸素化レベルを測定することが可能になる。近赤外線分光法は、1977年に Jobsis ら²⁸⁾が脳組織酸素濃度計測の可能性を報告したのを契機に発展し、1988年に Hampson & Piantadosi¹⁸⁾が、初めてヒトの骨格筋における酸素飽和度を測定した。近年では、多くの研究でその有用性が報告されている¹⁴⁾¹⁷⁾¹⁸⁾²⁰⁾³³⁾³⁷⁾⁴⁹⁾。

一般的に近赤外線分光装置は、本体と、送光部および受光部からなるプローブにより構成される。送光部から照射される 2 または 3 波長の近赤外光は、皮膚を透過し散乱しながら生体組織まで届き、その一部が血中のヘモグロビンおよび筋内のミオグロビンに吸収された後、受光部まで到達する⁴⁾。波長 700~1000nm 程度の近赤外光のうち、760nm 付近の光は脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン(deoxy-Hb/Mb)に吸収されやすく、850nm 付近の光は酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン(oxy-Hb/Mb)に吸収されやすいという吸光度特性があり、異なる波長の光の強さの変化に、Beer-Lambert の法則を応用して骨格筋組織などの酸素化レベルを測定することが可能となる⁴⁾。尚、oxy-Hb/Mb と deoxy-Hb/Mb の合算である total-Hb/Mb は、測定部分の血液量を反映した指標であるとされている⁴⁾。NIRS によって測定されるこれらのパラメーターは、組織の局所における酸素供給および酸素消費のバランス(アンバランス)を表した指標であると考えられているが¹⁷⁾、現在のところ測定対象である血中のヘモグロビンと筋内のミオグロビンを区別することは困難である。また、NIRS の測定パラメーターは皮下脂肪厚の影響を強く受けると伴に²²⁾、任意単位(a.u.)で表示されることが多いため、

血流遮断による生理学的キャリブレーションを行わなければ、個人間で比較をすることができないといった短所がある¹⁴⁾³³⁾。

このように NIRS で測定された筋酸素化レベルが何を意味するのか、判然としない部分はあるにせよ、ミトコンドリアへの酸素運搬を担うヘモグロビンとミオグロビンの両方を反映した指標を、非侵襲的に測定できる方法は他にない。また、NIRS により測定された筋酸素化レベルもしくは筋酸素飽和度は、直接的に測定された静脈血酸素飽和度と一致することが報告されており、この測定方法の妥当性も十分に確認されている³⁴⁾⁵⁰⁾。

(2) 一般人とスポーツ競技者の筋酸素化レベル

これまでの研究では、一般人とスポーツ競技者を対象にして、運動時および運動後の筋酸素化レベルが検討されている²⁾⁵⁾¹⁰⁾²¹⁾。Honma ら²¹⁾は、自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷テストにより、非鍛錬者と鍛錬者の筋酸素化レベルを測定し、後者の oxy-Hb/Mb が急激に低下した負荷が、前者のそれよりも 15 ワット程度高かったことを報告した。また Bae ら²⁾は、同様の方法により一般人とトライアスロン選手の $\dot{V}O_{2max}$ 、LT、外側広筋の酸素化レベル(oxy-Hb/Mb)を測定して LT 強度および疲労困憊時の oxy-Hb/Mb を比較したところ、いずれにおいてもトライアスロン選手が 20%程度低かったことを報告した。しかし Ding ら¹⁰⁾は、一般人と短距離走、長距離走、競歩を専門とする陸上競技選手を対象とした同様の負荷テストによって、運動による筋酸素化レベルの減少は、一般人よりも競技者において少なかったことを示している。この結果は、前述した Bae らの報告とは一致しない。また彼らは、運動後の回復期間における筋酸素化レベルも評価しており、競技者の高い回復率も合わせて報告している。さらに Brizendine ら⁵⁾は、一時的動脈血流遮断法を用いて、一般人と鍛錬された自転車競技者の筋酸素消費量を測定し、運動後の筋酸素消費量の回復時間は、やはり競技者において短かったことを報告した。

これらの報告から必ずしも一致した見解は得られないものの、NIRS によって一般人とスポーツ競技者における筋酸素化レベルの相違を検知することは可能であると考えられる。

(3) スポーツ競技のパフォーマンスと筋酸素化レベル

先行研究では、アルペンスキー、スピードスケート、フィンスイミング、陸上競技

1500m 走、自転車競技等いくつかのスポーツ種目における競技パフォーマンスと NIRS を用いて測定された筋酸素化レベルとの関連性が検討されている¹⁴⁾²⁰⁾²⁴⁾³⁸⁾³⁹⁾⁴⁴⁾⁴⁹⁾。Hesford ら²⁰⁾は、45 秒程度でショートトラックを 4.5 周するスピードスケート 500m のタイムに、外側広筋の酸素化レベルは関連しなかったことを報告したが、よりタイム差のつく長距離種目におけるパフォーマンスと筋酸素化レベルとの関連性について検討すべきであることを考察している。実際に Ferri ら¹⁴⁾は、トレッドミルを用いた漸増負荷テストおよび固定負荷テストにより、4 分程度で勝敗が決まる陸上競技 1500m 走のパフォーマンスと外側広筋酸素化レベルとの関連性を検討した。その結果、従来重要視されていた $\dot{V}O_{2max}$ ではなく、疲労困憊に達する直前における筋酸素化レベルの最大値(deoxy-Hb/Mb_{max})が 1500m 走のパフォーマンス決定因子の 1 つであることが示唆された。なお Ferri ら¹⁴⁾および Grassi ら¹⁷⁾は、deoxyHb/Mb を骨格筋における血液からの酸素抽出(O₂ extraction)に関係した指標として解釈し、この能力の重要性を報告している。また Wang ら⁴⁹⁾は、女性フィンスイマーを対象として自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷テストを行い、約 8 分間泳ぎ続けるフィンスイミング 800m のパフォーマンス高値群は、低値群と比較して筋酸素化レベルの一指標である Oxygen index(oxy-Hb/Mb - deoxy-Hb/Mb)の減少速度が遅かったことを報告した。また、この研究では高強度運動時の Oxygen index と $\dot{V}O_2$ との間にも相関関係がみられ、迅速な $\dot{V}O_2$ の増加が、末梢である外側広筋の脱酸素化を減速させたことが示唆された。

さらには、トレーニングによる筋酸素化レベルの変化と、それがスポーツ競技のパフォーマンスへ及ぼす影響について報告した先行研究も存在する。Neary ら³⁸⁾は、3 週間の持続的なトレーニングによって、約 30 分間のペダリング運動を伴う自転車 20km タイムトライアル中における内側広筋の脱酸素化レベルが増大し、それがタイムの向上に強く影響していることを報告した。その後彼らは、レースに向けたトレーニング量の漸減期間(トレーニングのテーパリング期間)に着目し、7 日間のテーパリングによっても自転車 20km タイムトライアル中における筋の脱酸素化レベルが増大し、このことが、同じくタイムの向上に強く寄与していることを報告した³⁹⁾。Neary らの研究は、トレーニングによる末梢の適応が、持続的なスポーツ競技のパフォーマンスを向上させるにあたっての重要な因子となることと伴に、その変化を NIRS で評価でき得ることを示した。

これらの報告は、持久性の求められるスポーツ競技のパフォーマンスに筋酸素化レベ

ルが関与していることを示唆しているが、先行研究で筋の酸素化レベルを明らかにするために用いた運動様式は自転車運動が多く、走種目のパフォーマンスに着目したものはほとんど見当たらない。したがって本研究では、確立された全身性の有気的能力の指標に走運動中の筋酸素化レベルを加えることで、長距離走のパフォーマンスをより正確に推定できるか否かを明らかにすることを目的とする。

第3章 方法

第1節 測定期間および環境

測定は、2014年5月7日から同年8月23日の期間に、順天堂大学運動生理学研究室内のトレッドミル室において実施された。測定時のトレッドミル室内の気温は $21.1 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$ 、湿度は $60.1 \pm 4.7\%$ であった。

第2節 被験者

本研究では、8名の男子大学長距離走選手を被験者とした。彼らの身体的特徴の平均値±標準偏差はそれぞれ、年齢： 19.3 ± 0.9 歳、身長： $168.7 \pm 8.8\text{cm}$ 、体重： $58.5 \pm 4.5\text{kg}$ 、体脂肪率： $8.5 \pm 2.8\%$ 、外側広筋の皮下脂肪厚： $2.9 \pm 0.8\text{mm}$ であった(Table 1.)。長距離走のパフォーマンスには、測定日に最も近い日(測定日の前後2か月以内)における5000m走のタイム($15'57''9 \pm 34''4$)を採用した。実験に先立ち、被験者に対して本研究の目的、内容、方法、考えられる不利益についての十分な説明を行い、口頭および書面にて同意を得た。なお、本研究は順天堂大学スポーツ健康科学研究科倫理委員会の承認を受けた。

第3節 測定プロトコル

まず基準となる筋酸素化レベルを測定するために、3分間、被験者にベッド上での仰臥位安静をとらせた後、大腿部を止血器(MT-870, 瑞穂医科工業, 日本)およびカフを用いて8分間加圧し(300mmHg)、動脈血流を遮断した。その後、運動時の筋酸素化レベル(oxy-Hb/Mb , deoxy-Hb/Mb)、乳酸性作業閾値(LT)、ランニングエコノミー(RE)を測定するために、次の6段階からなる最大下運動の間欠的漸増負荷テストを実施した。最初に、被験者に3分間の立位安静を保持させた後、傾斜1%のトレッドミル上を繰り返し走行させた。初速を、被験者の競技レベルを考慮して 150 あるいは $180\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ に設定し、段階が上がるごとに $30\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ずつ漸増させた。なお、各段階の走行時間は3分間とし、その間に30秒間の立位安静時間を設けた。

間欠的漸増負荷テスト終了後、15分間の安静時間を設け、続けて最大運動時の筋酸素化レベル($\text{oxy-Hb/Mb}_{\text{min}}$, $\text{deoxy-Hb/Mb}_{\text{max}}$)および最大酸素摂取量($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$)を測定するための連続的漸増負荷テストを実施した。最初の速度を間欠的漸増負荷テストにおいて

血中乳酸濃度が $2\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ を超えた速度に設定し、1 分ごとに $10\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ずつ漸増させることで、被験者を疲労困憊(オールアウト)に至らしめた(Fig 1.)。

第4節 測定項目

立位安静時および運動時の心拍数は心拍計(RS800, Polar, Finland)によって、心電図は心電計(DS-7120, フクダ電子, 日本)によって、それぞれ絶えず測定された。

(1) 酸素摂取量

酸素摂取量を測定する前に、2L のシリンジを用いてフローセンサの校正を、標準ガスを用いてガスメータの校正をそれぞれ行った。立位安静時および運動時の酸素摂取量は、呼気ガス分析器(AE-300, ミナト医科学, 日本)によって連続的に測定され、30 秒毎に平均化された。最大下の各走速度におけるランニングエコノミーとして、3 分間の走行時間のうち最後の 30 秒間の酸素摂取量を採用した。さらに酸素摂取量と走速度の回帰直線式を求め、先行研究で多く用いられている $268\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ (1 マイル 6 分)のランニングエコノミーを内挿して算出した。また、以下に示す基準を 2 つ以上満たした場合、最も高値を示した酸素摂取量を最大酸素摂取量($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$)と判定した⁵²⁾。

- ① $\dot{V}\text{O}_2$ のプラトー現象が発現すること
- ② 年齢から推定される最高心拍数にほぼ達していること(± 10 bpm)
- ③ 呼吸交換比が 1.0 より高値を示すこと
- ④ 血中乳酸濃度が $10\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上に達すること
- ⑤ RPE(主観的運動強度)が 19 以上に達すること

(2) 血中乳酸濃度

血中乳酸濃度は、安静時および間欠的漸増負荷テストにおける運動の間の立位安静時に、耳朶からの採血により、簡易血中乳酸測定器(ラクテート・プロ, アークレイ, 日本)を用いて測定された。血中乳酸濃度上昇開始点(LT)は通常、走速度(V)、酸素摂取量($\dot{V}\text{O}_2$)、心拍数(HR)等で表されるが¹²⁾、Tanaka ら⁴⁶⁾は長距離走のパフォーマンスと LT の走速度(V-LT)との間の強い関連性を報告していることから、本研究においても V-LT を採用した。走速度と血中乳酸濃度を相関図にプロットして 2 本の回帰直線を求め、その交点を乳酸性作業閾値(V-LT)とした。また、求めた回帰直線式に血中乳酸濃度 $4\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ の値を代入することで、血中乳酸蓄積開始点(V-OBLA)を算出した。

(3) 筋酸素化レベル

仰臥位安静時、運動時の右外側広筋の酸素化レベル(oxy-Hb/Mb, deoxy-Hb/Mb)は、携帯型近赤外線組織酸素モニタ装置(Pocket NIRS Duo, ダイナセンス, 日本)によって測定された。この装置はプローブと本体で構成され、本体と PC は Bluetooth 方式で無線通信された。測定部分はあらかじめカミソリで除毛された。プローブの光源には LED(735nm, 810nm, 850nm)が用いられ、送光部と受光部の間隔は 3cm であった。この間隔で測定した場合に、プローブ表面より深さ約 1.5cm の酸素動態を測定できることが報告されている⁴⁾。プローブは、汗の影響を受けないようにするためにテープで保護され、右脚の膝蓋骨上縁外側から 12-15cm 上方の位置に、外側広筋に沿って取り付けられた(Fig 2.)。さらに外乱光を遮断するため、プローブの上にシートがかぶせられた。

皮下脂肪厚の筋酸素化レベルへの影響を取り除き個人間で比較するために、oxy-Hb/Mb は、仰臥位安静時の値を 100%、血流遮断時の最低値を 0%、deoxy-Hb/Mb は仰臥位安静時の値を 0%、血流遮断時の最高値を 100%として相対値で標準化された。サンプリング間隔を 100ms に設定し、安静時、運動時の各段階ともに最後の 30 秒間の測定値を平均化した。また測定部分の皮下脂肪厚を、汎用超音波画像診断装置(プロサウンド C3, 日立アロカメディカル, 日本)によって測定した。

第5節 統計解析

データを平均値±標準偏差で示した。5000m 走のタイムと各測定パラメーターとの関連性(2変数間の関連性)を、Pearson の相関係数を用いて検定した。また、5000m 走のタイム(従属変数)を推定する生理的指標(独立変数)および式を導くために、統計ソフト(SPSS statistics ver.17.0)を用いて、ステップワイズ法による重回帰分析を行った。重回帰分析に投入する変数は $\dot{V}O_{2max}$ 、V-LT、V-OBLA、RE、oxy-Hb/Mb の最小値(oxy-Hb/Mb_{min})とした。有意水準は 5%未満に定めた。

第4章 結果

第1節 各生理的指標の値

本実験で測定された生理学的データの一覧を Table 2. に示した。間欠的漸増負荷テストにより測定された乳酸性作業閾値(V-LT)は $262.5 \pm 13.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 、血中乳酸蓄積開始点(V-OBLA)は $317.3 \pm 24.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。また $268 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ のランニングエコノミー(RE)は $53.2 \pm 3.1 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。連続的漸増負荷テストでは全ての被験者が疲労困憊に至り、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の判定基準を満たした。被験者の $\dot{V}O_{2\text{max}}$ は $67.7 \pm 5.6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 、oxy-Hb/Mb の最小値(oxy-Hb/Mb_{min})は $31.8 \pm 12.2\%$ 、deoxy-Hb/Mb の最大値(deoxy-Hb/Mb_{max})は $74.3 \pm 30.2\%$ であった。

第2節 長距離走のパフォーマンスを推定する生理的指標

測定日に最も近い日における 5000m 走のタイムと $\dot{V}O_{2\text{max}}$ 、V-LT、oxy-Hb/Mb_{min}、 $240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ で走行中の oxy-Hb/Mb(oxy-Hb/Mb₂₄₀)との間にそれぞれ有意な負の相関関係が認められた($r=0.74$, $r=0.74$, $r=0.73$, $r=0.71$, $p<0.05$)(Table 3, Fig 4-7)。一方で 5000m 走のタイムと、その他全ての生理的指標との間に関連性は認められなかった。なお、deoxy-Hb/Mb_{max} と 5000m 走のタイムとの間には直線関係ではなく、下に凸の曲線関係が認められたため、次の重回帰分析の投入変数からは除外した。

重回帰分析の結果、次の2つのモデルのパフォーマンス推定式が導かれた(Table 4.)。

モデル 1 : $5000\text{m 走タイム} = 1457.462 - 1.903 \times \text{V-LT}$

($R^2=0.55$, $r=0.74$, $p<0.05$)

モデル 2 : $5000\text{m 走タイム} = 1410.647 - 1.528 \times \text{V-LT} - 1.618 \times \text{oxy-Hb/Mb}_{\text{min}}$

($R^2=0.86$, $r=0.93$, $p<0.01$)

第5章 考察

本研究では、男子大学長距離選手を対象として、確立された全身性の有気的能力の指標に加えて局所骨格筋の酸素化レベルを測定し、それらと長距離走のパフォーマンスとの関連性を検討した。一般的に、スポーツ競技のパフォーマンスは様々な因子によって決定されることから、パフォーマンスを推定するためには、いくつかの重要な生理的指標を組み合わせることが望ましいと考えられる。このような観点から、単回帰分析だけでなく、重回帰分析を用いて長距離走のパフォーマンスの推定を行った⁶⁾¹¹⁾。その結果、乳酸性作業閾値(V-LT)のみで5000m走のタイムを55%程度推定でき($R^2=0.55$)、V-LTに最大運動時の筋酸素化レベル(oxy-Hb/Mb_{min})を組み合わせれば85%以上推定可能となることが明らかとなった($R^2=0.86$)。

そこで本章では、まず5000m走のタイムに最も強く関連したV-LTについて考察する。次に、本研究で新たに加えた局所骨格筋の酸素化レベル(oxy-Hb/Mb, deoxy-Hb/Mb)について考察し、最後に本研究においてはパフォーマンスに関連しなかった、最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)とランニングエコノミー(RE)についての考察を行う。

第1節 長距離走のパフォーマンスを推定する生理的指標

(1) 乳酸性作業閾値

本研究における被験者(5000m走平均タイム; 15'57"9 \pm 34"4)の乳酸性作業閾値(V-LT)の平均値は262.5 \pm 13.4m \cdot min⁻¹であった。本研究の被験者よりもやや競技力の劣る長距離ランナー(5000m走平均タイム; 16'29"0)を対象としたTanakaら⁴⁷⁾の研究では、V-LTの平均値が249.0m \cdot min⁻¹であったことが報告されていることから、本研究の測定値は競技力に相当する妥当な値であると考えられる。

重回帰分析の結果、長距離走のパフォーマンスを推定する全身性の生理的指標は $\dot{V}O_{2max}$ やREではなく、V-LTであることが示された。この結果は、V-LTが持つ2つの性質により説明されることができる。まずV-LTには、 $\dot{V}O_{2max}$ と同様に比較的競技レベルの幅がある集団のパフォーマンスと関連する傾向がある³⁾。本研究における被験者は全員日常的にトレーニングを行うランナーであったが、競技レベルにはある程度の差があったため(5000m走平均タイム; 15'15"3—16'53"2)、V-LTによってパフォーマンスを推定しやすかったことが推測できる。またV-LTは、重要な有気的能力の指標であ

る $\dot{V}O_{2max}$ 、 $\% \dot{V}O_{2max}$ 、RE の 3 つを統合した性質も合わせ持つことが報告されている³⁾。つまり、優れた $\dot{V}O_{2max}$ 、 $\% \dot{V}O_{2max}$ 、RE は、結局のところ高い V-LT につながり集約されるということである。したがって、1 つの全身性の指標から長距離走のパフォーマンスを推定しようとする場合には、V-LT が最も有効であると考えられ、本研究においても V-LT のみで 5000m 走のタイムを 50%以上説明可能なことが示唆された(モデル 1; $R^2=0.55$)。その他の先行研究においても、V-LT の万能性ともいえる特質を裏付ける報告がなされている。tanaka ら⁴⁶⁾は、大学生ランナーの V-LT、 $\dot{V}O_2$ -LT、V-OBLA、 $\dot{V}O_{2max}$ を測定して重回帰分析を行った結果、マラソンのパフォーマンスには V-LT が最も密接に関連したことを報告した。また、同様の手法で 3000m 走のパフォーマンスを推定する指標を検討した Grant ら¹⁶⁾も、鍛錬されたランナーの V-LT とタイムとの間に強い関連性が認められたことを報告している。本研究の結果は、彼らの報告を支持するものとなった。

(2) 筋酸素化レベル

本研究における被験者($\dot{V}O_{2max}$ の平均値; $67.7 \pm 5.6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)の oxy-Hb/Mb_{min} の平均値は $31.8 \pm 12.2\%$ であった。トライアスロン選手($\dot{V}O_{2max}$ の平均値; $65.8 \pm 3.3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)を対象とした Bae ら²⁾の研究では、平均 oxy-Hb/Mb_{min} が $42.3 \pm 17.6\%$ であったことが示されており、本研究の被験者の値は、彼らの報告よりも約 10%低かった。これには、本研究の被験者の骨格筋の酸素抽出能力(deoxy-Hb/Mb)が、Bae らの研究における被験者よりも優れていたことが考えられる。つまり、骨格筋で多くの酸素が血液から抜き取られてミトコンドリアへ運搬されることにより、相対的に oxy-Hb/Mb が低値を示した可能性があるということである。しかしながら Bae らの報告に deoxy-Hb/Mb は示されていないため、この見解は推測の域を出ない。本研究における被験者の deoxy-Hb/Mb_{max} の平均値は $74.3 \pm 30.2\%$ であった。一流中距離ランナーを対象にした Ferri ら¹⁴⁾の研究では、deoxy-Hb/Mb_{max} の平均値が $78.9 \pm 13.2\%$ であったことが示されており、本研究の被験者の値は、彼らの報告よりも 5%程度低かった。そのわずかな差は、 $\dot{V}O_{2max}$ で説明できるかもしれない。Ferri らの研究の被験者の平均 $\dot{V}O_{2max}$ は $70.2 \pm 3.9 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であったのに対して、本研究における被験者の平均 $\dot{V}O_{2max}$ は $67.7 \pm 5.6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ と、やはり $3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 程度低かった。このことから、局所骨格筋の酸素化レベル(deoxy-Hb/Mb_{max})は、体内に摂取できる酸素の最大値

($\dot{V}O_{2max}$)に関係していることが考えられる。また、deoxy-Hb/Mb_{max}における高い標準偏差(74.3%±30.2%)には、被験者 D の特段に低い値(21.4%)が起因している。これには、被験者 D における体重あたりの骨格筋量が低いこと(0.48kg)が影響している可能性が考えられる。

本研究では、V-LT に NIRS で測定した外側広筋の酸素化レベル(oxy-Hb/Mb_{min})を加えることで、より正確に長距離走のパフォーマンスを推定できることが示唆された。NIRS によって測定されるパラメーターは、組織の局所における酸素供給および酸素消費のバランスを表した指標であるとされている¹⁷⁾。この内 oxy-Hb/Mb は、骨格筋における酸素含有量(muscle oxygen content)を示すことが Bae ら²⁾によって報告されていることから、酸素供給の指標であると解釈できる。一方、deoxy-Hb/Mb は、骨格筋の血液からの酸素抽出(O₂ extraction)を表すことが Ferri ら¹⁴⁾および Grassi ら¹⁷⁾によって報告されていることから、酸素消費の指標であると解釈できる。有気的能力が強く求められる長距離走で高いパフォーマンスを発揮するためには、これら酸素供給・酸素消費の両方の能力に長けていることが重要であるはずである。したがって、oxy-Hb/Mb と deoxy-Hb/Mb の両方のパラメーターが長距離走のパフォーマンスに関わっていることが予想されたが、本研究では前者のみに 5000m 走タイムとの関連性がみられた。

最大運動時の oxy-Hb/Mb_{min} が高値を示した選手ほど 5000m 走のタイムが速かったことは、疲労困憊直前においても主働筋へより多くの酸素が供給されている状態は、長距離走において高いパフォーマンスを発揮することに有利に働く可能性があることを示唆する。Ding ら¹⁰⁾は、短距離走、長距離走、競歩を専門とする陸上競技選手と一般人を対象として本研究と同様の負荷テストを実施し、運動による筋酸素化レベルの減少は、一般人よりも競技者において少なかったことを示しており、本研究の結果は彼らの報告と一致する。同様に、女性フィンスイマーを対象とした Wang ら⁴⁹⁾の研究においても、フィンスイミング 800m のパフォーマンス高値群は、低値群と比較して筋酸素化レベルの減少速度遅かったことを報告しており、本研究の結果は彼らの報告にも支持される。このような末梢の能力は、骨格筋におけるガス交換能力や酸素利用能力を反映していることが考えられ、これらには、遅筋(タイプ I)線維の割合、酸化系酵素活性、ミトコンドリア数と容量、ミオグロビン量などが関与していることが知られている¹⁾。ところで Wang ら⁴⁹⁾の研究では、高強度運動時の $\dot{V}O_2$ と筋酸素化レベルとの間にも相関関係がみられ、迅速な $\dot{V}O_2$ の増加が、末梢である外側広筋の脱酸素化を減速させたこ

とが示唆されている。この全身と局所の関わり合いは本研究においても観察され、疲労困憊時の酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)と筋酸素化レベル(oxy-Hb/Mb_{min})との間には、関連する傾向がみられた($r=0.69$)。

Ferri らの研究では、中距離走(1500m 走)のタイムと deoxy-Hb/Mb_{max} との間に関連性がみられ、骨格筋の酸素抽出能力がパフォーマンス決定因子の 1 つであることを報告しているが、本研究においては、長距離走(5000 走)のタイムに deoxy-Hb/Mb_{max} は関連しなかった。この関連するパラメーターの相違には、運動エネルギーの発生過程が関係しているかもしれない。1500m 走では、有氣的過程と無氣的過程でそれぞれ約 50%ずつを占めるとされているため²⁵⁾、両方の能力がバランス良く求められる。これを裏付けるように Ferri ら¹⁴⁾は、有氣的能力の指標である deoxy-Hb/Mb_{max} だけでなく無氣的能力の指標である最高血中乳酸濃度も 1500m 走の重要なパフォーマンス決定因子であることを報告している。さらに彼らは、deoxy-Hb/Mb の緩成分とこの最高血中乳酸濃度との間に関連性が認められたことから、アシドーシスが Hb からの酸素乖離を促進する可能性があることを考察している。このことから、deoxy-Hb/Mb は骨格筋の酸素消費を表した有氣的能力の指標でありながら、無氣的能力も反映した指標であると考えられる。しかし 5000m 以上の距離で競われる長距離走においては、大部分が有氣的な過程でエネルギーが発生されるため、無氣的能力の重要性は低い。したがって、5000m 走のタイムと deoxy-Hb/Mb との間に関連性は見られなかったと思われる。

(3) 最大酸素摂取量およびランニングエコノミー

本研究における被験者(5000m 走平均タイム ; 15'57"9±34"4)の $\dot{V}O_{2max}$ の平均値は $67.7 \pm 5.6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。彼らとほぼ同レベルの長距離ランナー(5000m 走平均タイム ; 16'07"0)を対象とした Kumagai ら³¹⁾の研究では、 $\dot{V}O_{2max}$ の平均値が $64.1 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であったことが示されていることから、本研究における被験者の $\dot{V}O_{2max}$ の測定値は妥当であると考えられる。 $\dot{V}O_{2max}$ に関しては、単回帰分析では 5000m 走タイムとの関係がみられたが($r=0.74$)、重回帰分析の説明変数としては残らなかった。これは、 $\dot{V}O_{2max}$ を用いなくとも、V-LT で長距離走のパフォーマンスを十分に説明できることを意味する。 $\dot{V}O_{2max}$ と V-LT に共通する特徴は、ある程度競技力に差のある集団におけるパフォーマンスを推定できる指標であることと³⁴⁾、長距離走のレース中に維持可能な酸素摂取量を反映する、有氣的なエネルギー出力の大きさを表す指標であるとい

うことである³⁵⁾。しかし主に、 $\dot{V}O_{2max}$ は肺や心臓などの中枢の機能を表す指標であるのに対して、LTは脚などの末梢の機能を反映した指標であり、それぞれ体内の異なる部位の能力を評価している。したがって、本研究における5000m走のパフォーマンスは、被験者の中枢ではなく末梢の能力に起因していたことが考えられる。

ランニングエコノミー(RE, $268m \cdot min^{-1}$)の平均値は $53.2 \pm 3.1 ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ であった。Pollockら⁴²⁾の研究では、Good runners(平均 $\dot{V}O_{2max}$; $69.2 ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)におけるRE($268m \cdot min^{-1}$)の平均値は $55 ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ 程度であったことが示されており、それと比較すると本研究における被験者のREはやや高いといえる。REには、解剖学的要因(年齢、性)、生理学的要因($\dot{V}O_{2max}$ 、トレーニング)、バイオメカニクスの要因(重心の上下動、ストライドの長さ)などが影響を及ぼすことが報告されており⁵⁾、本研究における被験者の高いREには、これらの関与が考えられる。

第2章で記述したようにREは、同程度の $\dot{V}O_{2max}$ を有するランナーにおけるパフォーマンス決定因子の1つとなるものの⁶⁾、ある程度 $\dot{V}O_{2max}$ に差のある集団においては、その重要性は弱まる¹⁾。本研究における被験者の $\dot{V}O_{2max}$ ($60.7-75.0 ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)には十分な差が認められたことから、REは5000m走タイムの説明変数から除外されたと考えられる。

第2節 本研究のリミテーション

本研究における被験者は、大学競技者の中でも中位から下位レベルの競技力を有する集団であった。長距離走のパフォーマンスを推定する指標は、被験者の競技レベルに強く影響されることから⁸⁾¹⁵⁾²⁹⁾、本研究の結果が全てのランナーに当てはまるとは考えずらい。また、本研究では長距離走のパフォーマンスとして、基本的な距離といえる5000m走を用いたが、例えばマラソンのような、より持久性の求められる種目においても同様の結果が得られるかどうかは定かではない。したがって今後は、本研究とは異なる競技レベルの被験者を対象にして、5000m走に限らない長距離走種目のパフォーマンスを推定する生理的指標を、筋酸素化レベルを加えて検討していく必要があると思われる。

第6章 結論

これまでに確立された全身性の有気的能力の指標に、筋酸素化レベルの指標 (oxy-Hb-Mb_{min})を加えることで、男子大学レベルにおける長距離走(5000m 走)のタイムをより高い精度で推定できる可能性があることが示唆された。

第7章 要約

【背景】 長距離走のパフォーマンスの大部分は、全身性の有気的能力の指標である最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)、乳酸性作業閾値(LT)、ランニングエコノミー(RE)により推定されるもの、30%程度はそれらの指標で説明のつかないことが報告されている。近赤外線分光法(near-infrared spectroscopy; NIRS)によって測定される局所骨格筋の酸素化レベルの指標(oxy-Hb/Mb)を加えれば、長距離走のパフォーマンスをより正確に推定できる可能性があるが、これまでに検討されていない。

【目的】 確立された全身性の有気的能力の指標に NIRS で測定した筋酸素化レベルの指標を加えることで、長距離走のパフォーマンスをより正確に推定できるか否かを明らかにすることを目的とする。

【方法】 8名の男子大学長距離走選手(5000m 走タイム; $15'57''9 \pm 34''4$, $\dot{V}O_{2max}$; $67.7 \pm 5.6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)を対象として、トレッドミルを用いた漸増負荷テスト(最大下・最大運動)を実施した。その際、携帯型近赤外線組織酸素モニタ装置を用いて外側広筋の酸素化レベルを、呼気ガス分析器を用いて酸素摂取量を、さらには耳朶からの採血によって血中乳酸濃度をそれぞれ測定した。それらの値から算出した $\dot{V}O_{2max}$ 、V-LT、V-OBLA、RE、oxy-Hb/Mb の最小値(oxy-Hb/Mb_{min})を重回帰分析にかけることで、長距離走のパフォーマンスを推定する生理的指標を検討した。

【結果】 重回帰分析の結果、次の2つのモデルのパフォーマンス推定式が導かれ、V-LT に oxy-Hb/Mb_{min}を加えることで決定係数(R^2)は上昇した。

モデル1: 5000m 走タイム = $1457.462 - 1.903 \times \text{V-LT}$ ($R^2=0.55$)

モデル2: 5000m 走タイム = $1410.647 - 1.528 \times \text{V-LT} - 1.618 \times \text{oxy-Hb/Mb}_{min}$ ($R^2=0.86$)

【結論】 これまでに確立された全身性の有気的能力の指標に、筋酸素化レベルの指標(oxy-Hb-Mb_{min})を加えることで、男子大学レベルにおける長距離走(5000m 走)のタイムをより高い精度で推定できる可能性があることが示唆された。

謝辞

修士論文の作成にあたり、実験の被験者としてご協力して頂いた順天堂大学陸上競技部長距離部員の皆様に厚く御礼申し上げます。また、論文指導をして頂いた運動生理学研究室の皆様に心から感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 青木純一郎, 佐藤佑, 村岡功 (2001). スポーツ生理学. 東京, 市村出版, pp36-37.
- 2) Bae, S. Y., Yasukochi, M., Kan, K. (1996). Changes in Oxygen Content and Blood Volume in Working Skeletal Muscle up to Maximal Exercise by Near Infrared Spectroscopy - Changes at AT and Exhaustion - .*Therapeutic Research*, 17(6), 129-136.
- 3) Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*, 32(1), 70-84.
- 4) Belardinelli, R., Barstow, T. J., Porszasz, J., & Wasserman, K. (1995). Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(6), 487-492.
- 5) Brizendine, J. T., Ryan, T. E., Larson, R. D., & McCully, K. K. (2013). Skeletal muscle metabolism in endurance athletes with near-infrared spectroscopy. *Med Sci Sports Exerc*, 45(5), 869-875.
- 6) Bulbulian, R., Wilcox, A. R., & Darabos, B. L. (1986). Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 18(1), 107-113.
- 7) Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 12(5), 357-360.
- 8) Costill, D. L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G., & Saltin, B. (1976). Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J Appl Physiol*, 40(2), 149-154.
- 9) Daniels, J. T. (1985). A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc*, 17(3), 332-338.
- 10) Ding, H., Wang, G., Lei, W. (2001). Non-invasive quantitative assessment of oxidative metabolism in quadriceps muscles by near infrared spectroscopy. *Br J Sports Med*, 35(6), 441-444.

- 11) di Prampero, P. E., Atchou, G., Brückner, J. C., & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 55(3), 259-266.
- 12) Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E., & Costill, D. L. (1993). Plasma lactate accumulation and distance running performance. 1979. *Med Sci Sports Exerc*, 25(10), 1091-1097; discussion 1089-1090.
- 13) Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med*, 39(6), 469-490.
- 14) Ferri, A., Adamo, S., La Torre, A., Marzorati, M., Bishop, D. J., & Miserocchi, G. (2012). Determinants of performance in 1,500-m runners. *Eur J Appl Physiol*, 112(8), 3033-3043.
- 15) Foster, C., Costill, D. L., Daniels, J. T., & Fink, W. J. (1978). Skeletal muscle enzyme activity, fiber composition and $\dot{V}O_2$ max in relation to distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 39(2), 73-80.
- 16) Grant, S., Craig, I., Wilson, J., & Aitchison, T. (1997). The relationship between 3 km running performance and selected physiological variables. *J Sports Sci*, 15(4), 403-410.
- 17) Grassi, B., Pogliaghi, S., Rampichini, S., Quaresima, V., Ferrari, M., Marconi, C., et al. (2003). Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans. *J Appl Physiol* 95(1), 149-158.
- 18) Hampson, N. B., & Piantadosi, C. A. (1988). Near infrared monitoring of human skeletal muscle oxygenation during forearm ischemia. *J Appl Physiol*, 64(6), 2449-2457.
- 19) Helgerud, J., Ingjer, F., & Strømme, S. B. (1990). Sex differences in performance-matched marathon runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 61(5-6), 433-439.
- 20) Hesford, C. M., Laing, S. J., Cardinale, M., & Cooper, C. E. (2012). Asymmetry of Quadriceps Muscle Oxygenation during Elite Short-Track Speed Skating. *Med Sci Sports Exerc*, 44(3), 501-508.
- 21) Honma, S., Fujii, N., Eda, H., Ikegami, H. (1994). Evaluated of the balance of oxygen delivery and oxygen consumption in the working muscle during

- incremental cycle exercise studied by near-infrared spectroscopy. *Bulletin Of The Physical Fitness Research Institute*, 0(85), 96-105.
- 22) Homma, S., Fukunaga, T., & Kagaya, A. (1996). Influence of adipose tissue thickness on near infrared spectroscopic signal in the measurement of human muscle. *J Biomed Opt*, 1(4), 418-424.
- 23) Houmard, J. A., Costill, D. L., Mitchell, J. B., Park, S. H., & Chenier, T. C. (1991). The role of anaerobic ability in middle distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 62(1), 40-43.
- 24) Im, J., Nioka, S., Chance, B., & Rundell, K. W. (2001). Muscle oxygen desaturation is related to whole body $\dot{V}O_2$ during cross-country ski skating. *Int J Sports Med*, 22(5), 356-360.
- 25) 石河利寛, 杉浦正輝 (1989). 運動生理学. 東京, 建帛社, p122.
- 26) Iwaoka, K., Hatta, H., Atomi, Y., & Miyashita, M. (1988). Lactate, respiratory compensation thresholds, and distance running performance in runners of both sexes. *Int J Sports Med*, 9(5), 306-309.
- 27) Jones, A. M. (1998). A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med*, 32(1), 39-43.
- 28) Jöbsis, F. F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 198(4323), 1264-1267.
- 29) Kenney, W. L., & Hodgson, J. L. (1985). Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. *Br J Sports Med*, 19(4), 207-209.
- 30) Knight, D. R., Schaffartzik, W., Poole, D. C., Hogan, M. C., Bebout, D. E., & Wagner, P. D. (1993). Effects of hyperoxia on maximal leg O_2 supply and utilization in men. *J Appl Physiol*, 75(6), 2586-2594.
- 31) Kumagai, S., Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., & Asano, K. (1982). Relationships of the anaerobic threshold with the 5 km, 10 km, and 10 mile races. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 49(1), 13-23.
- 32) Larsen, H. B. (2003). Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 136(1), 161-170.
- 33) Legrand, R., Ahmaidi, S., Moalla, W., Chocquet, D., Marles, A., Prieur, F., et al.

- (2005). O₂ arterial desaturation in endurance athletes increases muscle deoxygenation. *Med Sci Sports Exerc*, 37(5), 782-788.
- 34) Mancini, D. M., Bolinger, L., Li, H., Kendrick, K., Chance, B., & Wilson, J. R. (1994). VALIDATION OF NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY IN HUMANS. *J Appl Physiol*, 77(6), 2740-2747.
- 35) Midgley, A. W., McNaughton, L. R., & Jones, A. M. (2007). Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med*, 37(10), 857-880.
- 36) Morgan, D. W., Baldini, F. D., Martin, P. E., & Kohrt, W. M. (1989). Ten kilometer performance and predicted velocity at $\dot{V}O_2$ max among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc*, 21(1), 78-83.
- 37) Neary, J. P., Hall, K., & Bhambhani, Y. N. (2001). Vastus medialis muscle oxygenation trends during a simulated 20-km cycle time trial. *Eur J Appl Physiol*, 85(5), 427-433.
- 38) Neary, J. P., McKenzie, D. C., & Bhambhani, Y. N. (2002). Effects of short-term endurance training on muscle deoxygenation trends using NIRS. *Med Sci Sports Exerc*, 34(11), 1725-1732.
- 39) Neary, J. P., McKenzie, D. C., & Bhambhani, Y. N. (2005). Muscle oxygenation trends after tapering in trained cyclists. *Dyn Med*, 4(1), 4.
- 40) Paavolainen, L., Häkkinen, K., Härmäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol*, 86(5), 1527-1533.
- 41) Patterson, M. S., Chance, B., & Wilson, B. C. (1989). Time resolved reflectance and transmittance for the non-invasive measurement of tissue optical properties. *Appl Opt*, 28(12), 2331-2336.
- 42) Pollock, M. L. (1977). Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: Cardiorespiratory aspects. *Ann N Y Acad Sci*, 301, 310-322.
- 43) Stratton, E., O'Brien, B. J., Harvey, J., Blitvich, J., McNicol, A. J., Janissen, D.,

- et al. (2009). Treadmill Velocity Best Predicts 5000-m Run Performance. *Int J Sports Med*, 30(1), 40-45.
- 44) Szmedra, L., Im, J., Nioka, S., Chance, B., & Rundell, K. W. (2001). Hemoglobin/myoglobin oxygen desaturation during Alpine skiing. *Med Sci Sports Exerc*, 33(2), 232-236.
- 45) Takeshima, N., & Tanaka, K. (1995). Prediction of endurance running performance for middle-aged and older runners. *Br J Sports Med*, 29(1), 20-23.
- 46) Tanaka, K., & Matsuura, Y. (1984). Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 57(3), 640-643.
- 47) Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., Kumagai, S., Sun, S. O., et al. (1984). A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc*, 16(3), 278-282.
- 48) Tanaka, K., Watanabe, H., Konishi, Y., Mitsuzono, R., Sumida, S., Tanaka, S., et al. (1986). Longitudinal associations between anaerobic threshold and distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 55(3), 248-252.
- 49) Wang, B. D., Tian, Q. P., Zhang, Z. X., & Gong, H. (2012). Comparisons of local and systemic aerobic fitness parameters between finswimmers with different athlete grade levels. *Eur J Appl Physiol*, 112(2), 567-578.
- 50) Wilson, J. R., Mancini, D. M., McCully, K., Ferraro, N., Lanoce, V., & Chance, B. (1989). Noninvasive detection of skeletal muscle underperfusion with near-infrared spectroscopy in patients with heart failure. *Circulation*, 80(6), 1668-1674.
- 51) 山地啓司 (1997). ランニングの経済性に影響をおよぼす要因. *日本運動生理学雑誌*, 4(2), 81-98.
- 52) 山地啓司 (2001). 改訂 最大酸素摂取量の科学. 第2版, 東京, 杏林書院, p15.
- 53) Yoshida, T., Udo, M., Iwai, K., Chida, M., Ichioka, M., Nakadomo, F., et al. (1990). Significance of the contribution of aerobic and anaerobic components to several distance running performances in female athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 60(4), 249-253.

Summary

Prediction of 5000m race time in collegiate distance runners
by using near-infrared spectroscopy.

Ryoma Murata

【BACK GROUND】The competition performance in long-distance running is almost 70% predicted by the traditional parameters of aerobic fitness as maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$), running economy ($\dot{V}O_{2submax}$), lactate threshold (LT). Recently, researchers reported that muscle oxygenation (oxy-Hb/Mb) in local regions measured by using near-infrared spectroscopy (NIRS) was correlated with competition performance in endurance sports. Therefore, the performance in long distance running may be better able to predict by the addition to the traditional parameters of muscle oxygenation (oxy-Hb/Mb, alternative parameter).

【METHODS】Eight endurance trained collegiate male runners (5000m time ; $15'57''9 \pm 34''4$, $\dot{V}O_{2max}$; $67.7 \pm 5.6 \text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) volunteered to participate in the study. Subjects performed the incremental exercise test to measure $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}O_{2submax}$, running speed at LT (V-LT), minimum oxy-Hb/Mb (oxy-Hb/Mb_{min}) in the vastus lateralis muscle. And the relationship between the 5000m race time and the measured all parameters were verified by stepwise multiple-regression analysis.

【RESULT】The following two equations were derived and the model 2 has higher coefficient of determination(R^2).

Model1: 5000m race time = $1457.46 - 1.903 \times V-LT$ ($R^2=0.55$)

Model2: 5000m race time = $1410.65 - 1.528 \times V-LT - 1.618 \times \text{oxy-Hb/Mb}_{min}$ ($R^2=0.86$)

【CONCLUSION】 The combination of V-LT and oxy-Hb/Mb_{min} is useful to predict 5000m race time in collegiate distance runners.

Table 1. Physical characteristics of the subjects.

Subject	Age (yrs)	Height (cm)	Body mass (kg)	Body fat (%)	adipose tissue thickness at VL (mm)
A	19	167.6	56.7	9.6	3.0
B	21	162.5	56.5	7.7	2.3
C	20	175.9	61.5	7.0	2.2
D	19	151.3	49.8	14.4	4.5
E	19	178.6	64.4	5.4	2.3
F	19	176	62.2	8.4	2.7
G	18	169.9	58.9	6.3	3.6
H	19	167.8	57.7	8.8	2.3
Mean	19.3	168.7	58.5	8.5	2.9
SD	0.9	8.8	4.5	2.8	0.8

Table 2. 5000m race time and physiological parameters of the subjects.

Subject	5000m Race time (min'sec")	$\dot{V}O_{2max}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	V-LT (m·min ⁻¹)	V-OBLA (m·min ⁻¹)	RE (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	oxy-Hb/Mbmin (%)	deoxy-Hb/Mbmax (%)
A	15'15"3	74.1	282.9	328.3	54.9	32.3	119.0
B	15'17"2	73.0	260.1	303.6	56.0	45.7	89.3
C	15'44"4	63.2	268.1	315.4	48.6	40.4	66.6
D	15'47"0	75.0	262.4	304.8	58.1	49.5	21.4
E	15'59"0	64.5	264.8	326.1	51.0	27.4	56.6
F	16'15"0	64.0	268.9	327.4	52.1	17.3	59.0
G	16'32"0	66.9	257.8	358.3	51.2	22.2	81.4
H	16'53"2	60.7	235.3	274.4	53.5	19.8	100.9
Mean	15'57"9	67.7	262.5	317.3	53.2	31.8	74.3
SD	34"4	5.6	13.4	24.4	3.1	12.2	30.2

Table 3. Correlations of physiological parameters with 5000m race time.

	$\dot{V}O_{2\max}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	V-LT (m·min ⁻¹)	V-OBLA (m·min ⁻¹)	RE (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	oxy-Hb/Mb ₂₄₀ (%)	oxy-Hb/Mb _{min} (%)	deoxy-Hb/Mb _{max} (%)
5000m Race time	r=0.74*	r=0.74*	r=0.09	r=0.34	r=0.71*	r=0.73*	r=0.06

* Statistically significant (p < 0.05)

Table 4. Multiple regression models of 5000m-running race time.

Model	Physiological parameters	Regression equation	R ²	r	Significance probability
1	V·LT	5000m time=1457.46 - 1.90×V·LT	0.55	0.74	p<0.05
2	V·LT, oxy·Hb/Mb _{min}	5000m time=1410.65 - 1.53×V·LT - 1.62×oxy·Hb/Mb _{min}	0.86	0.93	p<0.01

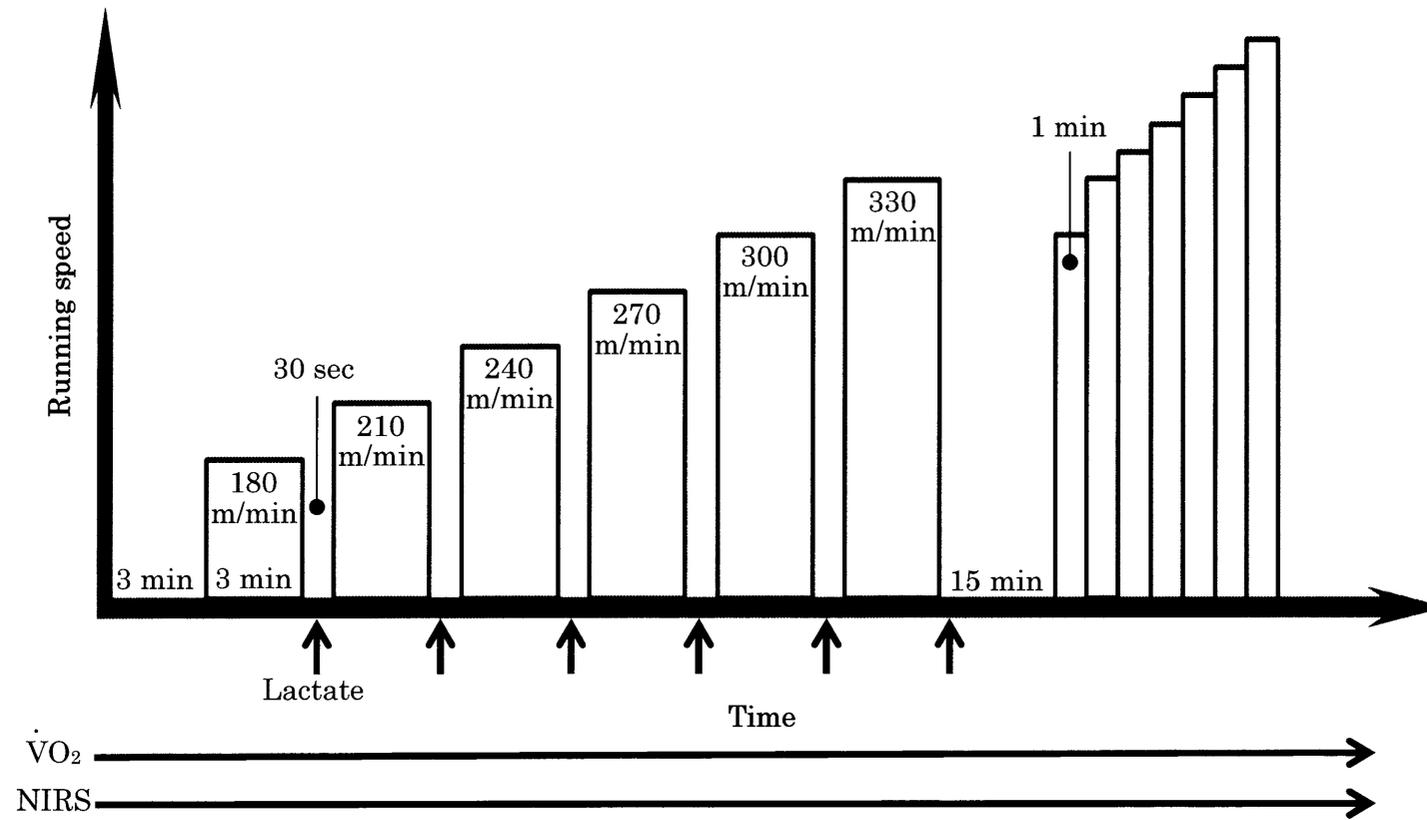


Fig 1. The experimental protocol of incremental exercise test on the treadmill .



Fig 2. The photograph showing placement of the NIRS probe over the vastus lateralis muscle 12-15 cm above the knee, along the major axis of the thigh.

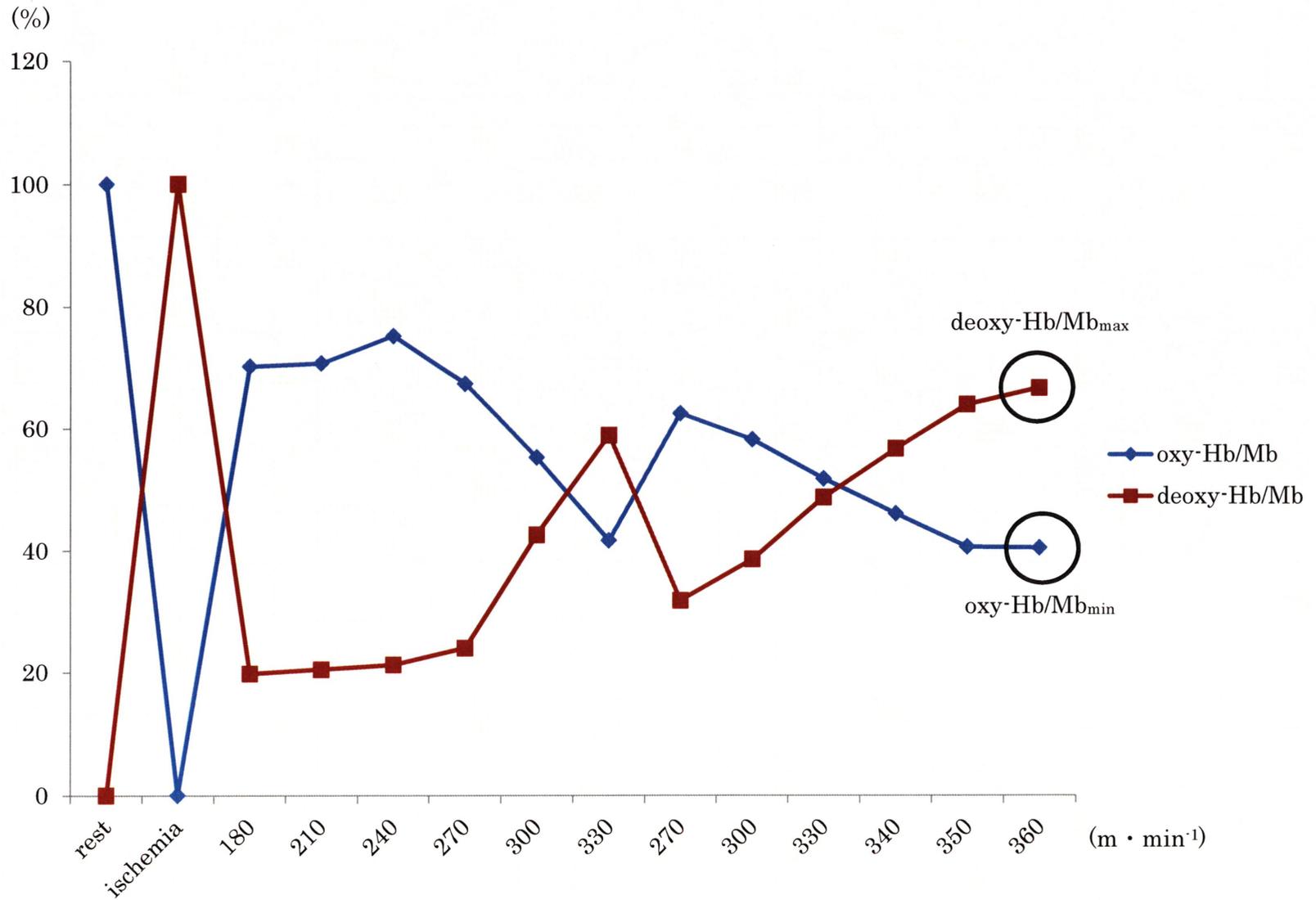


Fig 3. The example of NIRS oxygenation signal recorded during the incremental test.

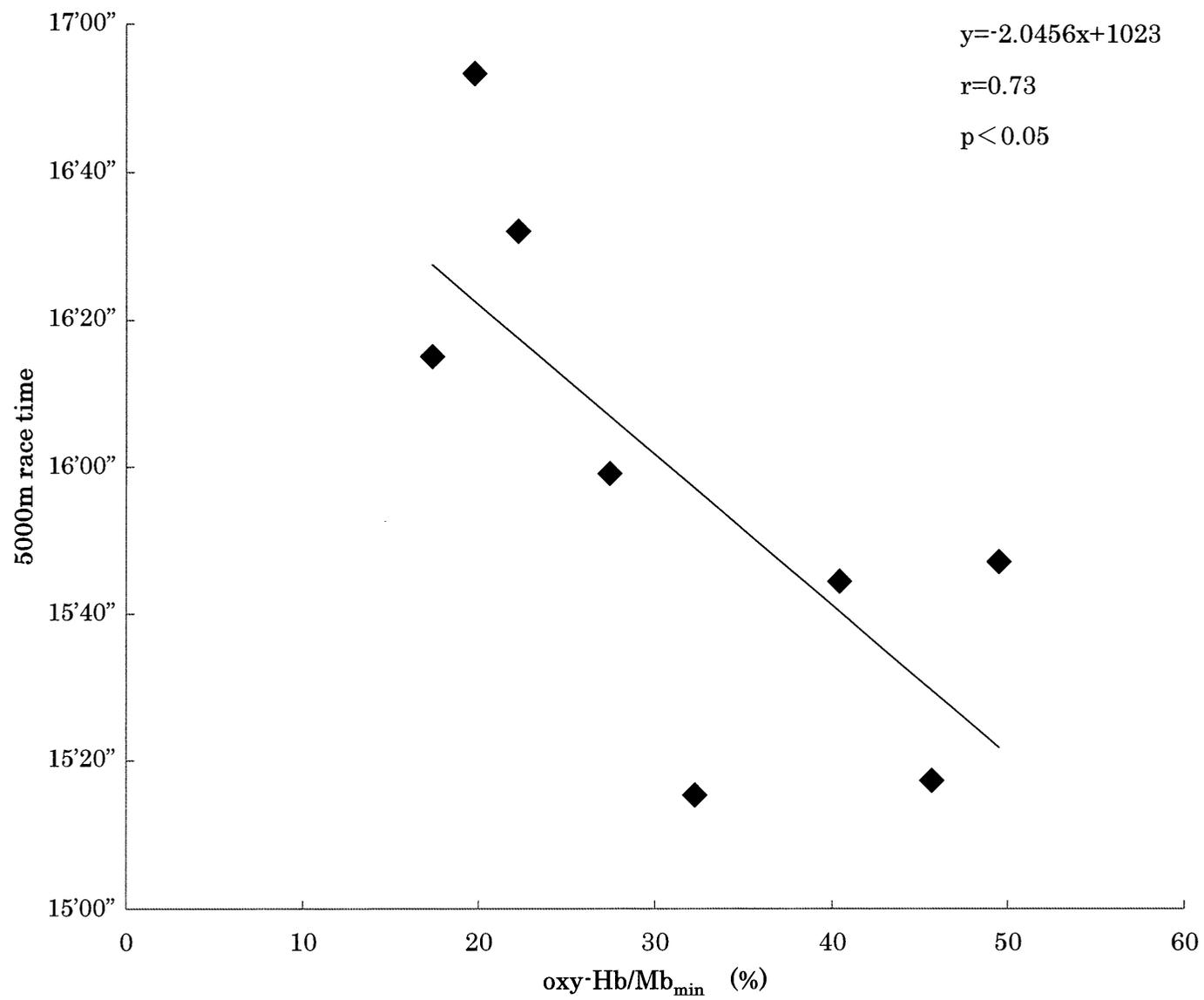


Fig 4. The relationship between oxy-Hb/Mb_{min} and 5000m race time.

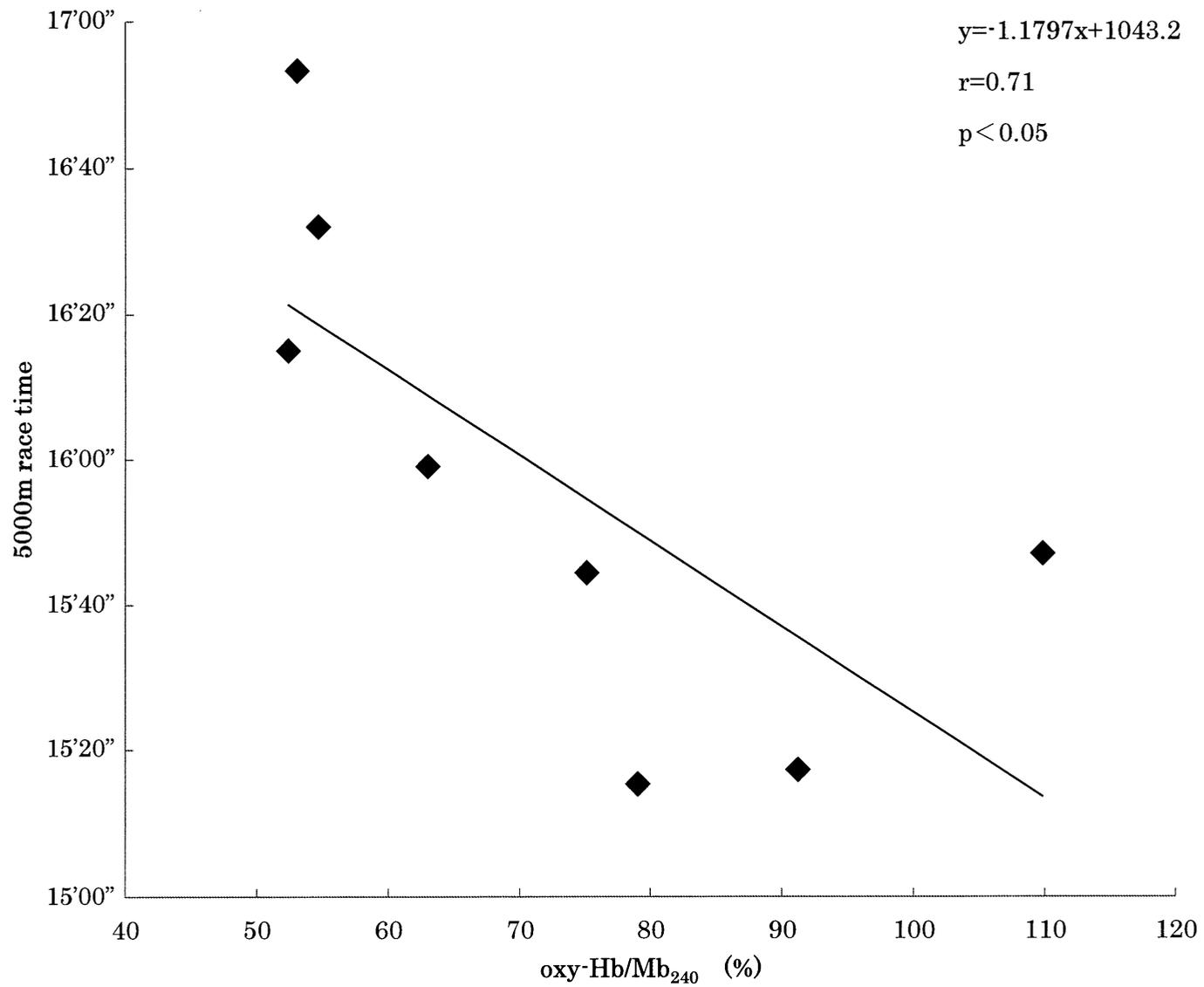


Fig 5. The relationship between oxy-Hb/Mb₂₄₀ and 5000m race time.

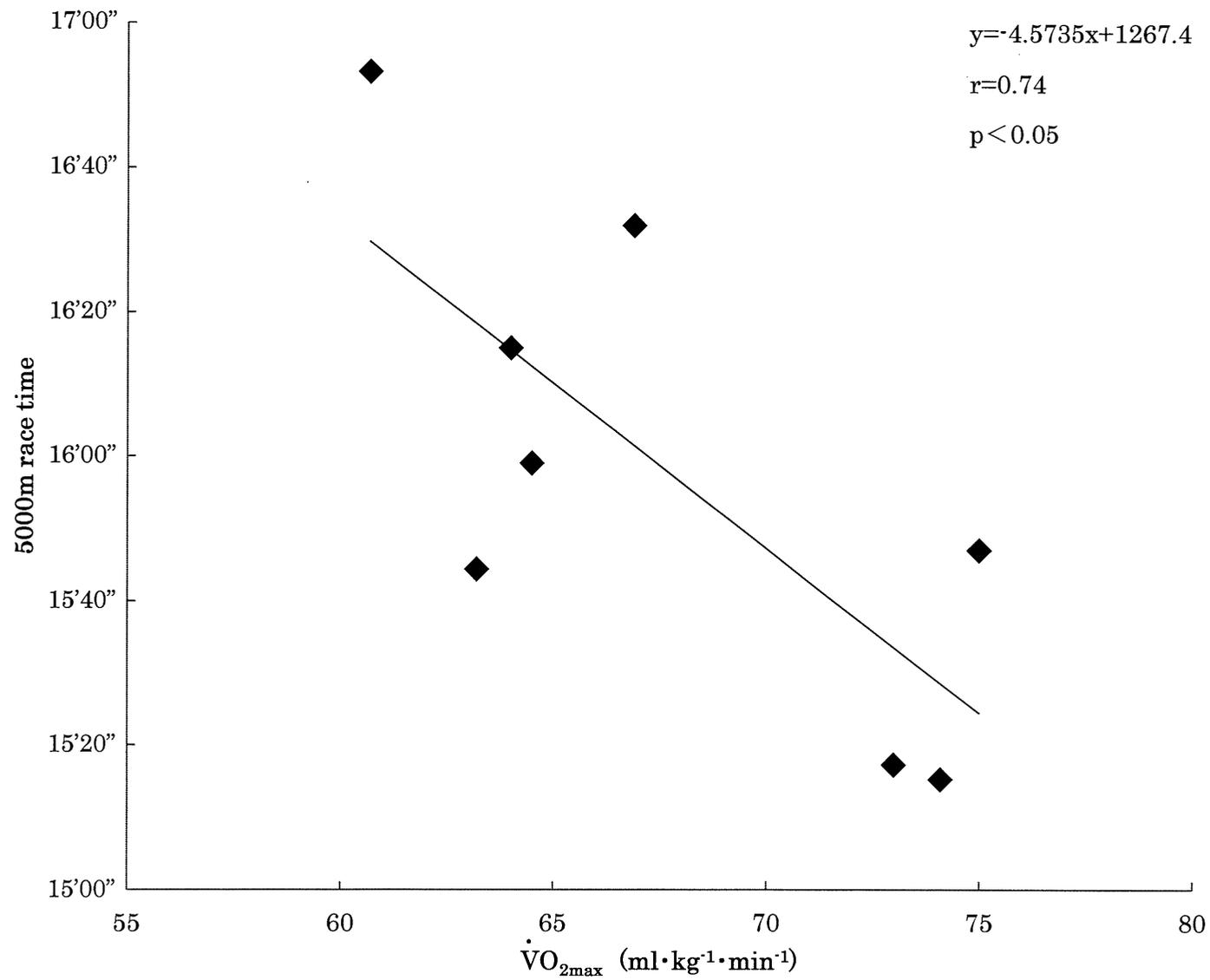


Fig 6. The relationship between $\dot{V}O_{2max}$ and 5000m race time.

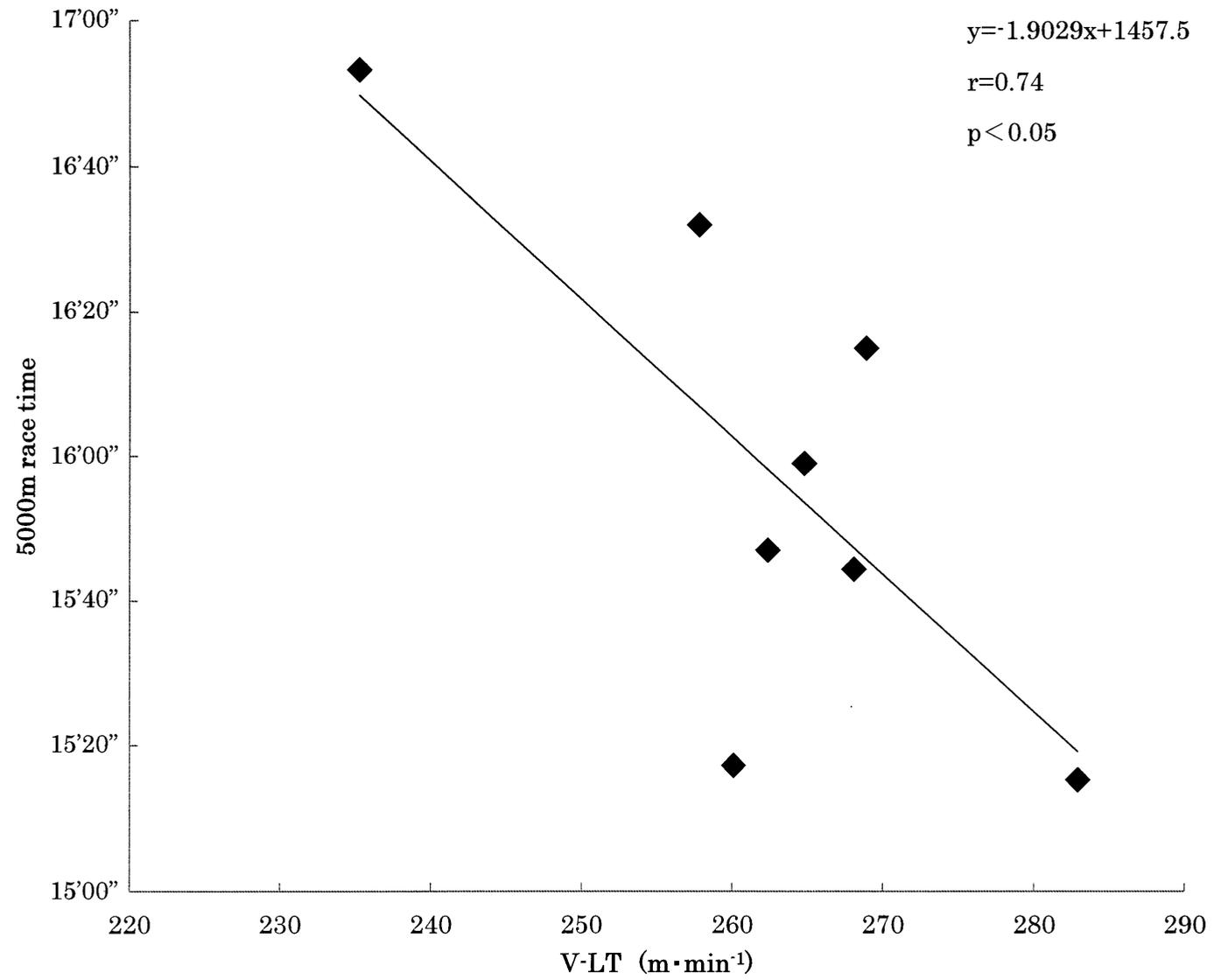


Fig 7. The relationship between V-LT and 5000m race time.