

加速度計を応用した運動中のエネルギー代謝の評価方法

東海学園大学 白井 祐介

Method to Evaluate Energy Expenditure During Exercise by Using Accelerometer

by

Yusuke Shirai

Tokai Gakuen university, Associate professor

ABSTRACT

Rowing has a unique exercise characteristic, that is, moving body toward back and forth to generate power output, and the work for that kind of movement was not considered when predicting energy expenditure. The aim of this study was to evaluate aerobic and anaerobic energy supplies during 2000 m rowing test with using a newly developed accumulated oxygen deficit (AOD) method which takes the exercise characteristic of rowing into account. Thirteen male university rowers conducted 2000 m test. In each 250-m section, utilized anaerobic energy was determined by subtracting measured oxygen uptake from predicted oxygen demand which was predicted by power output and accelerometer output measured by rowing ergometer and tri-accelerometer sensor being put on rower's back, respectively. The highest sectional anaerobic energy utilization was observed at the first section, then sectional anaerobic energy utilization gradually decreased with time course, however, contribution of anaerobic metabolism maintained around 10 % during second half of the test. Although entire contribution of anaerobic metabolism reached 18.3 ± 6.2 %, total amount of anaerobic energy was not correlated with average power output of 2000 m test ($r = -0.15$, $p = 0.625$), however, maximal oxygen uptake was ($r = 0.83$, $p = 0.001$). The

highest sectional power output was observed at the first section and gradually decreased with time course, meanwhile, power output at the final section was not significantly different from its previous section. Amount of available anaerobic energy at the final section and the second from final section were significantly correlated with relative power output at the final section ($r = 0.66, p = 0.015$ and $r = 0.57, p = 0.04$). These results suggested that rowing performance is mainly related to aerobic ability as reported previously, and anaerobic capacity would be important to maintain higher power output during second half of the test and especially at the final section.

要 旨

本研究では、13名の男子大学生ボート選手を対象に、テスト中の発揮パワーおよび身体に装着した加速度計の測定値から2000mテスト中の酸素需要量を推定し、そこから実際の酸素摂取量を差し引くことで無酸素性エネルギー供給量を定量した。その結果、テスト中の無酸素性代謝の貢献割合は $18.3 \pm 6.2\%$ であったが、平均発揮パワーと無酸素性エネルギー供給量の間には認められなかった ($r = -0.15, p = 0.625$)。一方、1500mおよび1750m地点における無酸素性エネルギー量の残存率と、2000mテストの平均発揮パワーを基準にした最終区間の発揮パワー水準の間には、それぞれ有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.57, p = 0.04, r = 0.66, p = 0.015$)。本研究の結果から、無酸素性代謝能力はラストスパートにとって重要な能力であることが示唆された。

緒 言

ボート競技とは、2000mの直線コース上で着順を競い合う競技であり、レースの所要時間はおおよそ5.5～7.5分間である。また、レース中の有酸素性および無酸素性代謝の貢献割合は、それぞれおおよそ80%および20%であり¹⁻⁴⁾、エネルギー代謝の大部分が有酸素性代謝に依存している。実際に、レースの所要時間や平均発揮パワーで表される

ローイングパフォーマンスは、有酸素性代謝能力の指標である最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) やレース中の最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) と強い相関関係を示すことが報告されている^{5,6)}。しかし、2000mレースのペース戦略に着目すると、有酸素性代謝からのエネルギー供給が十分に高まっていないスタート直後や、有酸素性代謝からのエネルギー供給がほぼ最大に達しているレース終盤において、特に高い艇速度（発揮パワー）で運動が行われている⁷⁻⁹⁾。このことから、スタート直後やレース終盤では、無酸素性代謝からのエネルギー供給もパフォーマンスを決定する重要な要因と考えられる。しかし、これまでにローイングを対象としてペース戦略とエネルギー供給動態の関係について検討した先行研究は認められない。

運動中の有酸素性エネルギー供給動態は、運動中の呼気ガス分析によって測定した $\dot{V}O_2$ によって直接的に定量することが可能である。それに対して、無酸素性エネルギー供給動態は、直接的に評価することが困難であるため酸素借 (Accumulated oxygen deficit: AOD) 法が用いられている。この方法では、最大下強度で求めた運動強度と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式に、レース中の運動強度を外挿することによって必要な酸素摂取量 (酸素需要量) を推定し、それと実際の $\dot{V}O_2$ の差分から酸素借、すなわち無酸素性エネルギー供給量を定量する^{10,11)}。しかし、この方法をローイングに

応用する際には、その運動特性が十分に考慮されていないという問題点がある。

ローイング動作は、身体を前後方向へと移動させつつ、後方へ移動する際にオールを牽引することによって推進力を発生させる運動であり、AOD法によって酸素需要量を推定する際にはオールを牽引する際の発揮パワーが用いられてきた。しかし、ローイング動作の特徴である身体を前後方向へと移動させる仕事について加味されていないことや、スタート直後およびレース終盤では1分間あたりのストローク回数（ストロークレート）も増加することから、レース中のエネルギー供給動態を詳細に検討するためには、身体を移動させる仕事も加味して運動中の酸素需要量を推定する必要がある。

この問題に対して、我々は、従来のAOD法に加えて、漕ぎ手の身体に3軸加速度測定装置（以下、加速度センサーと略す）を装着し、そこから評価した身体活動量によって身体を移動させる仕事も加味して運動中の酸素需要量を推定する方法について検討を行ない、その妥当性を明らかにしてきた¹²⁻¹⁵。そこで、本研究では、このローイング用のAOD法を用いて、2000mレース中の有酸素性および無酸素性エネルギー供給動態を明らかにし、それらとペース戦略の関係について検討を行うことを目的とした。

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者は、男子大学生ボート選手13名（身長： $1.74 \pm 0.05\text{m}$ 、体重： $69.3 \pm 7.4\text{kg}$ 、年齢： 20.2 ± 1.1 歳）であった。被験者には測定前日から激しいトレーニングおよびアルコールの摂取を禁止させ、また実験当日はカフェイン類の摂取を避けるよう指示した。さらに、実験開始の2時間前からは飲食を控えさせた。被験者には、事前に研究内容を詳細に説明し、研究の趣旨、測定への参加およびデー

タの発表についての上承を書面にて得た。また、本研究は筑波大学体育系倫理委員会の承認を受けて実施した（体26-9）。

1.2 実験内容および測定項目

本研究では、ローイング用に開発したAOD法によって2000mテスト中の酸素需要量を推定し、そこから実際に測定した $\dot{V}O_2$ を差し引くことによって無酸素性エネルギー供給量を定量した。そのため、2000mテストに先立ち、発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の直線回帰式、および身体に装着した加速度センサーの測定値（身体活動量）と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式を算出するための漸増負荷テストを実施した。

A. 漸増負荷テスト

発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の直線回帰式を求めるために、運動時間が4分間、休憩時間が2分間の間欠的漸増負荷テスト（テストI）を実施した。各ステージの発揮パワーは、直近の2kmタイムトライアル時の平均発揮パワー（ P_{2k} ）を基準として55, 60, 65, 70, 75および80% P_{2k} とした。各ステージの最後の1分間において、発揮パワー、身体活動量、ガス交換所量（換気量： $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、二酸化炭素排出量： $\dot{V}CO_2$ および呼吸交換比：RER）を測定した。

続いて異なる実験日に、身体活動量と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式を求めるための漸増負荷テスト（テストII）を実施した。運動時間は4分間、休憩時間は2分間とし、各ステージの発揮パワーを一定に保たせつつ、ストロークレートのみを24, 28, 32および36strokes/minと漸増させた。各ステージの最後の1分間において、身体活動量およびガス交換所量を測定した。各ステージの身体活動量と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式の傾き、および安静時の $\dot{V}O_2$ を用いて身体を移動させる仕事に対する酸素需要量の推定式を作成した。

発揮パワーを漸増させたテストIで得られた各ステージの $\dot{V}O_2$ には、ハンドルを牽引する仕事および身体を移動させる仕事の両者が影響を及ぼしている。そこで、テストIの各ステージで測定した身体活動量から身体を移動させる仕事に対する酸素需要量を推定し、それを実際に測定した $\dot{V}O_2$ から差し引くことでハンドルを牽引する仕事に対する酸素摂取量と定義した。そのうえで、発揮パワーとハンドルを牽引する仕事に対する酸素摂取量の直線回帰式を作成した。こうして作成した2つの直線回帰式に2000mテスト中の発揮パワーおよび身体活動量を代入することによって酸素需要量を推定した。

B. 2000mテスト

被験者には、最も高いパフォーマンスが発揮できると判断したペース戦略を採用するよう指示した。テスト中は、250m区間毎に平均発揮パワー、ストロークレート、身体活動量、ガス交換所量を測定した。平均発揮パワーおよび身体活動量から各区間の酸素需要量を推定し、そこから実際に測定した $\dot{V}O_2$ を差し引くことによって酸素借（無酸

素性エネルギー供給量）を算出した。有酸素性代謝および無酸素性代謝の貢献割合は、酸素需要量に対する酸素消費量および酸素借の比率によってそれぞれ算出した。

C. 統計処理

結果は全て平均値 ± 標準偏差にて示した。2000mテストの各区間における測定項目の差の検定には、区間を要因とした一元配置分散分析を用い、有意差が認められた場合にはBonferroni法によって調整した事後検定を行なった。また、項目間の関係性の検討にはピアソンの積率相関係数を用いた。統計的有意性の判断基準は、危険率5%未満とした。

2. 結果

2.1 エネルギー供給動態

2000mテストの平均発揮パワー、平均ストロークレートおよび所要時間は、それぞれ $301.5 \pm 25.6W$ 、 $32.9 \pm 1.0 \text{ strokes/min}$ および $7.1 \pm 0.2 \text{ min}$ であった。図1に250m区間毎の発揮パワーおよびストロークレートの推移を示した。発揮パワー

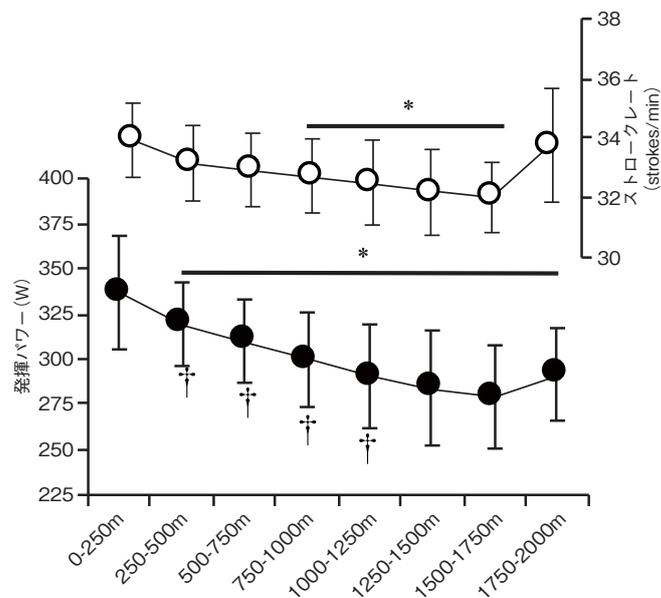


図1 2000mテストにおける発揮パワーおよびストロークレートの推移
*は第1区間(0-250m)と比較して、†は直前の区間と比較して有意差が認められたことを示す(p, 0.05)

は、第1区間 (0-250m) において最も高い値を示し、その後は第5区間 (1000-1250m) までの各区間において、直前の区間と比較して有意に低下した ($p<0.05$)。ストロークレイトは、第1区間 (0-250m) において最も高い値を示し、750-1750m 区間において第一区間よりもストロークレイトが有意に低下した ($p<0.05$)。

図2に2000mテスト中の $\dot{V}O_2$ 、酸素借、有酸素性および無酸素性代謝の貢献割合の推移を示した。 $\dot{V}O_2$ はテスト開始直後から第3区間まで急峻な増加を示し、その後はほぼ $\dot{V}O_{2peak}$ ($4.0 \pm 0.4L/min$) で推移した。酸素借は、第1区間において

最も高い値 ($2428.2 \pm 399.0mLO_2Eq$) を示し、その後は、第5区間まで有意に低下した ($p<0.05$) が、最終区間において直前の区間と比較して有意な増加を示した ($367.0 \pm 280.5mLO_2Eq$, $536.6 \pm 431.8mLO_2Eq$, $p<0.05$)。第1区間における無酸素性代謝の貢献割合は $56.2 \pm 5.1\%$ であり、有酸素性代謝 ($43.8 \pm 5.1\%$) よりも高い値であったが、その後は第5区間まで徐々に減少した ($10.5 \pm 6.1\%$) が、最終区間においてその直前の区間と比較して有意に増加した ($8.3 \pm 6.6\%$, $12.6 \pm 9.1\%$, $p<0.05$)。2000mテストにおける平均発揮パワーと $\dot{V}O_{2peak}$ の間には強い正の相関関係が認められた ($r=0.90$,

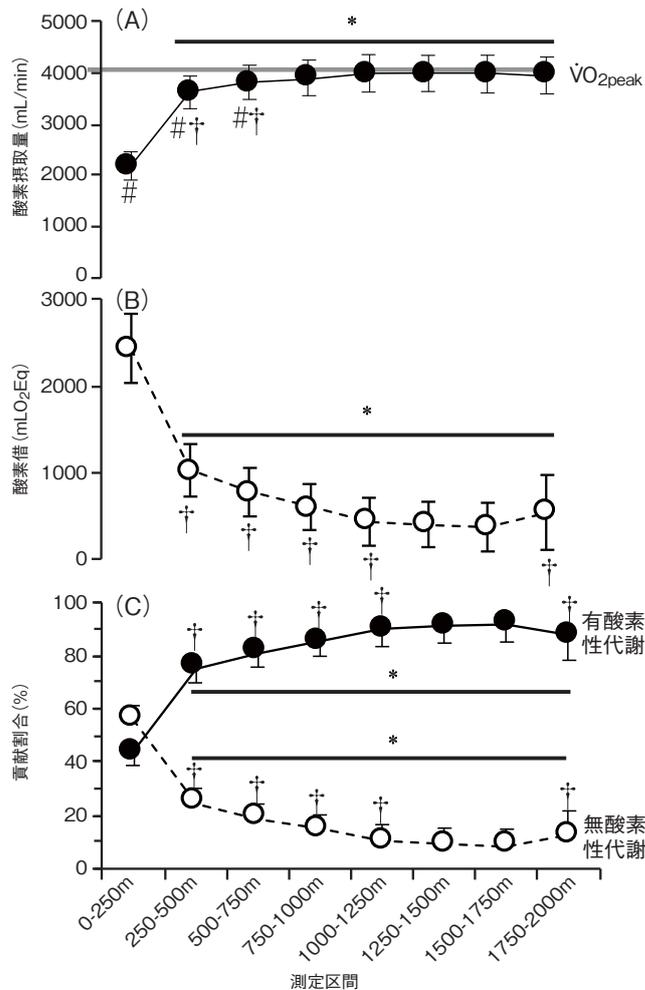


図2 2000mテスト中のエネルギー供給動態

2000mテストにおける酸素摂取量の推移(A)、酸素借の推移(B)、有酸素性および無酸素性代謝の貢献割合の推移(C)。#は $\dot{V}O_{2peak}$ と比較して有意差が認められたことを示す。*は第1区間(0-250m)と比較して、†は直前の区間と比較して有意差が認められたことを示す ($p<0.05$)

$p < 0.01$) が, AODとの間には関係性が認められなかった ($r = -0.15, p = 0.625$).

2. 2 エネルギー供給動態とペース戦略の関係

全ての被験者において第1区間の発揮パワーが最も高い値を示したが, 最終区間において発揮パワーの有意な増加は認められなかった. 被験者毎に2000mテストの平均発揮パワーを基準として最終区間の発揮パワー水準を算出した結果, 発揮パワー水準には92.2~104.7%のばらつきがみられた. 最終区間の発揮パワー水準は, $\dot{V}O_{2peak}$ と関係性を示さなかったものの ($r = -0.03, p = 0.936$), 1500mおよび1750m地点における無酸素性エネルギー量の残存率とそれぞれ有意な正の相関関係を示した ($r = 0.57, p = 0.04, r = 0.66, p = 0.015$, 図3).

3. 考察

本研究の目的は, ローイングの運動特性を考慮したAOD法によって, 2000mテスト中の有酸素性および無酸素性エネルギー供給動態を明らかにし, さらに, エネルギー供給動態とペース配分との関係を検討することであった. 本研究の結果から, 無酸素性代謝の貢献割合は, 1) スタート直後が最も高く, その後, 運動時間の経過に伴い漸減するものの, 中盤以降でも10%程度で維持されること, 2) 最終区間における発揮パワー水準は, 1500m地点および1750m地点における無酸素性エネルギー量の残存率とそれぞれ有意な正の相関関係を示すことが明らかになった.

3. 1 パフォーマンスとエネルギー代謝能力

Hagerman¹⁶⁾ は, 6分間テスト中の血中乳酸濃度について, 2分目まで上昇し続け16~18mmol/Lに到達した後, 比較的高い値(14~16mmol/L)で維持されることを報告している. 骨格筋内で産生された乳酸は, 血中へと放出されるのと同時に他の組織に取り込まれ除去されること¹⁷⁾ と考え

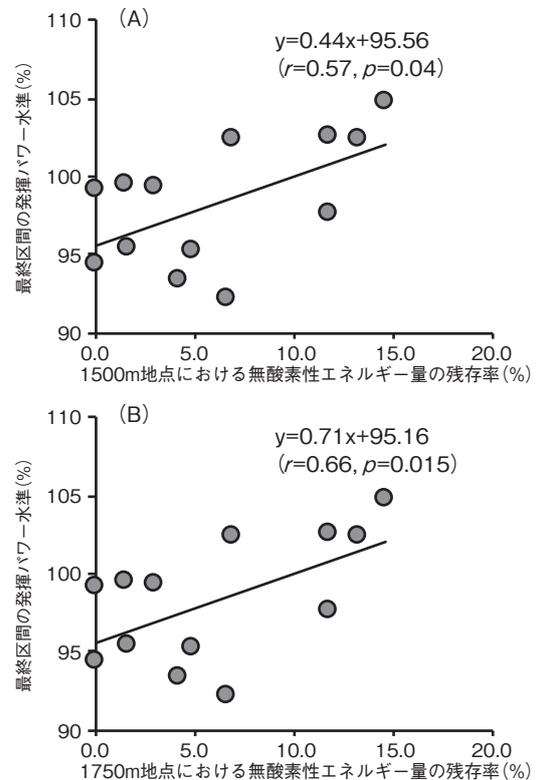


図3 無酸素性エネルギー量の残存率と最終区間の発揮パワー水準の関係

2000mテストの平均発揮パワーを基準とした最終区間(1750-2000m区間)の発揮パワー水準と1500m地点における無酸素性エネルギー量の残存率(A)および1750m地点における無酸素性エネルギー量の残存率(B)の関係. 無酸素性エネルギーの残存率は, 2000mテストにおける酸素借の総量と, 1500mおよび1750m地点までに動員された酸素借の差分から残量を算出し, それらを総量に対する割合で示した

合わせると, 2000mテストでは, テスト中盤位以降も無酸素性代謝, とりわけ解糖系からのエネルギー供給が一定の割合で維持されていると考えられる. 本研究において, 2000mテスト中盤以降の無酸素性代謝の貢献割合はおよそ10%で推移しており, 先行研究の見解を支持する結果であった.

本研究における2000mテスト中の無酸素性代謝の貢献割合は $18.3 \pm 6.2\%$ であったが, 2000mテスト中の平均発揮パワーは, テスト中の $\dot{V}O_{2peak}$ と強い相関関係を示したものの, 無酸素性エネルギー供給量との間には関係性は認められなかった. この結果は, Russell et al.¹⁾の結果とも一致するものであった. Russell et al.¹⁾の対象者

はジュニア期のボート選手であり、 $\dot{V}O_{2max}$ には3.4~5.2L/minの個人差が認められた。同様に、本研究の対象者においても $\dot{V}O_{2peak}$ に3.1~4.9L/minのばらつきが認められた。有酸素性エネルギー供給能力がローイングパフォーマンスにとってより強い決定要因であること^{5,6)}を踏まえ、本研究およびRussell et al.¹⁾の研究では、有酸素性エネルギー供給能力の個人差が大きかったことにより、無酸素性エネルギー供給能力の差がローイングパフォーマンスに及ぼす影響が相対的に小さかった可能性も考えられる。一方、ローイングパフォーマンスと無酸素性エネルギー供給能力の間に相関関係が認められたとする先行研究では、3.5年以上の競技経験を有する女子大学生ボート選手²⁾、またはナショナルチームにおける競技経験を有する男性ボート選手⁴⁾を対象としていた。持久系競技では、体内の恒常性を維持し、ゴールに前に疲労困憊に達することがないように運動強度を適切にコントロールすること（ペース戦略）によって、体内の恒常性を維持する必要がある¹⁸⁾。このことから、十分に経験を積んだボート選手では、自身の無酸素性エネルギー能力を最大限に活用するためのペース戦略が確立できており、無酸素性エネルギー供給能力とローイングパフォーマンスの間に関係が認められていた可能性も考えられる。

3. 2 ペース戦略とエネルギー供給能力

2000mテストにおける一般的なペース戦略として、スタートスパートおよびラストスパートを含む逆J字型（Reverse J-shaped）のペース配分が採用されている^{8,18)}。本研究では、第1区間の発揮パワーが最も高い値を示していたことから、本研究の被験者はスタートスパートを含むペース戦略を採用していたと考えられる。しかし、最終区間とその直前の区間の発揮パワーには有意差が認められなかったこと、さらに、2000mテストの平均

発揮パワーを基準とした最終区間の発揮パワー水準には92.2~104.7%のばらつきが認められたことから、被験者によってペース戦略が異なっていた可能性がある。このとき、最終区間の発揮パワー水準と VO_{2peak} の間には関係性が認められなかったが、1500m地点および1750m地点における無酸素性エネルギー量の残存率とは、それぞれ有意な正の相関関係を示していた。このことから、最終区間の発揮パワー水準を高めるためには、1500m以降で利用可能な無酸素性エネルギー量を少しでも残存させることが重要であると考えられる。また、そのためには、トレーニングによって無酸素性エネルギー供給能力（アネロビックキャパシティ）を高めること、および1500mまでに必要以上の無酸素性エネルギーを浪費しないための効率的なローイングテクニックを獲得することが重要であると考えられる。

結 論

本研究では、ローイングの運動特性を考慮した新たなAOD法によって、2000mテスト中のエネルギー供給動態およびエネルギー供給動態とペース戦略の関係を検討した。本研究において、テスト中の無酸素性代謝の貢献割合は $18.3 \pm 6.2\%$ であったものの、ローイングパフォーマンスと無酸素性エネルギー供給量の間には相関関係が認められなかった。しかし、有酸素性代謝からのエネルギー供給がほぼ最大レベルに到達しているテスト中盤以降において、無酸素性代謝の貢献割合は10%程度で維持されることや、最終区間の発揮パワー水準が高い被験者ほど、1500m地点および1750m地点における利用可能な無酸素性エネルギー量の残存率が高かったことから、無酸素性代謝能力はレース中盤以降における発揮パワーの維持およびラストスパートにとって重要な能力であることが示唆された。

謝 辞

本研究を委託いただきました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施にあたりご指導を賜りました筑波大学・鍋倉賢治教授に心より感謝いたします。

文 献

- 1) Russell A.P., Le Rossignol P.F., Sparrow W. A.: Prediction of elite schoolboy 2000m rowing ergometer performance from metabolic, anthropometric and strength variables, *J. Sports Sci.*, **16**: 749-754, doi: 10.1080/026404198366380 (1998)
- 2) Pripstein L.P., Rhodes E.C., McKenzie D.C., Coutts K.D.: Aerobic and anaerobic energy during a 2-km race simulation in female rowers, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **79**: 491-494, doi: 10.1007/s004210050542 (1999)
- 3) de Campos Mello F., de Moraes Bertuzzi R.C., Grangeiro P.M., Franchini E.: Energy systems contributions in 2,000 m race simulation: a comparison among rowing ergometers and water, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **107**: 615-619, doi: 10.1007/s00421-009-1172-9 (2009)
- 4) Clark J.R.: Energy system contribution to 2000-m rowing ergometry using the accumulate oxygen deficit版. University of Pretoria, South Africa (2016)
- 5) Bourdin M., Messonnier L., Hager J.P., Lacour J.R.: Peak power output predicts rowing ergometer performance in elite male rowers, *Int. J. Sports Med.*, **25**: 368-373, doi: 10.1055/s-2004-815844 (2004)
- 6) Cosgrove M.J., Wilson J., Watt D., Grant S.F.: The relationship between selected physiological variables of rowers and rowing performance as determined by a 2000 m ergometer test, *J. Sports Sci.*, **17**: 845-852, doi: 10.1080/026404199365407 (1999)
- 7) Steinacker J.M.: Physiological aspects of training in rowing, *Int. J. Sports Med.*, **14** Suppl 1: S3-10 (1993)
- 8) Garland S.W.: An analysis of the pacing strategy adopted by elite competitors in 2000 m rowing, *Br. J. Sports Med.*, **39**: 39-42, doi: 10.1136/bjism.2003.010801 (2005)
- 9) 松下雅雄, 中村夏美, 藤原 昌, 千足耕一: ボート競技の全国大会における上位進出の要件, *学術研究紀要*, **34**: 63-68 (2006)
- 10) Noordhof D.A., de Koning J.J., Foster C.: The maximal accumulated oxygen deficit method: a valid and reliable measure of anaerobic capacity?, *Sports Med.*, **40**: 285-302, doi: 10.2165/11530390-000000000-00000 (2010)
- 11) Medbø J.I., Mohn A.C., Tabata I., Bahr R., Vaage O., Sejersted O.M.: Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit, *J. Appl. Physiol. (1985)*, **64**: 50-60 (1988)
- 12) 白井祐介, 丹治史弥, 高山史徳, 鍋倉賢治: ローイング時の内的仕事に対するエネルギー消費量の定量方法, *バイオメカニズム学会誌 = Journal of the Society of Biomechanisms Japan*, **40**: 195-203 (2016)
- 13) 白井祐介, 品田貴恵子, 吉岡利貢, 鍋倉賢治: ローイング時のストロークレートの相違がエネルギー消費量に及ぼす影響, *体育学研究*, **59**: 263-274, doi: 10.5432/jjpehss.13010 (2014)
- 14) 白井祐介, 鍋倉賢治: ローイング時の酸素需要量の推定方法に関する検討, *体育測定評価研究*, **15**: 11-23, doi: 10.14859/jjtehp.15.11 (2016)
- 15) Shirai Yusuke, Murata Munenori, Nabekura Yoshiharu: Validity of a newly developed method to predict accumulated oxygen deficit, *Human Performance Measurement*, **15**: 1-13 (2018)
- 16) Hagerman F.C. (居石真理絵訳), ボート競技の生理学, Garrett W. E. Jr., Kirkendall, D, T.編, 西村書店, 東京 (2000)
- 17) van Hall G., Stromstad M., Rasmussen P., Jans O., Zaar M., Gam C., Quistorff B., Secher N.H., Nielsen H.B.: Blood lactate is an important energy source for the human brain, *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **29**: 1121-1129, doi: 10.1038/jcbfm.2009.35 (2009)
- 18) Abbiss Chris R., Laursen Paul B.: Describing and Understanding Pacing Strategies during Athletic Competition, *Sports Med.*, **38**: 239-252, doi: 10.2165/00007256-200838030-00004 (2008)