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

白井 祐介¹⁾ 品田貴恵子²⁾ 吉岡 利貢³⁾ 鍋倉 賢治⁴⁾

Yusuke Shirai¹, Kieko Shinada², Toshitsugu Yoshioka³ and Yoshiharu Nabekura⁴: Effect of stroke rate on energy expenditure during rowing. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 59: 263-274, June, 2014

Abstract : The aim of this study was to investigate the effect of differences in stroke rate (SR) on energy expenditure during rowing. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) was measured under different SR conditions with the same power output. Eight male collegiate rowers (age: 21.6 ± 1.4 yr, height: 171.1 ± 1.8 cm, weight: 68.7 ± 1.9 kg) participated in the study. First, they performed an incremental test on a rowing ergometer to determine power output at the blood lactate threshold (P_{LT}). On other days, they performed 6 different SR trials maintaining their power output at 80% P_{LT} (80% LT test) and 90% P_{LT} (90% LT test), respectively. During the 80% and 90% LT tests, each subject used a triaxial accelerometer sensor placed on the back, and integrals of the absolute value of the accelerometer output from three directions (IAA) were calculated as an index of physical activity level. The most economical SR, at which $\dot{V}O_2$ was lowest, was found at 80% and 90% LT. In both tests, a higher IAA was observed with increasing SR. Under SR conditions higher than the economical point, there was a significant correlation between the increasing amount of IAA (ΔIAA) and $\dot{V}O_2$ ($\Delta \dot{V}O_2$) from the economical SR during the 90% LT test ($r = 0.673$, $P < 0.001$). There were strong correlations ($r > 0.9$) between IAA and $\dot{V}O_2$ in many subjects at a SR higher than the economical point. These results suggest that there is an economical SR point with the same power output during rowing. Additionally, an increasing amount of $\dot{V}O_2$ associated with IAA at a higher SR than the economical point. This suggests that IAA is useful for estimation of energy expended by the moving body during rowing.

Key words : internal work, accelerometer, physical activity level

キーワード : 内的仕事, 加速度計, 身体活動量

I. 緒 言

ボート漕ぎ運動(ローイング)とは, 下肢, 体

幹及び上肢を動員してオールを牽引する全身運動であり, 漕ぎ手はドライブ局面とリカバリー局面によって構成されるローイングストロークを繰り返している. ドライブ局面とは, 身体を後方へと

- 1) 筑波大学大学院 人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
 - 2) 新潟県立津南中等教育学校
〒949-8201 新潟県中魚沼郡津南町大字下船渡戊 298番地 1
 - 3) 環太平洋大学 体育学部
〒709-8211 岡山県岡山市東区矢津2050番地13
 - 4) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
- 連絡先 白井祐介

1. Graduate School of Comprehensive Human Science, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
 2. Niigata Prefectural Tsunan Secondary School
298-1 Tsuchinoe, Shimofunato, Tsunanmachi, Nakaonuma-gun, Niigata 949-8201
 3. Faculty of Physical Education, International Pacific University
13-2050 Yazu, Higashi-ku, Okayama, Okayama 709-8211
 4. Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
- Corresponding author sculling.and.rowing@gmail.com

移動させつつオールを牽引する局面であり、リカバリー局面とは身体を前方へと移動させ次のドライブ局面の準備を行なう局面である。このことから、ローイングは身体重心の前後方向への周期的な移動を伴った運動であるといえる。Hofmijster et al. (2009) は、ローイングエルゴメータで測定した発揮パワーを一定に保たせつつ、1分間当たりの身体の前後方向への移動回数すなわちストローク回数（ストロークレート）のみを変化させると（28, 34及び40 strokes/min），酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）はストロークレートの増加に伴って増大することを報告している。このことは、ローイング時の $\dot{V}O_2$ ，すなわちエネルギー消費量が、運動中の発揮パワーのみならずストロークレート，すなわち身体を前後方向へと移動させる回数の影響も受けることを示している。しかし、これまでにストロークレートがエネルギー消費量に及ぼす影響を検討した研究は少ない（Hofmijster et al., 2009；中村ほか，1989；Secher, 1983）。

一方、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、ペダル回転数の相違がエネルギー消費量に及ぼす影響について盛んに研究が行なわれている。Coast and Welch (1985) は、自転車エルゴメータを用いて、発揮パワーを一定に保たせつつペダル回転数のみを変化させると（40—120 rpm）， $\dot{V}O_2$ が最も低くなる特定のペダル回転数（経済回転数）が出現すること，すなわちペダル回転数を経済回転数から増加させても減少させても $\dot{V}O_2$ が増大することを報告している。このときのペダル回転数と $\dot{V}O_2$ の関係には、下に凸の二次回帰式が精度よく当てはまることから（ $r=0.95$ 以上），回帰式によって $\dot{V}O_2$ が最小となるペダル回転数（経済回転数）を求める方法が用いられている（Coast and Welch, 1985; Marsh and Martin, 1997）。こうして求めた経済回転数よりもペダル回転数を増加させた際の $\dot{V}O_2$ の増大には、下肢を回転させる仕事の増加や（Coast and Welch, 1985; Foss and Hallén, 2004; Gaesser and Brooks, 1975; Marsh and Martin, 1997; Seabury et al., 1977），筋の収縮速度の上昇に伴うタイプII線維の動員比率の増加

（Sargeant, 1994; Pringle et al., 2003）などが関与するものと考えられている。一方、ペダル回転数を経済回転数より低下させた際の $\dot{V}O_2$ の増大には、1ストローク当たりの筋張力が増加することによるタイプII線維の動員比率の増加が関与するものと考えられている（Ahlquist et al., 1992）。同一の発揮パワー条件下において $\dot{V}O_2$ を増大させるこれらの要因のうち、下肢そのものを回転させる仕事すなわち発揮パワーに直接的には反映されない仕事は、内的仕事（internal work）と呼ばれ、発揮パワーと併せて自転車運動時のエネルギー消費量を決定する要因の1つとされてきた（Foss and Hallén, 2004; Hansen et al., 2004; Minetti, 2011; Wells et al., 1986; Widrick et al., 1992; Winter, 1979; Willems et al., 1995）。

ローイング時の内的仕事は、身体重心を前後方向へと移動させる仕事である（Fukunaga et al., 1986; Hofmijster et al., 2009）。そのため、下肢のみを回転させる自転車運動と比較して、ローイングは1ストローク当たりの内的仕事が大きな運動であると考えられる。そのため、ローイング時のエネルギー消費量は、発揮パワーのみならずストロークレート（内的仕事）の影響を強く受けるものと推察される。しかし、これまでローイング時のエネルギー消費量の推定には、発揮パワーのみが用いられてきており、ストロークレートの影響は十分に考慮されていない（Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998）。したがって、より正確にローイング時のエネルギー消費量を推定するためには、ストロークレート（内的仕事量）の相違がエネルギー消費量に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

ローイングにおける内的仕事を、前後方向に身体重心を移動させる“身体活動”と捉えると、内的仕事は身体活動量を測定することによって定量的に評価することが可能である。近年、小型の3次元加速度測定装置（以下、加速度センサ）が開発され、ウォーキングやランニングといった身体重心を移動させる運動において、身体に生じた加速度（以下、身体加速度）を3次元で測定し、それらの合成加速度を1分間で積分した値であ

る総積分値 (Integrals of value of accelerometer output: IAA) によって身体活動量が評価されてきた。(Bouten et al., 1994; Eston et al., 1998; Iwashita et al., 2003; Nichols et al., 1999). さらに, IAA は歩行及び走速度の増加に伴って増大し, $\dot{V}O_2$ と強い正の相関関係を示すことが報告されている (Bouten et al., 1994; Eston et al., 1998; Iwashita et al., 2003; Nichols et al., 1999). したがって, ローイングにおいて IAA がストロークレートの増加に伴って増加したエネルギー消費量と線形関係を示すのであれば, IAA からローイング時の内的仕事に対するエネルギー消費量が推定できると考えられる.

そこで本研究では, 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を明らかにすることを目的とし, 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または減少させた際のエネルギー消費量を比較検討した. また, 同一の発揮パワー条件下においてストロークレートを増加させれば, その分内的仕事量が增加するため, IAA とエネルギー消費量とともに増大するという仮説を立てた. そこで, そのときの IAA とエネルギー消費量の間に線形関係が成立するかを検討した.

II. 方 法

A. 被験者及び負荷装置

被験者は男子大学生ボート選手 8 名 (年齢: 21.6 ± 1.4 歳, 身長: 171.1 ± 1.8 cm, 体重: 68.7 ± 1.9 kg) であった. 被験者には測定前日から激しいトレーニング及びアルコールの摂取を, 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. 負荷装置は, ボート競技のトレーニングで一般的に用いられるローイングエルゴメータ (Rowing ergometer type D, Concept II 社製) を用いた. 被験者には, 事前に研究内容を詳細に説明し, 研究の趣旨, 測定への参加及びデータの発表についての了承を書面にて得た. また, 本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を

受け実施した.

B. 実験及び測定内容

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と, それに対するストロークレートを決定するために漸増負荷テストを実施した. 漸増負荷テストは最大下及び最大テストによって構成された. 最大下テストでは, 運動時間を 4 分間, 休息時間を 2 分間とした. 最初のステージの発揮パワーは, ローイングエルゴメータ (以下エルゴメータと略す) による 2000 m タイムトライアル時の平均発揮パワー (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}). その後, 10 分間の休息を挟んだ後に最大テストを実施した. 最大テストにおける最初の発揮パワーは 85% P_{2000} とし, 1 分毎に 5% P_{2000} ずつ発揮パワーを漸増させ, 被験者が指定された発揮パワーを維持できなくなった時点でテストを終了させた.

運動中の呼吸は, 自動呼吸ガス分析装置 (エアロモニタ AE310-s, ミナト医科学社製) の EXP モードを用いて分析し, 呼吸ガスパラメータ (換気量, 酸素摂取量及び二酸化炭素排出量) を測定した. EXP モードとは, ダグラスバッグ法を模した方法として, 蛇管内に導いた呼吸ガスの流量と酸素及び二酸化炭素濃度を 1 秒毎に測定し, それを一定時間 (本研究では 15 秒間隔) で連続的に積分する方法である. この方法は, ダグラスバッグ法による測定値と高い相関関係を示すことが報告されており (衣斐ほか, 2012), 妥当性の高い測定方法である. 心拍数 (heart rate: HR) の測定にはハートレートモニタ (S610i, Polar 社製) を用いた. 最大下テストの各ステージにおける呼吸ガスパラメータ及び HR は, 各ステージの運動終了前 1 分間の平均値を採用した. 最大テストでは, 山地 (2001) が示す最大努力の客観的指標を参考とした. すなわち, 1) $\dot{V}O_2$ のプラトーが出現すること, 2) HR が年齢から推定 ($220 - \text{年齢}$) される最大心拍数 ($HR_{\max}$) にほぼ

達していること (± 10 拍/分), 3) 呼吸交換比 (Respiratory Exchange Ratio: RER) が 1.10 以上に達していること, 4) 血中乳酸濃度が 10 mmol/l 以上に達していることの 5 条件のうち 2 つ以上を満たしている連続した 1 分間の平均値を最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\text{max}$) と判断した.

最大下テストの休息時間内には指穿より毛細管を用いて血液を採取し, 血中乳酸濃度分析器 (YSI1500SPORT, YSI 社製) を用いて血中乳酸濃度を測定した. 乳酸性作業閾値 (Lactate threshold: LT) は, Beaver et al. (1985) の方法を用い, Blood Lactate Endurance Marker Software (Lactate-E) によって算出し (Newell et al., 2007), そのときの発揮パワーを P_{LT} とした.

2. 80%及び90%LT テスト

漸増負荷テストにおいて被験者毎に求めた P_{LT} の 80% で発揮パワーを固定し, ストロークレートのみを変化させ, 代謝応答及び IAA を計測し, これを 80%LT テストとした. また, P_{LT} の 90% で発揮パワーを固定し同様の試技を行ない, これを 90%LT テストとした. 両テストでは, 可能な限り広範囲に渡ってストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係性を検討するために, 被験者がそれぞれの発揮パワー (80%及び90% P_{LT}) に対して自由に選択したストロークレート (Freely chosen stroke rate: FS) を基準として 4 strokes/min ずつストロークレートを増加または減少させ, 被験者が安定して運動条件 (発揮パワー及びストロークレート) を維持できると判断した自由ストロークレートを含む連続した 6 条件を用いた. なお, 自由ストロークレートは最大下テストにおける発揮パワーとストロークレートの関係から, 80%または90% P_{LT} に対するストロークレートを内挿法によって求めた. 運動中, 被験者にはエルゴメータのディスプレイに表示される 1 ストローク毎の発揮パワー及びストロークレートを見ながら, 指定された運動条件を維持するよう指示した. 両テストとも各ストロークレート条件に対して運動時間は 4 分間とし, 運動終了後は 6 分間の休息を挟み HR が十分に低下したことを

確認した後に次の運動を開始させた. なお, いずれも各ストロークレート条件はランダムに実施し, 漸増負荷テストと同様の方法を用いて呼気ガスパラメータの測定を行ない, 運動終了前の 1 分間の平均値をそのストロークレート条件に対する値とした.

先行研究 (Coast and Welch, 1985; Marsh and Martin, 1997) に倣い, ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係に対して二次回帰式を当てはめ, 回帰式から $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示すときのストロークレートを算出した.

3. 総積分値 (IAA)

本研究で用いた加速度センサの検出範囲は $\pm 16 G$ (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 変換し, 本体に内蔵されたシリアルフラッシュメモリに保存した. また, サンプリング周波数は 100 Hz に設定し, 測定終了後にパーソナルコンピュータ (MacBook Pro, Apple 社製) ヘデータを転送し, 加速度センサ付属のアプリケーション (LP-WSAPP01, ロジカルプロダクト社製) 上にて 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, 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 (左右, 上下及び前後方向) の身体加速度データから以下の式によって合成加速度を求めた.

$$a_{\text{total}}(\text{count}) = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

このとき a_{total} は合成加速度, a_x , a_y 及び a_z はそれぞれ左右, 上下及び前後方向で得られた身体加速度を表している. さらに先行研究 (Bouten et al., 1994; Eston et al., 1998; Iwashita et al., 2003; Nichols et al., 1999) に倣い, a_{total} を各運動終了前の 1 分間で積分した値である総積分値 (IAA) を以下の式によって算出し, 身体活動量の指標とした.

$$\text{IAA} = \int_{t=0}^T |a_{\text{total}}| dt$$

C. 統計処理

結果はすべて平均値±標準偏差にて示した。 $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示すストロークレートを求めるために、ストロークレートを独立変数、 $\dot{V}O_2$ を従属変数とした二次回帰式を求めた。同様に、ストロークレートとIAAの関係性を検討するために、ストロークレートを独立変数、IAAを従属変数とした一次及び二次回帰式を求め、それぞれの決定係数 (R^2 値) を算出し比較検討した。IAA と $\dot{V}O_2$ の線形関係の評価には、ピアソンの積率相関係数 (r) を用いた。測定項目間の差の検定には、対応のある t 検定を用いた。統計的有意性は危険率 5%未満とした。

III. 結 果

A. 漸増負荷テスト

最大テストによって得られた被験者の $\dot{V}O_{2\max}$ 及び $HR_{\max}$ は、それぞれ 4437.6 ± 389.8 ml/min 及び 188.1 ± 7.0 beats/min であった。最大下テストによって得られた被験者の LT 時の発揮パワー (P_{LT})、90% P_{LT} 及び 80% P_{LT} は、それぞれ 183.2 ± 14.1 , 164.9 ± 12.7 及び 146.5 ± 11.3 watt であった。80% P_{LT} は、一般的にトレーニングで

用いられる血中乳酸濃度 1.00 mmol/l 時の発揮パワー (Fritsch, 2005) よりも有意に低い値を示していた (172.2 ± 26.7 watt)。

80%及び90% P_{LT} に対する自由ストロークレート (FS) は、それぞれ 19.1 ± 1.9 及び 19.9 ± 1.9 strokes/min であり、80% P_{LT} と比較して 90% P_{LT} で有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

B. 80%及び90%LT テスト

1. ストロークレートと $\dot{V}O_2$

Fig. 1 に 80% および 90% LT テストにおけるストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係を 2 名の代表的な被験者の例で示した (被験者 C および B)。被験者 C では、80% および 90% LT テストにおいて、それぞれ R^2 値が 0.996 および 0.910 の二次回帰式が得られた (Fig. 1(A))。一方、被験者 B では、80% および 90% LT テストにおける R^2 値が、それぞれ 0.261 および 0.682 であった (Fig. 1(B))。二次回帰式の R^2 値が 0.9 を上回っていた被験者は、80% および 90% LT テストにおいて、それぞれ 5 および 2 名のみであった。それらの被験者について、二次回帰式から求めた経済ストロークレートと実測値から求めた経済ストロークレートを比較したところ、両者はほぼ近似した値

Fig. 1 Relationship between stroke rate and oxygen uptake during 80% (open circle) and 90% (close circle) LT test in Subject C (A) and B (B). Arrows represent a point whose oxygen uptake was lowest calculated from parabolic equation. Dashed circles represent a stroke rate whose oxygen uptake was lowest.

Fig. 2 Relationship between difference of stroke rate (ΔSR) and oxygen consumption ($\Delta \dot{V}O_2$) from most economical stroke rate during 80%LT test (A) and 90%LT test (B) in all subjects.

を示した（それぞれ 21.5 ± 1.9 および 20.5 ± 3.7 strokes/min）。そこで本研究では、実測の $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示したストロークレートを経済ストロークレートとした。80%および90%LTテストにおける経済ストロークレートは、それぞれ 22.5 ± 4.5 及び 19.4 ± 1.9 strokes/min であり、80%LTテスト時の経済ストロークレートは90%LTテストのそれと比較して有意ではないものの高い値を示した。

Fig. 2 に経済ストロークレートを基準とした、ストロークレートの変化量 (ΔSR) と $\dot{V}O_2$ の変化量 ($\Delta \dot{V}O_2$) の関係を全ての被験者について示した。両テストとも、経済ストロークレートよりもストロークレートを増加または減少させると $\dot{V}O_2$ が増大する傾向が認められた。

2. ストロークレートと IAA の関係

Fig. 3 は加速度センサで測定した生データを典型例で示したものである。上から左右軸、上下軸、前後軸及びその合成加速度を示しており、

Fig. 3 (A) が 16 strokes/min, Fig. 3 (B) が 32 strokes/min 時に得られたものである。両ストロークレートともに左右軸と比較して、上下及び前後軸で大きな身体加速度が生じていた。また、1回のストローク中における上下及び左右軸の身体加速度の変化に着目すると、漕ぎ始め（キャッチ：C）とともに上方向及び後方向への身体加速度が生じ、漕ぎ終わり（フィニッシュ：F）にかけて下方向及び前方向への身体加速度が生じていた。さらに、合成加速度は、ドライブ局面（キャッチからフィニッシュ：D）とリカバリー局面（フィニッシュからキャッチ：R）において増大し、局面から局面へと移り変わる時点では減少することが確認された。さらに、32 strokes/min では16 strokes/min と比較して、リカバリー局面に要する時間が短縮され、合成加速度は増大する傾向が確認された。

Fig. 4 に80%及び90%LTテストにおけるストロークレートと IAA の関係を示した。全ての被験者において IAA は、ストロークレートの増加に伴って増大する傾向が認められた。各被験者のストロークレートと IAA の関係性を検討したところ、両テストとも全ての被験者において、 R^2 値は 一次回帰式 ($0.86 \leq R^2 \leq 0.99$) よりも二次回帰式 ($0.95 \leq R^2 \leq 1.00$) で高い値を示した (Table 1)。

3. IAA と $\dot{V}O_2$ の関係

Fig. 5 に80%及び90%LTテストにおける、経済ストロークレートを基準としたストロークレートの増加に伴う IAA の増加量 (ΔIAA) と $\dot{V}O_2$ の増加量 ($\Delta \dot{V}O_2$) の関係を被験者全員の値で示した（それぞれ Fig. 5(A) 及び Fig. 5(B)）。80%LTテストでは、 ΔIAA と $\Delta \dot{V}O_2$ の間に有意な相関関係は認められなかったが、90%LTテストでは、両者の間に有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.673, p < 0.001$)。Table 2 に経済ストロークレート以上の条件における IAA と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式の相関係数 (r) を示した。80%LTテストでは4名、90%LTテストでは7名の被験者において、IAA と $\dot{V}O_2$ の r が0.9以上の値を示した。なお、80%LTテストにおける2名の被験者

Fig. 3 Accelerometer values in medio-lateral, vertical and antero-posterior direction and total impulse during 90%LT test at 16 strokes/min (A) and 32 strokes/min (B). Total impulses indicate the value of composition of all axis's accelerometer data. (D), (R), (C) and (D) indicate drive phase, recovery phase, catch and finish respectively.

Fig. 4 Relationship between stroke rate and integrals of absolute value of accelerometer output (IAA) during 80%LT test (open circle) and 90%LT test (close circle).

(被験者 D 及び E) については、経済ストローク以上の条件が 2 条件のみであったため、分析から除外した。

IV. 考 察

本研究は、ローイング時の内的仕事量の相違がエネルギー消費量に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、同一の発揮パワー条件下 (LT 時の発揮パワーの 80% 及び 90%) においてストロークレートのみを変化させた際の $\dot{V}O_2$ を比較検討した。その結果、いずれの発揮パワー条件においても、 $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示すストロークレート (経済ストロークレート) が確認された。すなわち、ストロークレートを経済ストロークレートから増加または減少させると、いずれも $\dot{V}O_2$ が増大する傾向が認められた。

A. ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係

本研究において、経済ストロークレートからストロークレートを増加させると $\dot{V}O_2$ が増大する傾向が認められた。ローイングと同様に周期性を

Table 1 Coefficient of determination of linear and curvilinear regressions between stroke rate and integrals of absolute value of accelerometer output (IAA) during 80% and 90%LT test.

Subject	80%LT test		90%LT test	
	Linear regression	Curvilinear regression	Linear regression	Curvilinear regression
A	0.988	0.998	0.970	0.974
B	0.885	0.996	0.974	0.980
C	0.990	0.998	0.964	0.988
D	0.947	0.996	0.910	0.998
E	0.962	0.992	0.918	0.984
F	0.872	0.994	0.956	0.996
G	0.951	0.996	0.937	0.992
H	0.972	0.978	0.856	0.953

Fig. 5 Relationship between Δ IAA and $\Delta\dot{V}O_2$ during 80%LT test (A) and 90%LT test (B) in pooled all subject's data.

有する運動である自転車運動でも、同様の現象が報告されている。すなわち、同一の発揮パワー条件下において、ペダル回転数のみを変化させると、 $\dot{V}O_2$ が最も低くなる特定のペダル回転数（経済回転数）が出現すること、すなわち経済回転数からペダル回転数を増加または減少させても $\dot{V}O_2$ は増大することが報告されている（Coast and Welch, 1985; Gaesser and Brooks, 1975; Marsh and Martin, 1997; Seabury et al., 1977）。先行研究の多くは、ペダル回転数と $\dot{V}O_2$ の関係に対して二次回帰式を当てはめ、そこから $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示すペダル回転数（経済回転数）を求めている。自転車運動では、全ての被験者において二次回帰式の R^2 値が非常に高い値を示すが、本研究では二次回帰式の R^2 値が低い値を示す被験

者が多く見受けられた。これには、ローイングと自転車運動における運動特性の相違が関与したものと考えられる。ローイングは自転車運動とは異なり、クランクによって1ストローク中の動作が規定されていないため、動作そのものが変化しやすい運動であるといえる。本研究において身体活動量の指標として用いた IAA は、ストロークレートの増加に対して曲線的な増加を示した (Fig. 5)。この結果は、高いストロークレートでは1ストローク当たりの身体活動量が增大していたこと、すなわちローイング動作そのものが変化していた可能性を示している。ストロークレートにはこうした1ストローク中の動作の影響が反映されにくいことから、ストロークレートを説明変数とした二次回帰式の R^2 値が低い値を示す

Table 2 Coefficient of correlation between IAA and $\dot{V}O_2$ during 80% and 90%LT test in each subject.

Test	Subject	Number of data points	<i>r</i> coefficient
80%LT test	A	3	0.985
	B	5	0.164
	C	4	0.946
	D	2	—
	E	2	—
	F	4	0.978
	G	5	0.942
	H	3	0.708
90%LT test	A	5	0.950
	B	4	0.990
	C	5	0.982
	D	4	0.801
	E	4	0.961
	F	4	0.939
	G	4	0.993
	H	4	0.997

被験者が見受けられた可能性がある。しかし、二次回帰式の R^2 値が0.9以上であった被験者について、回帰式から求めた経済ストロークレートと、実測の $\dot{V}O_2$ から求めた経済ストロークレートを比較したところ、両者はほぼ近似した値を示した (Fig. 1)。このことから、本研究では実測の $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示したストロークレートを経済ストロークレートとした。

B. ストロークレートの増加に伴う $\dot{V}O_2$ の増大

自転車運動において、ペダル回転数を経済回転数よりも増加させた際の $\dot{V}O_2$ の増大には、下肢を回転させる仕事 (内的仕事) の増大や (Coast and Welch, 1985; Gaesser and Brooks, 1975; Marsh and Martin, 1997; Seabury et al., 1977), 筋収縮速度の増加によるタイプII線維の動員比率の増加 (Sargeant, 1994; Pringle et al., 2003) が関与するものとされている。このことを踏まえると、ストロークレートを経済ストロークレートよりも増加させた条件 (高ストロークレート条件)

における $\dot{V}O_2$ の増大にも、内的仕事量及び筋収縮速度の増加が関与していたものと推察される。ローイングは、身体重心を前後方向に大きく移動させるため、発揮パワーには反映されない仕事すなわち内的仕事が大きな運動であることが指摘されている (Fukunaga et al., 1986)。したがって、高ストロークレート条件における $\dot{V}O_2$ の増大には、内的仕事量の増加がより強く関与していたと考えられる。

本研究では、ローイング時の身体活動量すなわち内的仕事量の指標として IAA を用いた。IAA による身体活動量の評価は、ランニングやウォーキングといった身体重心の移動を伴う運動で盛んに行なわれている (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 $\dot{V}O_2$ が共に増大し、両者の間には有意な強い正の相関関係が認められたことを報告している。このことは、IAA によって、身体重心を移動させる運動における $\dot{V}O_2$ が推定できる可能性を示唆している。本研究において、90%LT テストでは、高ストロークレート条件における ΔIAA と $\Delta \dot{V}O_2$ の間に有意な正の相関関係が認められた。さらに、高ストロークレート条件における IAA と $\dot{V}O_2$ の関係を被験者毎に検討したところ、回帰直線の r は1名の被験者を除いて0.9以上の値を示した。高ストロークレート条件における $\dot{V}O_2$ の増大には内的仕事量の増加が強く関連しているものと考えられることから、IAA はローイング時の内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ と線形関係を示す可能性がある。

しかし、80%LT テストでは、 ΔIAA と $\Delta \dot{V}O_2$ の間に有意な相関関係が認められなかった。また、被験者毎に高ストロークレート条件における IAA と $\dot{V}O_2$ の関係を検討したところ、回帰直線の r が0.9以上の値を示した被験者数は90%LT テストよりも減少した。こうした両テストの相違に影響を及ぼした要因について、本研究の結果から明らかにすることはできないが、発揮パワー条件とローイングの運動特性が影響を及ぼしていた可能性が挙げられる。すなわち、80%LT テスト

で用いた発揮パワーは、一般的にボート競技で用いられる最も低いトレーニング強度である血中乳酸濃度が1 mmol/lに相当する発揮パワー (Fritsch, 2005) よりも有意に低く、被験者にとって不慣れな発揮パワー条件であった可能性が考えられた。さらに、ローイングは1ストローク中の動作が規定されていないため、80%LTテストでは動作そのものが変容していた可能性も考えられる。しかし、この点について明らかにするためには、今後バイオメカニクスの手法などを用いてより詳細に動作を分析する必要がある。

C. ストロークレートの減少に伴う $\dot{V}O_2$ の増大

自転車運動において、経済回転数よりも低いペダル回転数における $\dot{V}O_2$ の増大には、1ストローク当たりの筋張力の増加によるタイプII線維の動員比率の増加が関与するものとされている (Ahlquist et al., 1992)。本研究の結果から、運動中の筋線維タイプの動員比率に関する検討を行うことは不可能であるが、同一の発揮パワー条件におけるストロークレートの減少は1ストローク当たりの仕事量すなわち筋張力を増加させ、タイプII線維の動員比率を増加させていたと推察される。タイプII線維はタイプI線維と比較して酸素当量に対するATP産生効率が低いこと (Kushumerick et al., 1992) から、経済ストロークレートよりも低いストロークレート条件における $\dot{V}O_2$ の増大には、筋発揮張力の増加によるタイプII線維の動員比率の増加 (Ahlquist et al., 1992) が関与していた可能性が考えられる。

D. 経済ストロークレートの決定要因

本研究の結果から、同一発揮パワー条件下におけるローイング時の $\dot{V}O_2$ には、主に内的仕事量及び1ストローク当たりの発揮筋力が影響を及ぼしている可能性が示唆された。すなわち、ストロークレートを経済ストロークレートから減少させれば1ストローク当たりの発揮筋力が増加し、反対にストロークレートを増加させれば内的仕事量が増加し、それぞれ $\dot{V}O_2$ を増大させてい

た可能性が示唆された。したがって、それらの影響が最小となるストロークレートにおいて $\dot{V}O_2$ は低い値を示すものと考えられる。

なお、自転車運動における経済回転数は、発揮パワーの増加に伴って直線的に上昇することが報告されている (Coast and Welch, 1985; Gaesser and Brooks, 1975)。しかし、80%LTテスト時の経済ストロークレートは、90%LTテストと比較して有意ではないものの高い値を示した。こうした自転車運動を用いた先行研究との相違には、上述した発揮パワー条件とローイングの運動特性が影響を及ぼしていたものと推察される。すなわち、自転車運動とは異なり、ローイングは1ストローク中の動きが規定されていない点に加え、80%P_{LT}は被験者にとって不慣れな発揮パワー条件であったため、筋発揮張力や内的仕事量以外の要因が影響を及ぼしていた可能性が考えられた。しかし、この点について本研究の結果から明らかにすることはできない。

V. 結 論

本研究の目的は、同一の発揮パワー条件下におけるストロークレート (内的仕事量) の相違が $\dot{V}O_2$ 、すなわちエネルギー消費量に及ぼす影響を明らかにすること及びIAAが身体を前後方向に移動させる仕事 (内的仕事) に対するエネルギー消費量の推定に有用であるかを検討することであった。本研究の結果から、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ると、 $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示す特定のストロークレート (経済ストロークレート) が出現することが明らかになった。すなわち、経済ストロークレートからストロークレートを増加させても減少させても $\dot{V}O_2$ が増大する傾向が認められた。さらに、90%LTテストでは、IAAはストロークレートの増加に伴って増大し、ほとんどの被験者で経済ストロークレート以上の条件 (高ストロークレート条件) において $\dot{V}O_2$ と線形関係を示すことが確認された。しかしながら、80%LTテストでは同様の関係性が認められた被験者が少なかったこと

から、今後は発揮パワー条件を被験者が十分に慣れている範囲内で設定し、IAA と $\dot{V}O_2$ の関係性について検討を行なう必要がある。

文 献

- Ahlquist, L.E., Bassett, D.R., Sufit, R., Nagle, F.J., and Thomas, D.P. (1992) The effect of pedaling frequency on glycogen depletion rates in type I and type II quadriceps muscle fibers during submaximal cycling exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 65: 360–364.
- Beaver, W.L., Wasserman, K., and Whipp, B.J. (1985) Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation. *J. Appl. Physiol.*, 59: 1936–1940.
- Bouten, C.V., Westerterp, K.R., Verduin, M., and Janssen, J.D. (1994) Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 26: 1516–1523.
- Coast, J.R. and Welch, H.G. (1985) Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 53: 339–342.
- 衣斐淑子・中垣浩平・今 有礼・中村真理子 (2012) アスリートにおける呼気ガス分析方法に関する検討. *体力科学*, 61: 750.
- Eston, R.G., Rowlands, A.V., and Ingledew, D.K. (1998) Validity of heart rate, pedometer, and accelerometry for predicting the energy cost of children's activities. *J. Appl. Physiol.*, 84: 362–371.
- Foss, Ø. and Hallén, J. (2004) The most economical cadence increases with increasing workload. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 92: 443–451.
- Fritsch, W. (2005) Improving anaerobic threshold. Nolte, V. (Eds.) *Rowing faster*. pp. 63–76.
- Fukunaga, T., Matuo, A., Yamamoto, K., and Toshio, A. (1986) Mechanical efficiency in rowing. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 55: 471–475.
- Gaesser, G.A. and Brooks, G.A. (1975) Muscular efficiency during steady-rate exercise: effect of speed and work rate. *J. Appl. Physiol.*, 38: 1132–1139.
- Hansen, E.A., Jørgensen, L.V., and Sjøgaard, G. (2004) A physiological counterpoint to mechanistic estimates of “internal power” during cycling at different pedal rates. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 91: 435–442.
- Hofmijster, M.J., Van Soest, A.J., and De Koning, J.J. (2009) Gross efficiency during rowing is not affected by stroke rate. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 41: 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. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35: 1766–1772.
- Kushmerick, M.J., Meyer, R.A., and Brown, T.R. (1992) Regulation of oxygen consumption in fast- and slow-twitch muscle. *Am. J. Physiol.* 263: 598–606.
- Marsh, A.P. and Martin, P.E. (1997) Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 29: 1225–1232.
- Minetti, A.E. (2011) Bioenergetics and biomechanics of cycling: the role of ‘internal work’. *Eur. J. Appl. Physiol.* 111: 323–329.
- 中村好男, 玉木啓一, 富田寿人, 村岡 功 (1989) ローイングエルゴメータの運動強度を決定する要因. *体力科学*, 38: 55–63.
- Newell, J., Higgins, D., Madden, N., Cruickshank, J., Einbeck, J., McMillan, K., and McDonald, R. (2007) Software for calculating blood lactate endurance markers. *J. Sports Sci.*, 25: 1403–1409.
- 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. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31: 908–912.
- Pringle, J.S., Doust, J.H., Carter, H., Tolfrey, K., and Jones, A.M. (2003) Effect of pedal rate on primary and slow-component oxygen uptake responses during heavy-cycle exercise. *J. Appl. Physiol.*, 94: 1501–1507.
- Pripstein, L.P., Rhodes, E.C., McKenzie, D.C., and Coutts, K.D. (1999) Aerobic and anaerobic energy during a 2-km race simulation in female rowers. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 79: 491–494.
- Russell, A.P., Le Rossignol, P.F., and Sparrow, W.A. (1998) Prediction of elite schoolboy 2000m rowing ergometer performance from metabolic, anthropometric and strength variables. *J. Sports Sci.*, 16: 749–754.
- Sargeant, A.J. (1994) Human power output and muscle fatigue. *Int. J. Sports med.*, 15: 116–121.
- Seabury, B.J., Adams, W.C., and Ramey, M.R. (1977) Influence of pedaling rate and power output on energy

- expenditure during bicycle ergometer. *Ergonomics*, 50: 491–498.
- Secher, N.H. (1983) The physiology of rowing. *J of Sports Sci*, 1: 23–53.
- Wells, R., Morrissey, M., and Hughson, R. (1986) Internal work and physiological response during concentric and eccentric cycling ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 55: 295–301
- Widrick, J.J., Freedson, P.S., and Hamill, J. (1992) Effect of internal work on the calculation of optimal pedaling rates. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24: 376–382.
- Willems, P.A., Cavagna, G.A., and Heglund, N.C. (1995) External, internal and total work in human locomotion. *J. Exp. Biol.*, 198: 379–393.
- Winter, D.A. (1979) A new definition of mechanical work done in human movement. *J. Appl. Physiol.*, 46: 79–83.
- 山地啓司 (2001) 改訂最大酸素摂取量の科学. $\dot{V}O_2$ max の測定—直接法—. 杏林書院：東京, p15.
- (平成25年2月27日受付)
(平成26年4月16日受理)
- Advance Publication by J-STAGE
Published online 2014/5/27