

ボート競技における無酸素性代謝能力の評価方法の開発

白井祐介

目 次

I. 要 約	1
II. 緒 言	2
III. 研究課題 I	3
A. 目 的	3
B. 方 法	3
C. 結 果	5
D. 考 察	6
E. 結 論	7
IV. 研究課題 II	8
A. 目 的	8
B. 方 法	8
C. 結 果	11
D. 考 察	13
E. 結 論	14
V. 総合考察	14

I. 要 約

本研究は、身体を前後方向へと大きく移動させつつパワー発揮を行なうというボート競技（ローイング）の運動特性を考慮し、運動中に必要な酸素摂取量（酸素需要量, Oxygen demand: OD）を推定する方法について検討を行なった。

研究課題 I では、異なる発揮パワー条件下（無負荷、低負荷および中負荷）で、それぞれストロークレートのみを増加させた際の代謝応答を測定した。その際、運動中の身体活動量を 3 軸加速度センサの総積分値（Integrals of absolute accelerometer output: IAA）によって評価した。その結果、ストロークレートの増加に伴って、IAA および酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）が共に増大し、両者の間に直線関係が成立することが確認された。さらに、IAA と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式の傾きは、無負荷で有意に大きくなり、低負荷および中負荷の間では有意な差が認められないことが明らかになった。

研究課題 II では、IAA を用いた OD の推定方法の妥当性を検証した。そのために、発揮パワーに対してストロークレートを直線的に増加させる最大下テストを行ない、そこから推定された OD (OD_{SR}) と、IAA によってストロークレートの増加分を補正して推定した OD (OD_{IAA}) を比較検討した。その結果、 OD_{SR} と OD_{IAA} はほぼ一致した値を示した ($ICC_{(1,1)} = 0.93, p < 0.05$)。

以上の結果から、IAA を用いる方法は、ローイング時のストロークレートを考慮して OD が推定できることが示唆された。

II. 緒言

ボート競技（ローイング）とは 2000 m 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よそ 5.5～7.5 分間である。また、レース中は有酸素性および無酸素性の両代謝系からエネルギーが供給される（de Campos Mello et al., 2009; Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998）。そのため、両代謝能力を評価することが重要であるが、無酸素性代謝量の定量ではボート競技の運動特性が十分に考慮されていないという問題がある。

無酸素性代謝量は、直接的に測定することが困難であるため、酸素借という指標によって間接的に評価されてきた。酸素借とは、最大下強度で求めた運動強度と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式に超最大運動時の運動強度を外挿することによって推定した酸素需要量（Oxygen demand: OD）から、運動中の有酸素性代謝量（総酸素摂取量, Accumulated oxygen uptake: AO）を差し引いた値であり、無酸素性代謝量の指標として様々な運動において用いられている（Duffield et al., 2004, 2005a, b; Medbo et al., 1988; Noordhof et al., 2010; Sloniger et al., 1997; Spencer and Gastin, 2001; Spencer et al., 2006; Withers et al., 1993; Withers et al., 1991）。

ローイングは、身体を前後方向へと移動させつつ、後方に移動する局面においてハンドルを牽引することでパワー発揮を行なう運動である。したがって、漕ぎ手が行なう仕事は、ハンドルに対して行われる外的仕事（発揮パワー）と身体を移動させる内的仕事に分けられる。このうち、内的仕事は、ローイングエルゴメータでは、ストロークレートとして測定されるのみであり、発揮パワーには反映されない。さらに、ストロークレートは、最大下強度では発揮パワーが増加してもほとんど増加しないが、超最大強度では著しく増加し、最大下強度の 2 倍近くにも達する。このことから、超最大強度では、外的仕事（発揮パワー）に加えて、内的仕事も増加しているといえる。したがって、発揮パワーのみから OD を推定する方法では、こうしたストロークレートの増加による内的仕事の増加分を捉えることができず、OD を実際よりも過小に見積もってしまう可能性がある。したがって、ローイングでは、超最大運動における内的仕事の増加を加味して OD を推定する必要がある。

これまでに、我々（白井ほか, 2014）は、同一の発揮パワー条件において、ストロークレートのみを増加させると、それに伴って $\dot{V}O_2$ が増大することを確認した。さらに、そのときの $\dot{V}O_2$ の増大が、3 軸加速度センサによって評価した身体活動量の指標である IAA（Integral of absolute accelerometer output）と直線関係を示す可能性が認められた。このことは、IAA によってローイング時の内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ が推定できる可能性を示唆している。しかし、そのためには、様々な発揮パワー条件において、IAA と $\dot{V}O_2$ の間に直線関係が認められる必要がある。

ところで、ローイングと同様に周期性を有する運動である走運動では、ピッチが走速度の増加に対してほぼ直線的に増加することが報告されている（牧ほか, 2010）。走運動では四肢そのものを動かす仕事が内的仕事、身体重心を移動させる仕事が外的仕事と定義される。したがって、走運動では走速度に対して外的仕事および内的仕事がほぼ一定の割合で増加していると考えられる。このことから、ローイングにおいても最大下および超最大テストを通して、ストロークレートを発揮パワーに対して直線的に

増加させることで、内的仕事を加味して OD が推定できると考えられる。

以上を踏まえて、本研究はローイングの運動特性を考慮し超最大運動時の OD を推定する方法を開発し、その妥当性を検証することを目的として、以下の研究課題を設定した。

研究課題 I：発揮パワー条件の相違が IAA と $\dot{V}O_2$ の関係性に及ぼす影響

研究課題 II：内的仕事を加味した酸素需要量の推定方法に関する検討

III. 研究課題 I

発揮パワー条件の相違が IAA と $\dot{V}O_2$ の関係性に及ぼす影響

A. 目的

我々（白井 et al., 2014）は、ローイングにおいて同一の発揮パワー条件下でストロークレートのみを増加させると、IAA および $\dot{V}O_2$ が共に増大し、両者の間には直線関係が認められることを確認した。この IAA と $\dot{V}O_2$ の直線関係を用いれば、運動中に測定した IAA から、そのときの内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ が推定できると考えられる。しかし、そのためには、異なる発揮パワー条件においても、IAA と $\dot{V}O_2$ が同様の直線関係が示す必要がある。そこで、本研究では、異なる発揮パワー条件において、それぞれストロークレートのみを増加させた際の IAA と $\dot{V}O_2$ の関係を比較検討することを目的とした。

B. 方法

1. 被験者

本研究の被験者は男子大学生ボート選手 10 名（身長：1.72 ± 0.03 m，体重：69.7 ± 5.1 kg，年齢：21.8 ± 2.4 歳）であった。全ての被験者には事前に研究内容を詳細に説明し、研究の趣旨、測定への参加及びデータの発表についての了承を書面にて得た。

2. 実験内容

2.1. 漸増負荷テスト

まず、被験者に対して、実験条件となる発揮パワーを決定するために漸増負荷テストを実施した。被験者は 10 分間のウォーミングアップに続いて、エルゴメータ上で 5 分間の座位安静を保たせた後、漸増負荷テストを開始させた。1 ステージ運動時間は 4 分間とし、ステージ間には 2 分間の休息時間を設けた。最初のステージの発揮パワーは、エルゴメータによる 2000 m タイムトライアル時の発揮パワー（以下 P_{2000} と略す）の 40 % とし、そこから 1 ステージ毎に 10 % P_{2000} ずつ発揮パワーを漸増させ 5 ステージを実施した（40, 50, 60, 70 及び 80 % P_{2000} ）。休息時間内には血中乳酸濃度を測定し、発揮パワーの増加に対する血中乳酸濃度の上昇開始点（Lactate threshold: LT）およびその時の発揮パワーを算出した。

2. 2. ストロークレートテスト (SR テスト)

SR テストでは、同一の発揮パワー条件において、ストロークレートのみを変化させ、そのときの $\dot{V}O_2$ および身体活動量を測定した。発揮パワー条件は、エルゴメータに接続されていないハンドルを持たせて空漕ぎを行わせる無負荷条件、 P_{LT} の90% (90% LT 条件) および 100% (100% LT 条件) の3条件とし、それぞれ異なる実験日に実施した。無負荷条件におけるストロークレートは、20, 22, 24, 26, 28, 30 及び 32 strokes/min の計7試技をランダムに実施した。90% および 100% LT 条件では、それぞれの発揮パワーに対して、被験者が選択したストロークレート (Freely chosen stroke rate: FS) で運動を行なわせ、FS を基準にストロークレートを設定した。すなわち、FS から 2 strokes/min ずつストロークレートを増加させた6試技を設定し、それらをランダムに実施した。いずれの条件においても、試技の運動時間は4分間とし、休息時間内にはHRが十分に低下したこと (安静時心拍数 + 10 beats/min 以内) を確認してから次の試技を開始させた。

3. 測定項目

3. 1. 呼気ガスパラメータ

安静時および運動中の $\dot{V}O_2$ をダグラスバッグ法によって測定した。呼気濃度の分析には自動呼気ガス分析装置 (エアロモニタ AE310-s, ミナト医科学) を用いた。また、換気量の測定には乾式ガスメータ (DC 型乾式テストガスメータ, シナガワ社製) を用いた。

3. 2. 身体活動量

加速度センサの検出範囲は $\pm 16\text{ G}$ (G は重力加速度), 検出感度は 57 mV/G であり, 検出したデータは 16 bit で AD 変換され, 本体に内蔵されたシリアルフラッシュメモリに保存される。また, サンプリング周波数は 50 Hz に設定した。得られたデータは, パーソナルコンピュータへ転送し, 0.3–25 Hz のバンドパスフィルタリング処理を行なった。加速度センサは, ローイング時の身体の移動をより反映するように, 左右の肩峰をつないだ直線と脊柱が直行する位置に装着した。加速度センサによって測定した各軸の身体加速度データの絶対値を1分間で積分した値 (Integral absolute value of accelerometer output: IAA) によって, 各軸に対する身体活動量を評価した。

$$IAA_x = \int_{t=0}^T |a_x| dt \quad (\text{式 III-1})$$

$$IAA_y = \int_{t=0}^T |a_y| dt \quad (\text{式 III-2})$$

$$IAA_z = \int_{t=0}^T |a_z| dt \quad (\text{式 III-3})$$

このとき a_x , a_y および a_z は, それぞれ左右, 上下および前後方向で得られた加速度データを示す。さらに, 各軸の IAA の合計値 (IAA) を全身の身体活動量の指標とした。

$$IAA = IAA_x + IAA_y + IAA_z \quad (\text{式 III-4})$$

4. 統計解析

結果はすべて平均値 $\pm$ 標準偏差にて示した。IAA と $\dot{V}O_2$ の線形関係の強さの評価にはピアソンの積

率相関係数を用いた。さらに、各テスト間における測定項目の差の検定には、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 の事後検定を行なった。統計的有意性は、危険率 5 % 未満とした。

C. 結 果

A. 発揮パワー、ストロークレートおよび IAA

LT 時の 90 % および 100 % に相当する発揮パワーは、それぞれ 162.2 ± 24.3 および 180.2 ± 27.0 Watt であった。同様に、FS はそれぞれ 20.6 ± 1.7 および 21.6 ± 1.3 strokes/min であった。図 1 に各条件におけるストロークレートと IAA の関係を示した。全ての条件において、IAA はストロークレートの増加に対して、ほぼ直線的な増加を示した。

B. ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係

図 2 に各条件におけるストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係を典型的な被験者の例で示した。図中の矢印は、それぞれ $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した試技を示している。どの条件においても、 $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示す特定のストロークレート (Economical stroke rate: ES) が確認された。すなわち、ES からストロークレートを増加または減少させると、 $\dot{V}O_2$ が増大することが確認された。無負荷、90 % LT および 100 % LT 条件における ES は、それぞれ 20.4 ± 0.8 , 24.2 ± 3.9 および 23.7 ± 2.4 strokes/min であった。

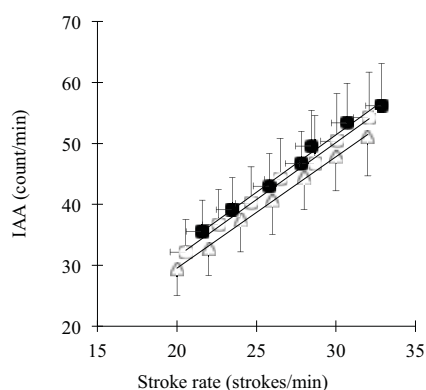


図 1. ストロークレートと IAA の関係。△は無負荷条件，○は 90%LT 条件，●は 100%LT 条件を表す。

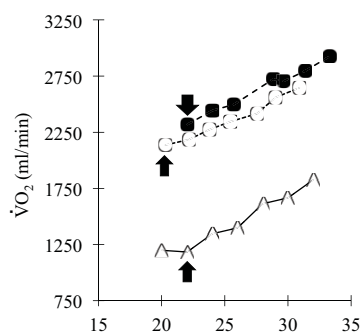


図 2. ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係。△は無負荷条件，○は 90%LT 条件，●は 100%LT 条件を表す。また、図中の矢印は $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した試技を表す。

C. IAA と $\dot{V}O_2$ の関係

ES よりもストロークレートを増加させた際の IAA と $\dot{V}O_2$ の関係を検討した結果を表 1 に示した。無負荷条件では全被験者において、90 % および 100 % LT 条件では、それぞれ 8 および 7 名の被験者において、IAA と $\dot{V}O_2$ の間に r が 0.9 以上の強い直線性が認められた。回帰直線の傾き ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA_{total}$) は、無負荷条件において最も高い値 (28.4 ± 4.6 ml/count) を示した。さらに、90%および 100%LT 条件における $\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA$ (それぞれ 19.5 ± 6.4 および 18.5 ± 3.6 ml/count) は、無負荷条件と比較してそれぞれ有意に低い値を示し、かつ両条件の間で有意な差は認められなかった。

表 1. 各条件における IAA と $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き、切片および相関係数 (r).

被験者	無負荷条件			90 % LT 条件			100 % LT 条件		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
A	32.13	262.84	0.96	23.7	1753.4	1.00	14.2	2765.7	0.69
B	31.89	-140.18	0.97	9.9	1971.6	0.93	16.9	1766.5	0.88
C	32.29	353.81	0.98	22.0	1442.3	0.95	24.0	1529.2	0.98
D	26.28	321.34	1.00	28.9	898.1	0.91	22.1	1555.8	0.94
E	31.81	86.01	0.98	29.0	1904.8	0.86	18.3	2220.8	0.97
F	27.12	62.52	0.98	16.6	851.9	0.99	21.3	1694.5	0.92
G	27.88	207.43	1.00	18.3	1489.0	0.99	20.9	1597.2	0.99
H	22.92	428.63	0.99	12.1	2064.1	0.98	16.9	1920.6	0.64
I	32.31	204.73	0.99	17.9	1764.2	0.98	17.8	2115.8	0.99
J	19.22	361.43	0.98	16.9	1462.0	0.63	12.5	1827.9	0.97
平均±標準偏差	28.4 ± 4.6	214 ± 172.0		19.5 ± 6.4	1560.1 ± 420.3		18.5 ± 3.6	1893.4 ± 366.9	
範囲			0.96 ~ 1.00			0.63 ~ 1.00			0.64 ~ 0.99

*は 90 % および 100 % LT 条件と比較して有意に高値であったことを示す.

D. 考 察

本研究課題では、発揮パワーの相違がストロークレートのみを増加させた際の IAA と $\dot{V}O_2$ の関係性に影響を及ぼすかを検討した. その結果、全ての条件において、ストロークレートのみを増加させた際の IAA と $\dot{V}O_2$ の間には強い直線関係が認められた. さらに、IAA と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式の傾きは、無負荷条件 (28.4 ± 4.6 ml/count) と比較して、90 % および 100 % LT 条件 (それぞれ 19.5 ± 6.4 および 18.5 ± 3.6 ml/count) は有意に高い値を示した. しかし、90 % および 100 % LT 条件の間では有意な差は認められなかった.

1. ストロークレートの増加に伴う $\dot{V}O_2$ の増加

ローイングと同様に周期性を有する運動である自転車運動では、同一の発揮パワー条件下でピッチのみを増加させると、 $\dot{V}O_2$ が最小となる特定のピッチが出現し、そこからピッチを増加させると $\dot{V}O_2$ が増大することが報告されている (Coast and Welch, 1985; Foss and Hallen, 2004; Seabury et al., 1977). このときの $\dot{V}O_2$ の増大は、発揮パワーすなわち外的仕事は同等であることから、内的仕事の差によるものと考えられる. 我々 (白井 et al., 2014) や Hofmijster et al. (2009) は、ローイング時の発揮パワー (外的仕事) を一定に保たせつつ、ストロークレートのみを変化させたところ、 $\dot{V}O_2$ はストロークレートの増加に伴って増大することを明らかにした. 本研究における SR テストでも、 $\dot{V}O_2$ は特定のストロークレートで最も低い値を示し、そこからストロークレートを増加させると $\dot{V}O_2$ も増大することが全ての条件で確認された. これらの結果は、ローイング時の $\dot{V}O_2$ すなわちエネルギー代謝が、運動中の外的仕事のみならず内的仕事 (内的仕事) の影響も受けることを示唆している.

2. IAA と内的仕事の関係

IAA は、歩行運動や走運動のような身体重心の移動を伴う運動における身体活動量の指標として用いられている (Bouten et al., 1994; Eston et al., 1998; Iwashita et al., 2003; Nichols et al., 1999). Bouten et al.

(1994) は、歩行速度の増加に伴って IAA と $\dot{V}O_2$ がともに増大し、両者の間には強い正の相関関係が認められたことを報告している ($r=0.82$)。そのため、IAA によって身体重心の移動を伴う運動時の $\dot{V}O_2$ が推定できると考えられている。本研究において、IAA は全ての条件においてストロークレートの増加に伴って有意な増加を示した。さらに、各条件において $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した試技を基準として、そこからストロークレートを増加させた際の IAA と $\dot{V}O_2$ の関係を検討したところ、各条件において両者の間には強い直線性が認められた。このときの $\dot{V}O_2$ の増加分は、ローイング時の内的仕事の増加分を捉えたものであったと考えられるため、IAA はローイング時の内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ と線形関係を示すと推察される。

3. IAA と $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き

本研究において、IAA と $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA$) は、90 % LT 条件および 100 % LT 条件と比較して、無負荷条件において有意に高い値を示した。この結果は、発揮パワーを伴う条件と比較して、無負荷条件では、身体活動量の増加に対するエネルギー代謝の増加率が高かったことを示唆している。こうした $\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA$ における差異を生じさせた要因として、無負荷条件における力学的なエネルギー効率が低下していた可能性が考えられる。Kautz and Neptune (2002) は自転車運動時の内的仕事と外的仕事が互いに独立し合う要素ではないことを指摘している。すなわち、自転車運動中の下肢は厳密には加速と減速を繰り返している。無負荷条件では、このときの仕事が全て内的仕事となる。しかし、クランクに負荷がかかっている場合には、歌詞が持つ力学的エネルギーの一部がクランクへと流れることで下肢が減速すると考えられるとしている。通常のローイングの場合、漕ぎ終わりの局面において漕ぎ手はハンドルを牽引しているが、同時に後方へと移動してきた身体が減速する。そのため、こうした局面においては、身体が持つ力学的エネルギーの一部がハンドルへと流れ込むことによって、身体が減速していると考えられる。したがって、身体活動量が等しい場合も、発揮パワーを伴っている場合には、身体が持つ力学的エネルギーを効率良くハンドルを牽引する仕事へ変換することによって、少ないエネルギーで身体を停止させていたと考えられる。しかし、90 % および 100 % LT テストでは、 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA$ に有意な差は認められなかった。このことから、発揮パワーを伴う場合には、発揮パワーが異なる場合でも上述したエネルギーの変換が同程度で生じていたと考えられる。

E. 結 論

本研究の結果から、無負荷、90 % LT および 100 % LT 条件において、ストロークレートのみを増加させると、それぞれ比較的低いストロークレート試技において $\dot{V}O_2$ は最も低い値を示し、そこからストロークレートの増加にともなって $\dot{V}O_2$ も増大することが認められた。このとき各条件における IAA と $\dot{V}O_2$ の間には、強い直線関係が認められた。さらに、各条件における IAA と $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA$) を比較したところ、無負荷条件は 90 % および 100 % LT 条件と比較して、有意に高い値を示したが、90 % および 100 % LT 条件の間では有意な差は認められなかった。これらの結果は、IAA によってローイング時の内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ を推定するためには、発揮パワーを伴った条件において IAA と $\dot{V}O_2$ の関係を求める必要があることを示唆している。

IV. 研究課題 II

内的仕事を加味した酸素需要量の推定方法に関する検討

A. 目的

ローイングと同様に周期性を有する運動である走運動では、走速度の増加に対してピッチがほぼ直線的に増加することが報告されている(牧ほか, 2010)。このことから、ローイングにおいても最大下および超最大テストを通して、ストロークレートを発揮パワーに対して直線的に増加させることで、超最大テストにおける身体を移動させる仕事の増加も含めて酸素需要量 (Oxygen demand: OD) が推定できる推定式が得られる可能性がある。

そこで、研究課題 II では、超最大運動で著しく増加する内的仕事の増加を加味して OD を推定する方法を検討することを目的として、通常の前最大下テスト (通常条件) に加えて、ストロークレートを発揮パワーに対して直線的に増加させた前最大下テスト (SR 増加条件) および IAA_{total} によって内的仕事を補正する方法 (IAA 条件) を用いて、超最大運動中の OD をそれぞれ推定し、それらを比較検討することを目的とした。そ

B. 方法

1. 被験者

被験者は男子大学生ボート選手 10 名 (年齢: 20.6 ± 2.8 歳, 身長: 174.7 ± 4.9 cm, 体重: 71.1 ± 8.9 kg) であった。

2. 実験内容

90 秒間の超最大テスト (P_{2000} テスト) 時の酸素需要量を 3 つの方法によって推定した。すなわち、1) 通常の前最大下テスト (通常条件) 時の発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の直線回帰式、2) ストロークレートを直線的に増加させた前最大下テスト (SR 増加条件) 時の発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の直線回帰式、および 3) IAA によって内的仕事の増加分を補正する方法によってそれぞれ酸素需要量を推定した。

2. 1. 前最大下テスト

被験者は、実験室に来室後、ストレッチおよびエルゴメータを用いて 10 分間のウォーミングアップを行なった。ウォーミングアップ時の発揮パワーは、最初の 5 分間は被験者の任意とし、残りの 5 分間は前最大下テストの第 1 ステージの発揮パワーとした。ウォーミングアップ終了後、15 分程度の休息を挟んだ後に本測定を開始した。まず、エルゴメータ上に座した状態で 5 分間の安静を保たせ、安静終了前 1 分間において安静時の $\dot{V}O_2$ を測定した。続いて、運動時間 4 分間の前最大下運動を 4 ステージ実施した。各ステージの運動強度は、2000 m タイムトライアル時の発揮パワー (P_{2000}) を基準として、それぞれ 55 % , 60 % , 65 % および 70 % P_{2000} とした。各ステージ終了前 1 分間の $\dot{V}O_2$ 、心拍数 (Heart rate: HR) および身体加速度データを測定した。ステージ間の休息中に HR を観察し、十分に回復したこと (安静

時心拍数+10 拍未満) を確認した後に次のステージを開始させた。

2.2. ストロークレートテスト (SR テスト)

最大下テスト終了後 15 分間の休息を挟み SR テストを実施した。SR テストでは、同一の発揮パワー条件下においてストロークレートのみを増加させた際の IAA_{total} と $\dot{V}O_2$ の関係を検討した。SR テストにおける発揮パワーは 55 % P_{2000} 、ストロークレートは 24, 28, 32 および 36 strokes/min とし、各ストロークレート試技とも運動時間は 4 分間とした。各試技終了前 1 分間における、 $\dot{V}O_2$ 、HR および身体加速度データを最大下テストと同様の方法で測定した。また、ステージ間では HR が十分に回復したことを確認し、それから次のステージを開始した。

2.3. P_{2000} テスト

SR テスト終了後 15 分間の休息を挟み P_{2000} テストを実施した。運動時間は 90 秒間とし、被験者は最も漕ぎやすいストロークレートで指定された発揮パワー (各被験者の P_{2000}) を維持した。運動中は他のテストと同様の方法で、 $\dot{V}O_2$ 、HR および身体加速度データを測定した。

2.4. ストロークレートを直線的に増加させた最大下テスト (SR 増加条件)

上記テストと日を変えて、SR 増加条件で最大下テストを実施した。SR 増加条件の運動時間および各ステージの発揮パワーは通常条件と同一とした。ただし、ストロークレートは、第 1 ステージは通常条件と同一としたが、第 2~4 ステージについては、第 1 ステージから P_{2000} テストまで、ストロークレートが発揮パワーに対して直線的に増加するよう被験者毎に調整した。被験者には、各ステージにおける発揮パワーおよびストロークレートを指示し、それらを維持するように指示した。各ステージの運動終了前 1 分間では、他のテストと同様の方法で $\dot{V}O_2$ 、HR および身体加速度データを測定した。ステージ間では HR が十分に低下したことを確認し、それから次のステージを開始した。

3. 測定項目

呼気ガスパラメータおよび IAA_{total} については研究課題 I と同様の方法を用いて測定した。

4. OD の推定方法

4.1. 通常および SR 増加条件における酸素需要量の推定方法

通常条件および SR 増加条件における日間変動の影響を考慮するため、同一の発揮パワーおよびストロークレートで運動を行わせた第 1 ステージを基準にして OD の推定式を補正した。まず、それぞれの条件で測定した発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き (発揮パワーに対する $\dot{V}O_2$ の増加率) を求めた。そのうえで、通常条件の第 1 ステージで測定した発揮パワーおよび $\dot{V}O_2$ と、それぞれの条件で求めた増加率によって OD の推定式 (式 IV-1) を求めた。

$$OD (lO_2Eq/min) = \frac{\Delta \dot{V}O_2}{\Delta PO} \cdot PO + \left(\dot{V}O_{21st} - \frac{\Delta \dot{V}O_2}{\Delta PO} \cdot PO_{1st} \right) \quad (\text{式 IV-1})$$

このとき、OD は酸素需要量、 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta PO$ は発揮パワーに対する $\dot{V}O_2$ の増加率、PO は最大テスト時の発揮パワーを表す。また、 PO_{1st} および $\dot{V}O_{2_1st}$ は、それぞれ通常条件の第 1 ステージにおける発揮パワーおよび $\dot{V}O_2$ を表す。

4.2. IAA 条件による OD の推定方法

IAA 条件では、運動中の IAA によって内的仕事の増加分を補正して OD を推定した (OD_{IAA})。この方法では、運動中の $\dot{V}O_2$ が安静時の $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2rest}$) と運動そのものに対する $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$ spent for exercise: $\dot{V}O_{2EX}$) によって構成され、さらに $\dot{V}O_{2EX}$ は外的仕事に対する $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$ spent for external work: $\dot{V}O_{2ext}$) と内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$ spent for internal work: $\dot{V}O_{2int}$) によって構成されると仮定した (式IV-2)。

$$\begin{aligned}\dot{V}O_2 &= \dot{V}O_{2rest} + \dot{V}O_{2EX} \\ &= \dot{V}O_{2rest} + \dot{V}O_{2int} + \dot{V}O_{2ext} \quad (\text{式IV-2})\end{aligned}$$

身体を前後方向へと移動させる運動のみを行なった場合、安静時 ($IAA_{total} = 0$ count/min, $\dot{V}O_2 = \dot{V}O_{2rest}$) をベースラインとして、そこに $\dot{V}O_{2int}$ が上乘せされると考えられる。このとき、 $\dot{V}O_{2int}$ は IAA_{total} に比例して増加すると考えられることから、SR テストにおける IAA_{total} と $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き (IAA_{total} に対する $\dot{V}O_2$ の増加率) によって $\dot{V}O_{2ext}$ 以外の $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2rest+int}$) の推定式を作成した (式IV-3)。

$$\dot{V}O_{2rest+int} (\text{l/min}) = \frac{\Delta\dot{V}O_2}{\Delta IAA_{total}} \cdot IAA_{total} + \dot{V}O_{2rest} \quad (\text{式IV-3})$$

このとき $\dot{V}O_{2rest+int}$ は $\dot{V}O_{2rest}$ と $\dot{V}O_2$ を合わせた代謝量、 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA$ は IAA に対する $\dot{V}O_2$ の増加率、 $\dot{V}O_{2rest}$ は安静時の $\dot{V}O_2$ を表す。

次いで、通常条件の最大下テストにおける各ステージの IAA から、各ステージにおける $\dot{V}O_{2rest+int}$ を推定し、各ステージで測定した $\dot{V}O_2$ からそれらを差し引き外的仕事 (発揮パワー) に対する $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2ext}$) と定義した。さらに、各ステージの発揮パワーと $\dot{V}O_{2ext}$ の直線回帰式を求め $\dot{V}O_{2ext}$ の推定式とした。 P_{2000} テスト中の発揮パワーおよび IAA を、それぞれ $\dot{V}O_{2ext}$ および $\dot{V}O_{2rest+int}$ の推定式に外挿し、外的仕事および内的仕事に対する OD を推定し、その合計を P_{2000} テスト中の OD とした (OD_{IAA})。

5. 統計処理

結果は全て平均値 $\pm$ 標準偏差にて示した。通常および SR 増加条件間における、各ステージで測定したストロークレート、IAA、 $\dot{V}O_2$ および発揮パワーに対する $\dot{V}O_2$ の増加率 ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta PO$) の差の検定には対応のある t 検定を用いた。また単回帰分析によって項目間の直線回帰式を求め、その際の相関係数 (r) によって両者の直線性を検討した。各推定方法による酸素需要量の差の検討には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 法による事後検定を行なった。さらに、条件間における酸素需要量の一致度の検討には級内相関係数 (Interclass correlation coefficient: ICC) を、関係性の検討にはブランド・アルトマン法を用いた。なお、危険率 5 % 未満で統計的有意性を判断した。

C. 結 果

1. 発揮パワーに対するストロークレートおよび IAA

図 3 に最大下テストおよび P_{2000} テストにおける発揮パワーとストロークレート (A) および IAA (B) の関係を示した。通常条件において、ストロークレートは発揮パワーの増加に対して緩やかな増加を示した (図 3 (A), 第 1 から 4 ステージにおいて、それぞれ 22.6 ± 1.6 , 22.7 ± 1.6 , 23.0 ± 1.9 および 23.5 ± 1.9 strokes/min)。SR 増加条件のストロークレートは、第 2 ステージ以降で通常条件と比較して有意に高い値を示し (第 2 から 4 ステージにおいて、それぞれ 24.0 ± 1.8 , 25.5 ± 1.8 および 26.8 ± 1.7 strokes/min)， P_{2000} テストにおけるストロークレート (34.8 ± 3.2 strokes/min) を含めると発揮パワーとの間で非常に強い直線性が確認された ($r = 1.00$)。さらに、被験者毎においても同様の検討を行なった結果、 r が $0.99 \sim 1.00$ の強い直線性が認められた。

通常条件における IAA は、ストロークレートと同様に発揮パワーの増加に対して緩やかな増加を示した (図 3 (B), 第 1 ステージから第 4 ステージにおいて、それぞれ 38.4 ± 2.8 , 39.4 ± 3.0 , 40.9 ± 3.7 および 42.3 ± 3.6 count/min)。SR 増加条件における IAA は、第 1 ステージでは通常条件と有意差が認められなかったが (38.4 ± 3.2 count/min)，第 2 ステージ以降では通常条件よりも有意に高い値を示し (それぞれ 41.9 ± 3.4 , 45.3 ± 3.4 および 48.2 ± 4.1 count/min)， P_{2000} テストにおける IAA (66.3 ± 9.3 count/min) も含めると発揮パワーとの間で強い直線性が確認された ($r = 1.00$)。さらに、被験者毎においても同様の検討を行なった結果、 r が $0.94 \sim 1.00$ となる強い直線性が認められた。

通常条件における発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の関係を被験者毎に検討したところ、両者の間には強い正の相関関係が認められた ($r = 0.96 \sim 1.00$)。同様に SR 増加条件においても、発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の間には強い正の相関関係が認められた ($r = 0.96 \sim 1.00$)。通常条件および SR 増加条件における $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta PO$ (直線回帰式の傾き) は、それぞれ 12.1 ± 1.5 および 13.8 ± 1.8 ml/min/watt であり、条件間で有意な差が認められた ($p < 0.05$)。

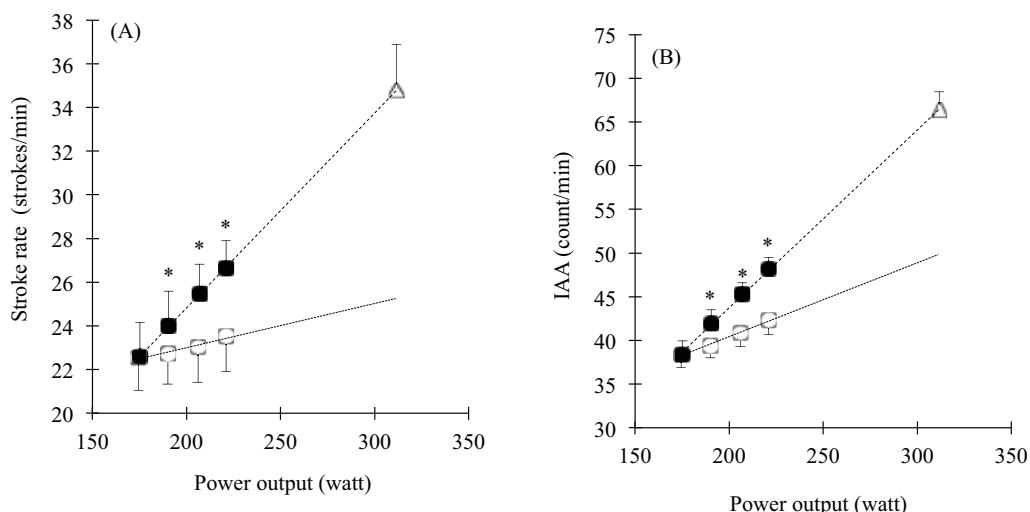


図 3. 発揮パワーとストロークレート (A) および IAA (B) の関係。図中○は通常条件の最大下テスト，●は SR 増加条件の最大下テスト，△は P_{2000} テストの結果を表している。*は通常条件と SR 増加条件の間で有意差が認められたことを示す ($p < 0.05$)。

2. OD

SR テストにおける $\dot{V}O_2$ はSR24 または SR28 試技において最も低い値を示し、そこからストロークレートの増加に伴って $\dot{V}O_2$ も増大した。このとき、 $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した試技よりもストロークレートを増加させた際の IAA と $\dot{V}O_2$ の関係を被験者毎に検討したところ、両者の間には r が0.89~1.00の強い線形関係が認められ、直線回帰式の傾き ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA$) は、 18.7 ± 13.6 ml/count であった。通常条件の最大下テストで測定した各ステージの $\dot{V}O_2$ から推定した $\dot{V}O_{2\text{rest+int}}$ を差し引いた値を外的仕事に対する $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2\text{ext}}$) とし、各ステージの発揮パワーとの関係性を被験者毎に検討したところ、両者の間には r が0.87~1.00の強い線形関係が認められた。このときの発揮パワーと $\dot{V}O_{2\text{ext}}$ の直線回帰式の傾きは、 10.81 ± 2.50 ml/min/watt であった。

図 4 に通常、SR 増加および IAA 条件において推定した酸素需要量 (それぞれ OD, OD_{SR} および OD_{IAA}) を示した。OD_{SR} および OD_{IAA} は、それぞれ 7.0 ± 0.8 および 7.0 ± 0.7 lO₂Eq であり、OD_{SR} (6.6 ± 0.8 lO₂Eq) と比較して、それぞれ有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。さらに、OD_{SR} と OD_{IAA} の間には、有意な差は認められなかった。図 5 に OD_{SR} と OD_{IAA} の関係を示した。なお、図中の破線は $Y = X$ の直線を表している。OD_{SR} と OD_{IAA} の間には非常に高い級内相関係数 ($ICC(1, 1) = 0.93, p < 0.05$) が認められた。さらに、ブランド・アルトマン法を用いて OD_{SR} と OD_{IAA} の関係を検討したところ、両推定方法の差は -0.03 ± 0.41 lO₂Eq であり、測定方法の相違による OD の差に、推定値の大きさによる一定の傾向は認められなかった (図 5, $r = -0.12, p = 0.76$)。

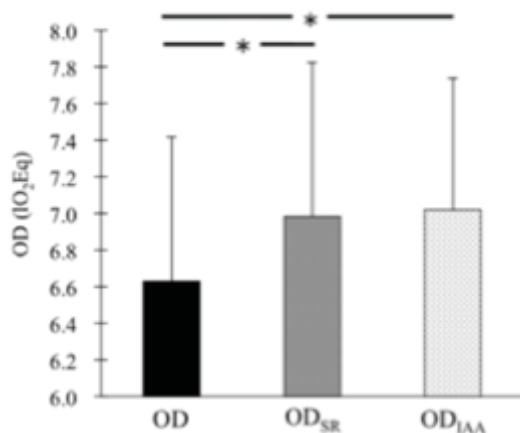


図 4. 各条件によって推定した酸素需要量。通常条件、SR 増加条件および IAA 条件において、それぞれ OD, OD_{SR} および OD_{IAA}。* は条件間で有意差が認められたことを示す ($p < 0.05$)。

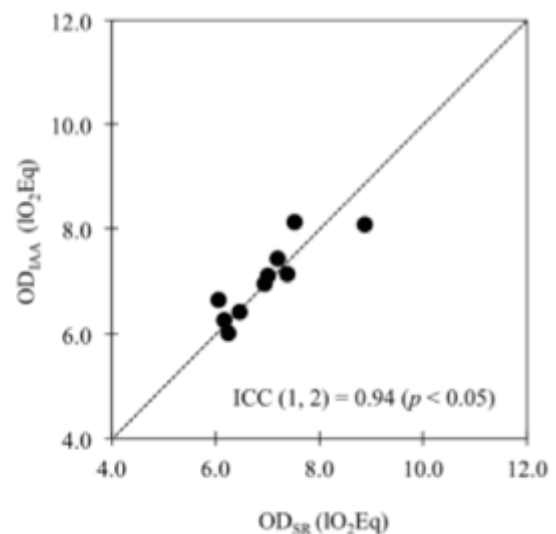


図 5. ODSR と ODIAA の関係。図中の破線は $Y = X$ の直線を表す。

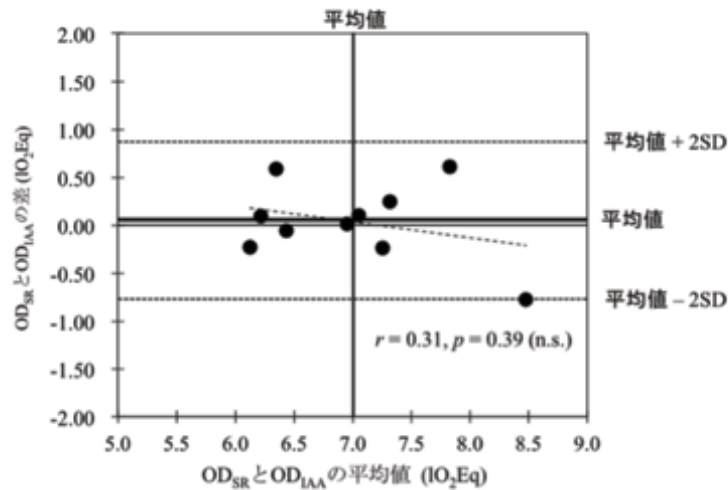


図 6. ブランド・アルトマンプロットによる OD_{SR} と OD_{IAA} の関係性の検討. OD_{SR} および OD_{IAA} の平均値は $7.0 \pm 0.8 \text{ lO}_2\text{Eq}$ であり, OD_{SR} と OD_{IAA} の差の平均値は $0.03 \pm 0.41 \text{ lO}_2\text{Eq}$ であった.

D. 考 察

1. SR 増加条件における酸素需要量 (OD_{SR})

通常条件と比較して, SR 増加条件では, 第 2 ステージ以降のストロークレートおよび IAA が有意に高い値を示した. このことから, 通常条件と比較して SR 増加条件では, 第 2 ステージ以降の各ステージにおいて, それぞれより多くの内的仕事が行われていたと考えられる. さらに, SR 増加条件における発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き ($\Delta\dot{V}O_2 / \Delta PO$) は, 通常条件と比較して有意に高い値を示した. ローイング時の $\dot{V}O_2$ は, 発揮パワー (外的仕事) およびストロークレート (内的仕事) の両者の影響を受けること, さらに, 両条件において各ステージの外的仕事の大きさは同一であったことから, 条件間における $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta PO$ の差は内的仕事の差によるものであったと考えられる.

通常条件における最大下テストのストロークレートおよび IAA は, 発揮パワーに対して緩やかに直線的な増加を示したが, P_{2000} テスト時のストロークレートおよび IAA は, それらの直線から逸脱して高い値を示した. それに対して, SR 増加条件におけるストロークレートおよび IAA は, 最大下テストおよび P_{2000} テストを通して発揮パワーとの間で強い直線性が認められた. これらの結果から, SR 増加条件では, 最大下テストおよび P_{2000} テストを通して, 一定の割合で内的仕事も増加していたと考えられる. したがって, SR 増加条件によって推定した OD_{SR} では, P_{2000} テストにおける内的仕事の増加分が加味できた可能性があり, OD_{SR} が OD よりも有意に高い値を示した結果は, この見解を支持するものである.

2. IAA 条件における酸素需要量 (OD_{IAA})

本研究の結果から, SR 増加条件では, 超最大テストにおける内的仕事の増加分を加味して酸素需要量が推定できる可能性を示せた. しかし, SR 増加条件によって OD を推定するためには, 事前に超最大運動における発揮パワーおよびストロークレートを測定し, それらを踏まえて, 最大下テストのストロークレートを設定する必要がある. また, 本研究では各被験者の P_{2000} に対して, その発揮パワーを安定して維持できるストロークレートで運動を行わせたが, オールアウト形式のテストのような最大努力が要求される運動の場合では, 運動時間の経過に伴ってストロークレートが著しく低下することが予想される. さらに, 実際の 2000 m レースでは, スタート局面, 中盤局面およびラストスパート局面にお

いて、ストロークレートはダイナミックに変化する (Steinacker, 1993) . そのため、SR 増加条件によって、レース中の各局面におけるエネルギー代謝を検討するためには、各局面におけるストロークレートを全て把握し、最大下のストロークレートをそれぞれ調整して実施する必要がある、現実的とはいえない。そこで、そのような運動中のストロークレートの変化に対応するために、本研究では IAA による OD の推定方法 (IAA 条件) についても検討を行なった。

一般的に、運動中の内的仕事を検討する際には、身体各部位の位置エネルギー、運動エネルギーおよび回転エネルギーの変化から内的仕事が見積もられており (Minetti, 2011; Winter, 1990) , そのようにして求めた内的仕事に外的仕事を合わせた総仕事とエネルギー代謝の関係が検討されている (Hansen et al., 2004) . しかし、力学的エネルギーの評価には専用の機材が必要であり、生理学的指標の測定と併せて実施すると測定自体が煩雑になる可能性がある。そこで、本研究では加速度センサによって測定した IAA によって内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2int}$) の推定を試みた。我々 (白井ほか, 2014) および本研究において、ストロークレートを増加させることによって内的仕事のみを増加させた際の IAA と $\dot{V}O_2$ の間には、強い線形関係が認められた。これらの結果は、IAA が $\dot{V}O_{2int}$ を推定する指標として有用であることを示唆している。しかし、SR テストにおける各試技の $\dot{V}O_2$ には、外的仕事 (発揮パワー) に対する $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2ext}$) も含まれている。そこで、本研究では、安静時 (IAA = 0 count/min, $\dot{V}O_2 = \dot{V}O_{2rest}$) をベースラインとして、そこに運動中の内的仕事分の $\dot{V}O_{2int}$ が上乗せされると仮定し、 $\dot{V}O_{2rest+int}$ の推定式を求めた。その結果、 OD_{IAA} は OD よりも有意に高い値を示し、かつ OD_{SR} とはほぼ一致した ($ICC(1, 1) = 0.93, p < 0.05$) . このことから、IAA 条件によって推定した OD_{IAA} は、SR 増加条件と同様に、 P_{2000} テストにおける内的仕事の増加分が加味されていたと考えられる。

E. 結 論

本研究の結果から、IAA を用いることによって、ローイングにおける超最大運動時の内的仕事を加味して酸素需要量が推定できることが示唆された。なお、IAA を用いる方法は、実際の 2000 m レースのような、運動中にストロークレート (内的仕事) がダイナミックに変換するような運動において、酸素需要量を推定するうえで非常に有用であると考えられる。

V. 総合考察

本研究は、ローイングにおける超最大運動において著しく増加するストロークレート (内的仕事) を加味して OD を推定する方法について検討を行ない、その妥当性を検証することを目的とした。その結果、身体活動量の指標である IAA を用いることによって、ローイング時の内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ が推定できること、それを応用することによって、内的仕事の増加を考慮して超最大運動時の OD を定量することができることが明らかになった。IAA を用いる方法は、実際のレースのようなストロークレートが局面によってダイナミックに変化する運動において OD を推定するうえで、非常に汎用性が高いと考えられる。

引用文献

- Bouten, C. V., Westerterp, K. R., Verduin, M., and Janssen, J. D.** (1994) Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **26** (12):1516-1523.
- Coast, J. R., and Welch, H. G.** (1985) Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* **53** (4):339-342.
- Duffield, R., Dawson, B., and Goodman, C.** (2004) Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events. *Journal of Science and Medicine in Sport* **7** (3):302-313.
- Duffield, R., Dawson, B., and Goodman, C.** (2005a) Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running. *Journal of Sports Sciences* **23** (3):299-307.
- Duffield, R., Dawson, B., and Goodman, C.** (2005b) Energy system contribution to 1500- and 3000-metre track running. *Journal of Sports Sciences* **23** (10):993-1002.
- Eston, R. G., Rowlands, A. V., and Ingledew, D. K.** (1998) Validity of heart rate, pedometry, and accelerometry for predicting the energy cost of children's activities. *J Appl Physiol (1985)* **84** (1):362-371.
- Foss, O., and Hallen, J.** (2004) The most economical cadence increases with increasing workload. *European Journal of Applied Physiology* **92** (4-5):443-451.
- Hofmijster, M. J., Van Soest, A. J., and De Koning, J. J.** (2009) Gross efficiency during rowing is not affected by stroke rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **41** (5):1088-1095.
- Iwashita, S., Takeno, Y., Okazaki, K., Itoh, J., Kamijo, Y., Masuki, S., Yanagidaira, Y., and Nose, H.** (2003) Triaxial accelerometry to evaluate walking efficiency in older subjects. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **35** (10):1766-1772.
- Kautz, S. A., and Neptune, R. R.** (2002) Biomechanical determinants of pedaling energetics: internal and external work are not independent. *Exercise and Sport Sciences Reviews* **30** (4):159-165.
- Medbo, J. I., Mohn, A. C., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., and Sejersted, O. M.** (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol (1985)* **64** (1):50-60.
- 牧 良輔, 瀧澤 一騎, 遠山 孝司 (2010) スピードの漸増と一定のトレッドミル走にみられるストライドとピッチの貢献度(%). ランニング学研究 **22** (1): 13-23.
- Nichols, J. F., Morgan, C. G., Sarkin, J. A., Sallis, J. F., and Calfas, K. J.** (1999) Validity, reliability, and calibration of the Tritrac accelerometer as a measure of physical activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **31** (6):908-912.
- Noordhof, D. A., de Koning, J. J., and Foster, C.** (2010) The maximal accumulated oxygen deficit method: a valid and reliable measure of anaerobic capacity? *Sports Medicine* **40** (4):285-302.
- Seabury, J. J., Adams, W. C., and Ramey, M. R.** (1977) Influence of pedalling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry. *Ergonomics* **20** (5):491-498.
- 白井 祐介, 品田 貴恵子, 吉岡 利貢, 鍋倉 賢治 (2014) 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** (1): 263-274.
- Sloniger, M. A., Cureton, K. J., Prior, B. M., and Evans, E. M.** (1997) Anaerobic capacity and muscle activation during horizontal and uphill running. *J Appl Physiol (1985)* **83** (1):262-269.

- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., Goodman, C., and Duffield, R.** (2006) Metabolism and performance in repeated cycle sprints: active versus passive recovery. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **38** (8):1492-1499.
- Spencer, M. R., and Gastin, P. B.** (2001) Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **33** (1):157-162.
- Withers, R. T., Sherman, W. M., Clark, D. G., Esselbach, P. C., Nolan, S. R., Mackay, M. H., and Brinkman, M.** (1991) Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* **63** (5):354-362.
- Withers, R. T., Van der Ploeg, G., and Finn, J. P.** (1993) Oxygen deficits incurred during 45, 60, 75 and 90-s maximal cycling on an air-braked ergometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* **67** (2):185-191.