

博士論文

ローイング時の無酸素性エネルギー供給量の評価方法

平成 30 年度

筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

白井祐介

## 関連論文

本論文は、以下に示した論文に未発表の実験結果を加えてまとめた。

- 1) 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 (1): 263-274 (2015).
- 2) 白井祐介, 丹治史弥, 高山文徳, 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 40 (3): 195-203 (2016)
- 3) 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 (2016).
- 4) Shirai, Y., Murata, M., Nabekura, Y. Validity of a newly developed method to predict accumulated oxygen deficit in rowing. Human Performance Measurement. 15: 1-13 (2018).

## 略語の説明

$A_1$	: 血中乳酸濃度の動態モデルにおける乳酸放出成分の振幅
$A_2$	: 血中乳酸濃度の動態モデルにおける乳酸除去成分の振幅
ATP (Adenosine triphosphate)	: アデノシン 3 リン酸
AOD (Accumulated oxygen deficit)	: 酸素借. 運動中の無酸素性エネルギー供給量の指標
FS (Freely chosen stroke rate)	: 被験者が選択したストロークレート
HR (Heart rate)	: 心拍数
$IAA_x, IAA_y, IAA_z$ (Integrals of value of accelerometer output on x, y or z axis)	: 各軸 (x, y, z) で測定された身体加速度の積分値
$IAA_{total}$ (Total integrals of value of accelerometer output)	: $IAA_x, IAA_y$ および $IAA_z$ の合計値, 総積分値
LT (Lactate threshold)	: 乳酸性代謝閾値
MAOD (Maximal accumulated oxygen deficit)	: 最大酸素借 (無酸素性エネルギー供給能力の指標)
OD (Oxygen demand)	: 酸素需要量
$OD_{ext}$ (Oxygen demand for external work)	: 外的仕事に対する酸素需要量
$OD_{int}$ (Oxygen demand for internal work)	: 内的仕事に対する酸素需要量
$P_{LT}$ (Power output at LT)	: LT 時の発揮パワー
$P_{2000}$ (Power output at 2000 m test)	: 2000 m テスト時の平均発揮パワー
$Q_{LaA}$ (Quantity of lactate accumulated)	: 総乳酸蓄積量 (mmol)
$Q_{LaA}$ at $[La]_{b peak}$	: 最高血中乳酸濃度に到達した時点の体内乳酸蓄積量 (mmol)
$Q_{LaR}$	: 運動終了直後から最高血中乳酸濃度に到達するまでに体内から除去された乳酸量 (mmol)
$\dot{V}O_2$ (Oxygen uptake)	: 酸素摂取量
$\dot{V}O_{2 EX}$ (Oxygen uptake spent for EXERCISE)	: 運動そのものに対する酸素摂取量
$\dot{V}O_{2 ext}$ (Oxygen uptake spent for external work)	: 外的仕事に対する酸素摂取量

$\dot{V}O_{2\text{ int}}$ (Oxygen uptake spent for internal work)	: 内的仕事に対する酸素摂取量
$\dot{V}O_{2\text{ rest}}$ (Oxygen uptake at resting state)	: 安静時の酸素摂取量
$\dot{V}O_{2\text{ max}}$ (Maximal oxygen uptake)	: 最大酸素摂取量 (漸増負荷テストで測定された酸素摂取量の最大値)
$\dot{V}O_{2\text{ peak}}$ (Peak value of oxygen uptake)	: 最高酸素摂取量 (運動中に測定された酸素摂取量の最高値)
$V_{\text{TLS}}$ (Volume of total lactate distribution space)	: 体内において乳酸が含まれる組織の容積
$\gamma_1$	: $[\text{La}]_b$ の動態モデルにおける乳酸放出成分の時定数
$\gamma_2$	: $[\text{La}]_b$ の動態モデルにおける乳酸除去成分の時定数
$[\text{La}]_b$	: 血中乳酸濃度 (mmol/L)
$[\text{La}]_{b\text{ pre}}$	: 運動開始直前の血中乳酸濃度 (mmol/L)
$[\text{La}]_{b(0)}$	: 運動終了直後の血中乳酸濃度 (mmol/L)
$[\text{La}]_{b\text{ peak}}$	: 運動終了後の最高血中乳酸濃度 (mmol/L)
$\Delta \dot{V}O_2 / \Delta \text{IAA}_{\text{total}}$	: $\text{IAA}_{\text{total}}$ と $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き
%Anaerobic	: 無酸素性代謝の貢献割合
$\% \dot{V}O_{2\text{ max}}$	: 最大酸素摂取量を基準とした酸素摂取水準

## 表のタイトル一覧

表 2-1. 種目, 性別および体重カテゴリー毎の世界最高記録

表 2-2. ボート選手および陸上中長距離選手の身体プロフィール, パフォーマンスレベルおよび  $\dot{V}O_{2max}$

表 5-1. 各被験者における 90% LT テスト時の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の相関係数

表 7-1. SR テストにおける発揮パワー, ストロークレート,  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$

表 9-1. SR テストの各試技における発揮パワー, ストロークレート,  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$

表 10-1. 漸増負荷テストの結果

表 10-2. SR テストの各試技における発揮パワー, ストロークレート,  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$

表 10-3. 各パフォーマンステストにおける発揮パワー, ストロークレート (SR),  $\dot{V}O_2$  obtained, OD, 総酸素摂取量 (Accumulated oxygen uptake: AO), AOD, %Anaerobic および MAOD への到達率 (%MAOD)

表 10-4. 2000 m テスト中の各区分およびテスト全体の平均発揮パワーと,  $\dot{V}O_{2max}$ ,  $\dot{V}O_{2peak}$  および AOD の相関係数および  $p$  値

## 図のタイトル一覧

- 図 2-1. ローイング動作の連続写真
- 図 2-2. 水上およびエルゴメータにおける 2000 m テストのペース変化
- 図 2-3. ローイングエルゴメータを用いた 6 分間および 7 分間のレースシミュレーションテスト中の  $\dot{V}O_2$  応答
- 図 2-4.  $\dot{V}O_2$  および血中乳酸濃度の応答からみた運動強度とエネルギー消費量の関係
- 図 2-5. 超最大運動後における血中乳酸濃度の動態と数理モデルを用いた評価
- 図 2-6. Medbø et al. (1988) によって提唱された酸素借法の概念図
- 図 2-7. Medbø & Tabata (1993) によって報告された筋生検法 (横軸) および AOD 法 (縦軸) によって定量した無酸素性エネルギー供給量の関係
- 図 4. 本研究で使用したローイングエルゴメータ (左) とローイングエルゴメータのディスプレイ (右)
- 図 5-1. 90 % LT テストにおけるストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の関係の代表例
- 図 5-2. 90 % LT テストにおけるストロークレートの変化量 ( $\Delta$ Stroke rate) と  $\dot{V}O_2$  の変化量 ( $\Delta\dot{V}O_2$ ) の関係
- 図 5-3. 14 strokes/min (A) および 34 strokes/min (B) で得られた身体加速度波形の典型例
- 図 5-4. 90 % LT テストにおけるストロークレートと  $IAA_{total}$  の関係
- 図 5-5. 90 % LT テストにおける  $\Delta IAA_{total}$  と  $\Delta\dot{V}O_2$  の関係
- 図 6-1. 無負荷条件 (A), 90 % LT 条件 (B) および 100 % LT 条件 (C) における各試技で得られた  $IAA$ .
- 図 6-2. 各発揮パワー条件におけるストロークレートと  $IAA_{total}$  の関係
- 図 6-3. ストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の関係 (代表例)
- 図 6-4. 無負荷条件, 90 % LT 条件および 100 % LT 条件における  $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$
- 図 7-1. 従来の AOD 法 (上段) および  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法 (下段) による酸素需要量の推定方法の概念図
- 図 7-2. 内的仕事および外的仕事の概念による ローイング時の  $\dot{V}O_2$  の捉え方
- 図 7-3.  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法による OD の推定方法
- 図 7-4. SR テストにおけるストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の関係の典型例
- 図 7-5. SR テストにおける  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係の典型例
- 図 7-6.  $OD_N$  と  $OD_{IAA}$  および  $AOD_N$  および  $AOD_{IAA}$  の関係性の検討
- 図 8-1. 超最大テスト後の血中乳酸濃度の推移
- 図 8-2.  $Q_{LaA}$  と  $AOD_N$  および  $AOD_{IAA}$  の関係
- 図 9-1. 本研究において検討した OD の推定方法の概念図

図 9-2. 発揮パワーとストロークレート (A) および  $IAA_{total}$  の関係 (B)

図 9-3. 通常条件 (図中実線) および SR 増加条件 (図中破線) における OD の推定式

図 9-4. 各条件によって推定した OD

図 9-5.  $OD_{SR}$  と  $OD_{IAA}$  の関係

図 9-6. 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

図 10-1. 各パフォーマンステスト中のストロークレート (上段) および発揮パワー (下段) の変化

図 10-2.  $\dot{V}O_{2max}$  および MOAD と各パフォーマンステストにおける %MAOD の関係 ( $n = 14$ )

図 11-1. ローイングパフォーマンス (平均発揮パワー,  $P_{2k}$ ) と  $\dot{V}O_{2max}$  (左図) および MAOD (右図) の関係

図 11-2. 2 km テスト中の発揮パワー (A), ストロークレート (B),  $IAA_{total}$  (C) および 1 ストロークあたりの  $IAA_{total}$  (D) の推移 ( $n = 13$ )

図 11-3. 2 km テスト中の  $\dot{V}O_2$  応答 ( $n = 13$ )

図 11-4. 2 km テスト中の各 250 m 区間における AOD (A) および %Anaerobic (B) の推移 ( $n = 13$ )

## 目 次

関連論文	
略語の説明	
表のタイトル一覧	
図のタイトル一覧	
第1章 緒 言	1
第2章 文献研究	5
1. ボート競技(ローイング)の特性	5
1.1. 競技の特性	5
1.2. レース中の生理応答特性	9
1.3. ボート選手の体力特性	10
2. 有酸素性代謝とその定量方法	14
3. 無酸素性代謝とその定量方法	15
3.1. 骨格筋の収縮とエネルギー代謝	15
3.2. ATP 供給機構	15
3.3. 無酸素性代謝量の定量方法	17
3.4. AOD 法の位置付け	28
4. AOD 法を用いたローイング時の無酸素性代謝量の評価	29
4.1. ローイングにおける無酸素性代謝の貢献	29
4.2. 無酸素性代謝に影響を及ぼすローイングの運動特性	30
4.3. ローイングにおいて AOD 法を用いる際の問題点	31
5. ピッチがエネルギー代謝に及ぼす関係	32
5.1. 走運動におけるピッチと $\dot{V}O_2$ の関係	32
5.2. 自転車運動におけるピッチと $\dot{V}O_2$ の関係	33
5.3. ローイングにおけるストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係	34
6. 内的仕事の評価方法	35
6.1. バイオメカニクス的手法による評価	35
6.2. 身体活動量による評価	36
第3章 研究課題	38
1. 研究課題 I	39
2. 研究課題 II	39
3. 研究課題 III	39
4. 研究課題 IV	40
5. 研究課題 V (実践研究)	40
第4章 本研究で用いた負荷装置	41
第5章 研究課題 I - 1	42
1. 目 的	42
2. 方 法	42
2.1. 被験者	42
2.2. 実験および測定内容	43
2.3. 統計処理	45
3. 結 果	46
3.1. 漸増負荷テスト	46



3.2.	90 % LT テスト	46
4.	考 察	52
4.1.	ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係	52
4.2.	ストロークレートの増加に伴う $\dot{V}O_2$ の増大	53
4.3.	ストロークレートの減少に伴う $\dot{V}O_2$ の増大	54
4.4.	経済ストロークレートの決定要因	54
5.	結 論	55
第6章	研究課題 I - 2	56
1.	目 的	56
2.	方 法	56
2.1.	被験者	56
2.2.	実験および測定内容	57
2.3.	統計処理	58
3.	結 果	59
3.1.	SR テストにおける発揮パワー条件	59
3.2.	ストロークレートと $IAA_{total}$ の関係	59
3.3.	ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係	59
3.4.	$IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係	60
4.	考 察	62
4.1.	ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係	63
4.2.	ストロークレートと $IAA_{total}$ の関係	63
4.3.	$IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係	64
5.	結 論	65
第7章	研究課題 II	67
1.	目 的	67
2.	方 法	67
2.1.	実験デザイン	67
2.2.	被験者	68
2.3.	測定方法	68
2.4.	OD の推定方法	70
2.5.	統計処理	72
3.	結 果	73
3.1.	漸増負荷テストおよび SR テスト	73
3.2.	超最大テスト	76
4.	考 察	78
4.1.	$IAA_{total}$ による内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ の評価	78
4.2.	OD および AOD	79
第8章	研究課題 III - 1	80
1.	目 的	80
2.	方 法	80
2.1.	被験者	80
2.2.	測定方法	81
2.3.	$Q_{LaA}$ の算出方法	81
2.4.	統計処理	82
3.	結 果	83
3.1.	血中乳酸濃度の動態	83

3.2.	測定項目間の関係	84
4.	考察	86
4.1.	血中乳酸濃度の関連指標と AOD の関係	86
4.2.	従来の AOD 法および IAA <sub>total</sub> を用いた AOD 法の関係	88
4.3.	本研究の限界と新たな課題	89
5.	結論	89
第9章	研究課題 III-2	91
1.	目的	91
2.	方法	92
2.3.	被験者	92
2.4.	実験および測定内容	92
2.5.	OD の算出方法	95
2.6.	統計処理	95
3.	結果	96
3.1.	発揮パワーに対するストロークレートおよび IAA <sub>total</sub>	96
3.2.	SR テスト	98
3.3.	OD	99
4.	考察	101
4.1.	SR 増加条件における OD (OD <sub>SR</sub> )	101
4.2.	IAA 条件における OD (OD <sub>IAA</sub> )	102
5.	結論	103
第10章	研究課題 IV	104
1.	目的	104
2.	方法	104
2.1.	被験者	104
2.2.	実験内容および測定項目	105
2.3.	算出項目	106
2.4.	統計処理	107
3.	結果	107
4.	考察	114
4.1.	運動時間と MAOD の関係	114
4.2.	ローイングの運動特性の影響	115
4.3.	ペース戦略の影響	116
4.4.	IAA <sub>total</sub> を用いた AOD 法の有用性	117
4.1.	本研究の限界	118
5.	結論	118
第11章	研究課題 V (実践研究)	120
1.	目的	120
2.	方法	120
2.1.	被験者	120
2.2.	実験概要	121
2.3.	算出項目	121
2.4.	統計処理	121
3.	結果	122
4.	考察	127
4.1.	2 km テスト中の無酸素性代謝	127
4.2.	ローイングパフォーマンスとエネルギー供給能力の関係	128
5.	結論	129

第 12 章	総合考察.....	131
1.	ストロークレートの増加が $IAA_{total}$ および $\dot{V}O_2$ に及ぼす影響.....	131
2.	$IAA_{total}$ を用いた AOD 法.....	133
3.	ローイングにおける MAOD の測定方法.....	134
4.	$IAA_{total}$ を用いた AOD 法の意義.....	135
5.	トレーニング現場への示唆.....	136
6.	本研究の限界.....	137
7.	結 論.....	138
第 13 章	引用文献.....	141

## 第1章 緒言

ボート競技とは 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。レース中は酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) が最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) のおよそ 90% で推移するため (Pripstein et al., 1999), 有酸素性代謝の貢献が大きな競技であるといえる。また、レース中のペース戦略に着目すると、スタート直後およびレース終盤において、特に高い艇速度 (発揮パワー) で運動が行われる (スタートおよびラストスパート局面, 松下ほか, 2006; Steinacker, 1993)。このとき、スタート直後では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ことや、レース終盤ではそれがほぼ最大に達していることから、スタートおよびラストスパート局面では、有酸素性代謝のみならず無酸素性代謝からのエネルギー供給も重要である。

運動中の有酸素性代謝量は、呼気ガスを測定することによって直接的に定量することが可能であり、その最大値である  $\dot{V}O_{2max}$  はボート競技のパフォーマンスと強く関連することが報告されている (Bourdin et al., 2004; Cosgrove et al., 1999; Kramer et al., 1994; Lacour et al., 2007; Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998; Secher, 1983; Secher, 1993; Steinacker, 1993; Yoshiga and Higuchi, 2003)。それに対して、無酸素性代謝量は、直接的に定量することが不可能であるため (Noordhof et al., 2013), Medbø et al. (1988) が提唱した酸素借 (Accumulated oxygen deficit: AOD) による推定法 (AOD 法) が用いられてきた。AOD 法とは、超最大運動中の酸素需要量 (Oxygen demand: OD) を推定し、そこから実際に測定された  $\dot{V}O_2$  すなわち有酸素性エネルギー供給量を差し引くことによって無酸素性エネルギー供給量の指標である AOD を定量する方法である (Medbo et al., 1988; Noordhof et al., 2010)。

ローイングを対象とした先行研究においても、AOD 法を用いて 2000 m シミュレーションテスト中の無酸素性代謝の貢献割合 (%Anaerobic, Clark, 2016; Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998) が評価されており、さらに無酸素性エネルギー供給能力の指標である最大酸素借 (Maximal accumulated oxygen deficit: MAOD) とローイングパフォーマンスの関係についても検討が行なわ

れている (Clark, 2016; Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998). しかし, 2000 m シミュレーションテストの運動時間がほぼ同一 (6.7 分間および 6.8 分間) の先行研究間においても, テスト中の %Anaerobic には若干の差が認められる (16 % v.s. 20 %, それぞれ Russell et al., 1998 および Clark, 2016 による). さらに, ローイングパフォーマンスと MAOD の関係についても, 有意な相関関係が認められたとする報告 (Clark, 2016; Pripstein et al., 1999) と, 関係が認められなかったとする報告 (Russell et al., 1998) があり, 一致した見解が示されていない. こうしたローイング時の無酸素性代謝に関する先行研究の問題点には, AOD 法によって OD を推定する際にローイングの運動特性が十分に考慮されていないことが影響を及ぼしている可能性がある. 加えて, 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関係を検討した先行研究では, 無酸素性エネルギー供給能力の指標として 2000 m シミュレーションテストまたは 2 分間の超最大テスト中の AOD が用いられているが (Clark, 2016; Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998), それらによって真の MAOD が測定されているかが十分に検討されていないことも問題点として挙げられる.

ローイングは, ハンドルを後方へと牽引することで大きな推進力を発生させるドライブ局面と, 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リカバリー局面によって構成されている. ドライブ局面において生じた艇を推進させる仕事は外的仕事と定義され, ローイングエルゴメータでは発揮パワーとして測定される. 一方, リカバリー局面に代表される身体を前後方向へと移動させる仕事は内的仕事と定義されるが (Di Prampero et al., 1971; Fukunaga et al., 1986; Hofmijster et al., 2009), ローイングエルゴメータでは発揮パワーには反映されず, 1 分間あたりのストローク回数がストロークレートとして記録されるのみである. この内的仕事量は, ストロークレートの増加に伴って増加すること (Hofmijster et al., 2009), さらに超最大強度におけるストロークレートは最大下強度のその 2 倍近くにも達することから, 超最大強度ではエルゴメータで測定されない内的仕事量も増加していると推察される. しかし, AOD 法では, 最大下強度で求めた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式に超最大テスト時の発揮パワーを外挿することによって OD が推定されるため, こうしたストロークレートの増加に伴う内的仕事量の増加分が加味されず, OD を実際よりも過小に評価している可能性がある. そのため, ローイングの運動特

性を考慮して OD を推定するためには、ストロークレートの増加による内的仕事量の増加がエネルギー代謝量に及ぼす影響を明らかにするとともに、それを補正して OD を推定する方法を検討する必要がある。

ローイング時の内的仕事を、前後方向に身体重心を移動させる“身体活動”と捉えると、内的仕事量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、小型の加速度測定装置 (以下、加速度センサ) が開発され、体に装着することによって運動中の身体に生じた加速度 (以下、身体加速度と略す) を容易に測定することが可能になった。歩行および走運動といった身体重心を移動させる運動では、身体加速度を 3 次元で測定し、それらの絶対値の 1 分間積分値を合計した値である総積分値 (Total integrals of value of accelerometer output:  $IAA_{total}$ ) 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、 $IAA_{total}$  は歩行および走速度の増加に伴って増大し、そのときの  $\dot{V}O_2$  と強い直線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も、ストロークレートのみを増加させることにより内的仕事量のみを増加させた際に、 $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間に直線関係が成立すれば、 $IAA_{total}$  からローイング時の内的仕事に対する  $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2$  spent for internal work:  $\dot{V}O_{2int}$ ) が評価できると考えられる。

一方、Medbø et al. (1988) は、およそ 2 分間で疲労困憊に至る定常負荷の超最大運動において AOD が最大値 (MAOD) に到達し、さらに、そこから運動時間を増加させても AOD がほぼ一定の値を示すことから、MAOD の測定には定常負荷による 2~4 分間の超最大テストを推奨している。しかし、その後の研究によって、ウィングートテストのようなオールアウト型のパワー発揮様式では、より短い時間 (60~90 秒間) で MAOD に到達すること (Withers et al., 1991; Withers et al., 1993) や、有酸素性能力に優れた被験者ではより運動時間が長い (~5 分間) 超最大テストで MAOD が出現すること (Craig et al., 1995) が報告されている。これらのことから、MAOD の測定プロトコルを選択する際には、被験者のエネルギー供給系の体力特性や、専門とする競技の運動時間やペース戦略を考慮する必要があることが指摘されている (Craig et al., 1995; Noordhof et al.,

2010). しかし, これまでにローイングを対象として, MAOD を測定する際の最適なプロトコルについて検討を行なった先行研究は認められない.

そこで本研究の目的は, ローイング時のストロークレートの増加が  $\dot{V}O_2$  および  $IAA_{total}$  に及ぼす影響を明らかにし, そのうえで, 超最大テストにおけるストロークレートの増加, 特に内的仕事量の増加の影響を補正して OD を推定する AOD 法を開発することとした. さらに, ローイングにおいて MAOD を測定する際の最適なプロトコルについても検討を行なうことによって, ローイング時の無酸素性エネルギー供給能力の評価方法を確立することを目的とした. 本研究によって新たな AOD 法を確立することは, ローイングの運動特性を加味して, 2000 m シミュレーションテスト中の無酸素性エネルギー供給動態および %Anaerobic, さらにローイングパフォーマンスと MAOD の関係を検討することを可能とし, それらはエネルギー供給系の体力からローイングパフォーマンスの向上を検討するうえで重要な知見になると考えられる.

## 第2章 文献研究

## 1. ボート競技(ローイング)の特性

## 1.1. 競技の特性

ボート競技は、1人が2本のオールを操るスカル種目と、1人が1本のオールを操るスイープ種目に大別され、さらに漕手の人数によってさらに細かく分類される。また、1996年のアトランタオリンピックより体重制限がない重量級 (Open weight category) に加えて、漕手個人の体重が男子では 72.5 kg、女子では 59 kg、クルーの平均体重が男子では 70 kg 以下、女子では 57 kg 以下に制限される軽量級 (Light weight category) が採用されている。一般的に競技は 2000 m の直線コースで実施され、そのときの所要時間は種目、性別および体重カテゴリーによって異なり、最も所要時間が短い種目である男子重量級エイトの世界最高記録は 5 分 18 秒 680 であり、最も所要時間が長い種目である女子軽量級シングルスカルでは 7 分 24 秒 460 である (表 2-1)。また、これら 2000 m レースのタイムには天候や水温といった気象条件が影響するため、それらの影響を除いて漕手のローイングパフォーマンスを評価するために、ローイングエルゴメータが広く用いられている。これまでに様々なタイプのローイングエルゴメータが開発されてきたが、現在では Concept II 社製のローイングエルゴメータが、トレーニングや選手選考の際に広く用いられている。また、エルゴメータを用いた 2000 m タイムトライアルの世界大会も開催されており、男子重量級および軽量級選手の世界記録は、それぞれ 5 分 36 秒 6 および 5 分 56 秒 7、女子重要級および軽量級選手では、それぞれ 6 分 25 秒 0 および 6 分 54 秒 7 である。



表2-1. 種目, 性別および体重カテゴリー毎の世界最高記録.

Boat type	Sex	Category	O.L.	Time	Nation	Race
Eight (8+)	M	Heavy	*	5:18.680	Germany	2017 World Rowing Cup II (Poznan, POL)
	M	Light		5:30.240	Germany	1992 World Rowing Championships (Monreal, CAN)
	F	Heavy	*	5:54.160	U.S.A.	2013 World Cup III (Lucerne, SUI)
Quadruple sculls (4X)	M	Heavy	*	5:32.260	Ukraine	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	M	Light		5:42.750	Greece	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Heavy	*	6:06.840	Germany	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Light		6:15.950	Netherlands	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
Coxed four (4+)	M	Heavy		6:43.860	Roumania	1991 World Rowing Championships (Vienna, AUT)
	F	Light		5:58.960	Germany	1986 World Rowing Championships (Nottingham, GBR)
Coxless Four (4-)	M	Heavy	*	5:38.000	GBR	2012 World Rowing Championships (Lucerne, SUI)
	M	Light		5:43.160	Denmark	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Heavy	*	6:14.360	New Zealand	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Light		6:36.400	U.S.A.	1994 World Rowing Championships (Indianapolis, USA)
Double sculls (2X)	M	Heavy	*	5:59.720	Croatia	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	M	Light	*	6:05.360	RSA	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Heavy	*	6:37.310	Australia	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Light	*	6:47.690	Netherlands	2016 World Rowing Cup III (Poznan, POL)
Coxed pair (2+)	M	Heavy		6:33.260	New Zealand	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
Coxless pair (2-)	M	Heavy	*	6:08.500	New Zealand	2012 Olympic Games (London, GBR)
	M	Light		6:22.910	Switzerland	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Heavy	*	6:49.080	New Zealand	2017 World Rowing Cup II (Poznan, POL)
	F	Light		7:18.320	Australia	1997 World Rowing Championships (Aiguebelette, FRA)
Single scull (1X)	M	Heavy	*	6:30.740	New Zealand	2017 World Rowing Cup II (Poznan, POL)
	M	Light		6:43.370	Italia	2014 World Rowing Championships (Amsterdam, NED)
	F	Heavy	*	7:07.710	Bulgaria	2002 World Rowing Championships (Seville, ESP)
	F	Light		7:24.460	New Zealand	2015 World Rowing Cup II (Varese, ITA)

ボートの種類 (Boat type), 性別 (Sex), 体重カテゴリー (Category), オリンピック種目の有無 (Olympic: O.L.), 最高タイム (Time), 国 (Nation) および大会 (Race) を記載.

ローイング動作は, ブレードが水中に入った状態でハンドルを後方へと牽引することによって大きな推進力を発生させるドライブ局面 (図 2-1, (a)~(d)) と, ブレードが空中にある状態で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リカバリー局面 (図 2-1, (e)~(h)) によって構成される. レース中, 漕手はローイング動作を 1 分間におよそ 34 - 42 回の頻度 (ストロークレート) で繰り返しており (Steinacker, 1993), 総ストローク数は 210 - 230 本にも達する. さらに, レース中の艇速度 (または発揮パワー) は一定ではな

く、それぞれの局面によって変化する (Steinacker, 1993). スタート直後は特に大きな力を発揮し、それを高いストロークレートで繰り返すことによって静止した艇を一気に加速させる (スタートスパート局面). この局面は 10 秒程度続き、発揮パワーおよびストロークレートは最も高い値に達する (それぞれ 600~700 watt および 36~42 strokes/min). その後は、獲得した艇速度を維持しつつ、発揮パワーおよびストロークレートをわずかに低下させ (スタート局面, 450~600 watt および 34~38 strokes/min), この局面はスタート局面と呼ばれる. スタート局面が終わると、可能な限り高い艇速度を維持するために、発揮パワーおよびストロークレートをさらに低下させる (350~450 watt および 30~36 strokes/min). この局面はコンスタント局面と呼ばれ、レースの大部分 (6 分テストの場合,

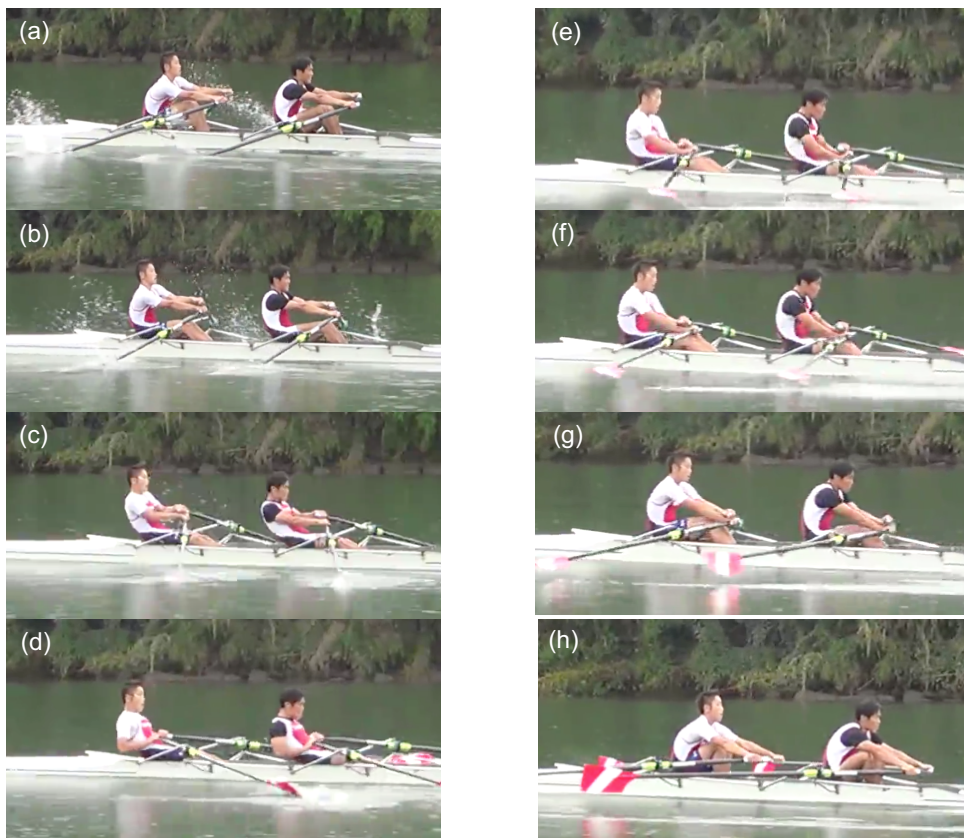


図 2-1. ローイング動作の連続写真.

オールを水中に沈める (キャッチ, a) と同時に下肢、股関節の順に伸展させ (b および c), その後上肢を屈曲させハンドルを引き付けること (d) によって推進力を発生させる (ドライブ局面). その後は、上肢の伸展 (e), 股関節の屈曲 (f), 下肢の屈曲の順に最初のポジションへと移動する.

およそ 4~4.5 分) がこの局面によって占められている。その後、ゴール直前では再度発揮パワーおよびストロークレートを増加させるラストスパート局面が出現する (400~500 watt および 34~38 strokes/min)。このようなスタート直後に最も高い艇速度を獲得し、その後、レースの進行とともに徐々に艇速度を低下させ、レース終盤で再度上昇させるペース戦略は、国際レベル (Garland, 2005) および国内レベル (松下ほか, 2006) でも同様に報告されている。松下ほか (2006) は、こうしたボート競技独特のペース戦略について、ボート競技は後ろ向きに艇を推進させているため、相手に先行されてしまうと、相手との距離を視覚的に認識することができなくなることに関連している可能性があると考えしている。一方、Garland (2005) は、相手との距離感といった心理的な影響を受けないエルゴメータを用いた 2000 m シミュレーションテストにおいても、水上ほど著しくはないものの同様のペース戦略が認められた (図 2-2) ことを報告している。彼らは、運動開始直後において特に高い強度で運動を遂行するペース戦略について、血流量 (Hughson et al., 1996)、換気量 (Whipp and Ward, 1990) または  $\dot{V}O_2$  (Ozyener et al., 2001) を素早く増加 (応答) させるといった生理学的な側面も関連している可能性を指摘している。

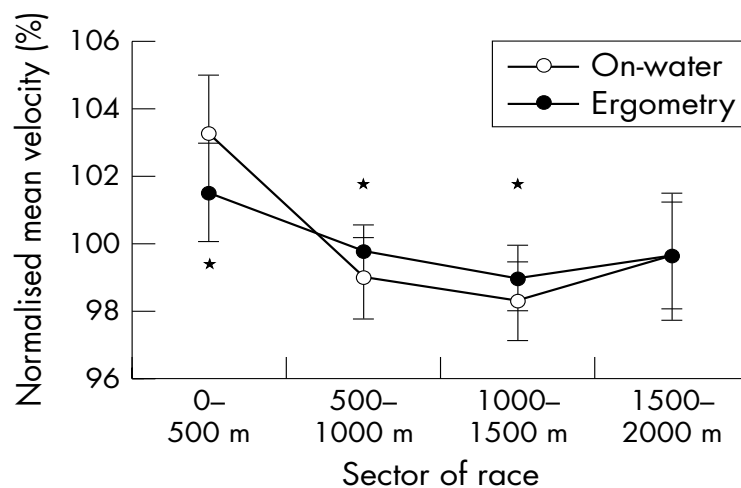


図 2-2. 水上 (○) およびエルゴメータ (●) における 2000 m テストのペース変化 (Garland, 2003 より抜粋)。縦軸はレース中の平均速度によって 500 m 毎の平均速度を正規化した値を示す。図中の \* は条件間 (水上またはエゴメータ) で有意な差が認められたことを表す ( $p < 0.05$ )。

## 1.2. レース中の生理応答特性

レース中、 $\dot{V}O_2$  はスタート直後から急峻な増加を示し、2～5 分後までに最高値へと到達し、最後のおよそ1分間を除いてほぼ  $\dot{V}O_{2max}$  の水準で推移することが報告されている(図2-3, Hagerman, 2000; Pripstein et al., 1999). また, Hagerman (2000) は, 6分間シミュレーションテストのパフォーマンスが,  $\dot{V}O_{2max}$  または  $\dot{V}O_{2peak}$  といった指標よりも, スタート後の1分間と運動終了前の1分間の除いた4分間における平均  $\dot{V}O_2$  と強い相関関係を示すことを報告し, ボート選手に求められる能力として,  $\dot{V}O_{2peak}$  や  $\dot{V}O_{2max}$  が高いことに加えて, 相対的に高い酸素摂取水準( $\% \dot{V}O_{2max}$ )で運動が継続できる点を挙げている.

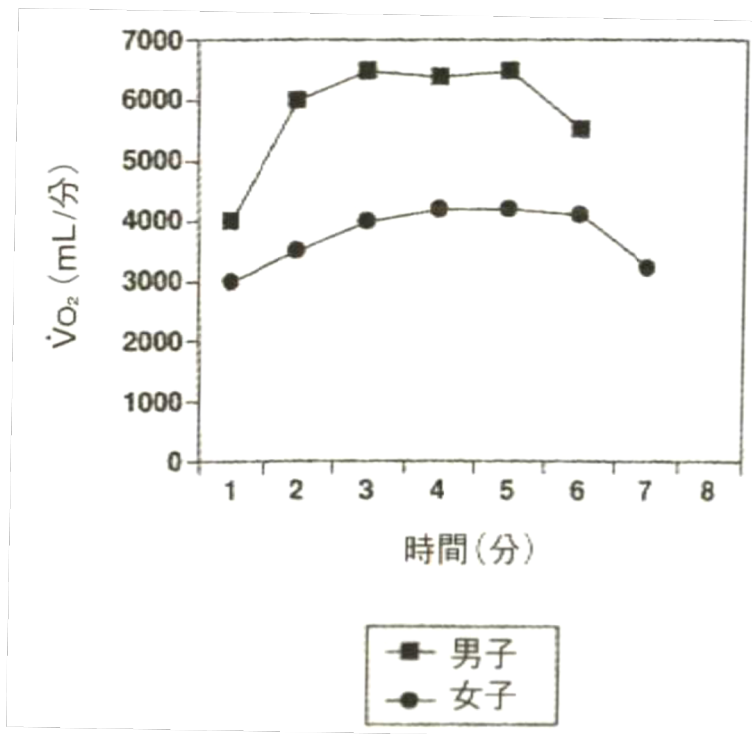


図2-3. ローイングエルゴメータを用いた6分間(男子)および7分間(女子)のシミュレーションテスト中の  $\dot{V}O_2$  応答 (Hagerman, 2000. より抜粋). 男子の場合は, 3分目以降, 女子の場合は4分目以降で,  $\dot{V}O_2$  がほぼ  $\dot{V}O_{2peak}$  の水準で推移する.

運動中のエネルギー供給系は, ATP-PCr 系, 解糖系および酸化系に分類され, 運動強度が高くなるほど, ATP-PCr 系および解糖系, すなわち無酸素性代謝の貢献が高まるこ

とが知られている。特に、解糖系によるエネルギー供給の過程では、骨格筋内で乳酸が産生され、その後、血中へと放出される (van Hall et al., 2009)。Åstrand and Rodahl (1987) は、ボート選手を対象として、レース終了直後の血中乳酸濃度を測定したところ、 $16.6 \pm 2.4$  mmol/L (12.0~17.2 mmol/L) に達していたことを報告している。また、Hagerman et al. (1978) は、33名のエリートボート選手を対象として、6分間のレースシミュレーションテストを2回実施させ、1回目は最後まで漕ぎ切らせたのに対して、2回目は運動開始1, 2, 3, 4または5分後のいずれかでテストを中断させ、そのときの血中乳酸濃度を測定し、それらを比較することによってレースシミュレーションテスト中の血中乳酸濃度の動態を検討した。その結果、血中乳酸濃度は運動開始2分後までに最高値に達し、その後も比較的高い値 (16~18 mmol/L) で推移することを明らかにしている。これらの報告は、レース中は有酸素性代謝に加えて、無酸素性代謝からのエネルギー供給も高い水準で維持されていることを示唆している。

### 1.3. ボート選手の体力特性

2000 m または 6 分間のシミュレーションテストのパフォーマンスは、 $\dot{V}O_{2peak}$  および  $\dot{V}O_{2max}$  と密接に関連することが報告されており、それらの指標に代表される有酸素性能力はボート競技において成功を納めるためには必須の能力であるとされている。Hagerman (2000) によると、米国の男子および女子代表選手の  $\dot{V}O_{2peak}$  は、重量級男子および女子において、それぞれ 7.0 および 5.5 L/min を超える値であり、軽量級男子および女子では、それぞれ重量級選手から 500~1000 mL/min 程度低い値を示す。また、フランスの国際および国内レベルの選手の  $\dot{V}O_{2peak}$  は、重量級男子および女子選手において、それぞれ 5.7 および 3.8 L/min であり、軽量級男子および女子選手において、それぞれ 5.1 および 3.5 L/min であったことが報告されている。ボート競技において、選手の  $\dot{V}O_{2peak}$  および  $\dot{V}O_{2max}$  は一般的に絶対値で評価される (Secher, 1993)。それは、ローイングの運動特性、すなわち体重が座席に支えられた座位姿勢でパワー発揮を繰り返すことと関連している

と考えられる。一方、自身の体重を支持し、それを移動させる走運動では、体重が重いことは走の経済性 (Running economy) を低下させ、その結果、走パフォーマンスに対して負の影響を及ぼす。そのため、ローイングと同様に持久系競技である陸上競技の中長距離走者と比較すると、ボート選手は絶対値で示した  $\dot{V}O_{2peak}$  または  $\dot{V}O_{2max}$  は高い値を、体重たりに示した  $\dot{V}O_{2peak}$  または  $\dot{V}O_{2max}$  は低い値を示す (表 2-1)。また、Yoshiga and Higuchi (2003) は、広範な身体および体力特性を有する男子ボート選手 120 名 (身長: 1.64~1.93 m, 体重: 58~95 kg, 年齢: 18~24 歳, パフォーマンスタイム: 378~484 秒:  $\dot{V}O_{2peak}$ : 3.4~5.6 L/min) および女子ボート選手 71 名 (身長: 1.53~1.73 m, 体重: 43~69 kg, 年齢: 18~24 歳, パフォーマンスタイム: 437~556 秒:  $\dot{V}O_{2peak}$ : 2.1~3.9 L/min) に対して、2000 m シミュレーションテストおよび  $\dot{V}O_{2max}$  の測定を実施し、パフォーマンスタイムが身長 ( $r = -0.81$ ), 体重 ( $r = -0.85$ ), 除脂肪体重 ( $r = -0.91$ ) および  $\dot{V}O_{2max}$  ( $r = -0.90$ ) とそれぞれ強い相関関係を示したこと、さらに、同等のパフォーマンスタイムを有する男性および女性被験者を比較した場合、身長および体重の差 (それぞれ 10 % および 9 %) と比較して、除脂肪体重の差が少なかったこと (4 %) を報告している。このことは、ボート選手にとって、絶対値で示した  $\dot{V}O_{2peak}$  または  $\dot{V}O_{2max}$  が高いこと、またそれらと関連する除脂肪体重が多いことが、高いパフォーマンスを発揮するうえで重要であることを示唆している。

$\dot{V}O_{2max}$  が心肺および循環能力といった中枢因子が強く反映された指標であるのに対して、筋などの末梢因子が反映された有酸素性能力の指標として乳酸性代謝閾値 (Lactate threshold: LT) や血中乳酸濃度の蓄積開始点 (Onset accumulation of blood lactate: OBLA) がある。これまでに、LT および OBLA 時の発揮パワーや  $\dot{V}O_2$  は、ローイングパフォーマンスとの間で有意な正の相関関係を示すことが報告されている (Cosgrove et al., 1999; Bourdin et al., 2004; Ingham et al., 2002; Lacour et al., 2009)。また、エリートボート選手では、無酸素性代謝閾値 (Anaerobic threshold: AT) が出現する相対強度が高いこと (83 %  $\dot{V}O_{2max}$ ) が報告されている (Mickelson and Hagerman, 1982)。こうした報告は、エリートボート選手の骨格筋線維において酸化能力に優れる遅筋線維 (Type I 線維) の割合が高いこと (Hagerman and

表2-2. ボート選手および陸上中長距離選手の身体プロフィール, パフォーマンスレベルおよび $\dot{V}O_{2max}$ .

Study	Sport	Performance level	Performance time			n	Sex	Height (m)	Weight (kg)	Age (years)	$\dot{V}O_{2max}$ (L/min)	$\dot{V}O_{2max}$ / BW (mL/min)
			m:sec (0)	% World record	% World record							
Gee et al. (2012)	Rowing	Club level	5:53	95.1	8	M	1.93±0.03	96.3±5.2	25.8±2.3	5.90±0.08	61.1±0.6	
Ingham et al. (2007)	Rowing	Elite level	5:56±0:06	94.6	4	M	1.88	95	21.1	6.62±0.22	69.7±5.3	
Ingham et al. (2007)	Rowing	International level	5:59	93.8	6	M	1.90±0.07	89.0±7.1	26.1±3.6	5.71±0.31	64 <sup>a</sup>	
Lacour et al. (2009)	Rowing	National to international	6:21.2±0:6.6	93.6*	23	M	1.80±0.04	74.0±1.8	23.0±3.7	5.05±0.20	68 <sup>a</sup>	
Mikulic (2011)	Rowing	National to international	6:04.9±0:09.8	92.2	31	M	1.90±0.05	88.6±5.1	22.6±3.7	5.68±0.32	64 <sup>a</sup>	
Shimoda et al. (2009)	Rowing	University rowers	6:49.3±0:12.3	87.1*	16	M	1.76±0.07	72.5±6.4	20.7±0.9	4.10±0.40	57 <sup>a</sup>	
Russell et al. (1998)	Rowing	Club rowers	6:33.9±0:09.5	85.5	14	M	1.86±0.05	85.6±8.3	22.8±5.1	6.04±0.62	71 <sup>a</sup>	
Bourdin et al. (2004)	Rowing	Elite level	6:34	85.4	8	M	1.87±0.05	89.5±5.4	25.0±1.5	5.00±0.14	55.6±1.2	
de Campos Mello et al. (2009)	Rowing	Adult rower	6:42.0±0:15.0	83.7	8	M	1.84±0.06	81.4±6.7	23.8±5.5	5.22±0.56	64 <sup>a</sup>	
Bourdin et al. (2004)	Rowing	Schoolboy rowers	6:43.2±16.2	83.5	19	M	1.87±0.05	85±8	18±2	4.60±1.45	54 <sup>a</sup>	
Sandals et al. (2006)	800 m running	Middle distance runners	1:52.0±0:03.3	91.0	8	M	1.78±0.10	67.8±4.7	25.8±3.3	4.56 <sup>a</sup>	67.2±4.3	
Tanji et al. (2017)	800 m running	University runners	1:53.1±0:02.1	90.1	12	M	1.70±0.05	58.7±3.1	19.9±0.1	3.96 <sup>a</sup>	67.4±5.3	
品田ほか (2012)	800 m running	University runners	2:12.6±0:05.4	85.4	11	M	1.71±0.04	57.8±5.6	21.8±4.0	3.40 <sup>a</sup>	58.9±4.2	
Duffield et al. (2005)	800 m running	Trained	2:06.0±0:05.4	80.9	9	M	1.80±0.06	67.8±5.6	19.8±3.5	4.23 <sup>a</sup>	62.4±3.4	
Bosquet et al. (2006)	800 m running	Highly trained	2:07.4±0:04.5	80.0	8	M	1.80±0.06	68.9±6.8	22.9±4.1	4.83 <sup>a</sup>	70.1±6.5	
Hanon et al. (2008)	1500 m running	National level	4:05.4±0:06.04	83.9	11	M	1.75±0.04	65.4±3.9	22.6±4.7	4.32 <sup>a</sup>	66.1±7.0	
Duffield et al. (2005)	1500 m running	Trained	4:23.0±0:08.5	78.3	10	M	1.79±0.08	69.8±7.7	25±6	4.62 <sup>a</sup>	66.2±4.9	
Duffield et al. (2005)	3000 m running	Trained	9:37.7±0:23.6	76.3	8	M	1.79±0.08	70.5±7.8	26±6	4.84 <sup>a</sup>	68.6±4.5	

文献 (Study), 競技 (Sport), 競技レベル (Performance level), 競技時間 (Performance time), 被験者数 (n), 身長 (Height), 体重 (Weight), 年齢 (Age), 最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ), 体重あたりの  $\dot{V}O_{2max}$  ( $\dot{V}O_{2max}$  / BW) を記載した。%World record: 男子軽量級ボート選手 (5:36.6), 陸上競技 800 m 種目 (1:41.9), 1500 m 種目 (3:26.0), 3000 m 種目 (7:20.7) の世界記録を基準として, それぞれの速度に対する到達率を示した。a:  $\dot{V}O_{2max}$  または  $\dot{V}O_{2max}$  / BW のいずれかが報告されていた場合には, 体重から  $\dot{V}O_{2max}$  / BW または  $\dot{V}O_{2max}$  をそれぞれ算出した。\*: 平均体重がエルゴメータを用いた 2000 m レースにおける軽量級の基準 (75 kg) に達していなかったため, 軽量級選手として評価した。

Staron, 1983; Mickelson and Hagerman, 1982) や、酸化系を担うミトコンドリアの密度が高いこと (Hagerman and Staron, 1983) とも一致するものである。

前述したように、レース中の  $\dot{V}O_2$  は、スタート直後から急峻な増加を示し、その後は最後の1分間を除いてほぼ  $\dot{V}O_{2max}$  付近で推移する (図2-3, Hagerman, 2000; Pripstein et al., 1999). このことは、レース中の大部分において有酸素性代謝によるエネルギー供給が非常に高いレベルで維持されることを示唆している。一方、運動を開始してから有酸素性代謝によるエネルギー供給が高まるまでには時間的な遅延が生じることが知られているが (Poole and Jones, 2012), スタート局面では特に高い運動強度 (発揮パワー) で運動が遂行される (Garland, 2005; 松下ほか, 2006). また、ラストスパート局面では、有酸素性代謝からのエネルギー供給がほぼ最大 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) に達しているにも関わらず、さらに高い運動強度 (発揮パワー) で運動が遂行される (Garland, 2005; 松下ほか, 2006). こうした局面では、無酸素性代謝の貢献が高まると考えられる。このことは、レース後の血中乳酸濃度が非常に高い値を示すこと (12.0~17.2 mmol/L, Åstrand and Rodahl, 1987) や、レース中の血中乳酸濃度が高い値で維持されるという報告 (Hagerman et al., 1978) とも一致している。以上の点から、レース中のエネルギー供給には、有酸素性および無酸素性の両代謝系がそれぞれ高いレベルで貢献していることが示唆され、これまでも多くの先行研究によって、レース中の有酸素性および無酸素性代謝によるエネルギー供給量の定量が試みられてきた (Hagerman et al., 1978; Hagerman and Lee, 1971; Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998; Clark, 2016). しかし、有酸素性代謝によるエネルギー供給量が、運動中の  $\dot{V}O_2$  を測定することによって比較的容易にかつ直接的に定量することが可能であるのに対して、無酸素性代謝によるエネルギー供給量は直接的に定量することが不可能であるため、筋生検法 (バイオプシー法)、酸素負債法、血中乳酸濃度または酸素借法などが用いられてきた。



## 2. 有酸素性代謝とその定量方法

有酸素性代謝では、血中遊離脂肪酸および解糖系によって産生されたピルビン酸が、ミトコンドリア内のミトコンドリアマトリックスに取り込まれ、それぞれアセチル CoA へと変換された後に TCA 回路と呼ばれる反応系に入り、クエン酸-cis-アスコット酸-イソクエン酸-2-オキシグルタル酸-スクシニル CoA-コハク酸-フマル酸-リンゴ酸-オキサロ酢酸-クエン酸と変化する。こうした反応系では電子が生成され、それが電子伝達系で受け渡される過程でアデノシン 3 リン酸 (Adenosine tri-phosphate: ATP) が合成される。この ATP 合成の過程で生じる水素を受け取る働きに酸素が消費されるため、これら一連の代謝系は有酸素性代謝と呼ばれる。

これまでに運動中の有酸素性代謝によるエネルギー供給量の測定には、呼気を分析する全身性の  $\dot{V}O_2$ 、および動静脈酸素格差と血流量を測定する局所性の  $\dot{V}O_2$  が用いられてきた (Bangsbo et al., 1990a)。全身性の  $\dot{V}O_2$  測定では、被験者にマスクを装着させることで、運動中の全身の酸素消費量、すなわち有酸素性代謝量が評価できることから (Hagerman, 1984)、走運動や自転車運動をはじめサッカーやハンドボールなどのフィールドスポーツでも広く用いられている (Deka et al., 2017; Zagatto et al., 2016)。一方、局所性の  $\dot{V}O_2$  測定は、動脈および静脈にカテーテルを設置し、そこから得られた動静脈酸素格差に血流量を掛け合わせることで  $\dot{V}O_2$  を算出する。そのため、自転車エルゴメータや腕クランキングエルゴメータのような運動において、特定の筋群における有酸素性代謝量を評価することが可能である。また、全身性の  $\dot{V}O_2$  測定の場合、運動に動員された筋群における  $\dot{V}O_2$  に加えて、呼吸循環系に関連した筋活動に対する  $\dot{V}O_2$  が含まれてしまうことや、測定した  $\dot{V}O_2$  と骨格筋での酸素摂取量との間にタイムラグが生じるといった点に注意が必要であるが、ローイングのように全身の筋群が動員される運動において有酸素性代謝量を検討するためには、全身性の  $\dot{V}O_2$  を用いる必要がある。

### 3. 無酸素性代謝とその定量方法

#### 3.1. 骨格筋の収縮とエネルギー代謝

あらゆる運動は骨格筋が収縮することによって遂行され、その骨格筋の最小単位である筋原線維は、ミオシンフィラメントおよびアクチンフィラメントによって構成される (Huxley, 1957)。筋収縮を促す神経刺激を受け取ると、筋小胞体 (Sarcoplasmic reticulum: SR) からカルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) が放出され、それによってアクチンフィラメントとミオシンフィラメントの結合構造 (クロスブリッジ) が形成され、その結合が一旦解離したのちに再度結合し、ミオシンフィラメントがアクチンフィラメントを牽引 (パワーストローク) することによって筋長が短縮し筋収縮が生じる。この一連の過程は、クロスブリッジサイクルと呼ばれ、その過程において ATP が消費される。そのため、筋収縮を維持するためには、クロスブリッジサイクルにおける ATP 需要量を満たすように ATP を再合成し続ける必要があり、骨格筋では内部に貯蔵されていた ATP の利用に加えて、3 つの経路すなわち ATP-PCr 系、解糖系および酸化的リン酸化によって ATP の再合成が行なわれる。そのうち、ATP-PCr 系および解糖系は嫌気的環境下でも ATP の再合成が行なわれることから無酸素性代謝、酸化的リン酸化は好気的環境下で ATP 合成が行なわれることから有酸素性代謝に分類される。

#### 3.2. ATP 供給機構

##### 3.2.1. ATP ストア

安静時の骨格筋には ATP が含まれており (ATP ストア)、その量は非常に短時間の日常的な動作における ATP 需要量を満たすとされている。例えば、Kemp et al. (2007) は、 $^{31}\text{P}$  磁気共鳴スペクトル (Nuclear magnetic resonance spectroscopy: NMR) 法を用いて、安静時における大腿四頭筋の ATP 濃度がおよそ  $8 \text{ mmol/L muscle cell water (mw)}$  であったことを報告している。これと、中強度運動における 1 分間あたりの ATP 需要率がおよそ  $24 \text{ mmol/Lmw/min}$  であること (Cannon et al., 2014) を考え併せると、ATP ストアのみでそうし

た中強度運動がおよそ 20 秒間持続できることになる。一方、6 秒間の全力ペダリング運動の場合、ATP 需要率はおよそ 400 mmol/Lmw/min であり (Gray et al., 2006; Kemp et al., 2007), ATP ストアのみではおよそ 1 秒しか持続できない。しかし、実際には、骨格筋内の ATP 需要量の増加に応じて、ATP が素早く再合成 (供給) されるため、骨格筋内の ATP 濃度は恒常性が保たれる (Allen et al., 1997)。

### 3.2.2. ATP-PCr 系

骨格筋内の ATP 需要量の増加に応じて、最も速く ATP 供給を行なうのがクレアチンキナーゼ (Creatine kinase: CK) を触媒とした PCr の分解による ATP 再合成である (Barclay, 2017)。CK の作用により PCr から取り出されたリン酸は、ADP と結合することによって ATP を生成する。また、安静時の骨格筋における PCr 濃度 (~33 mmol/Lmw) は ATP 濃度 (~8 mmol/Lmw) のおよそ 4 倍であり (Kemp et al., 2007), これは上述した中強度運動 (ATP 需要率がおよそ 24 mmol/Lmw/min) であればおよそ 80 秒間、全力ペダリング運動 (同じく 400 mmol/Ldw/min) であればおよそ 4 秒間分の ATP 需要量に相当する。ATP-PCr 系による ATP の再合成過程は、嫌気的環境下かつ乳酸の産生を伴わないため非乳酸性無酸素性代謝 (Anaerobic alactic metabolism) とも呼ばれる (di Prampero and Ferretti, 1999)。また、ATP 再合成中には H<sup>+</sup>が消費されるため、細胞内の pH (Intracellular pH: pHi) はアルカリ性へ傾く (Jones et al., 2009)。さらに、運動中に ATP-PCr による ATP 再合成によって減少した PCr は、運動終了後に ATP を消費し Cr から PCr を再合成することで安静時の PCr 濃度へと回復される。

### 3.2.3. 解糖系

解糖系では、骨格筋内に取り込まれたグルコースや骨格筋内に蓄えられているグリコーゲンをピルビン酸に分解する反応を経て ATP が産生される (Thomas et al., 2012)。ピルビン酸の一部は、ミトコンドリア内のミトコンドリアマトリックスに取り込まれて有酸

素性代謝系で利用される。それ以外のピルビン酸は、乳酸脱水素酵素 (Lactate dehydrogenase: LDH) を触媒として乳酸へと変換され、モノカルボン酸輸送担体 4 (Monocarboxylate transporter 4: MTC4) によって血中へと放出される (Dimmer et al., 2000; van Hall, 2010; van Hall et al., 2009)。また、血中へと放出された乳酸は、心筋や遅筋線維に多く含まれる MCT1 によって取り込まれ、LDH を触媒としてピルビン酸に変換されたのちにミトコンドリアマトリックス内に取り込まれて有酸素性代謝系で利用される。解糖系による ATP 再合成は運動強度の増加に伴って亢進し、ミトコンドリアに取り込まれなかったピルビン酸が乳酸に変換され血中へと放出される。そのため、運動強度に対して血中乳酸濃度は乳酸性代謝域値 (Lactate threshold: LT) を境に急峻な上昇を示す。

### 3.3. 無酸素性代謝量の定量方法

#### 3.3.1. 筋生検法 (筋バイオプシー法)

これまでに述べてきたように、無酸素性代謝 (ATP-PCr 系および解糖系) によって ATP が再合成される過程では、骨格筋内で代謝物質の増加または減少が生じる。そこで筋生検法では、運動の前後で採取した骨格筋サンプルにおける無酸素性代謝に関連した代謝物質の濃度を測定し、そこから乾燥させた筋サンプルまたは水分を含んだ筋サンプル 1 kg あたりの ATP 供給量を算出している (mmol ATP/kg *dm* または mmol ATP/kg *wm*)。Medbo and Tabata (1993) は、骨格筋内の PCr および乳酸濃度の変化量から、30 秒、1 分および 2~3 分で疲労困憊に至る自転車定常負荷運動における無酸素性代謝からの ATP 供給量が、それぞれ 156, 224 および 232 mmol ATP/kg *wm* であったことを報告している。一方で、乳酸は骨格筋内で産生された後に、血中へと放出され他の組織に取り込まれるため、運動前後で採取した骨格筋サンプルには放出された乳酸が含まれていない。そこで、カフを用いて局所の血流量を制限し、骨格筋内に代謝物質を留める方法も用いられている。Spriet et al. (1987) は、カフを用いて下肢血流を制限した場合、およそ 1.7 分間の膝伸展運動における無酸素性代謝からの ATP 供給量がおよそ 294.5 mmol ATP/kg *dm* であったことを報告

している。さらに、Bangsbo et al. (1990a) は、カフによる血流制限に加えて、骨格筋から放出された乳酸およびピルビン酸の量を試算して加えることにより、3分間の膝伸展運動における無酸素性代謝による ATP 供給量が  $370 \text{ mmol ATP/kg dm}$  であったことを報告している。このように、筋生検法は、骨格筋内の代謝物質を直接的に測定できる唯一の方法ではあるが、骨格筋から関連代謝物質が放出される影響をどのように加味するかによって、算出される ATP 供給量の値には差異が認められる。さらに、筋生検法によって算出される無酸素性代謝からの ATP 供給量は骨格筋サンプル  $1 \text{ kg}$  あたりで表されており、運動時における無酸素性代謝からの総 ATP 供給量を推定するためには、その運動で動員された骨格筋量を正確に見積もる必要がある。この点について、Bangsbo (1998) は、走運動や自転車運動のように多くの筋群が動員される運動では、骨格筋サンプルで得られた値が他の動員筋群の値を反映していない可能性があることや、動員筋量を正確に見積もることが困難であることを指摘し、膝伸展運動のような特定の筋群のみが動員される運動モデルを用いることで、そうした問題の影響を最小限に止めることができるとしている。

### 3.3.2. 酸素負債法

高強度運動後、 $\dot{V}O_2$  は時間の経過とともに安静時の  $\dot{V}O_2$  水準へと緩やかに減少し、その間における安静時の  $\dot{V}O_2$  水準を超えて消費された  $\dot{V}O_2$  の総量は酸素負債と定義される。初期の研究において Hill (1928) は、運動終了後の安静時の  $\dot{V}O_2$  を超えて消費される  $\dot{V}O_2$  は運動中に産生された乳酸の除去に関連するものであると考えていた。その後、Margaria (1933) は、運動終了後の  $\dot{V}O_2$  を、終了直後にみられる急峻な減少成分と、その後に見られる緩やかな減少成分に分け、そのうち前者が非乳酸性無酸素性代謝 (Alactic anaerobic metabolism)、すなわち PCr の再合成と関連した代謝量であること、また後者を乳酸性無酸素性代謝 (Lactic anaerobic metabolism)、すなわちグリコーゲンの再合成と関連した代謝量であることを示唆した。そのため、それ以降の研究では、酸素負債は運動中の無酸素

性代謝量を評価する指標として用いられている (Hagerman et al., 1978).

しかし、その後の研究によって、酸素負債量は、運動によって低下した PCr の再合成や乳酸をグルコースに変換するための  $\dot{V}O_2$  以外にも、1) ミオグロビン中の酸素ストアの回復、2) 体温上昇、3) カテコラミンの上昇、4) 運動によって増加した換気量や心拍数などの影響を受けること (Chad and Wenger, 1988; Gaesser and Brooks, 1984) が指摘され、運動中の無酸素性代謝量を過大評価することが明らかになった (Bangsbo et al., 1990a).

### 3.3.3. 血中乳酸濃度

解糖系による ATP 再合成過程において生成されるピルビン酸は、乳酸脱水素酵素 (Lactate dehydrogenase: LDH) を触媒として乳酸へと変換され、その後、MCT4 を介して血液中へと放出され、血中乳酸濃度を上昇させる (八田, 2009). そのため、これまでに超最大運動後の最高血中乳酸濃度 (Peak blood lactate concentration:  $La_{peak}$ ) は、無酸素性代謝の貢献を間接的に評価する指標として広く用いられてきた (Lacour et al., 1990; 佐伯ほか, 1999; Schnabel and Kindermann, 1983; Mero, 1988; Ohkuwa et al., 1984; Paterson et al., 1986). しかし、血中乳酸濃度は全身の乳酸量を表す指標ではないことや、血中へと放出された乳酸量と他の組織に取り込まれた乳酸量のバランスによって決定することから、その指標単独で運動中の解糖系によるエネルギー供給量を評価することは困難であることも指摘されている.

Margaria et al. (1963) は、1) 乳酸は筋内で産生された後に血中およびその他の組織へと素早く拡散すること、および2) 血液および人体の水分率はそれぞれ 80 % および 60 % に相当すると仮定し、運動後に測定した血中乳酸濃度を体重あたりの乳酸蓄積量 (g/kg または mmol/kg) に換算することで解糖系によるエネルギー供給量の定量を試みた. そのうえで、様々な運動時間の超最大運動を行なわせた結果、1) 1 分間あたりおよび体重 1 kg あたりの有酸素性エネルギー供給量 ( $\dot{V}O_2$  から算出, cal/kg/min) が最大に達する運動強度

から、1 分間あたりおよび体重 1 kg あたりの乳酸蓄積量が増加し始めること、2) 鍛錬者は非鍛錬者と比較して乳酸蓄積量が増加し始める強度が高いこと、3) 鍛錬者と非鍛錬者において運動強度と乳酸蓄積量の間には等しい傾きが認められたことから、乳酸 1 mmol あたりのエネルギー供給量を 84 kJ とした。この推定式は、 $\dot{V}O_{2max}$  強度において血中への乳酸蓄積が生じないと仮定していることなど問題もあるものの、運動後の血中乳酸濃度から解糖系によるエネルギー供給量が簡易的に評価できるため、その後もいくつかの研究によって用いられている (図 2-4, de Campos Mello et al., 2009; di Prampero and Ferretti, 1999; Maciejewski et al., 2013)。

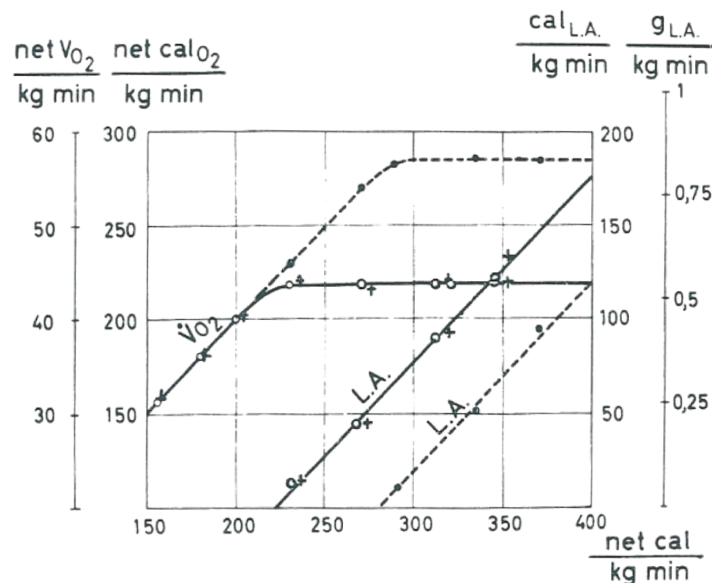


図 2 - 4.  $\dot{V}O_2$  および血中乳酸濃度の応答からみた運動強度とエネルギー消費量の関係 (Margaria et al. (1963) より抜粋)。

横軸は運動強度を 1 分間あたりのエネルギー消費量 (cal/kg•min) で表し、○および+は非アスリート 2 名、●はアスリート 1 名における  $\dot{V}O_2$  から算出した 1 分間あたり体重 1 kg あたりのエネルギー消費量 (net $\dot{V}O_2$ /kg/min および net cal $O_2$ /kg/min), および 1 分間あたり体重 1 kg あたりの血中乳酸の増加量 (g $_{LA}$ /kg/min) を表す。非アスリートでは、220 cal/kg/min の強度において  $\dot{V}O_2$  から見積もった有酸素性エネルギー供給量が最大に達し、ほぼ同強度において血中乳酸の増加量が上昇し始める。このことから Margaria et al. (1963) は、この強度を境界線として、それよりも低い強度では運動中のエネルギー消費量が有酸素性代謝によって賄われ、それよりも高い強度では無酸素性代謝からのエネルギー供給が開始されると仮定した。さらに、非アスリートおよびアスリートにおいて、運動強度に対する血中乳酸の増加量の傾きはほぼ一致しており、最大下強度から運動強度に対してエネルギー消費量が一定の割合で増加すると仮定した場合、血中乳酸の増加量 (g $_{LA}$ ) から無酸素性エネルギー供給量が推定できることを紹介した (222 cal/g $_{LA}$ )。

一方, Margaria et al. (1963) の方法では, 乳酸は骨格筋で産生された後に素早く体内に拡散すると仮定していたが, 実際には血中へと放出されるまでにタイムラグが生じており, 加えて血中から他の組織への取り込みも行なわれる (van Hall, 2010; van Hall et al., 2009). そこで, Freund and Gendry (1978) は, こうした乳酸の代謝経路を踏まえて乳酸の産生量を推定するために, 運動後の血中乳酸濃度の動態から乳酸代謝を評価する指数関数モデルを提案した. この指数関数モデルは, 運動終了  $t$  分後の血中乳酸濃度 ( $La(t)$ ) を, 運動終了直後の血中乳酸濃度 ( $La(0)$ ), 時間の経過に伴って血中乳酸濃度を上昇させる, すなわち骨格筋から血中へ乳酸放出を評価する指数関数 (第 2 項) と, 時間の経過に伴って血中乳酸濃度を低下させる, すなわち他の組織による乳酸の取り込みを評価する指数関数 (第 3 項) によって構成されている (式 2-1).

$$La(t) = La(0) + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t}) \quad (\text{式 2-1})$$

このとき  $La(t)$  は運動終了  $t$  分後の血中乳酸濃度を表し,  $La(0)$  は運動終了直後の血中乳酸濃度を表している.  $A_1$  および  $A_2$  は指数関数の振幅を,  $\gamma_1$  および  $\gamma_2$  は時定数をそれぞれ表している. その後, この指数関数モデルは, Freund と Zouloumian の研究グループを中心にその妥当性が検証され, 1) 血流が制限される姿勢で運動を行なわせた場合や, 乳酸の代謝速度を高めるために軽運動を行なわせた場合, 数理モデルによって評価した乳酸の除去速度 ( $\gamma_2$ ) にそれらの影響が反映されること (Freund and Zouloumian, 1981a), 2) 指数関数モデルで得られる各係数 ( $A_1, A_2, \gamma_2$  および  $\gamma_1$ ) と乳酸代謝をシミュレーションする 2 区画モデル (Two compartment model) を組み合わせて, 血中乳酸濃度から骨格筋内の乳酸濃度を推定することが可能であり, それと筋生検法で採取した筋サンプルから実測した乳酸濃度がよく一致することが報告されている (Zouloumian and Freund, 1981a, b; Freund and Zouloumian, 1981b). 2 区画モデルとは, 乳酸代謝に関わる組織を, 運動に動員された筋群 (Volume of muscles involved in exercise:  $V_M$  in L) とそれ以外の組織 (Volume of remaining lactate space:  $V_S$ , in L) に分け, その合計を乳酸代謝に関連する組織の総量 (Volume of total lactate distribution space:  $V_{TLS}$ , in L) として乳酸代謝をシミュレーションするモデルであり



(Zouloumian and Freund, 1981b), 後述する総乳酸産生量の推定でも用いられている. さらに、数理モデルを用いて評価した  $\gamma_1$  および  $\gamma_2$ , すなわち骨格筋からの乳酸放出速度および血中からの乳酸除去速度は、骨格筋の毛細血管数やその密度と正の相関関係を示すことが報告されている (Messonnier et al., 2002). 筋と血液の接点である毛細血管の形状的な特徴は、筋から血中への乳酸放出と関連すると考えられるため、この結果は、 $\gamma_1$  や  $\gamma_2$  が乳酸の放出および除去速度を評価する指標となる Freund and Gendry (1978) の主張を支持している.

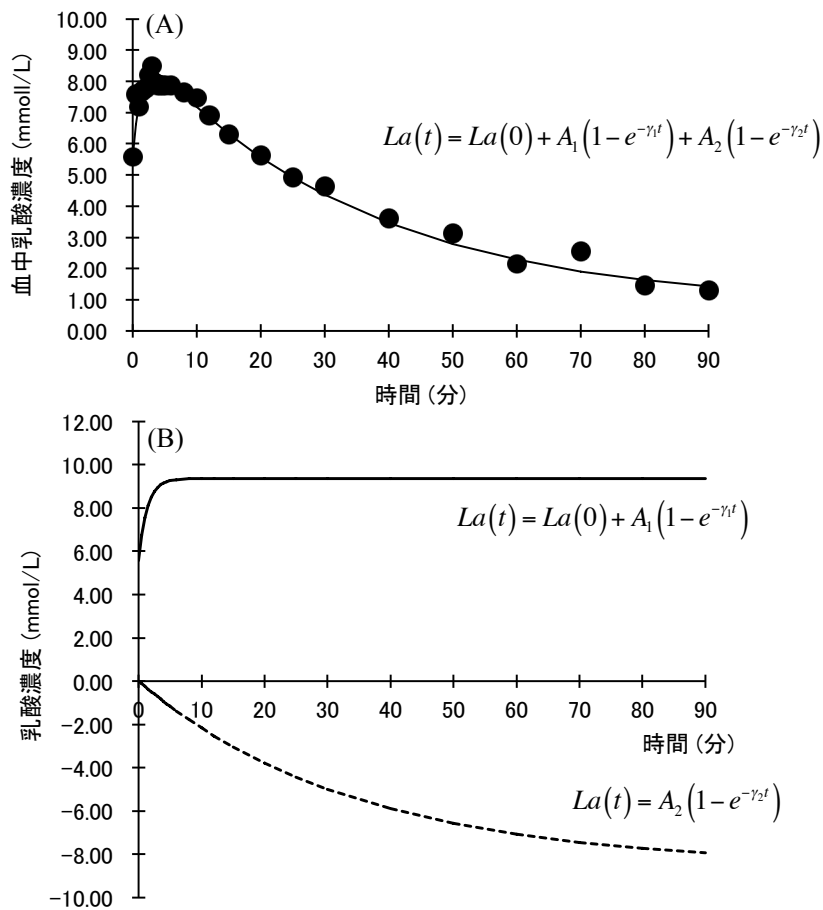


図 2-5. 超最大運動後における血中乳酸濃度の動態と数理モデルを用いた評価.

上段は超最大運動後における血中乳酸濃度の動態の実測値 (●) および実測値にフィッティングさせた数理モデルを実線で示した (A). 下段は数理モデルの第 1 項と第 2 項, および第 3 項の経過時間に対する変化をそれぞれ示した (B).

さらに近年の研究では、最高血中乳酸濃度に達した時点において筋内と血中の乳酸濃度がほぼ一致すること (Freund and Zouloumian, 1981b) から、乳酸代謝に関与する組織の容積 (Total lactate distribution space:  $V_{\text{TLS}}$ ) を積算することによって、最高血中乳酸濃度が出現した時点における乳酸蓄積量 (Quantity of lactate accumulated at La peak:  $Q_{\text{LaA}}$  at  $\text{La}_{\text{peak}}$ ) の推定が試みられている (Bret et al., 2003; Maciejewski et al., 2013). さらに、血中からの乳酸除去速度を表す  $\gamma_2$  を用いて、運動終了直後から最高血中乳酸濃度に到達するまでの間に除去された乳酸量 (Quantity of lactate removed:  $Q_{\text{LaR}}$ ) を推定し、最高血中乳酸濃度が出現した時点における  $Q_{\text{LaA}}$  at  $\text{La}_{\text{peak}}$  と足し合わせた値を運動によって蓄積した総乳酸量 (Quantity of lactate accumulated:  $Q_{\text{LaA}}$ ) と定義している先行研究も見受けられる. こうして求めた  $Q_{\text{LaA}}$  は、その算出過程において、被験者の体重 ( $\text{体重} \times 0.6 = V_{\text{TLS}} (\text{L})$ , Freund and Zouloumian, 1981b; Zouloumian and Freund, 1981a) や乳酸の代謝経路 ( $A_1, A_2, \gamma_2$  および  $\gamma_1$ ) が考慮されているため、運動終了直後の血中乳酸濃度や最高血中乳酸濃度よりも、無酸素性代謝によるエネルギー供給量を評価するうえで有用な指標である可能性が指摘されている (Maciejewski et al., 2013). しかし、 $V_{\text{TLS}}$  が被験者の体重のみから推定されているため、体組成や運動などによる脱水などの影響を受ける可能性が指摘されている点に留意する必要がある. さらに、数理モデルを利用して推定した  $Q_{\text{LaA}}$  は、無酸素性代謝のうち解糖系による ATP の再合成の程度を評価するものであり、ATP-PCr による ATP 再合成の影響が含まれていないという点にも留意が必要である.

### 3.3.4. 酸素借 (AOD) 法

Krogh and Lindhard (1920) は運動開始初期において  $\dot{V}\text{O}_2$  の応答が遅延することによって生じる  $\dot{V}\text{O}_2$  の不足分を酸素借 (Oxygen deficit) と定義し、その後、Hermansen (1969) は酸素借の概念を発展させ、運動中の無酸素性代謝量は運動中の OD から有酸素性代謝量を差し引くことによって定量できると紹介した. AOD 法を用いた初期の研究では、運動中の機械的効率を 25 % と仮定し、それによって運動中の OD を推定していた. その

後, Medbø et al. (1988) は, 個人毎に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運動中の OD を推定する方法を提唱した (図 2-6). 彼らは, この方法を用いて, トレッドミル上で被験者毎に走速度と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式を求め, その後, 15~300 秒で疲労困憊に至る複数の超最大運動を行わせたところ, 1) AOD がおよそ 120 秒で疲労困憊に達する超最大運動において MAOD に達したこと, 2) MAOD に到達した条件から運動強度を下げて運動時間を増加させても AOD は増加しなかったこと, 2) 低酸素および常酸素を吸入させて測定した AOD に有意差が認められなかったことから, AOD 法によって運動中の無酸素性エネルギー供給量が定量できることを示唆した.

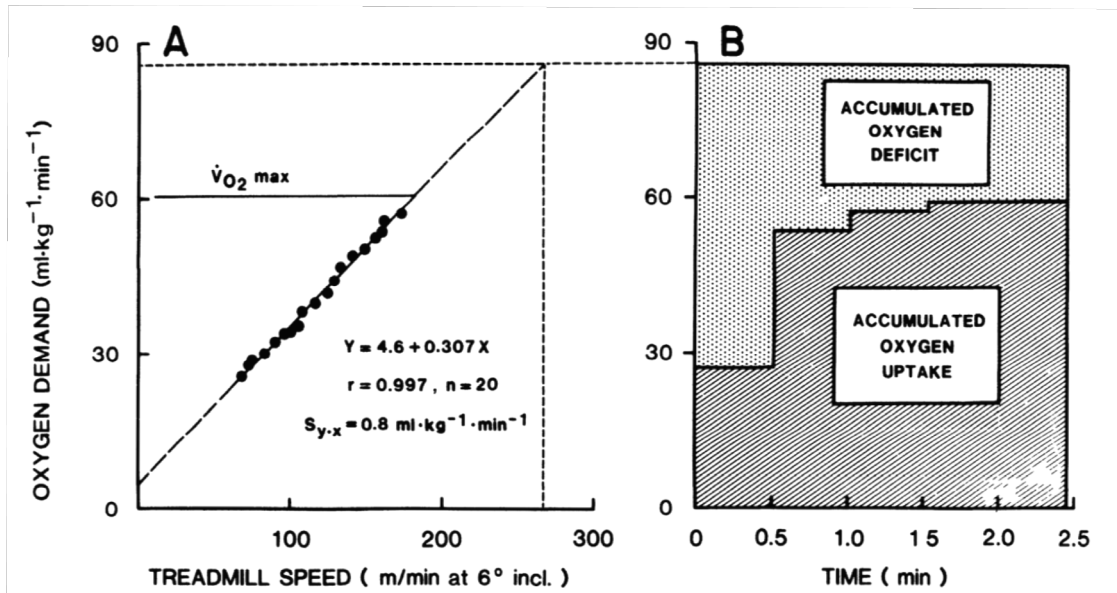


図 2-6. Medbø et al. (1988) によって提唱された酸素借法の概念図.

(A) は最大下強度で求めた運動強度 (走速度) と酸素摂取量の関係を表し, (B) は (A) から推定した超最大テスト時の酸素需要量と実際の酸素摂取量を表す (Medbø et al., 1988).

その後, いくつかの研究によって AOD 法の妥当性が検討されている. Medbø and Tabata (1993) は, 非トレーニング者を対象として, 自転車運動による超最大運動時の AOD と,

筋生検法によって定量した無酸素性代謝による ATP 供給量 ( $ATP_{an}$ ) を比較することによって AOD 法の妥当性を検証した。その結果、AOD と  $ATP_{an}$  の間には強い正の相関関係が認められたこと ( $r = 0.94$ ) から、Medbø and Tabata (1993) は AOD 法が  $ATP_{an}$  を定量する妥当な測定方法であることを示唆した。一方、Green et al. (1996) は、よくトレーニングされたサイクリストを対象として、同様に超最大運動時の AOD と  $ATP_{an}$  を比較したところ、両者の間には有意な相関関係が認められなかったことを報告し、AOD 法では自転車運動時の無酸素性エネルギー供給量が妥当に定量できない可能性を指摘した。両者が用いた実験方法の相違点としては、 $ATP_{an}$  の算出する式が異なった点が挙げられるが、いずれの方法も骨格筋からの乳酸の放出量が考慮されておらず、 $ATP_{an}$  を実際よりも過小に評価していた可能性がある。さらに、筋生検法によって自転車運動時の  $ATP_{an}$  を評価することについては、1) 筋サンプルを採取した筋 (多くは外側広筋) の代謝情報が他の動員筋群のそれと一致していたかが不明である点、さらに、2) 自転車運動時の動員筋量を正確に推定することが困難である点も指摘されている (Noordhof et al., 2010)。Medbø and Tabata (1993) と Green et al. (1996) による見解の不一致に影響を及ぼした  $ATP_{an}$  の算出方法以外の要因として、両者が用いた超最大テストの運動時間が指摘されている。Medbø and Tabata (1993) は、~30 秒、1 分および 2-3 分間の超最大テストを実施し、そこから得られた AOD と  $ATP_{an}$  の結果をプールした結果、両者の間に強い直線関係が認められたことを報告している。一方、Green et al. (1996) が実施した超最大テストの運動時間は  $2.9 \pm 0.4$  分間であり、Medbø and Tabata (1993) が用いた超最大テストの方が、運動時間が広範囲に及んでいた。そのため、Bangsbo (1996) は、Medbø and Tabata (1993) が報告した AOD と  $ATP_{an}$  の関係について、それぞれの運動時間毎 (~30 秒、1 分および 2-3 分間) に両者の関係を検討すると、必ずしも正の相関関係が出現しないことを指摘している (図 2-7)。

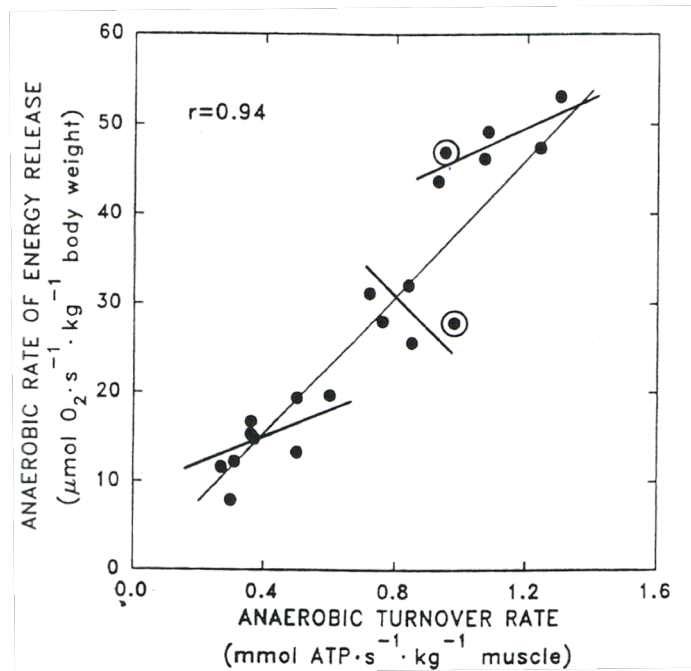


図 2-7. Medbø & Tabata (1993) によって報告された筋生検法 (横軸) および AOD 法 (縦軸) によって定量した無酸素性エネルギー供給量の関係 (Bangsbo et al. (1996) より抜粋).

図中のプロットの集合は、無酸素性エネルギー供給量が少ない方から、それぞれ運動時間~30 秒、1 分および 2-3 分間の超最大テストで得られた結果を示している。図中の実線で囲まれたプロットは、筋生検法で見積もった無酸素性エネルギー供給量がほぼ等しいにも関わらず、AOD 法で見積もった無酸素性エネルギー供給量に 2 倍程度の差が認められた例として指摘されている (Bangsbo et al., 1996).

一方、Bangsbo et al. (1990a) は、より正確に  $ATP_{an}$  を定量するために、特定の筋群のみが動員される片脚膝伸展運動モデルを用い、さらにカフによって下肢血流量を制限することによって、骨格筋から血中への乳酸の放出量を最小限に制限して AOD 法および筋生検法によってそれぞれ推定した無酸素性エネルギー供給量を比較している。その結果、AOD 法および筋生検法によって推定した無酸素性エネルギー供給量は、それぞれほぼ等しい値を示したことから、彼らは特定の筋群が動員される運動モデル、すなわち、動員筋量が正確に推定できる運動モデルであれば、AOD 法は  $ATP_{an}$  を定量する妥当な測定方法であると結論づけた。これらの検証結果は、単一の筋群が動員される運動モデル (片脚膝伸展運動など) では、AOD 法と筋生検法でそれぞれ評価した無酸素性エネルギー供給

量がよく一致するが、走運動や自転車運動のように多くの筋群が動員される運動では、筋生検法と AOD 法の間で一致した結果が得られないことを示唆している。

さらに、OD を推定する直線回帰式の算出方法についても検討が行われている。Medbø et al. (1988) は、10 分間の最大下運動を 35-100 %  $\dot{V}O_{2max}$  強度の範囲で実施し、およそ 20 点の運動強度と  $\dot{V}O_2$  のデータセットを取得し、被験者毎の直線回帰式を作成した。しかし、LT や換気性代謝域値 (Ventilatory threshold: VT) を超える運動強度では、 $\dot{V}O_2$  は運動開始直後から急峻な上昇を示した後定常状態には至らず、その後も緩やかに上昇し続ける (Jones et al., 2011)。この  $\dot{V}O_2$  の緩やかな上昇は緩成分 (Slow component) と呼ばれ、運動後半において ATP あたりの酸素消費量が多い速筋線維の動員率が増加することや、骨格筋内の pH 上昇に伴う興奮収縮連関の効率の低下が要因であると考えられている。したがって、35-100 %  $\dot{V}O_{2max}$  強度で最大下テストを実施した場合、運動強度が高くなるほど  $\dot{V}O_2$  slow component の出現によって定常状態が得られず、 $\dot{V}O_2$  からその運動強度に対する酸素需要量が定量できないことが指摘されている (Bangsbo, 1996)。さらに、Green and Dawson (1995) は、LT 以下の強度で求めた運動強度と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式の傾きと比較して、LT 以上の強度では直線回帰式の傾きが小さくなること (6-14 % の低下) から、運動強度と  $\dot{V}O_2$  の間には直線関係が成立しないことを示唆している。また、Medbø et al. (1988) は、最大下強度におけるエネルギー消費量を  $\dot{V}O_2$  のみから評価していたが、実際には運動強度の増加に伴って解糖系からの ATP 供給が増加するが、そうした無酸素性代謝の貢献が考慮されていないという点も指摘されている (Bangsbo, 1996)。これらの指摘から、運動強度と  $\dot{V}O_2$  の間には厳密には直線関係が成立しないこと、さらに、最大下強度であっても運動強度が高くなるほど運動強度と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式から OD の推定式を導くことは適切ではないことが示唆される。しかし、上述したように AOD 法で推定した AOD は、片脚膝伸展運動のような単一の筋群が動員される運動では筋生検法で定量した  $ATP_{an}$  と同等の値を示すこと (Bangsbo et al., 1990a)、AOD 法以外に全身運動における無酸素性代謝量を評価する手法が確立されていないことから、現時点において無酸素性代謝からのエネルギー

一供給を評価する唯一の方法とされている。

### 3.4. AOD 法の位置付け

特定の筋群が動員される運動，すなわち脚伸展運動のような動員筋量が定量しやすい運動では，筋内の代謝物質の変化量から無酸素性代謝量を定量する筋生検法と AOD 法はほぼ一致することが報告されている。しかし，より多くの筋群が動員される運動，すなわち自転車運動や走運動のような動員筋量が定量しにくい運動の場合，筋生検法では全体の無酸素性代謝量を正確に定量できない可能性が示唆されている。そのため，AOD 法は，酸素需要量の推定方法について上述したような指摘もされているものの，自転車運動や走運動のような動員筋量が定量しにくい運動において無酸素性代謝量を定量する唯一の方法とされている。さらに，筋生検法では，運動前後の筋サンプルから運動中の無酸素性代謝による総エネルギー供給量が測定されるのに対して，AOD 法では運動中の運動強度および $\dot{V}O_2$ を連続的に測定することによって，運動中の無酸素性代謝によるエネルギー供給を経時的に評価することが可能である。そのため，これまでに AOD 法は，超最大運動中の生理応答の検討に加えて競技スポーツ，すなわち陸上競技 (Duffield et al., 2004, 2005a, b; Sloniger et al., 1997; Spencer and Gastin, 2001)，自転車競技 (Spencer et al., 2006; Withers et al., 1991; Withers et al., 1993) およびローイング (Pripstein et al., 1999; Russel et al., 1998; Clark, 2016; Droghetti et al., 1991) において，実際のレースまたはそれをシミュレートした運動時の無酸素性代謝の貢献割合の検討および無酸素性エネルギー供給動態の検討にも用いられている。

これまでに AOD 法は，走運動，自転車運動，泳運動，カヤックおよびスキーなど様々な運動形態において，運動中の無酸素性代謝量の定量に用いられている。特に，走運動および自転車運動では，比較的広範な運動時間 (0.2~11.6 分間) においてそれぞれ無酸素性代謝量および無酸素性代謝の貢献割合が報告されている。それらの先行研究の結果から，1) 固定負荷を用いた場合，2 分程度で疲労困憊に至る超最大運動で MAOD に到達するこ

と (Medbø et al., 1988), 2) ウィンゲートテストのようなオールアウト型のパワー発揮が行なわれる運動ではより短い時間 (60~90 秒) で MAOD に達すること (Withers et al., 1993; Withers et al., 1991), および 3) 無酸素性能力に優れた者と比較して, 有酸素性能力に優れた者は MAOD に到達するまでに要する時間が長いこと (70 秒 vs 300 秒, Craig et al., 1993) などが報告されている. これらのことから, MAOD の測定プロトコルを選択する際には, 被験者のエネルギー供給系の体力特性や, 専門とする競技の運動時間やペース戦略を考慮する必要があることが指摘されている (Craig et al., 1995; Noordhof et al., 2010).

#### 4. AOD 法を用いたローイング時の無酸素性代謝量の評価

##### 4.1. ローイングにおける無酸素性代謝の貢献

AOD 法を用いてローイング時の無酸素性代謝量の定量を試みた先行研究では, 6 分間または 2 km のシミュレーションテストが用いられている. Pripstein et al. (1999) は, 女子ボート選手を対象として, AOD 法を用いて 2000 m シミュレーションテスト中のエネルギー代謝を検討した結果, 無酸素性代謝の貢献割合が 12 % であったこと, またレース中の AOD が, 2 分間の超最大テストで測定した MAOD にほぼ到達することを明らかにした. さらに, Pripstein et al. (1999) は, テストの所要時間 (7.5 min) と AOD の間に有意な負の相関関係が認められたことも報告している ( $r = -0.77$ ). 同様に, Clark (2016) は, 2000 m シミュレーションテストの所要時間が短い (6.8 min) 男子ボート選手を対象として, テスト中の無酸素性代謝の貢献割合が 20 % であり, 所要時間と AOD の間に有意な負の相関関係が認められたことを報告している ( $p = -0.71$ ). 一方, Russell et al. (1998) は, 男子ジュニア選手 (テスト所要時間が 6.7 min) を対象として, 2000 m シミュレーションテスト時の無酸素性代謝の貢献割合が 16 % であり, レース中の平均発揮パワーと AOD の間には相関関係が認められなかったことを報告している ( $r = 0.10$ ). このように, 2000 m シミュレーションテスト中の無酸素性代謝の貢献比率については, 運動時間が比較的等しい先行研



究同士でも、16% (Russell et al., 1998) および 20% (Clark, 2016) と差が認められる。さらに、これらの先行研究では、2 分間の超最大テストや 2000 m シミュレーションテストで測定した AOD が MAOD と定義されているが、それらのテストにおいて MAOD に到達していたか否かについては検討されていない。

#### 4.2. 無酸素性代謝に影響を及ぼすローイングの運動特性

ローイングの運動特性として、主に下肢の筋群が動員される走運動や自転車運動と比較して、動員される筋群が多い点が挙げられる。さらに、運動に動員される筋群が増加すると、全身の血流量や  $\dot{V}O_2$  は増加するが、局所では血流量や  $\dot{V}O_2$  が低下することが報告されている。すなわち、Secher et al. (1977) は、サイクリングにアームクランキングを加えると、サイクリングのみを行わせた場合と比較して下肢血流量が低下することを報告している。さらに、Volianitis et al. (2004) は、アームクランキングにサイクリングを加えると、アームクランキングのみを行わせた場合と比較して、上肢の血流量および  $\dot{V}O_2$  が低下し、その結果、上肢における無酸素性代謝の貢献割合が高まることを報告している。これらの報告から、全身の筋群が動員されるローイングでは、上肢または下肢における  $\dot{V}O_2$  が制限されるため、ランニングやサイクリングと比較して、無酸素性代謝の貢献割合が高い値を示す可能性がある。

さらに、運動中の無酸素性代謝に影響を及ぼすローイングの運動特性として、運動リズム(ストロークレート)が遅い点が挙げられる。ローイングの 1000 m 種目 (3~3.5 min) と競技時間が近い陸上競技 1500 m 種目 (3.5~ min) およびトラックサイクリング競技の 4000 m 種目 (4~ min) を比較すると、ピッチがそれぞれ 35~40 strokes/min, 170~230 steps/min (松尾ほか, 1997) および 130-140 revolutions/min (Craig and Norton, 2001) であり、ローイングではピッチが著しく低いことがわかる。このことから、ローイングでは短時間で発揮可能な仕事量が制限され、その結果、他の運動と比較して MAOD に到達するまでに要する時

間が長い可能性も考えられる。しかし、これまでにローイングを対象として、MAODへの到達時間を検討した先行研究は認められない。さらに、ローイングに対してAOD法を用いる際の問題点として、ODを推定する際に、身体を前後方向へと移動させつつパワー発揮を行なうローイングの運動特性が十分に考慮されていない点も挙げられる。

#### 4.3. ローイングにおいてAOD法を用いる際の問題点

ローイングは身体を前後方向へと移動させつつハンド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、このときのハンドルを牽引する仕事は外的仕事と定義され、ローイングエルゴメータではその時の仕事率が発揮パワーとして測定される。一方、身体を前後方向へと移動させる仕事は内的仕事と定義されるが、ローイングエルゴメータでは1分間あたりのストローク回数がストロークレートとして測定されるのみであり、発揮パワーには加味されていない。さらに、発揮パワーとストロークレートの関係に着目すると、最大下強度ではストロークレートが発揮パワーに対して緩やかにかつ直線的に増加していくのに対して、超最大強度ではストロークレートがその直線から逸脱して著しく高い値を示す。このことから、超最大強度では発揮パワーのみならず、発揮パワーとして測定されない内的仕事量も著しく増加している可能性がある。しかし、これまでローイングを対象としてAOD法を用いた先行研究では、こうしたストロークレートの著しい増加による内的仕事量の増加の影響は十分に加味されていない。さらに、レース中のストロークレートに着目すると、スタートおよびラストスパート局面において特に高いストロークレートで運動が遂行されていることがわかる。このことから、レースの各局面(スタートスパート局面、コンスタント局面およびラストスパート局面)における無酸素性代謝量を定量するためには、ストロークレートの増減の影響を加味してODを推定する必要がある。

## 5. ピッチがエネルギー代謝に及ぼす関係

ローイングの運動様式の影響を加味して OD を推定するためには、超最大テストにおけるストロークレートの増加分を考慮する必要があるが、これまでに、ローイング時のストロークレートの相違が運動中のエネルギー消費量に及ぼす影響を検討した研究は限られている (Hofmijster et al., 2009). 一方、ローイングと同様に周期性を有する運動である走運動や自転車運動では、同一の走速度または発揮パワー条件下におけるピッチの相違がエネルギー消費量に及ぼす影響が盛んに検討されている.

### 5.1. 走運動におけるピッチと $\dot{V}O_2$ の関係

これまでに同一の走速度におけるピッチの相違が  $\dot{V}O_2$  に及ぼす影響が検討されており (佐竹ほか, 1987; 佐竹と池上, 1985), ある走速度に対してエネルギー消費量が最も低くなる特定のピッチ (経済ピッチ) が出現することが報告されている. すなわち, 経済ピッチからピッチを増加させても減少させても  $\dot{V}O_2$  が増加することが報告されている. 佐竹ほか (1987) は, 経済ピッチよりも低いピッチを用いた場合の  $\dot{V}O_2$  の増加には, 下肢の振り子運動が影響を及ぼすことを示唆している. すなわち, 故意に低いピッチで走行するためには, 下肢の動きに制動をかけるような状態となり, これによるエネルギーの浪費が  $\dot{V}O_2$  を増大させる可能性に言及している. 一方, 経済ピッチよりも高いピッチを用いた場合の  $\dot{V}O_2$  の増加には, 四肢そのものを動かす仕事の増加が関与していると考えられる. Cavagna and Kaneko (1977) は, 走運動時に行われる仕事を重心の移動に対する仕事 (外的仕事) と四肢そのものを移動させる仕事 (内的仕事) に分け, 走速度とそれぞれの関係を検討した. その結果, ピッチの増加に伴い内的仕事が増加することを報告している. このことから, 同一の走速度条件においてピッチを増加させた際の  $\dot{V}O_2$  には, 走速度に対する余分な四肢そのものの運動 (内的仕事) の増加によるエネルギー消費量の増加が影響を及ぼしていると考えられる.

これまでに AOD 法を用いて走運動時の無酸素性代謝量の定量を試みた先行研究では,

ODを推定する際に最大下強度で求めた走速度と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式が用いられており、運動中の内的小よび外的仕事量については考慮されていない。しかし、ピッチは走速度に対してほぼ直線的に増加すること(牧ほか, 2010)から、走速度の増加に伴って内的小仕事量も一定の割合で増加するため、最大下強度で求めた走速度と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式からODが妥当に推定されていると考えられる。

## 5.2. 自転車運動におけるピッチと $\dot{V}O_2$ の関係

自転車運動においても走運動と同様に、ピッチが $\dot{V}O_2$ に及ぼす影響が検討され、同一の発揮パワー条件下においてピッチ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ピッチ(経済ピッチ)が出現することが報告されている(Coast and Welch, 1985; Foss and Hallen, 2004; Gaesser and Brooks, 1975; Marsh and Martin, 1993; Seabury et al., 1977)。すなわち、経済ピッチからピッチを増加させても減少させても $\dot{V}O_2$ は増大し、ピッチと $\dot{V}O_2$ の間にはU字型の関係が成立することが報告されている。このうち、経済ピッチよりもピッチを増加させた際に $\dot{V}O_2$ を増大させる要因としては、ペダリング動作そのものの仕事(内的小仕事)の増加(Foss and Hallen, 2004, 2005)、筋の収縮頻度の増加に伴う筋小胞体からのカルシウムイオン( $Ca^{2+}$ )の出し入れの頻度の増加によるATP消費量の増加(森元ほか, 2005)、筋の内部抵抗の増加(Gaesser and Brooks, 1975)などが指摘されている。一方、経済ピッチよりもピッチを減少させた際に $\dot{V}O_2$ を増大させる要因としては、1ストローク中の発揮筋力の増加に伴うType II線維の動員比率の増加が指摘されている(Ahlquist et al., 1992)。したがって、こうした $\dot{V}O_2$ を増大させる要因の影響が最小となるピッチが経済ピッチとして出現するものと考えられる。しかし、こうした代謝効率的な観点から求めた経済ピッチと被検者が自由に選択したピッチ(自由ピッチ)は必ずしも一致しないことが報告されている。Marsh and Martin (1993)は、200 W時の経済ピッチは56 rpmであったのに対して、自由ピッチは85 rpmであったことを報告している。また、サイクリストが選択する自由ピッチは、競技中に彼らが用いるピッチである90~110 rpmと近似していると

の報告も多い (Hagberg et al., 1981; Marsh and Martin, 1993; Patterson and Moreno, 1990) . これらに対して, Redfield and Hull (1986) は, 同一の運動強度条件下におけるペダリング時の足関節, 膝関節および股関節に作用するモーメントを算出し, 各関節で発揮されたモーメントをクランク回転数で除して1ストローク当たりの値を求めたところ, 105 rpm で最少となることを報告している. さらに, Bieuzen et al. (2007) は, 1ストローク中の積分筋電図 (iEMG) が最小となるピッチ, すなわち神経 – 筋最適ピッチは, 自由ピッチに近い値を示すことを報告している. これらは, 自由ピッチが代謝効率のみならず, 1ストローク当たりの慣性モーメントや筋活動量といった下肢筋群への負荷に関連して決定されている可能性を示すものである.

自転車運動を対象として, AOD 法によって運動中の無酸素性代謝量の定量を試みた多くの先行研究では, 最大下および超最大強度を通して一定のピッチが用いられている. そのため, 自転車運動では内的仕事の変化がもたらす影響を受けずに OD が推定されることが考えられる.

### 5.3. ローイングにおけるストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係

これまでにローイングを対象として, 同一の発揮パワー条件下におけるストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の関係を検討した研究は少ない. Hofmijster et al. (2009) は, 2000 m テストにおける平均発揮パワーの 70% に相当する発揮パワー (70%P<sub>2000</sub>) を用いて, ストロークレートのみを変化させたところ (28, 34 および 40 strokes/min), ストロークレートの増加に伴って  $\dot{V}O_2$  が増大することを明らかにした. さらに, 彼らは運動中の各身体セグメントの変位から身体を前後方向へと移動させる仕事 (内的仕事) 量を算出したところ, 内的仕事量がストロークレートの増加に伴って増大することを確認している. また, Di Prampero et al. (1971) は, 水上における実際のローイングにおいて, 艇速, 1ストローク当たりの外的仕事量およびストロークレートの3者の関係を比較した. その結果, 1ストローク当たりの仕事量は艇速が増加しても一定であったのに対して, ストロークレートは艇速の増

加に伴って上昇していたことから、ローイングではストロークレートを増加させることによって艇速を増加させていることを示唆し、ローイングにおいて高い艇速度を得る際に内的仕事の増加が生じることを指摘している。さらに、Fukunaga et al. (1986) は、ローイング時の機械的効率、すなわち運動中の消費エネルギーに対する出力エネルギーの比率が、出力エネルギーを発揮パワー(外的仕事)のみから算出する方法 (Gross efficiency) と比較して、内的仕事を考慮した算出方法 (Work efficiency) で低い値を示すことから、ローイングは内的仕事が比較的大きな運動であることを示唆している。これらのことから、ローイングは内的仕事が比較的大きな運動であり、ストロークレートを増加させれば、内的仕事が増加することによって  $\dot{V}O_2$  の増大が生じると考えられるが、前述した走運動や自転車運動に比べて、十分な検討が行われているとはいえない。

## 6. 内的仕事の評価方法

### 6.1. バイオメカニクス的手法による評価

運動中の外的仕事は、身体の外に対して行われる仕事であるため、比較的容易に測定することが可能である。一方、内的仕事を測定するためには、映像解析によって運動中の各身体セグメントにおける力学的エネルギー(位置エネルギーおよび運動エネルギー)を算出するバイオメカニクス的手法が用いられており、その算出方法によって様々なモデルが提案されている (Cavagna and Kaneko, 1977; Minetti et al., 2001; Widrick et al., 1992; Winter, 1979; Willems et al., 1995)。しかし、Sjogaard et al. (2002) は、内的仕事を評価するための様々なバイオメカニクスのモデルが考案されているが、一致した見解が得られていないことを指摘している。そこで、彼らは内的仕事を評価するために運動中に測定した安静時以上の  $\dot{V}O_2$  と機械的効率から総仕事量を逆算し、そこから外的仕事を差し引くことによって内的仕事を評価する方法を提案している。

$$W_{ext} + W_{int} = (\dot{V}O_{2ex} - \dot{V}O_{2rest}) \cdot OE \cdot \eta_{delta} \quad (\text{式 2-2})$$

ここで  $W_{\text{ext}}$  および  $W_{\text{int}}$  はそれぞれ外的仕事および内的仕事、 $\dot{V}O_{2\text{ex}}$  は運動時の  $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}O_{2\text{rest}}$  は安静時の  $\dot{V}O_2$ 、OE は酸素当量 (Oxygen equivalent: 20 kJ/ $IO_2$ Eq) である。Sjogaard et al. (2002) は、この生理学的指標を用いたモデルによって、様々なバイオメカニクスのモデルの妥当性を評価している。このように、内的仕事を評価する指標の妥当性は、生理学的指標 ( $\dot{V}O_2$ ) との関係からも検討されている。

しかし、こうしたバイオメカニクスの手法を用いるためには、専用の機材や分析が必要となることや、生理学的測定項目と合わせて実施すると実験自体が煩雑になる可能性もある。特に、選手の体力測定として実施する場合には、より簡便な指標を用いる必要があると考えられる。実際に、Sjogaard et al. (2002) や Minetti et al. (2001) は、自転車運動において、被験者の体重とそのときのピッチから内的仕事量を推定するモデルを提唱しており、ローイングにおいても同様により簡便な評価方法を検討する必要がある。

## 6.2. 身体活動量による評価

ローイング時の内的仕事を前後方向へ身体を移動させる身体活動と捉えると、そのときの内的仕事量は身体活動量を測定することによって定量的に評価できる可能性がある。近年、小型で軽量の加速度測定装置 (加速度センサ) が開発され、運動時に身体で生じた加速度 (身体加速度) を容易に測定および評価することが可能となった。Bouten et al. (1994) は、身体重心位置付近に加速度センサを装着させ、運動中の身体加速度を 3 次元 (左右、上下および前後方向) で測定し、各軸で得られた身体加速度の絶対値を 1 分間で積分することで、各軸に対する身体活動量を評価している。また、それらを合計した値である総積分値 (Sum of the integrals of absolute accelerometer output:  $IAA_{\text{total}}$ ) は、全身の身体活動量の指標として用いられている。

$$IAA_x = \int_{t=0}^T |a_x| dt \quad (\text{式 2-3})$$

$$IAA_y = \int_{t=0}^T |a_y| dt \quad (\text{式 2-4})$$

$$\text{IAA}_z = \int_{t=0}^T |\mathbf{a}_z| dt \quad (\text{式 2-5})$$

$$\text{IAA}_{\text{total}} = \text{IAA}_x + \text{IAA}_y + \text{IAA}_z \quad (\text{式 2-6})$$

こうして求めた  $\text{IAA}_{\text{total}}$  は、歩行や走行速度の増加に伴って増大し、そのときのエネルギー消費量との間で正の相関関係を示すことが明らかとなり、身体重心を移動させる運動時の  $\dot{V}\text{O}_2$  (エネルギー消費量) を推定する指標となり得る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). また、加速度センサを用いた先行研究には、 $\text{IAA}_{\text{total}}$  に対する各軸で測定した IAA ( $\text{IAA}_x$ ,  $\text{IAA}_y$  および  $\text{IAA}_z$ ) の割合を比較することで、運動の効率に言及したものもみられる (Eston et al., 1998; Iwashita et al., 2003; 中村, 2007; 中村ほか, 2010; 吉田ほか, 2013). Eston et al. (1998) は、子どもの歩行時における  $\text{IAA}_{\text{total}}$  に対する上下方向の IAA が成人の 2 倍に及ぶことを指摘し、子どものエネルギー消費量が多くなる要因は、上下方向へのエネルギーの浪費に起因することを示唆した。また、Iwashita et al. (2003) は、高齢者を対象として筋力トレーニングプログラムを実施した前後における最大歩行速度およびそのときの身体加速度を測定した。その結果、最大歩行速度が増加し、さらに  $\text{IAA}_{\text{total}}$  に対する上下方向で得られた IAA の割合が減少していたことから、最大歩行速度の上昇は上下方向へのエネルギーの浪費が減少したことと関連することを示唆している。ローイングは、自転車運動と異なり 1 ストローク中の動作がクランクなどによって規定されていない。そのため、運動の強度や時間によって、1 ストローク中の動作が変容する可能性も考えられる。そのため、自転車運動のようにピッチから内的仕事を評価する方法では、こうした動作の変容が評価できない可能性がある。そのため、ローイング時の内的仕事量の評価に  $\text{IAA}_{\text{total}}$  を用いることで、こうした動作の変容も含めて身体を移動させる仕事 (内的仕事) を評価できる可能性がある。



## 第3章 研究課題

文献研究から、ローイング時の無酸素性代謝に関する研究について以下の問題点が明らかになった。

- 1) 超最大強度では、発揮パワーに加えてストロークレートも著しく増加するが、従来の AOD 法では、そうしたストロークレートの増加の影響が加味されておらず OD が過少に見積もられている可能性があること。
- 2) ローイング時の無酸素性エネルギー供給能力を評価した先行研究では、2000 m シミュレーションテストまたは2分間の超最大テスト時の AOD が用いられているが、それらが MAOD を捉えているかは明らかにされておらず、ローイングにおける MAOD の測定プロトコルが十分に検討されていないこと。
- 3) レース中は、運動時間の経過に伴ってストロークレートが変化するが、その影響を加味してレース中の無酸素性エネルギーの供給動態および%Anaerobic を検討した先行研究は認められず、さらに、最適な測定プロトコルによって評価した MAOD とローイングパフォーマンスの関係についても検討されていないこと。

これらの問題点を解決するためには、ストロークレートの増加に伴う内的仕事量の増加分も加味して OD を推定する AOD 法を考案する必要があり、その際に身体加速度から評価した身体活動量の指標である  $IAA_{total}$  が有用な指標となる可能性が考えられた。

そこで、本研究では、 $IAA_{total}$  を用いてストロークレートの増加分を補正して OD を推定する AOD 法を開発することを目的とし、さらに、開発した新たな AOD 法を用いて、1) ローイング時の MAOD を測定する際の最適なプロトコルについて検討すること、2) レース中の無酸素性エネルギー供給動態、%Anaerobic および最適なプロトコルで評価した MAOD とローイングパフォーマンスの関係についても検討を行なった。以上の目的を達成するために、本研究では以下の5つの研究課題を設定し、実験を行なった。

### 1. 研究課題 I

研究課題 I では、ローイング時の内的仕事量の評価指標としての  $IAA_{total}$  の有用性について検討を行なうことを目的とした。研究課題 I-1 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変化 (増加および減少) させることによって内的仕事量のみを変化 (増加および減少) させ、それが  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$  に及ぼす影響について検討した。また、研究課題 I-2 では、異なる発揮パワー条件下においてストロークレート (内的仕事量) のみを増加させ、その際に  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間に同様の直線関係が成立するか否かについて検討を行なった。

### 2. 研究課題 II

研究課題 II では、実際に  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法を考案し、それによって超最大運動中の OD および AOD を推定し、それらを従来の AOD 法によって推定した値と比較検討した。

### 3. 研究課題 III

研究課題 III では、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって推定した OD および AOD の妥当性について検討を行なった。研究課題 III-1 では、無酸素性代謝、特に解糖系からのエネルギー供給量と関連する指標である  $Q_{LaA}$  と AOD の関係から  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって推定した AOD の妥当性について検討を行なった。

また、従来の AOD 法において、ローイング時の OD が過小に見積もられる要因として、超最大テスト時のストロークレートが、最大下テスト時の発揮パワーとストロークレートの直線関係から逸脱して著しく増加する点が挙げられる。それに対して、走運動では、最大下および超最大強度を通して走速度の上昇に伴いピッチが一定の割合で増加する。そのため、走運動では、最大下強度で求めた走速度と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式を用いても、ピ

ッチ (内的仕事量) の増加分を加味して OD が推定されている。そこで研究課題 III - 2 では、最大下および超最大テストを通して、発揮パワーとストロークレートの間に直線関係が成立するようにストロークレートを調整した最大下テストを実施し、そこから得られた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式を用いて OD を推定し、それと  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した OD とを比較することで、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によってストロークレートの増加分が加味されていたか否かについて検討を行なった。

#### 4. 研究課題 IV

研究課題 IV では、ローイング時の MAOD を測定するためのプロトコルについて検討するために、運動時間が異なる 4 種類の超最大テスト (2 min テスト, 1 km テスト, 1.5 km テストおよび 2 km テスト) を実施し、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって AOD を定量し、各テストにおいて MAOD に到達した被験者数を比較した。

#### 5. 研究課題 V (実践研究)

研究課題 V では、研究課題 IV で得られた結果のうち、2 km テスト中の無酸素性エネルギー供給動態、%Anaerobic および MAOD とローイングパフォーマンスの関係についてさらに検討を行なった。

## 第4章 本研究で用いた負荷装置

本研究の研究課題は、いずれもボート競技用のエルゴメータ (ローイングエルゴメータ, Concept II 社製) を用いて実験を行なった (図 4)。ローイングエルゴメータのハンドルは、チェーンを介して空気抵抗を受ける羽が取り付けられた回転盤に接続されており、漕ぎ手がハンドルを後方へと牽引すると回転盤が回転し、回転盤の回転数の変化量から仕事量が算出される。さらに、その仕事量を 1 ストロークに要した時間で除すことによって仕事率(発揮パワー)が算出される。ローイングエルゴメータのディスプレイには、1 ストローク毎の発揮パワーとストロークレートが表示される。したがって、運動条件 (発揮パワー、ストロークレートまたは両者) が指定されている場合には、被験者はディスプレイを確認しつつそれらを調整して運動を遂行した。また、本研究で使用したローイングエルゴメータは、空気抵抗によって負荷を発生させているため、測定前には回転盤に流れ込む空気量を調整し、被験者毎に条件間で統一させた。

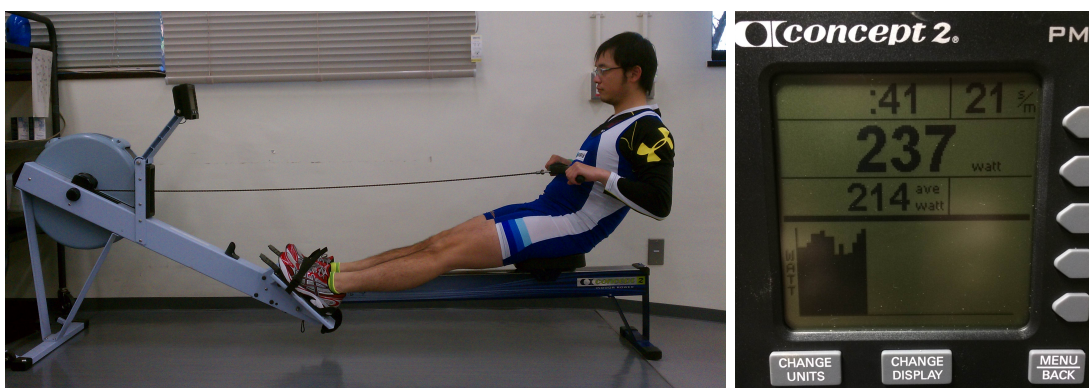


図 4. 本研究で使用したローイングエルゴメータ (左) とローイングエルゴメータのディスプレイ (右).

## 第5章 研究課題 I - 1

ローイング時のストロークレートの相違が  $\dot{V}O_2$  に及ぼす影響

## 1. 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や自転車運動では、同一の走速度や発揮パワー条件下において、ピッチのみを変化させると、 $\dot{V}O_2$  は特定のピッチ (経済ピッチ) において最も低い値を示すこと、すなわち経済ピッチからピッチを増加させても減少させても  $\dot{V}O_2$  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). そのうち、ピッチを増加させた際の  $\dot{V}O_2$  の増大は、下肢そのものを動かす仕事 (内的仕事) の増加、筋の収縮速度の増加に伴うタイプ II 線維の動員比率の増加、筋の収縮頻度の上昇に伴う ATP 消費量の増加、筋の内部抵抗の増加などが指摘されている。

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  $\dot{V}O_2$  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  $\dot{V}O_2$  を比較検討した。このとき、ローイングにおいても、自転車運動と同様に、 $\dot{V}O_2$  はストロークレートに対して U 字型の関係を示すという仮説を立てた。さらに、身体重心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ローイングの運動特性から、ストロークレートの増加に伴う  $\dot{V}O_2$  は、内的仕事量の増加と強く関連すると仮説立て、 $\dot{V}O_2$  と身体活動量の指標である  $IAA_{total}$  の関係についても検討を行なった。

## 2. 方法

## 2.1. 被験者

被験者は男子大学生ボート選手 8 名 (身長 :  $171.1 \pm 1.8$  cm, 体重 :  $68.7 \pm 1.9$  kg, 年齢 :

21.6±1.4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、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了承を書面にて得た。

## 2.2. 実験および測定内容

### 2.2.1. 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、最大下およ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、エルゴメータによる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 および 80%  $P_{2000}$ )。その後、10分間の休息を挟み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。

運動中の呼気は、自動呼気ガス分析装置(エアロモニタ AE310-s, ミナト医科学社製)のEXPモードを用いて分析し、呼気ガスパラメータ ( $\dot{V}E$ ,  $\dot{V}O_2$  および  $\dot{V}CO_2$ ) 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、蛇管内に導いた呼気ガスの流量と酸素およ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から、妥当性の高い測定方法であるといえる。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気ガスパラメータおよび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 ( $\pm 10$  拍/分)、3) 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 4 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  $\dot{V}O_{2\max}$  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。乳酸性代謝閾値 (Lactate threshold: LT) は、Beaver et al. (1985) の方法を用い、Blood Lactate Endurance Marker Software (Lactate-E, Newell et al., 2007) によって算出し、そのときの発揮パワーを  $P_{LT}$  とした。

### 2.2.2. 80 % および 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 90 % 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、代謝応答および身体加速度を計測し、これを 90 % LT テストとした。90 % LT 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 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 6 条件を設定した。なお、FS 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およ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。90 % LT テスト中の各ストロークレート試技に対する運動時間は 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試技を開始させた。なお、各ストロークレート試技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 分間の平均値を採用した。

先行研究 (Coast and Welch, 1985; Marsh and Martin, 1993) 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。

### 2.2.3. IAA<sub>total</sub> (Total integrals of absolute accelerometer output)

本研究で使用した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  $57\text{ mV/G}$  であり、検出したデータは  $16\text{ bit}$  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  $100\text{ Hz}$  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、 $0.3 - 25\text{ Hz}$  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の身体加速度データは、その絶対値を1分間で積分し、それぞれ  $IAA_x$ 、 $IAA_y$  および  $IAA_z$  とした(式 5-1~3)。

$$IAA_x = \int_{t=0}^T |a_x| dt \quad (\text{式 5-1})$$

$$IAA_y = \int_{t=0}^T |a_y| dt \quad (\text{式 5-2})$$

$$IAA_z = \int_{t=0}^T |a_z| dt \quad (\text{式 5-3})$$

さらに、 $IAA_x$ 、 $IAA_y$  および  $IAA_z$  の合計 ( $IAA_{total}$ ) を、運動中の身体活動量の指標として用いた(式 5-4)。

$$IAA_{total} = IAA_x + IAA_y + IAA_z \quad (\text{式 5-4})$$

### 2.3. 統計処理

結果はすべて平均値  $\pm$  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最小自乗法にて求めた。同様に、ストロークレートと  $IAA_{total}$  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,  $IAA_{total}$  を従属変数とした一次およ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.  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線性の評価には, 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 % 未満を基準に判断した.

### 3. 結果

#### 3.1. 漸増負荷テスト

最大テストによって得られた被験者の  $\dot{V}O_{2max}$  および  $HR_{max}$  は, それぞれ  $4437.6 \pm 389.8$  ml/min および  $188.1 \pm 7.0$  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 %  $P_{LT}$  および 80 %  $P_{LT}$  は, それぞれ  $183.2 \pm 14.1$ ,  $164.9 \pm 12.7$  および  $146.5 \pm 11.3$  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 時の発揮パワーよりも有意に低い値を示していた ( $172.2 \pm 26.7$  watt).

80 % および 90 %  $P_{LT}$  に対する自由ストロークレート (FS) は, それぞれ  $19.1 \pm 1.9$  および  $19.9 \pm 1.9$  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 ( $p < 0.05$ ).

#### 3.2. 90 % LT テスト

##### 3.2.1. ストロークレートと $\dot{V}O_2$

図 5-1 に 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, ストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の間で  $R^2$  値が 1.00 を示す二次回帰式が得られた (図 5-1 (A)). 一方, 被験者 B における二次回帰式の  $R^2$  値は 0.68 であった (図 5-1 (B)). 二次回帰式の  $R^2$  値が 0.9 を上回っていた被験者は, 8 名中 5 名であった. 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, ほぼ近似した値を示した (それぞれ  $21.5 \pm 1.9$  および  $20.5 \pm 3.7$  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 ( $19.4 \pm 1.9$  strokes/min) を経済ストロークレートとした。

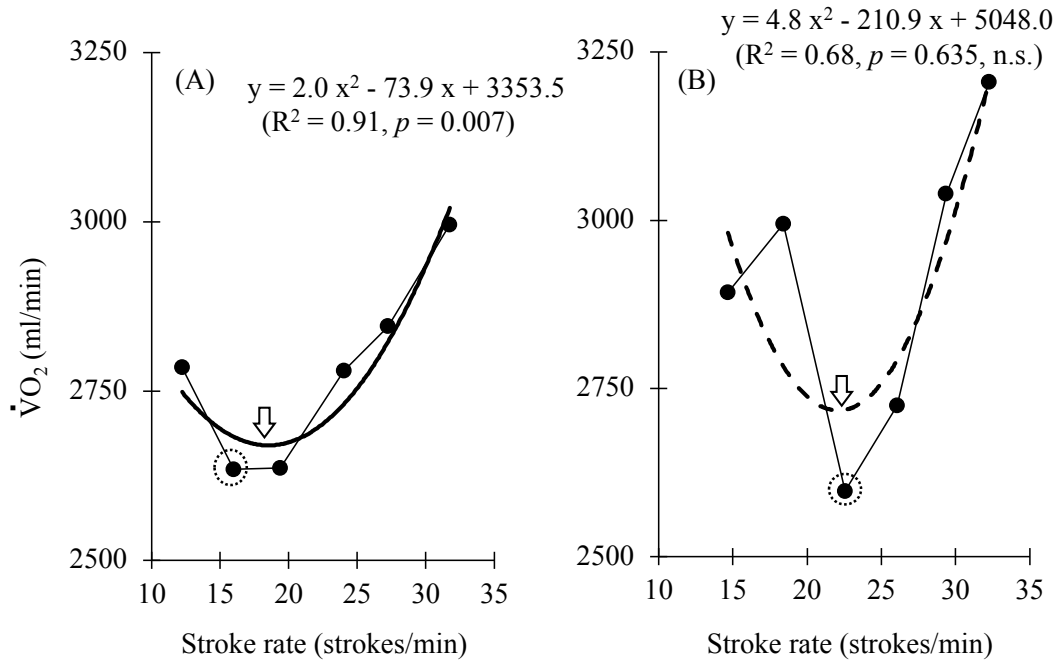


図5-1. 90% LTテストにおけるストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係の代表例。  
 図中の矢印は回帰曲線によって求めた $\dot{V}O_2$ が最小となる位置を表し、破線で囲まれた試技は、実測の $\dot{V}O_2$ が最小であった試技を示している

図5-2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 ( $\Delta$ Stroke rate) 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。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。

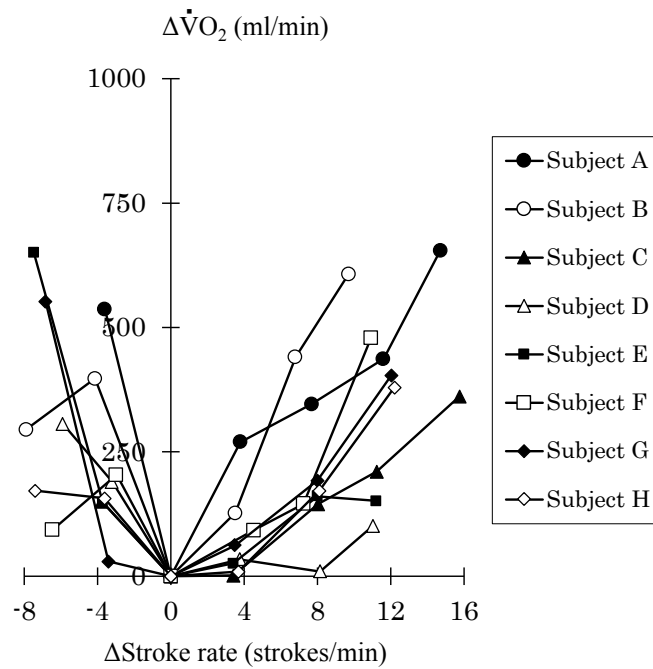


図5-2. 90% LTテストにおけるストロークレートの変化量 ( $\Delta$ Stroke rate) と  $\dot{V}O_2$  の変化量 ( $\Delta \dot{V}O_2$ ) の関係。

### 3.2.2. ストロークレートと $IAA_{total}$ の関係

図5-3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。上から加速度センサの左右軸 (x)，上下軸 (y)，前後軸 (z) およびそれらの絶対値を合計した値 ( $IAA_{total}$ ) を示しており，(A)が14 strokes/min，(B)が34 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，上下および前後軸で大きな身体加速度が生じていた。いずれのストロークレートにおいても，上下および前後軸で周期性を有する特徴的な加速度波形が得られた。

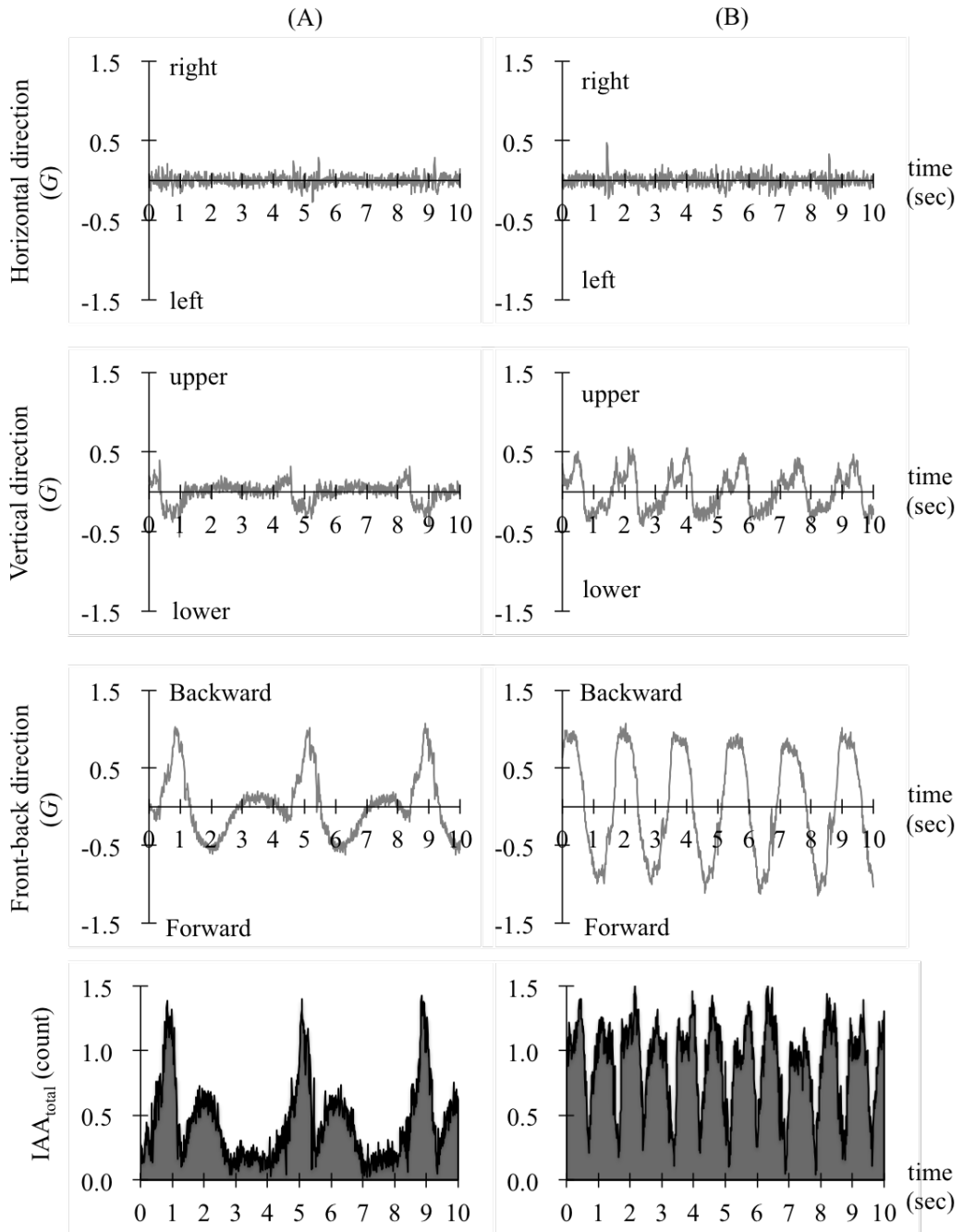


図5-3.14 14 strokes/min (A) および 34 strokes/min (B) で得られた身体加速度波形の典型例。上段から加速度センサの左右 (x) , 上下 (y) および前後 (y) 軸で得られた加速度データを表す。下段は、各軸で得られた身体加速度データの絶対値の合計 (IAA<sub>total</sub>) を表す。

図5-4に90%LTテストにおけるストロークレートと $IAA_{total}$ の関係を示した。全ての被験者において $IAA_{total}$ 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 $IAA_{total}$ の関係性を検討したところ、全ての被験者において $R^2$ 値は一次回帰式( $0.86 \leq R^2 \leq 0.99$ )と比較して、二次回帰式( $0.95 \leq R^2 \leq 1.00$ )で高い値を示した。

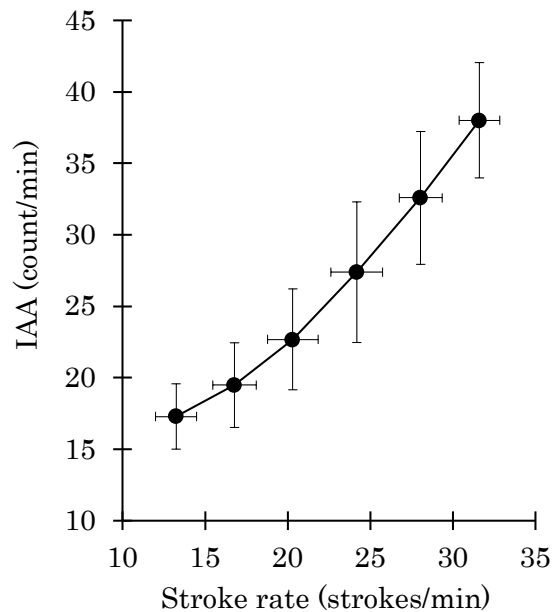


図5-4. 90%LTテストにおけるストロークレートと $IAA_{total}$ の関係。

### 3.2.3. $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係

図5-5に90%LTテストにおける、経済ストロークレートよりもストロークレートを増加させた際の $IAA_{total}$ の増加量( $\Delta IAA_{total}$ )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。 $\Delta IAA_{total}$ と $\Delta \dot{V}O_2$ の間には、有意な正の相関関係が認められた( $r = 0.67$ ,  $p < 0.001$ )。表5-1に経済ストロークレート以上の条件における $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係を被験者毎に検討した結果を示した。8名中7名の被験者において、 $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の間に相関係数( $r$ )が0.9以上の値を示す直線関係が認められた。

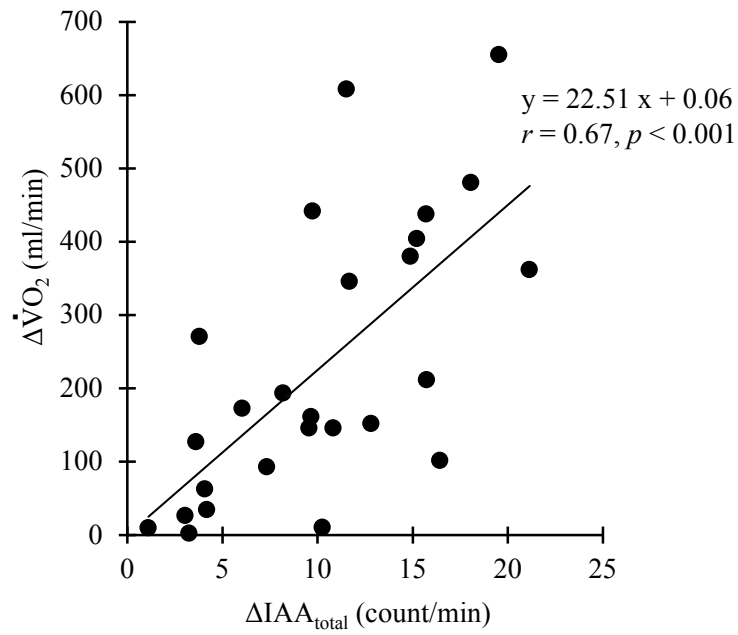


図5-5. 90% LT テストにおける  $\Delta IAA_{total}$  と  $\Delta \dot{V}O_2$  の関係.

表5-1. 各被験者における90% LT テスト時の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の相関係数.

Subject	Number of data points	r value
A	5	0.95
B	4	0.99
C	5	0.98
D	4	0.80
E	4	0.96
F	4	0.94
G	4	0.99
H	4	1.00

#### 4. 考 察

本研究は、ローイング時のストロークレートの相違が  $\dot{V}O_2$  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 ( $P_{LT}$  の 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、 $\dot{V}O_2$  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。また、ストロークレートを増加させた際の  $\dot{V}O_2$  の増大は、特に内的仕事量の増加と強く関連すると考え、経済ストロークレートを基準として、ストロークレートを増加させた際の  $\Delta IAA_{total}$  と  $\Delta \dot{V}O_2$  の関係を検討した結果、両者の間に有意な正の相関関係が認められた。

##### 4.1. 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、ピッチのみを変化させると、 $\dot{V}O_2$  が最も低くなる特定のピッチ (経済ピッチ) が出現すること、すなわち経済ピッチからピッチを増加させても減少させても  $\dot{V}O_2$  が増大することが報告されている (Coast and Welch, 1985; Foss and Hallen, 2005; Gaesser and Brooks, 1975; Marsh and Martin, 1993; 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ピッチを求めている。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、本研究課題では二次回帰式の  $R^2$  値が低い値を示す被験者が見受けられた。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影響を及ぼしていたと考えられる。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  $IAA_{total}$  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 (図 5-4)。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増大し、ローイング動作そのものが変容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変容が反映されないため、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 (図 5-1)。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。

#### 4.2. 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に  $\dot{V}O_2$  を増大させる要因として、下肢を回転させる仕事 (内的仕事) の増大 (Coast and Welch, 1985; Foss and Hallén., 2004; 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), 筋の収縮頻度の上昇に伴う筋小胞体からの  $Ca^{2+}$  の出し入れ頻度の増加に伴う ATP 消費量の増加 (森元ほか, 2005), 筋肉の内部抵抗の増加 (Gaesser and Brooks, 1975) などが指摘されている。一方、ローイングは、自転車運動と比較して運動リズムが低いことや、身体重心を前後方向に大きく移動させつつパワー発揮を繰り返すという運動特性上、内的仕事が比較的大きな運動であること (Fukunaga et al., 1986) を考慮すると、ストロークレートを増大させた際の  $\dot{V}O_2$  の増大には、主に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。

$IAA_{total}$  は、歩行や走運動といった身体重心の移動を伴う運動において、歩行または走速度の増加に伴って増大すること、さらにそのときのエネルギー消費量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). このことから、 $IAA_{total}$  は、ローイング時の内的仕事量および  $\dot{V}O_{2int}$  を評価する指標となる可能性が考えられた。本研究において、90% LT テストでは、経済ストロークレートよりもストロークレートを増加させた際の  $\Delta IAA_{total}$  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、被験者毎に  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を検討したところ、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。この結果は、ローイングにおいてストロークレートを増加させた際の  $\dot{V}O_2$  の増大が内的仕事量の増加と強く関連するとした本研究の仮説を支持する結果であり、被験者毎に評価した  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線関係からローイング時の  $\dot{V}O_{2int}$  が推定できる可能性を示唆している。

#### 4.3. 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、被験者自身の経済ピッチよりもピッチを減少させた際の  $\dot{V}O_2$  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とされている (Ahlquist et al., 1992)。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 (Kushmerick et al., 1992) から、本研究においても、ストロークレートの減少によって1ストローク当たりで発揮されるパワーすなわち筋張力が増加していたと仮定すると、タイプII線維の動員比率が増加し、それによって  $\dot{V}O_2$  が増大していた可能性も考えられる。

#### 4.4. 経済ストロークレートの決定要因

同一発揮パワー条件下において、ストロークレートを増加および減少させた際の  $\dot{V}O_2$  の増大には、それぞれ異なる要因、すなわち内的仕事量の増加および筋線維の動員比率の変化が関与していると考えられた。このことから、経済ストロークレートは、それぞれの要因の影響が最小となる条件で出現していたと考えられる。なお、自転車運動における経済ピッチは、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; Foss and Hallén., 2004; Gaesser and Brooks, 1975; Marsh and Martin,

1997; Seabury et al., 1977).

## 5. 結 論

本研究では、同一の発揮パワー条件下におけるストロークレートの相違が $\dot{V}O_2$ に及ぼす影響を明らかにすること、およびストロークレートを増加させた際の $\dot{V}O_2$ の増大は内的仕事量の増大と強く関連するという仮説に立ち、ストロークレートを増加させた際の $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係について検討を行なった。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、自転車運動と同様に $\dot{V}O_2$ 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、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 $\dot{V}O_2$ が増大することが確認された。さらに、経済ストロークレートを基準とした場合、 $IAA_{total}$ および $\dot{V}O_2$ はストロークレートの増加に伴って共に増大し、被験者毎に両指標の関係を検討した結果、ほとんどの被験者において強い直線関係が認められた。これらの結果は、 $IAA_{total}$ を用いることによってローイング時の $\dot{V}O_{2int}$ が推定できることを示唆している。

## 第6章 研究課題 I-2

発揮パワーの相違が  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係に及ぼす影響

## 1. 目的

研究課題 I-1 の結果から、 $IAA_{total}$  はローイング時の  $\dot{V}O_{2\ int}$  を推定する指標となることが示唆された。しかし、そのためには、ストロークレートを増加させた際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間の直線関係が、異なる発揮パワー条件においても成立するかを明らかにする必要がある。さらに、自転車運動を対象とした先行研究では、 $\dot{V}O_{2\ int}$  を測定する方法として負荷がかかっていないクランクを回転させる無負荷運動 (空漕ぎ) が用いられている。この実験条件は、被験者が内的仕事のみを行なうことから、ストロークレートを増加させた際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線関係がよりクリアに得られる可能性も考えられる。

そこで本研究では、ストロークレートのみを増加させた際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線関係が、発揮パワー条件の影響を受けるか否かを検討することを目的とし、90 %  $P_{LT}$ 、100 %  $P_{LT}$  および無負荷 (空漕ぎ) の3条件においてストロークレートのみを増加させ、そのときの  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$  について検討を行なった。

## 2. 方法

## 2.1. 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:  $171.8 \pm 2.8$  cm, 体重:  $69.7 \pm 5.1$  kg, 年齢:  $21.3 \pm 2.4$  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、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。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、測定への参加およびデータの発表についての上承を書面にて得た。

## 2.2. 実験および測定内容

### 2.2.1. 最大下テスト

ストロークレートテスト(後述)で用いる発揮パワー条件を決定するための最大下テストと最大テストによって構成される漸増負荷テストを実施した。被験者には10分間のウォーミングアップを行わせ、その後エルゴメータ上で5分間の座位安静を保たせた後、最大下テストを開始させた。1ステージの運動時間は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 $P_{2000}$ の40%とし、そこから1ステージ毎に5% $P_{2000}$ ずつ発揮パワーを漸増させ7ステージを実施した(40, 45, 50, 55, 60, 65 および70% $P_{2000}$ )。休息時間内には血中乳酸濃度を測定し、Beaver et al. (1985)の方法を用い、Blood Lactate Endurance Marker Software (Lactate-E)によって $P_{LT}$ を算出した。最大下テスト終了後、10分間の休息を挟んだのちに最大テストを実施した。最大テストは、最初の運動強度を70% $P_{2000}$ とし、1分ごとに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が維持できなくなった時点、もしくは被験者が運動の継続が困難であると判断した時点でテストを終了させた。

### 2.2.2. 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 $IAA_{total}$ 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ローイング動作(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条件として、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 および32 strokes/minの計7試技とし、それらをランダムに実施した。90%および100%LT条件では、最初に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(FS)で運動を行なわせた。続いて、FSを基準に2 strokes/minずつストロークレートを増加させ

ることによって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、1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(およそ2~5分間)。

### 2.2.3. 呼気ガスパラメータおよび血中乳酸濃度

安静時および運動中の $\dot{V}E$ ,  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ およびRERは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、測定前には校正ガス(O<sub>2</sub>濃度5%, CO<sub>2</sub>濃度15%)によってキャリブレーションを実施した。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。

血中乳酸濃度の測定には、研究課題I-1と同様に、血中乳酸濃度分析器(YSI1500SPORT, YSI社製)を用い、Beaver et al. (1985)の方法によってP<sub>LT</sub>を算出した。

### 2.2.4. IAA<sub>total</sub>

加速度センサは、研究課題I-1と同様の装置を用いた。しかし、本研究課題は、研究課題I-1と比較して試技数が多く、測定データの容量が大きくなることや、ローイング動作における身体重心の移動速度は走運動よりも低いことなどから、サンプリング周波数を50 Hzに設定した。各軸で得られた身体加速度データは、研究課題I-1と同様にバンドパスフィルタリング処理(0.3 - 25 Hz)を行なった後に、その絶対値を1分間で積分し(IAA<sub>x</sub>, IAA<sub>y</sub>およびIAA<sub>z</sub>)、それらの合計値をIAA<sub>total</sub>とした。

## 2.3. 統計処理

結果はすべて平均値±標準偏差にて示した。IAA<sub>total</sub>と $\dot{V}O_2$ の直線性の評価にはピアソンの積率相関係数を用いた。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 % 未満を基準に判断した。

### 3. 結果

#### 3.1. SR テストにおける発揮パワー条件

90 % および 100 % LT 条件における発揮パワーは、それぞれ  $162.2 \pm 24.3$  および  $180.2 \pm 27.0$  watt であった。同様に、FS はそれぞれ  $20.6 \pm 1.7$  および  $21.6 \pm 1.3$  strokes/min であった。

#### 3.2. ストロークレートと $IAA_{total}$ の関係

図 6-1 に無負荷条件 (A), 90 % LT 条件 (B) および 100 % LT 条件 (C) の各試技で得られた  $IAA_x$ ,  $IAA_y$  および  $IAA_z$  を示した。全ての条件の各試技において、 $IAA_z$  (前後方向) が最も高い値を示し、次いで  $IAA_y$  (上下方向),  $IAA_x$  (左右方向) の順に高い値を示した。さらに、 $IAA_x$  はストロークレートを増加させてもほぼ一定の値を示したが、 $IAA_y$  および  $IAA_z$  は、ストロークレートの増加に対して有意な増加を示した。図 6-2 に各条件におけるストロークレートと  $IAA_{total}$  の関係を示した。どの条件においても、ストロークレートの増加に対して  $IAA_{total}$  が増大することが確認された。

#### 3.3. ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係

図 6-3 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。図中の破線で囲まれた試技は、それぞれ  $\dot{V}O_2$  が最も低かった試技を示している。各発揮パワー条件において、 $\dot{V}O_2$  はストロークレートが最も低い試技、もしくはその付近の試技で最も低い値を示した。本研究では、実施した試技のうち  $\dot{V}O_2$  が最も低い値を示した試技を経済ストロークレートとして分析を行なった。経済ストロークレートは、無負荷、90 % および 100 % LT 条件において、それぞれ  $20.4 \pm 0.8$ ,  $23.1 \pm 4.2$  および  $23.7 \pm 2.4$

strokes/min であった。また、全ての被験者および条件 (90 % LT, 100 % LT および無負荷条件) 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、 $\dot{V}O_2$  も増大することが確認された。

### 3.4. $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係

経済ストロークレートよりもストロークレートを増加させた際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を検討したところ、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 名および 7 名の被験者で  $r$  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 ( $28.4 \pm 4.6$  ml/count) を示した。さらに、90 % および 100 % LT 条件における  $\Delta\dot{V}O_2/\Delta IAA_{total}$  (それぞれ  $19.5 \pm 6.4$  および  $18.5 \pm 3.6$  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 (図 6-4)。

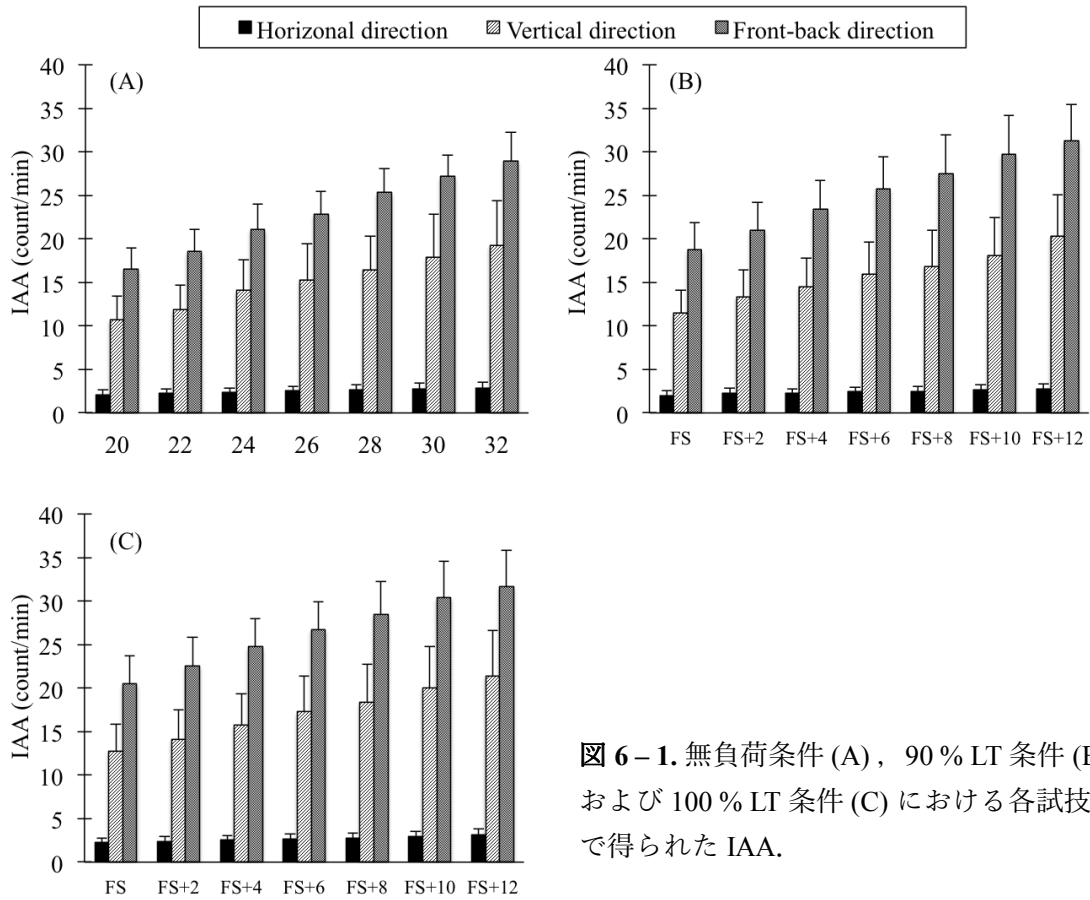


図6-1. 無負荷条件(A), 90% LT 条件(B) および 100% LT 条件(C)における各試技で得られた IAA.

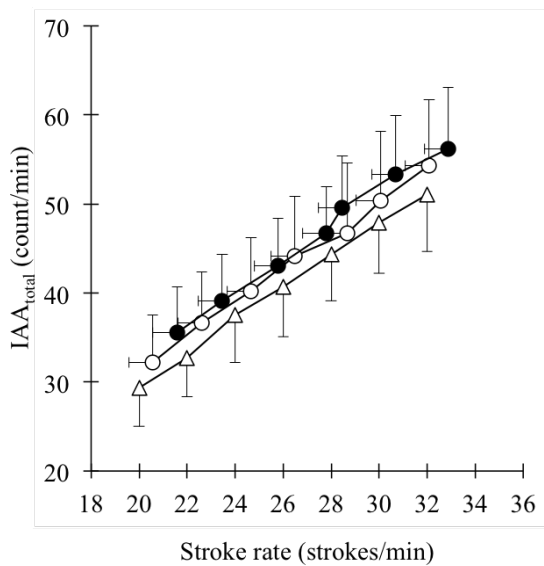


図6-2. 各発揮パワー条件におけるストロークレートと IAA<sub>total</sub> の関係. △は無負荷条件, ○は 90% LT 条件, ●は 100% LT 条件を表す.



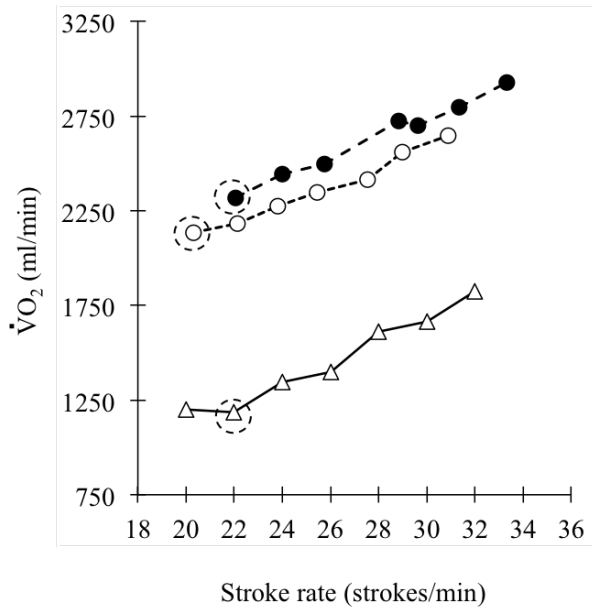


図 6-3. ストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の関係 (代表例) .  $\Delta$ は無負荷条件,  $\circ$ は 90 % LT 条件,  $\bullet$ は 100 % LT 条件を表す.

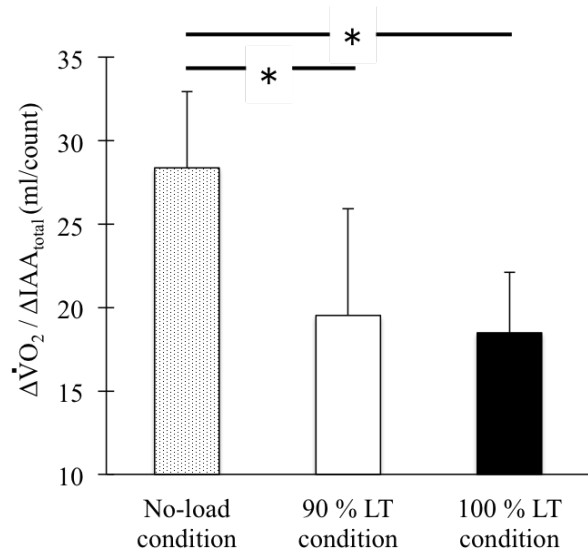


図 6-4. 無負荷条件, 90 % LT 条件および 100 % LT 条件における  $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ .

#### 4. 考 察

本研究では, 発揮パワーの相違がストロークレートを増加させた際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$ , および両者の関係性に影響を及ぼすか否かを検討することを目的として, 異なる 3 つの発揮パワー条件 (90 % LT, 100 % LT および無負荷条件) 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  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を比較検討した. その結果, いずれの発揮パワー条件においても,  $\dot{V}O_2$  が最も低い値を示した試技を基準とした場合, そこからストロークレートを増加させると  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$  が共に増加すること, さらに  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間には強い直線関係が認められることが明らかになった. また,  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式の傾き ( $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ ) は, 無負荷条件と比較して, 90 % および 100 % LT 条件でそれぞれ有意に低い値を示したが, 90 % LT および 100 % LT 条件間では有意差は認められなかった.

#### 4.1. ストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係

無負荷条件では、ほとんどの被験者において、ストロークレートが最も低い試技 (20 strokes/min) で $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した。また、90 % LT および 100 % LT 条件では、最もストロークレートが低い試技、またはその付近の試技で $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した (それぞれ  $23.1 \pm 4.2$  および  $23.7 \pm 2.4$  strokes/min)。すなわち、90 % および 100 % LT 条件では、ストロークレートが最も低い試技、すなわち内的仕事量が最も少なかったと考えられる試技において、必ずしも $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示さなかった。こうした傾向は、研究課題I-1ではより顕著に観察され、タイプII線維の動員比率の変化などの内的仕事量以外の要因が関与している可能性が考えられた。ストロークレートを増加させることによって内的仕事量を増加させた際の $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係を異なる発揮パワー条件間で比較するという本研究の目的上、本研究では $\dot{V}O_2$ 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定義し、そこからストロークレートを増加させた際の $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係について検討を行なった。

#### 4.2. ストロークレートと $IAA_{total}$ の関係

加速度センサによって測定した身体加速度から、運動中の身体活動量を評価する際には、加速度センサは身体重心位置の近くに装着される (Bouten et al., 1994; Eston et al., 1998; Iwashita et al., 2003; Nichols et al., 1999; 吉田ほか, 2013)。しかし、ローイングでは各動作局面によって身体重心位置が変化すること、さらに漕ぎ終わりの局面で上体を後方へと反らす特徴的な動作を含むことから、本研究では左右の肩峰をつないだ直線と脊柱が直交する位置に加速度センサを装着した。本研究では、 $IAA_{total}$ に加えて各軸で得られた $IAA$ についても検討を行なった。被験者の身体の左右方向に相当するx軸方向で得られた $IAA_x$ は、いずれの発揮パワー条件においても、ストロークレートの増加に対してほぼ一定の値を示した。さらに、被験者の上下および前後方向に相当するy軸およびz軸方向で

得られた  $IAA_y$  および  $IAA_z$  は、 $IAA_x$  よりも著しく高い値であった。この結果は、本研究よりも重心位置に近い腰背部に加速度センサを装着し、ローイング時の身体加速度を測定した先行研究とも一致する結果であった (中村, 2007; 中村ほか, 2010)。また、ストロークレートの増加に伴う  $IAA_{total}$  の増大は、特に  $IAA_y$  および  $IAA_z$  の増大によるものであることが確認された。ローイング時の内的仕事の大部分が身体の前後および上下方向への移動に起因することを踏まえると、本研究で採用した加速度センサの装着位置で得られた身体加速度データは、ローイング時の動作の特徴を捉えていたと考えられる。

#### 4.3. $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係

いずれの発揮パワー条件においても、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た際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間には強い直線関係が認められた。このことから、 $IAA_{total}$  はローイング時の身体を移動させる仕事 (内的仕事) に対する  $\dot{V}O_2$  を推定する指標となることが確認された。しかし、 $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の回帰直線の傾き ( $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ ) は、90 % LT 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、無負荷条件では同一の身体活動量に対してより多くの代謝エネルギーが消費されていることを示している。Gaesser and Brooks (1975) は、自転車運動において発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式を求めたところ、理論上は内的仕事のみを行なわせた際の  $\dot{V}O_2$  に相当するはずの y 切片が、実際に無負荷運動を行わせて測定した  $\dot{V}O_2$  よりも低い値であったことを報告している。Kautz and Neptune (2002) は、自転車運動時の外的仕事と内的仕事が互いに独立しあ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おり、無負荷条件ではそのときの仕事が内的仕事とされる。しかし、クランクに負荷がかかっている場合には、下肢がもつ力学的エネルギーの一部がクランクへと流れることによって下肢が減速すると考えられるとしている。このことを踏まえれば、無負荷条件で評価した内的仕事に対する  $\dot{V}O_2$  は、実際に負荷を伴った際の内的仕事に対する  $\dot{V}O_2$  を過大に評価してしまうと考えられる。ロー

イングの場合、漕ぎ終わりの局面において漕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は減速するため、外的仕事(発揮パワー)の一部が身体に流れ込み身体を減速させていると考えられる。無負荷条件の場合は、こうしたエネルギーの流れが生じないため、身体を減速させるための仕事が大きくなっていた可能性があり、その結果、 $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ が高い値を示したと考えられる。一方、90%および100%LT条件において $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ に有意な差は認められなかった。このことから、外的仕事すなわち発揮パワーを伴う条件では、発揮パワーが異なる場合であっても上述したエネルギーの流入が同程度で生じている可能性がある。

本研究では、運動時のエネルギー代謝量を $\dot{V}O_2$ から評価するために、比較的低い発揮パワー条件を設定した。そのため、さらに高い発揮パワー条件では、ハンドルを牽引することによる外的仕事の身体への流入の程度が大きくなり、 $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係も異なる可能性も考えられる。しかし、ローイング時に上肢で発揮されるパワーは全体の10%程度であること(Kleshnev, 2002)や、水上でのローイングではハンドルを牽引し終わった直後でも、後方へと移動してきた身体を減速させる動作により、艇の進行方向に対して正の加速度が生じること(下田ほか, 2007)などから、発揮パワーが高い条件でも身体へのエネルギーの流入はわずかである可能性も考えられる。本研究で得られた結果は、この点について明らかにすることはできないが、無負荷条件で評価した $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ は、 $\dot{V}O_{2\ int}$ を過大に評価する可能性があることから、発揮パワーを伴う条件(90%LTまたは100%LT条件)において求めた $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ を用いる必要があると結論づける。

## 5. 結論

本研究の結果から、発揮パワー条件の相違に関わらず、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ると、 $IAA_{total}$ および $\dot{V}O_2$ はともに増大し、両者の間には直線関係が認められることが明らかになった。また、 $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の直線回帰式の傾き( $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ )は、無負荷条件において、90%および100%LT条件よりも有意

に高い値を示した。しかし、90 % LT 条件と 100 % LT 条件の間では  $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$  に有意な差は認められなかった。これらの結果から、 $IAA_{total}$  によってローイング時の  $\dot{V}O_{2\ int}$  を推定する際には、発揮パワーを伴った条件において  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線関係を求める必要があることが示唆された。

## 第7章 研究課題II

IAA<sub>total</sub>によってストロークレートの増加分を補正するAOD法の考案

## 1. 目的

研究課題I-1およびI-2で得られた結果から、発揮パワーを伴った条件で求めたIAA<sub>total</sub>と $\dot{V}O_2$ の直線関係を用いることによって、ローイング時の $\dot{V}O_{2\text{ int}}$ が評価できることが示唆された。そこで、研究課題IIでは、IAA<sub>total</sub>を用いてストロークレートの増加分を補正しODを推定するAOD法を考案し、それによって実際に推定したODおよびAODを、従来のAOD法で見積もった値とそれぞれ比較することを目的とした。

## 2. 方法

## 2.1. 実験デザイン

本研究では、2分間の超最大テスト中のODを、従来のAOD法と、IAA<sub>total</sub>を用いたAOD法によってそれぞれ推定した。従来のAOD法では、最大下テストで求めた発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の直線回帰式に超最大テスト時の発揮パワーを外挿することによってODを推定した(図7-1)。一方、IAA<sub>total</sub>を用いたAOD法では、超最大テスト中のIAA<sub>total</sub>および発揮パワーから、内的仕事および外的仕事に対するOD(Oxygen demand for internal work: OD<sub>int</sub>およびOxygen demand for external work: OD<sub>ext</sub>)をそれぞれ別個に推定し、その合計を運動中のODとした(図7-1, 詳細は2.3.2.に記載)。

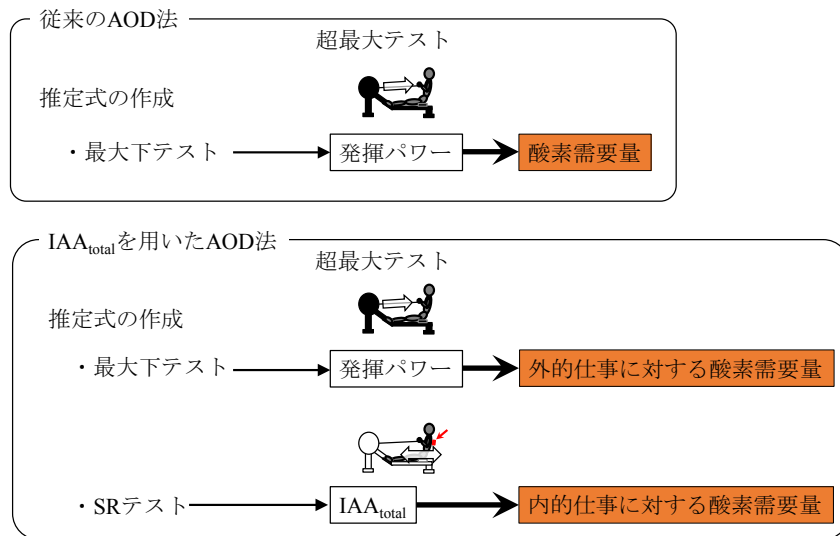


図7-1. 従来のAOD法(上段)およびIAA<sub>total</sub>を用いたAOD法(下段)による酸素需要量の推定方法の概念図。

## 2.2. 被験者

本研究の被験者は男子大学生ボート選手8名(身長: 1.75 ± 0.05 m, 体重: 70.5 ± 10.1 kg, 年齢: 19.8 ± 0.9 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、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。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、測定への参加およびデータの発表についての了承を書面にて得た。

## 2.3. 測定方法

### 2.2.1. 漸増負荷テスト

最大下強度における発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の関係を求めるために最大下テストを実施し、続いて  $\dot{V}O_{2max}$  を導出するための最大テストを実施した。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ステージの運動時間は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、最も直近で得られた  $P_{2000}$  の40%とし、そこから

1ステージ毎に5% P<sub>2000</sub> ずつ発揮パワーを漸増させ7ステージを実施した(40, 45, 50, 55, 60, 65 および 70 %P<sub>2000</sub>)。休息時間内には血中乳酸濃度を測定し、Beaver et al. (1985)の方法を用い、Blood Lactate Endurance Marker Software (Lactate-E) によって P<sub>LT</sub> を算出した。各ステージ終了前1分間の呼気ガスパラメータ、HR および身体加速度を研究課題I-2と同様の方法を用いて測定した。

最大下テスト終了後、10分間の休息を挟んだのちに最大テストを実施した。最大テストは、最初の運動強度を70% P<sub>2000</sub> とし、1分毎に5% P<sub>2000</sub> 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が維持できなくなった時点、もしくは被験者が運動の継続が困難であると判断した時点でテストを終了させた。運動中は研究課題I-2と同様の方法を用いて、1分毎の呼気ガスパラメータ、HR および身体加速度を測定した。

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て  $\dot{V}O_{2max}$  を決定した。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 - 年齢) される最大心拍数 (HR<sub>max</sub>) にほぼ達していること (±10 拍/分)、3) 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4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  $\dot{V}O_{2max}$  と判断した。

### 2.2.2. ストロークレートテスト (SR テスト)

漸増負荷テストと異なる実験日に 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において、ストロークレートのみを増加させ、そのときの IAA<sub>total</sub> と  $\dot{V}O_2$  の関係を被験者毎に求めた。発揮パワー条件は、漸増負荷テストで求めた P<sub>LT</sub> とした。ストロークレートは最初のステージを 24 strokes/min とし、1ステージ毎に 4 strokes/min ずつストロークレートのみを漸増させた (24, 28, 32 および 36 strokes/min)。各ステージ終了前1分間の呼気ガスパラメータ、HR および身体加速度を漸増負荷テストと同様の方法を用いて測定した。



### 2.2.3. 超最大テスト

漸増負荷テストおよびSRテストとは異なる実験日に超最大テストを実施した。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った後に、2分間の超最大テストを行なった。被験者には、可能な限り高い発揮パワーで運動を行うように指示し、運動中は1分毎の呼気ガスパラメータ、HRおよび身体加速度を他のテストと同様の方法を用いて測定した。

## 2.4. ODの推定方法

### 2.4.1. 従来のAOD法によるODの推定

従来のAOD法では、最大下テストで求めた発揮パワーと $\dot{V}O_2$ の直線回帰式に、超最大テスト時の発揮パワーを外挿することによってOD (OD in normal method:  $OD_N$ )を推定した。さらに、 $OD_N$ から測定した $\dot{V}O_2$ を差し引くことによってAOD (AOD in normal method:  $AOD_N$ )を算出した。

### 2.4.2. IAA条件におけるODの推定方法

IAA条件では、運動中に測定した $IAA_{total}$ によって内的仕事の増加分を補正してODを推定した (Oxygen demand in IAA method:  $OD_{IAA}$ )。本研究では、Winter (1979) が提唱した内的仕事および外的仕事の概念に倣い、1) 運動中の $\dot{V}O_2$ は安静時の $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_{2rest}$ ) 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、2)  $\dot{V}O_{2EX}$ は外的仕事に対する $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2$  spent for external work:  $\dot{V}O_{2ext}$ ) および内的仕事に対する $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2$  spent for internal work:  $\dot{V}O_{2int}$ ) によって構成されると仮定した (式7-1 および図7-2)。

$$\begin{aligned}\dot{V}O_2 &= \dot{V}O_{2rest} + \dot{V}O_{2EX} \\ &= \dot{V}O_{2rest} + \dot{V}O_{2int} + \dot{V}O_{2ext}\end{aligned}\quad (式7-1)$$

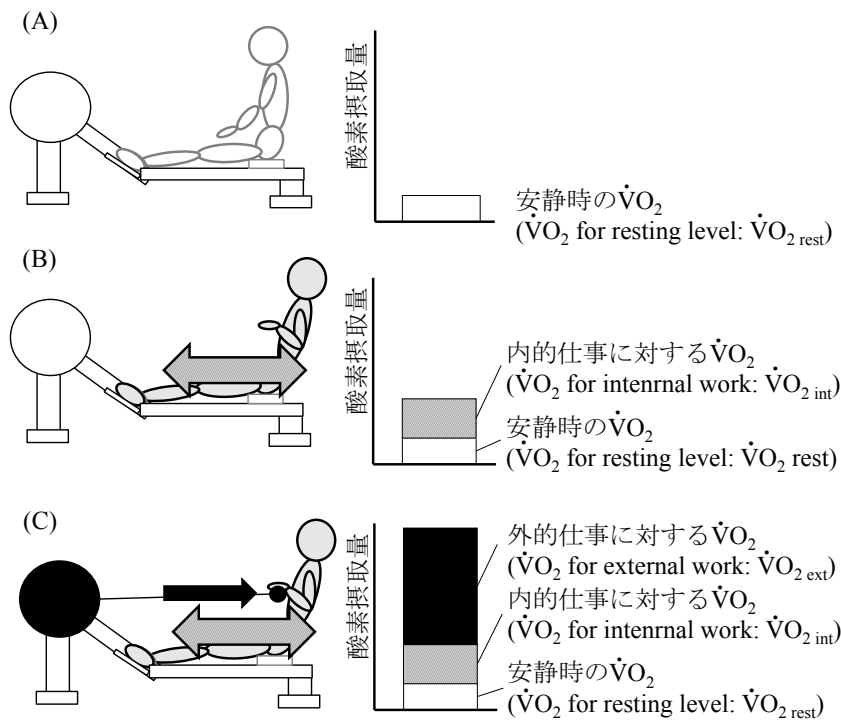


図7-2. 内的仕事および外的仕事の概念によるローイング時の $\dot{V}O_2$ の捉え方。  
 ローイング動作を、身体を前後方向に移動させつつ、ハンドルを牽引することによって推進力を発生させる運動と捉えると、前者は内的仕事、後者は外的仕事と定義される。したがって、ローイングエルゴメーター上で身体を前後方向へ移動させる運動(内的仕事)のみを行なった場合には、安静時 $\dot{V}O_2$ (A)に内的仕事量に対する $\dot{V}O_2$ が上乘せされる(B)。さらに、通常のローイング運動時の $\dot{V}O_2$ は、安静時の $\dot{V}O_2$ (A)、内的仕事および外的仕事に対する $\dot{V}O_2$ によって構成されると捉えられる。

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( $IAA_{total} = 0 \text{ a.u.}$ ,  $\dot{V}O_2 = \dot{V}O_{2 \text{ rest}}$ )をベースラインとして、そこに $\dot{V}O_{2 \text{ int}}$ が上乘せされると考えられる(図7-2(B))。ストロークレートのみを増加させると、 $IAA_{total}$ および $\dot{V}O_2$ は内的仕事量の増加を捉え共に増大し、両者の間には直線関係が成立すること(研究課題I-1およびI-2)から、SRテストで求めた $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の回帰直線の傾き( $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ )および $\dot{V}O_{2 \text{ rest}}$ を用いて、測定した $IAA_{total}$ から $\dot{V}O_{2 \text{ rest}}$ および $\dot{V}O_{2 \text{ int}}$ ( $\dot{V}O_{2 \text{ rest+int}}$ )を推定する式を作成した(式7-2)。

$$\dot{V}O_{2 \text{ rest+int}} (\text{l/min}) = \Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total} \cdot IAA_{total} + \dot{V}O_{2 \text{ rest}} \quad (\text{式7-2})$$

このとき、 $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$  はSRテストにおいて求めた  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の回帰直線の傾き、 $\dot{V}O_{2\ rest}$  は安静時の  $\dot{V}O_2$  を表す。次いで、最大下テストの各ステージで測定した  $IAA_{total}$  から、各ステージにおける  $\dot{V}O_{2\ rest+int}$  を推定した。さらに、各ステージで測定した  $\dot{V}O_2$  からそれらを差し引き、 $\dot{V}O_{2\ ext}$  を算出し、そのうえで各ステージの発揮パワーと  $\dot{V}O_{2\ ext}$  の直線回帰式を求め  $\dot{V}O_{2\ ext}$  の推定式とした(式7-3)。

$$\dot{V}O_{2\ ext} \text{ (L/min)} = a \cdot PO + b \quad (\text{式7-3})$$

このとき、 $a$  および  $b$  は、それぞれ発揮パワーと  $\dot{V}O_{2\ ext}$  の直線回帰式の傾きおよび切片を表し、 $PO$  は発揮パワーを表す。超最大テスト中の  $OD$  を推定する際には、テスト中の発揮パワーおよび  $IAA_{total}$  を、式7-2 および式7-3 にそれぞれ代入し、 $OD_{int}$  および  $OD_{ext}$  を推定し、その合計を超最大テスト中の  $OD$  とした ( $OD_{IAA}$ )。AOD は、従来の AOD 法と同様に、推定した  $OD_{IAA}$  から超最大テスト中の  $\dot{V}O_2$  を差し引いた値とした (AOD estimated by IAA method:  $AOD_{IAA}$ )。

## 2.5. 統計処理

結果はすべて平均値  $\pm$  標準偏差にて示した。従来の AOD 法および  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって推定した  $OD$  ( $OD_N$  および  $OD_{IAA}$ ) および AOD ( $AOD_N$  および  $AOD_{IAA}$ ) の差の検定には、対応のある  $t$  検定を用いた。指標間の関係性の強さの検定には、ピアソンの積率相関係数 ( $r$ ) を用いた。統計的有意性の判断基準はいずれも  $p < 0.05$  とした。

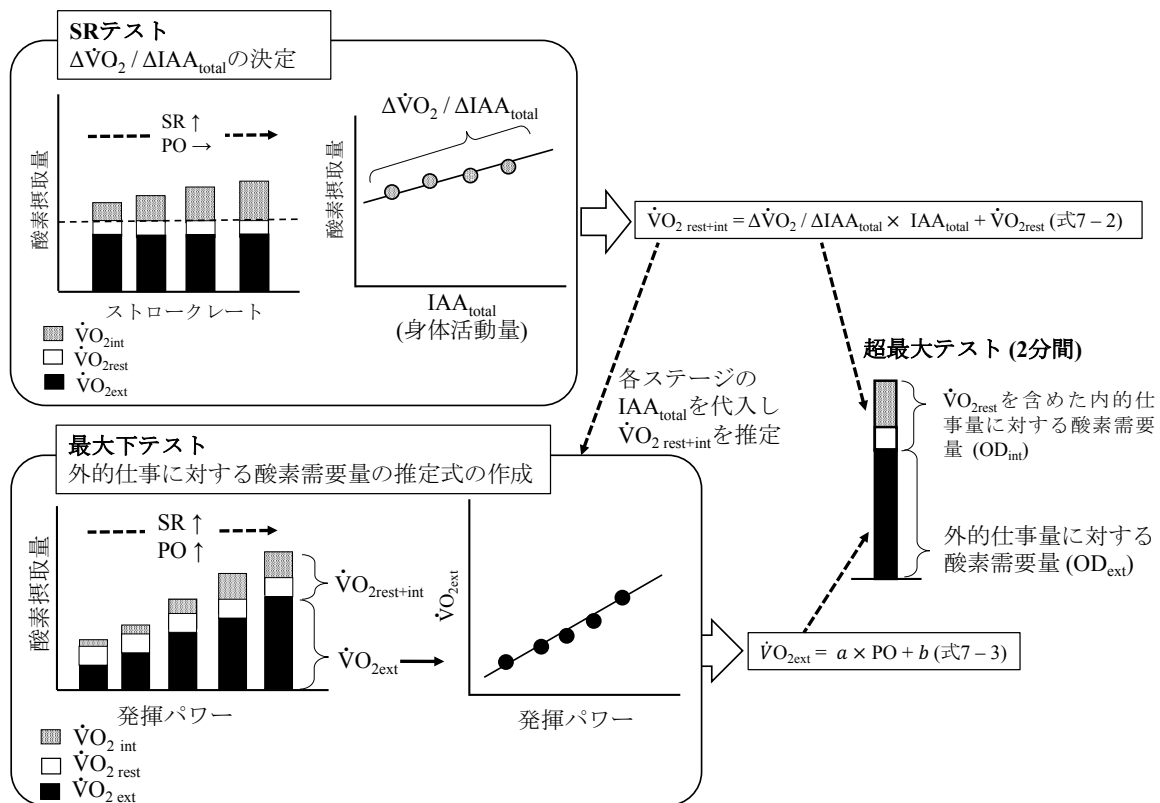


図7-3. IAA<sub>total</sub>を用いたAOD法によるODの推定方法.

ストロークレート (内的仕事)のみを増加させた際の IAA<sub>total</sub> と  $\dot{V}O_2$  の関係を求めるために SR テストを実施し, IAA<sub>total</sub> と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式の傾き ( $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ ) を被験者ごとに求めた.  $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_{2rest}$  を用いて, 測定した IAA<sub>total</sub> から  $\dot{V}O_{2rest}$  および  $\dot{V}O_{2int}$  ( $\dot{V}O_{2rest+int}$ ) を推定する式を作成した. その式を用いて, 最大下テストの各ステージにおける  $\dot{V}O_{2rest+int}$  を推定し, それと実際の  $\dot{V}O_2$  の差分を  $\dot{V}O_{2ext}$  と定義した. そのうえで, 発揮パワーと  $\dot{V}O_{2ext}$  の直線回帰式から  $\dot{V}O_{2ext}$  の推定式を作成した. OD を推定する際には,  $\dot{V}O_{2rest+int}$  の推定式および  $\dot{V}O_{2ext}$  の推定式に, それぞれ超最大テスト中の IAA<sub>total</sub> および発揮パワーを外挿し, OD<sub>int</sub> および OD<sub>ext</sub> を推定し, その合計を OD とした.

### 3. 結果

#### 3.1. 漸増負荷テストおよびSRテスト

$\dot{V}O_{2rest}$  および  $\dot{V}O_{2max}$  は, それぞれ  $301.3 \pm 45.0$  mL/min および  $4072.6 \pm 465.8$  mL/min であった. 最大下テストの各ステージで測定した発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の間には,  $r$  が 0.96~1.00 を示す強い直線関係が認められ, 得られた直線回帰式の傾きおよび切片は, それぞれ  $15.4 \pm 2.5$  mL/min/W および  $110.4 \pm 495.9$  mL/min であった.

表7-1にSRテストの各ストロークレート試技で得られた発揮パワー、ストロークレート、 $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$  を示した。最大下テストによって決定した  $P_{LT}$  は、 $188.5 \pm 25.1$  Wであった。SRテストの各試技間で発揮パワーに有意差は認められなかった。図7-4にストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の関係を典型的な2名の被験者の例で示した。 $\dot{V}O_2$  はSR24試技または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を増加させると、 $\dot{V}O_2$  も増大することが認められた。 $IAA_{total}$  はSR24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を増加させると、 $IAA_{total}$  も増大することが確認された。図7-5に  $\dot{V}O_2$  が最も低い値を示した試技(SR24またはSR28試技)、およびそこからストロークレートを増加させた試技における  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を示した。 $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間には、 $r$  が0.91~1.00の直線関係が認められ、得られた直線回帰式の傾き ( $\Delta\dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ ) は  $20.1 \pm 7.3$  mL/min/a.u. であった ( $\dot{V}O_2 = 20.1 \pm 7.3 \times IAA_{total} + 1789.0 \pm 376.4$ )。

表7-1. SRテストにおける発揮パワー、ストロークレート、 $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$ .

	24 strokes/min	28 strokes/min	32 strokes/min	36 strokes/min
Power (watt)	$183.6 \pm 25.2$	$183.2 \pm 26.2$	$183.7 \pm 25.3$	$184.1 \pm 26.9$
Stroke rate (strokes/min)	$23.9 \pm 0.3^*$	$27.7 \pm 0.2^*$	$32.1 \pm 1.1^*$	$34.8 \pm 1.4^*$
$IAA_{total}$ (a.u./min)	$40.1 \pm 2.7^*$	$46.3 \pm 3.7^*$	$54.7 \pm 3.8^*$	$60.9 \pm 2.6^*$
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	$2697.9 \pm 357.7$	$2727.5 \pm 325.9$	$2856.2 \pm 349.9$	$3047.0 \pm 362.6^{a,b}$

\*は全ての試技間で有意差が認められたことを表す。a および b は、それぞれSR24試技およびSR28試技との間でそれぞれ有意差が認められたことを表す(いずれも  $p < 0.05$ )。

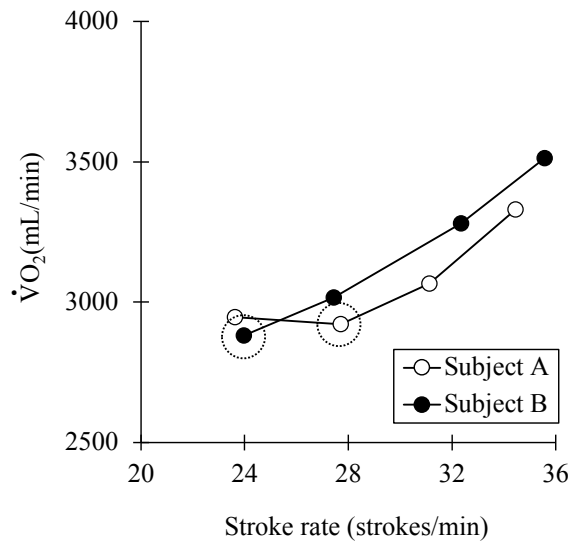


図7-4. SRテストにおけるストロークレートと $\dot{V}O_2$ の関係の典型例.

SRテスト時の $\dot{V}O_2$ は、SR24試技(被験者B)またはSR28試技(被験者A)において最も低い値を示し、そこからストロークレートを増加させると $\dot{V}O_2$ も増大する関係が認められた。図中は $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した試技を破線で囲み示した。

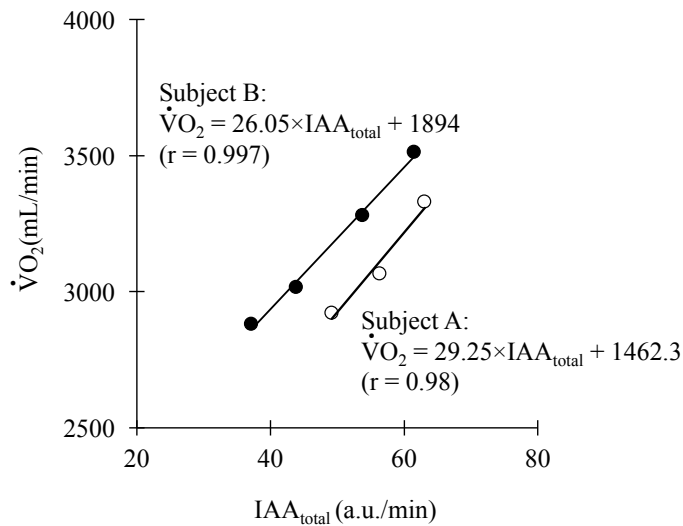


図7-5. SRテストにおける $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係の典型例.

SRテストにおいて、 $\dot{V}O_2$ が最も低い値を示した試技およびそこからストロークレートを増加させた試技における $IAA_{total}$ と $\dot{V}O_2$ の関係について典型的な被験者の例でした。

得られた  $\dot{V}O_{2\text{ rest}}$  および  $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{\text{total}}$  を用いて  $\dot{V}O_{2\text{ rest+int}}$  の推定式(式7-2)を作成した。式7-2に最大下テストの各ステージで測定した  $IAA_{\text{total}}$  を代入することで、各ステージにおける  $\dot{V}O_{2\text{ rest+int}}$  を推定し、それらを各ステージで実際に測定された  $\dot{V}O_2$  から差し引くことによって  $\dot{V}O_{2\text{ ext}}$  を算出した。そのうえで、発揮パワーと  $\dot{V}O_{2\text{ ext}}$  の関係を検討したところ、両者の間には  $r$  が 0.95~1.00 を示す強い直線関係が認められ、得られた直線回帰式の傾きおよび切片は、それぞれ  $13.2 \pm 3.1 \text{ mL/min/W}$  および  $717.1 \pm 515.1 \text{ mL/min}$  であった ( $\dot{V}O_{2\text{ rest+int}} = 13.2 \pm 3.1 \times PO + 717.1 \pm 515.1$ , PO: Power output)。

### 3.2. 超最大テスト

超最大テスト時の発揮パワー、ストロークレートおよび  $IAA_{\text{total}}$  は、それぞれ  $405.4 \pm 38.5 \text{ W}$ ,  $40.4 \pm 0.9 \text{ strokes/min}$  および  $69.4 \pm 26.5 \text{ a.u./min}$  であった。図7-6に従来のAOD法および  $IAA_{\text{total}}$  を用いたAOD法で推定したOD(それぞれ  $OD_N$  および  $OD_{IAA}$ ) およびAOD(それぞれ  $AOD_N$  および  $AOD_{IAA}$ ) を示した(それぞれ図7-6(A) および(B))。  $IAA_{\text{total}}$  を用いたAOD法で推定した  $OD_{IAA}$  および  $AOD_{IAA}$  ( $13.2 \pm 1.9 \text{ LO}_2\text{Eq}$  および  $6.8 \pm 1.5 \text{ LO}_2\text{Eq}$ ) は、従来のAOD法で推定した値 ( $12.4 \pm 2.0 \text{ LO}_2\text{Eq}$  および  $6.1 \pm 1.5 \text{ LO}_2\text{Eq}$ ) と比較して、それぞれ有意に高い値を示した ( $6.4 \pm 3.0 \%$  および  $14.0 \pm 7.7 \%$ )。また、 $OD_N$  と  $OD_{IAA}$  および  $AOD_N$  と  $AOD_{IAA}$  の間には、それぞれ高い級内相関係数(それぞれ、 $ICC(1,1) = 0.91$  および  $0.85$ ) が認められた(図7-6(C) および(D))。図7-6(E) および(F)に、 $OD_N$  と  $OD_{IAA}$  および  $AOD_N$  と  $AOD_{IAA}$  の平均値と推定方法間の差の関係をブランドアルトマンプロットによって示した。OD およびAODにおいて、それぞれの推定値の大きさに依存する系統的誤差は認められなかった。

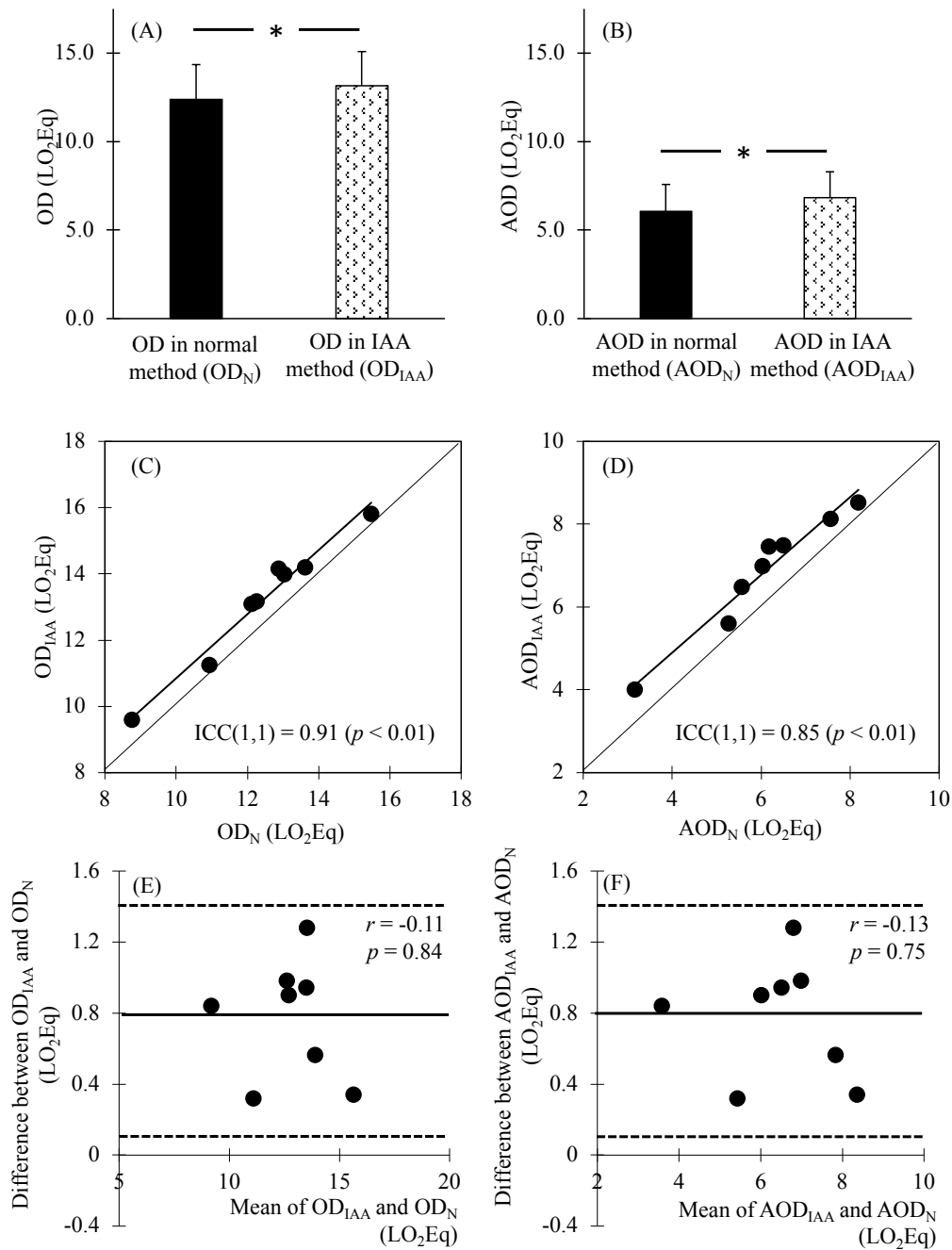


図7-6. OD<sub>N</sub>とOD<sub>IIA</sub>およびAOD<sub>N</sub>およびAOD<sub>IIA</sub>の関係性の検討

IAA<sub>total</sub>を用いたAOD法で推定したODおよびAOD(OD<sub>IIA</sub>およびAOD<sub>IIA</sub>)は、従来のAOD法で推定した値(OD<sub>CON</sub>およびOD<sub>CON</sub>)と比較して、それぞれ有意に高い値を示した((A)および(B))。さらに、OD<sub>N</sub>とOD<sub>IIA</sub>およびAOD<sub>N</sub>およびAOD<sub>IIA</sub>の間には、級内相関係数(Intraclass correlation coefficient: ICC)が、それぞれ0.91および0.85が認められた((C)および(D))。OD<sub>N</sub>とOD<sub>IIA</sub>およびAOD<sub>N</sub>およびAOD<sub>IIA</sub>の平均値とそれぞれの差の関係をブランドアルトマンプロットで示した((E)および(F))。図中の実線は差の平均値、破線は差の2SDの範囲を示す。ODおよびAODの推定値に依存する系統的な誤差は認められなかった。



#### 4. 考 察

本研究の目的は、 $IAA_{total}$  によってストロークレートの増加分を補正して OD を推定する AOD 法を提案し、それによって推定した OD および AOD を、従来の AOD 法で推定した値とそれぞれ比較することであった。本研究の結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で見積もった OD および AOD は、従来の AOD 法で見積もった値とそれぞれ高い級内相関係数を示すものの (それぞれ 0.91 および 0.85)、推定値はそれぞれ  $14.0 \pm 7.7\%$  および  $6.4 \pm 3.0\%$  高い値を示すことが明らかになった。

##### 4.1. $IAA_{total}$ による内的仕事に対する $\dot{V}O_2$ の評価

本研究では、ローイング時の  $\dot{V}O_{2\ int}$  を見積もるために、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 SR テストで得られた  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線関係を用いた。 $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線関係を評価する際に、本研究では  $\dot{V}O_2$  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両指標の値を用いた。その際、8名中4名の被験者において、行われた内的仕事量が最も少ないと考えられる SR24 試技ではなく、SR28 試技において  $\dot{V}O_2$  が最も低い値を示すことが確認された。これは、研究課題 I-1 および I-2 と同様に、SR24 試技では SR28 試技と比較して、1 ストロークあたりの発揮筋力の増加に伴うタイプ II 線維の動員比率の増加が生じ、それによって内的仕事量が少ないものの  $\dot{V}O_2$  が増大していた可能性が考えられる。しかし、これらの被験者における SR24 試技と SR28 試技における  $\dot{V}O_2$  の差は  $41.0 (5.7 \sim 71.8) \text{ mL/min}$  であり、SR28 試技で得られた  $\dot{V}O_2$  の  $1.5\% (0.2 \sim 2.9\%)$  に相当していた。本研究ではダグラスバッグ法を用いて呼気ガスパラメータを定量したが、Taylor et al. (1955) はダグラスバッグ法を用いて  $\dot{V}O_{2\ max}$  測定を実施した場合、測定値の  $2.4\%$  に相当する誤差が含まれることを報告している。このことから、SR24 試技と SR28 試技間の  $\dot{V}O_2$  は、ダグラスバッグ法の測定精度という観点から考えると、非常に微小な差であり、測定誤差の範囲内であった可能性も考えられる。そこで、本研究では被験者毎に  $\dot{V}O_2$  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  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係から  $\dot{V}O_{2\ int}$  の推定式を作成した。

研究課題 I-2 において  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を検討した際には、6~7 試技で得られたデータから両指標の関係について検討し、90% および 100% LT 強度において 8 名中 7 名の被験者において相関係数が 0.9 以上の強い直線関係が確認された。本研究では、研究課題 I-2 で用いたストロークレートの範囲 (22~33 strokes/min) とほぼ等しい範囲内において、より少ない試技 (3 または 4 試技) の結果を用いて  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を検討した。しかし、全ての被験者において  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間には研究課題 I-2 と同等の強い直線関係 (相関係数が 0.9 以上) が認められた。このことから、本研究で実施した SR テストは、研究課題 I-2 と同様に  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を捉えることができたと考えられる。

#### 4.2. OD および AOD

本研究において  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した  $OD_{IAA}$  および  $AOD_{IAA}$  は、従来の AOD 法と比較して、それぞれ  $14.0 \pm 7.7\%$  および  $6.4 \pm 3.0\%$  高い値を示し、それぞれ測定方法間で有意な差が認められた。しかし、本研究の結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法による推定値の妥当性について検討を行なうことはできない。そこで、研究課題 III では、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法による推定値の特性を明らかにすることを目的として、研究課題 III-1 では、無酸素性代謝、特に解糖系によるエネルギー供給の指標となる  $QLaA$  と AOD の関係について検討し、研究課題 III-2 では最大下テストと超最大テストのストロークレートの乖離をなくした方法との比較を行なった。

## 第8章 研究課題 III-1

IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法によって推定した AOD と Q<sub>LaA</sub> の関係

## 1. 目的

研究課題 II の結果から、IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法によって推定した AOD は、従来の AOD 法と比較して 14.0 % 高い値を示すことが明らかになった。そこで、研究課題 III-1 では、それぞれの AOD 法によって推定した AOD に着目し、それと無酸素性代謝、特に解糖系からのエネルギー供給に関連する指標である Q<sub>LaA</sub> の関係を検討することによって、IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法によって推定された AOD の妥当性を明らかにすることを目的とした。なお、IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法によって推定された OD では、超最大テストにおけるストロークレートの増加分が補正されていると考えられることから、そこから算出した AOD (AOD<sub>IAA</sub>) は、従来の AOD 法によって推定した AOD (AOD<sub>N</sub>) よりも Q<sub>LaA</sub> と強い相関関係を示すと仮説立てた。

## 2. 方法

研究課題 III-1 では、研究課題 II で得られた実験結果に、同時に測定した血中乳酸濃度関連指標を加えて論じる。したがって、方法については未記述の方法および測定項目についてのみ記述する。

## 2.1. 被験者

本研究の被験者は、研究課題 II と同様であった。

## 2.2. 測定方法

被験者は、それぞれ異なる実験日に漸増負荷テスト、SR テストおよび超最大テストを実施した。超最大テスト終了後は、エルゴメータ上で 90 分間の安静を保たせた。運動中は 1 分毎の呼気ガスパラメータ、HR および身体加速度を他のテストと同様の方法を用いて測定した。また、テスト開始前 (blood lactate concentration at pre-exercise:  $[La]_{b\ pre}$ )、テスト終了直後 (blood lactate concentration at termination of the exercise:  $[La]_{b\ (0)}$ ) テスト終了後 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80 および 90 分に指先より血液を採取し、それぞれ血中乳酸濃度を測定した。採血に際しては、動脈血化を促進するために Htperemic cold cream (HP クリーム, ジャパンでメディック) を指先に塗布することで血流を亢進させた (Krliza et al., 2015)。運動終了後に測定した血中乳酸濃度のうち、最も高い値を最高血中乳酸濃度 (peak blood lactate concentration:  $[La]_{b\ peak}$ ) とした。

## 2.3. $Q_{LaA}$ の算出方法

超最大テスト終了後の血中乳酸濃度の動態に対して、以下の数理モデルを最小自乗法によってフィッティングした。

$$[La]_{(t)} = [La]_{(0)} + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t}) \quad (\text{式 } 8-1)$$

このとき、 $[La]_{(0)}$  は、運動終了  $t$  分後の血中乳酸濃度を表す (mmol/l)。また、右辺の第 2 項および第 3 項は、それぞれ筋内から血中への乳酸放出成分および血中からの乳酸除去成分を表す指数関数であり、 $A_1$  および  $A_2$  は、それぞれの振幅 (mmol/l)、 $\gamma_1$  および  $\gamma_2$  はそれぞれの時定数 (1/min) を表す。

超最大テスト終了後の血中乳酸濃度が  $[La]_{b\ peak}$  に到達した時点において、筋内と血中の乳酸濃度はほぼ一致すること (Freund and Zouloumian, 1981b; Freund et al., 1986) から、以下の式によってその時点における体内の乳酸蓄積量 (Quantity of lactate accumulated at  $[La]_{b\ peak}$

obtained:  $Q_{LaA}$  at  $[La]_{b \text{ peak}}$ ) を推定した.

$$Q_{La \text{ at } [La]_{b \text{ peak}}} = [La]_{b \text{ peak}} \cdot V_{TLS} \quad (\text{式 8-2})$$

このとき、 $V_{TLS}$  は体内において乳酸が含まれる組織 (筋および血液) の容積 (Total lactate distribution space: TLS, ml) を表し、先行研究に倣い体重 1kg 当たり 600 mL として算出した。さらに、運動終了直後から最高血中乳酸濃度に到達するまでの間に体内から除去された乳酸量 (Quantity of lactate removed:  $Q_{LaR}$ ) を以下の式によって算出した (Bret et al., 2013; Chatel et al., 2016; Maciejewski et al., 2013).

$$Q_{LaR} = \{([La]_{b \text{ peak}} - [La]_{b(0)})/2\} \cdot \gamma_2 \cdot t[La]_{b \text{ peak}} \cdot V_{TLS} \quad (\text{式 8-3})$$

このとき、 $t[La]_{b \text{ peak}}$  は血中乳酸濃度が  $[La]_{b \text{ peak}}$  に到達するまでに要した時間 (min) を表す。そのうえで、以下の式によって運動終了直後から  $t[La]_{b \text{ peak}}$  までに動員された筋から放出された総乳酸量 ( $Q_{LaA}$ ) を算出した。

$$Q_{LaA} = Q_{La \text{ at } [La]_{b \text{ peak}}} + Q_{LaR} \quad (\text{式 8-5})$$

#### 2.4. 統計処理

結果はすべて平均値 ± 標準偏差にて示した。本研究では、Magnitude-based-inference を用いて指標間の関係性について検討を行なった。指標間の関係性は Pearson の積率相関係数を用いて評価し、不確実性 (Uncertainty) の評価には相関係数の 90 % 信頼区間を用いた。すなわち、相関係数が -0.1~0.1 の区間を Trivial, -0.1 以下の区間を Negative, 0.1 以上の区間を Positive とし、相関係数の 90 % 信頼区間が Negative および Positive の両区間にまたがり、かつそれぞれの割合が 5 % を超えていた場合には、指標間の関係性を Unclear と判定した。それ以外の場合は、相関係数の大きさに従って関係性の強さを判定した。すなわち、指標間の相関関係の強さについて、相関係数が 0.1 未満の場合は Trivial, 0.1 以上 0.3 未満の場合は Small, 0.3 以上 0.5 未満の場合は Moderate, 0.5 以上 0.7 未満の場合は Large, 0.7 以上 0.9 未満の場合は Very Large, 0.9 以上の場合は Nearly perfect と判

断した (Hopkins, 2009).

### 3. 結果

#### 3.1. 血中乳酸濃度の動態

図 8 - 1 に超最大テスト終了後の血中乳酸濃度の動態を示した。血中乳酸濃度は、運動終了直後の値 ( $8.29 \pm 1.37$  mmol/L) から急峻な上昇を示し、 $3.1 \pm 1.5$  分後に最高血中乳酸濃度 ( $9.75 \pm 1.8$  mmol/L) に到達した。その後、血中乳酸濃度は緩やかに低下し、80 分後 ( $1.54 \pm 0.61$  mmol/L) および 90 分後 ( $1.32 \pm 0.44$  mmol/L) に安静時とほぼ同等の値 ( $1.28 \pm 0.27$  mmol/L) に戻った。超最大テスト終了後の血中乳酸濃度の動態に対して、被験者毎に数理モデルをフィッティングさせたところ、数理モデルの決定係数 ( $R^2$ ) は  $0.969 \sim 0.996$  であった。各被験者の体重から求めた  $V_{TLS}$  は、 $42.3 \pm 6.1$  L であり、 $[La]_{b \text{ peak}}$  に達した時点における体内の乳酸蓄積量を表す  $Q_{La \text{ at } [La]_{b \text{ peak}}}$  は  $409.7 \pm 28.0$  mmol であった。また、 $[La]_{b \text{ peak}}$  に到達するまでに除去された乳酸量を表す  $Q_{LaR}$  は、 $28.9 \pm 11.0$  mmol であった。 $Q_{La \text{ at } [La]_{b \text{ peak}}}$  と  $Q_{LaR}$  の合計である  $Q_{LaA}$  は  $435.5 \pm 35.4$  mmol であった。

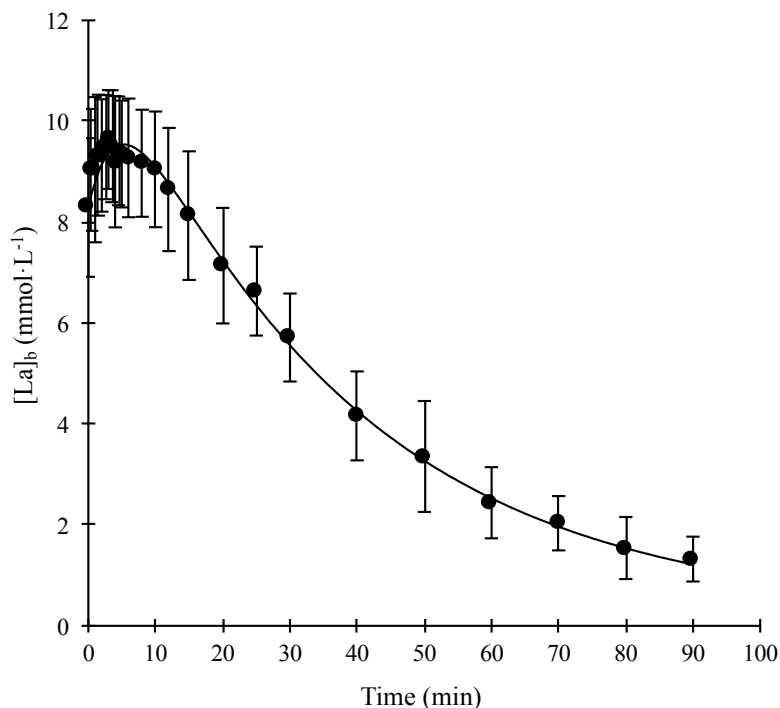


図 8-1. 超最大テスト後の血中乳酸濃度の推移.

図中の曲線は各時点で測定された血中乳酸濃度の平均値に対して数理モデルをフィッティングさせて求めた。

### 3.2. 測定項目間の関係

図8-2にAOD<sub>N</sub>およびAOD<sub>IAA</sub>と[La]<sub>b(0)</sub>, [La]<sub>b peak</sub>およびQ<sub>LaA</sub>の関係を示した。AOD<sub>N</sub>およびAOD<sub>IAA</sub>と[La]<sub>b(0)</sub>の関係は、いずれもUnclearと判断された(それぞれ $r = 0.12, p = 0.77$ , 90%信頼区間:  $\pm 0.62$  および  $r = -0.03, p = 0.995$ , 90%信頼区間:  $\pm 0.63$ )。同様に、AOD<sub>N</sub>およびAOD<sub>IAA</sub>と[La]<sub>b peak</sub>の関係は、いずれもUnclearと判断された(それぞれ $r = 0.13, p = 0.768$ , 90%信頼区間:  $\pm 0.62$  および  $r = 0.10, p = 0.81$ , 90%信頼区間:  $\pm 0.62$ )。しかし、AOD<sub>N</sub>およびAOD<sub>IAA</sub>とQ<sub>LaA</sub>の間には、それぞれModerateに相当する関係が認められた(それぞれ $r = 0.65, p = 0.08$ , 90%信頼区間:  $\pm 0.43$  および  $r = 0.59, p = 0.12$ , 90%信頼区間:  $\pm 0.47$ )。

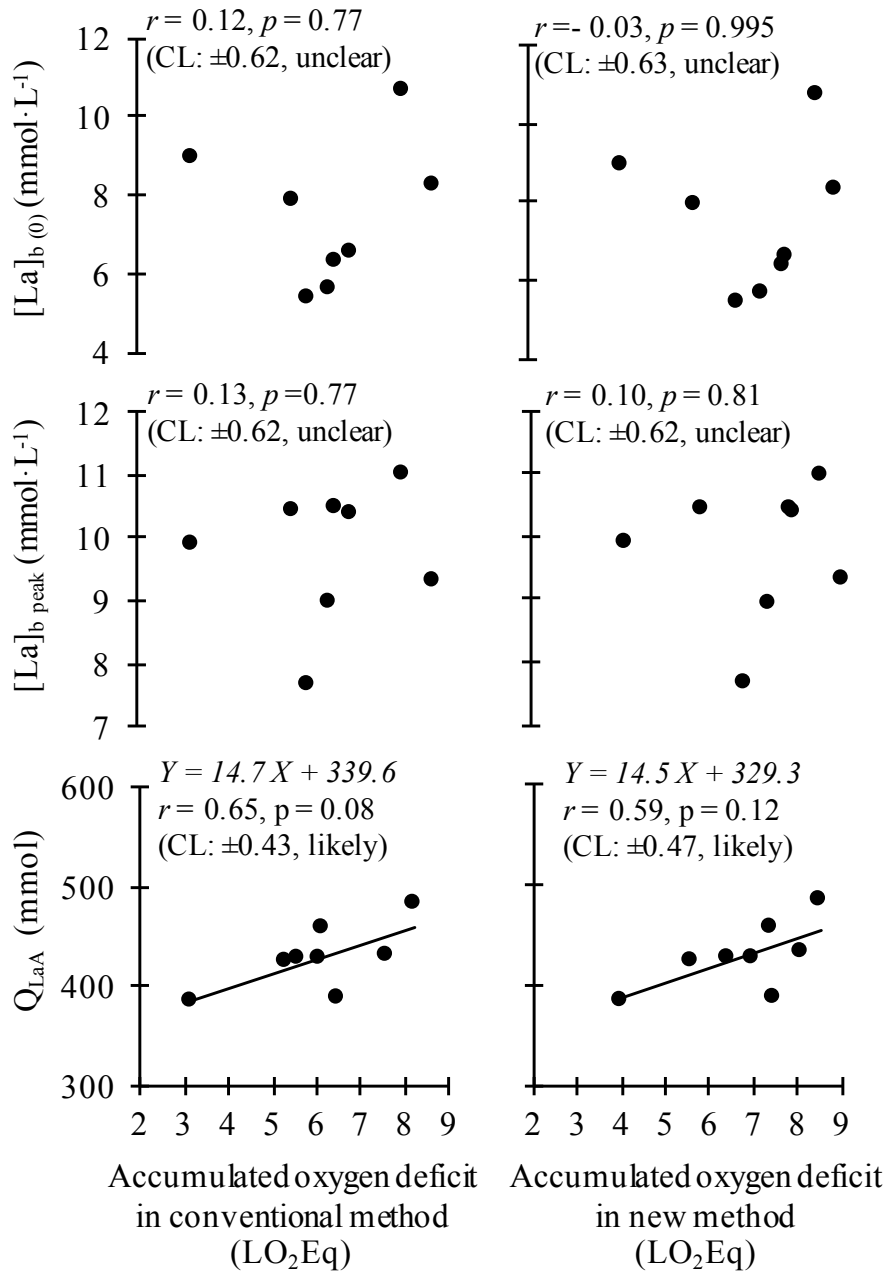


図 8-2. Q<sub>LaA</sub> と AOD<sub>N</sub> および AOD<sub>IAA</sub> の関係.

いずれも、図中に相関係数 (r), p 値, 相関係数の信頼区間 (Confidence limit: CL), Magnitude-based-inference による関係性の解釈について記載した。



#### 4. 考 察

本研究の目的は、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法について、推定された AOD と  $Q_{LaA}$  の関係から推定方法の妥当性を明らかにすることであった。従来の AOD 法と比較して、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって推定された AOD ( $AOD_{IAA}$ ) は 14.0 % 高い値を示した (研究課題 II)。いずれの推定方法においても、AOD と  $[La]_{b(0)}$  および  $[La]_{b\ peak}$  の関係は Unclear と判定されたが、AOD と  $Q_{LaA}$  の間には中程度の相関関係が認められた。しかし、従来の AOD 法および  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法の間において、推定した AOD と  $Q_{LaA}$  の関係性の強さに差は認められなかった。

##### 4.1. 血中乳酸濃度の関連指標と AOD の関係

これまでに、いくつかの先行研究によって超最大運動後の  $[La]_{b(0)}$  や  $[La]_{b\ peak}$  は、無酸素性能力の指標として用いられてきた (Craig et al., 1995; 佐伯ほか, 1995; 佐伯ほか 1998)。佐伯ほか (1999) は、オールアウト後の  $[La]_{b\ peak}$  が、長距離ランナーと比較して、無酸素性能力に優れる中距離ランナーで高い値を示すことを報告している。また、Craig et al. (1995) は、自転車運動において超最大運動後の  $[La]_{b\ peak}$  と MAOD の間に正の相関関係が認められたことを報告している。その一方で、多くの先行研究によって AOD が超最大運動後の  $[La]_{b(0)}$  や  $[La]_{b\ peak}$  と正の相関関係を示さなかったことが報告されている (Bishop et al., 2002; Gastin et al., 1995; Medbø et al., 1988; Pripstein et al., 1999; Scott et al., 1991)。本研究においても、従来の AOD 法および  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した AOD ( $AOD_N$  および  $AOD_{IAA}$ ) と  $[La]_{b(0)}$  および  $[La]_{b\ peak}$  の関係は Unclear と判定され、指標間に正の相関関係は認められなかった。その要因として、超最大運動後の血中乳酸濃度には、運動に動員された筋で産生された乳酸量に加えて、血中から除去された乳酸量が反映されている点が挙げられる (van Hall et al., 2009)。さらに、血中乳酸濃度には、被験者の体重や体組成といった形態的特徴が反映されないことから、それ単独の指標から体内で賛成され蓄積した乳酸量を推定することは困難であると考えられる。そこで、本研究では、超最大運動

後の血中乳酸動態に数理モデルを当てはめ、動員された筋から血中への乳酸放出および血中からの乳酸除去を評価し、そこから得られた各指標を用いて算出した  $Q_{LaA}$  を無酸素性代謝、特に解糖系からのエネルギー供給の指標として用いた。この数理モデルは、これまでに走運動 (Aguiar et al., 2015a; Aguiar et al., 2015b; Bret et al., 2003; Bret et al., 2013; Chatel et al., 2016)、自転車運動 (Beneke et al., 2007; Beneke et al., 2010; Messonnier et al., 2001; Messonnier et al., 2006) に加えて、ローイングを対象とした先行研究 (Maciejewski et al., 2013; Messonnier et al., 1997) でも用いられており、高強度運動後の血中乳酸濃度の動態によくフィットすることが報告されている。本研究においても数理モデルの  $R^2$  値は 0.969~0.996 であり、先行研究と同程度であった。さらに、本研究において従来の AOD 法および  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した AOD と  $Q_{LaA}$  の関係を検討したところ、それぞれ中程度の相関関係が認められ、方法間で AOD と  $Q_{LaA}$  の関係に差は認められなかった。これらの結果は、いずれの AOD 法においても推定した AOD は、無酸素性代謝量、特に解糖系によるエネルギー供給の指標と関連することを示唆している。しかし、Maciejewski et al. (2013) は、ローイングを対象として、3 分間の超最大運動を行わせ、従来の AOD 法で推定した AOD と  $Q_{LaA}$  の間に本研究よりも強い相関関係が認められたことを報告している ( $r=0.85$ ; 90% 信頼区間:  $\pm 0.22$ , Most likely)。本研究において AOD と  $Q_{LaA}$  の相関係数が、Maciejewski et al. (2013) の報告と比較していずれも低い値であった要因として、本研究で用いた超最大テストの運動時間および被験者の形態的特徴が影響が考えられる。

まず、本研究では2分間の超最大テストを採用したのに対して、Maciejewski et al. (2013) は3分間の超最大テストを用いていた。高強度運動では、ATP-PCr系からのATP再合成は運動開始後10秒程度でほとんど行われなくなり、それ以降の無酸素性代謝はその大部分が解糖系によるATP再合成に依存することを考慮すると、3分間の超最大テストでは、2分間の超最大テストと比較して、無酸素性エネルギー供給量に対して解糖系がより高い割合で貢献していた可能性がある。さらに、AODは無酸素性代謝量、すなわちATP-PCr

系および解糖系によるエネルギー供給量を合わせた指標であるのに対して、 $Q_{LaA}$  は解糖系によるエネルギー供給の指標とされている。以上の点から、本研究では無酸素生代謝に占める解糖系によるエネルギー供給の割合が小さく、それが AOD と  $Q_{LaA}$  の相関関係に影響を及ぼしていた可能性がある。

次に、先行研究と比較して、本研究の被験者の体重には大きなばらつきが認められたすなわち、先行研究および本研究の被験者の体重は、それぞれ  $72.1 \pm 3.0$  kg および  $70.5 \pm 10.5$  kg であり、このときの変動係数はそれぞれ 4.2 % および 14.8 % であった。一方、被験者の身長には、体重のような大きなばらつきは認められなかった (先行研究および本研究において、変動係数がそれぞれ 1.6 % および 2.9 %)。これらの結果は、直接的に被験者の身体組成を表すものではないが、本研究と比較して、先行研究の被験者は身体組成についてより等質な集団であった可能性がある。本研究および先行研究は、いずれも乳酸代謝に関連した組織の容積 ( $V_{TlS}$ ) を被験者の体重のみから推定している。そのため、本研究のように体組成が非等質な可能性がある集団では  $V_{TlS}$  が正確に推定されず、その結果、 $Q_{LaA}$  と AOD の間の関係が弱まった可能性も考えられる。

#### 4.2. 従来の AOD 法および $IAA_{total}$ を用いた AOD 法の関係

本研究で得られた AOD と  $Q_{LaA}$  の関係からは、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法の妥当性を確認することはできなかった。しかし、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した AOD は、従来の AOD 法で推定した値と比較して、14.0 % 高い値を示し、さらに推定方法間における AOD の差は、被験者によって大きく異なった (4.2~26.5 %)。このことは、被験者によっては推定方法間における AOD の差が小さかったことを意味している。方法間における AOD の差は推定した OD の差に起因するが、その差が小さくなる要因としては、超最大テストと最大下テストにおけるストロークレートの乖離が少なかった可能性が考えられる。すなわち、最大下テストおよび超最大テストを通して、発揮パワーの増加に対してストロークレートも増加していた被験者では、従来の AOD 法によって推定した OD が、 $IAA_{total}$  を

用いて超最大テストにおけるストロークレートの増加分を補正して推定した OD を近い値を示す可能性がある。

#### 4.3. 本研究の限界と新たな課題

本研究では、無酸素性代謝、特に解糖系からのエネルギー供給の指標として  $Q_{LaA}$  を用いた。しかし、本研究で採用した超最大テストは、先行研究と比較して運動時間が短かったため、運動中の無酸素性代謝量に占める解糖系からのエネルギー供給の貢献割合が低かった可能性や、被験者の体重のばらつきが大きかったことが  $V_{TILS}$  の推定値に影響を及ぼしていた可能性が考えられ、その結果、いずれの推定方法においても AOD と  $Q_{LaA}$  の関係が先行研究よりも弱まっていた可能性が考えられた。そのため、本研究の結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法の妥当性を明らかにすることはできなかった。 $Q_{LaA}$  によって推定された AOD の妥当性を検討するためには、より運動時間が長い超最大テストを用いることや、形態的特性がより等質な被験者集団を対象とする必要があると考えられる。

一方、推定方法間における AOD の差は被験者によって大きく異なること (4.2~26.5 %) が確認された。推定方法間における AOD の差は OD の差に起因するが、その要因として超最大テストと最大下テストにおけるストロークレートの乖離の程度が関与している可能性があった。したがって、最大下テストのストロークレートを調整することによってストロークレートの乖離を小さくする方法でも、超最大テストにおけるストロークレートの増加分を加味して OD が推定できる可能性が考えられた。

## 5. 結 論

本研究の結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって推定した AOD は、 $Q_{LaA}$  と中程度の相関関係を示すことが明らかになった。しかし、従来の AOD 法によって推定した AOD と  $Q_{LaA}$  の間にも同程度の相関関係が認められたことから、本研究の結果から  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法の妥当性を明らかにすることはできなかった。そこで研究課題 III-2 では、

最大下テスト時のストロークレートを調整する方法によって、超最大テストにおけるストロークレートの増加分を補正する方法との比較から、 $IAA_{total}$ を用いたAOD法によって、超最大テスト時のストロークレートの増加分が補正されていたかについて検討することとした。

## 第9章 研究課題 III-2

## ストロークレートを調整した最大下テストによる妥当性の検討

## 1. 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において、Cavagna and Kaneko (1977) はピッチの増加に伴って四肢そのものを移動させる仕事 (内的仕事) が増加することを報告している。さらに、牧ほか (2010) は、走運動時のピッチが走速度に対してほぼ直線的に増加することを報告している。これらのことから、走運動では、走速度に対して内的仕事量も一定の割合で増加するため、最大下強度で求めた走速度と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式から推定した超最大運動時の OD には、ピッチの増加に伴う内的仕事量の増加分が加味されているといえる。したがって、ローイングにおいても、最大下テストにおけるストロークレートを調整し、最大下テストと超最大テストを通して発揮パワーとストロークレート間に直線関係を成立させることによって、最大下テストで求めた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式から超最大テスト時のストロークレートの増加分を加味して OD を推定することが可能である。

そこで、本研究の目的は、発揮パワーとストロークレート間に直線関係が成立するようにストロークレートを調整した最大下テスト (SR 増加条件) によって推定した OD (Oxygen demand in increased stroke rate condition:  $OD_{SR}$ ) と、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した OD (Oxygen demand in IAA method:  $OD_{IAA}$ ) の関係を比較することで、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によってストロークレートの増加分を補正して OD が推定されているかを検討することとした。

## 2. 方法

### 2.3. 被験者

被験者は男子大学生ボート選手 10 名 (身長:  $174.7 \pm 4.9$  cm, 体重:  $71.1 \pm 8.9$  kg, 年齢:  $20.6 \pm 2.8$  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し, 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了承を書面にて得た。

### 2.4. 実験および測定内容

本研究では, 2000 m テスト時の発揮パワー ( $P_{2000}$ ) で実施した 90 秒間の超最大テスト ( $P_{2000}$  テスト) の OD を 3 つの方法によって推定した。すなわち,  $P_{2000}$  テスト時の OD を, 1) 通常の下最大テストで求めた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式を用いる方法 (通常条件, 図 9-1 (A), Oxygen demand: OD), 2) ストロークレートを直線的に増加させた最大下テストで求めた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式を用いる方法 (SR 調整条件, 図 9-1 (B), Oxygen demand in stroke rate adjusted condition:  $OD_{SR}$ ), および 3)  $IAA_{total}$  によって内的仕事の増加分を補正する方法 (IAA 条件, Oxygen demand in IAA method:  $OD_{IAA}$ ) によってそれぞれ推定した。

#### 2.2.1. 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。 $\dot{V}O_2$ 、HR および身体加速度は研究課題 III-1 と同様の方法を用いて測定した。

### 2.2.2. $P_{2000}$ テスト

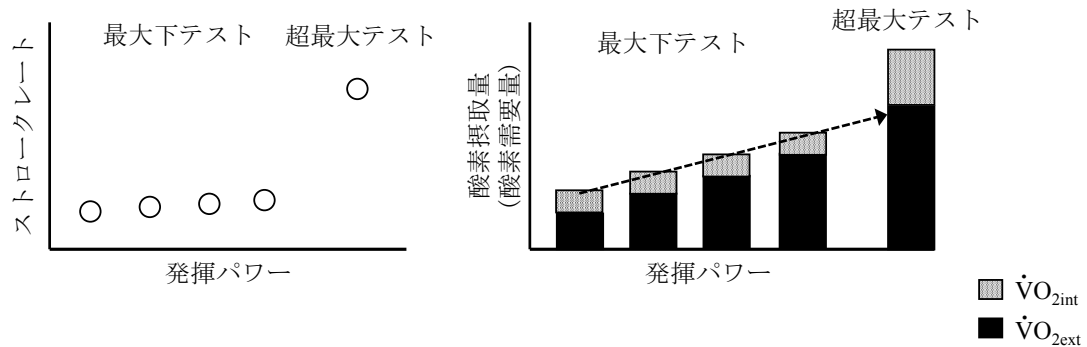
SR テスト終了後 15 分間の休息を挟み  $P_{2000}$  テストを実施した。運動時間は 90 秒間とし、被験者は最も漕ぎやすいストロークレートで指定された発揮パワー (各被験者の  $P_{2000}$ ) を維持した。すなわち、運動中のストロークレートおよび発揮パワーをそれぞれ一定に保つよう指示をした。運動中は他のテストと同様の方法で、 $\dot{V}O_2$ 、HR および身体加速度データを測定した。

### 2.2.3. 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 調整条件)

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。



(A) 従来 of AOD法



(B) 最大下テストのストロークレイトを調整したAOD法

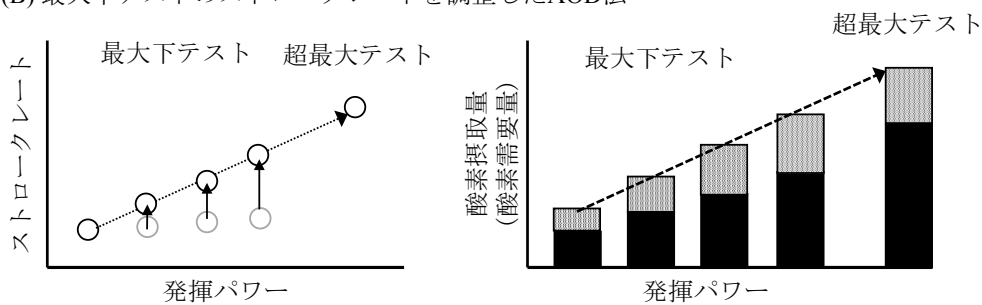


図9-1. 本研究において検討した酸素需要量の推定方法の概念図。

通常 of 最大下テストによって推定された OD は、超最大テストにおけるストロークレイトの増加が考慮されていないため、実際よりも過小評価されている可能性がある (A, 従来 of AOD 法, 通常条件). そこで、最大下および超最大テストを通して、ストロークレイトが発揮パワーに対して直線的に増加するように最大下テストのストロークレイトを調整すれば、超最大テストにおけるストロークレイトの増加分を加味して OD が推定できると考えられる (B, SR 調整条件).

#### 2.2.4. ストロークレイトテスト (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イ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%  $P_{2000}$ , ストロークレイトは 24, 28, 32 および 36 strokes/min とし、各ストロークレイ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.

## 2.5. OD の算出方法

### 2.4.3. 通常条件および SR 調整条件における OD の推定方法

SR 増加条件は、通常条件と異なる実験日に実施した。そのため、SR 増加条件における OD の推定式は、通常条件で測定した第 1 ステージの発揮パワーおよび  $\dot{V}O_2$  に、SR 増加条件で求めた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式の傾き (発揮パワーに対する  $\dot{V}O_2$  の増加率) を組み合わせて作成した。

$$OD (L O_2 Eq/min) = \Delta \dot{V}O_2 / \Delta PO \cdot PO + (\dot{V}O_{2_{1st}} - \Delta \dot{V}O_2 / \Delta PO \cdot PO_{1st}) \quad (\text{式 9-1})$$

このとき、OD は酸素需要量、 $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta PO$  は SR 増加条件で求めた発揮パワーに対する  $\dot{V}O_2$  の増加率、PO は発揮パワーを表す。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。

### 2.4.4. IAA 条件における OD の推定方法

IAA 条件における OD の推定は、研究課題 II と同様とし、通常条件の最大下テストおよび SR テストで得られた結果から、被験者毎に  $OD_{int}$  および  $OD_{ext}$  に対する推定式を作成し、それらに  $P_{2000}$  テスト中の  $IAA_{total}$  および発揮パワーを外挿することによって OD を推定した ( $OD_{IAA}$ )。

## 2.6. 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、 $IAA_{total}$ 、 $\dot{V}O_2$  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。

### 3. 結果

#### 3.1. 発揮パワーに対するストロークレートおよび $IAA_{total}$

図9-2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  $IAA_{total}$  (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9-2(A), 第1から4ステージにおいて、それぞれ  $22.6 \pm 1.6$ ,  $22.7 \pm 1.6$ ,  $23.0 \pm 1.9$  および  $23.5 \pm 1.9$  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  $24.0 \pm 1.8$ ,  $25.5 \pm 1.8$  および  $26.8 \pm 1.7$  strokes/min)、 $P_{2000}$  テストにおけるストロークレート ( $34.8 \pm 3.2$  strokes/min) を含めると発揮パワーとの間で非常に強い直線性を示した ( $r = 1.00$ )。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  $IAA_{total}$  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9-2(B), 第1ステージから第4ステージにおいて、それぞれ  $38.4 \pm 2.8$ ,  $39.4 \pm 3.0$ ,  $40.9 \pm 3.7$  および  $42.3 \pm 3.6$  count/min)。SR 増加条件における  $IAA_{total}$  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 ( $38.4 \pm 3.2$  a.u./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  $41.9 \pm 3.4$ ,  $45.3 \pm 3.4$  および  $48.2 \pm 4.1$  a.u./min)、 $P_{2000}$  テストにおける  $IAA_{total}$  ( $66.3 \pm 9.3$  a.u./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 ( $r = 0.96 \sim 1.00$ )。図9-3に通常お

よび SR 増加条件で求めた推定式の関係を示した。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  $12.1 \pm 1.5$  および  $13.8 \pm 1.8$  ml/min/watt であり、条件間で有意な差が認められた ( $p < 0.05$ )。

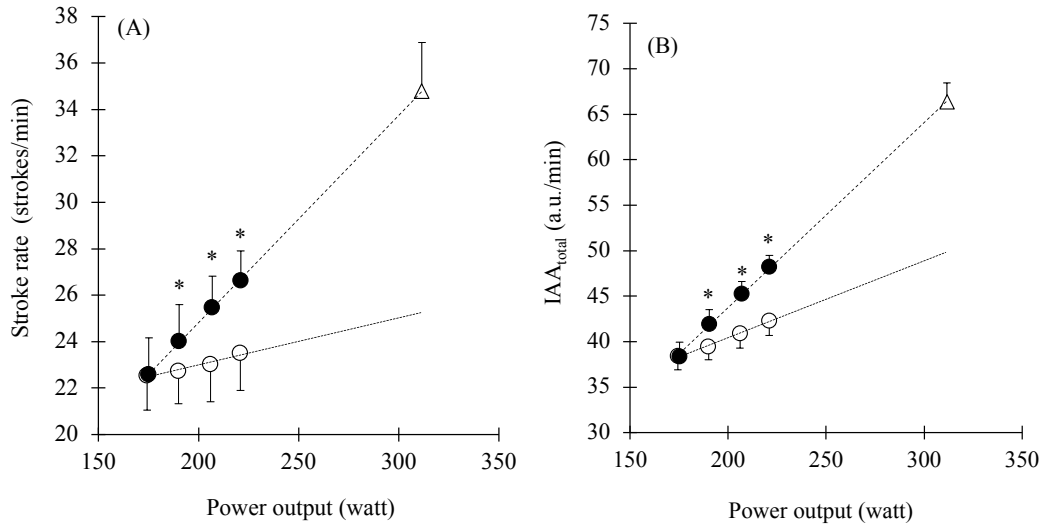


図9-2. 発揮パワーとストロークレート (A) および IAA<sub>total</sub> の関係 (B).

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<sub>2000</sub> 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 ( $p < 0.05$ )。

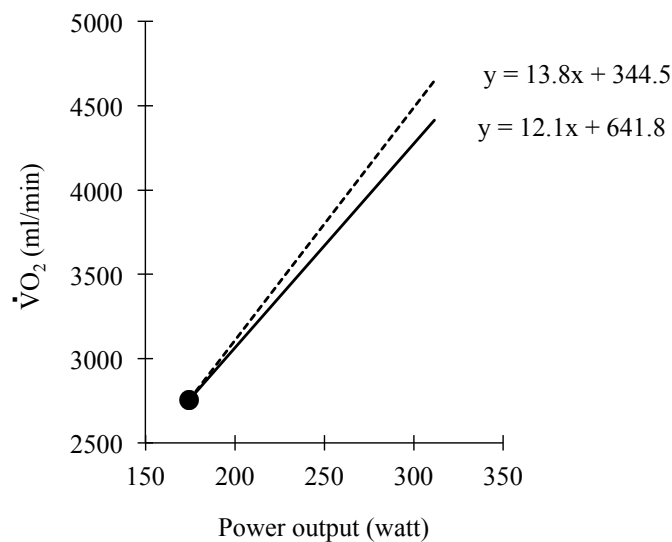


図9-3. 通常条件 (図中実線) および SR 増加条件 (図中破線) における OD の推定式。

## 3.2. SR テスト

表9-1にSRテストの各試技における発揮パワー、ストロークレート、 $IAA_{total}$ および $\dot{V}O_2$ を示した。発揮パワーは試技間でほぼ一致し、有意な差は認められなかった。 $IAA_{total}$ はSR24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を増加させると $IAA_{total}$ も有意に増大した。 $\dot{V}O_2$ 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 $IAA_{total}$ 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( $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ )は、 $18.7 \pm 13.6$  ml/a.u.であった。

式7-2を用いて各ステージで測定した $IAA_{total}$ から $\dot{V}O_{2rest+int}$ を推定し、それらを各ステージで実際に測定した $\dot{V}O_2$ から差し引くことによって $\dot{V}O_{2ext}$ を算出した。そのうえで、各ステージの発揮パワーと $\dot{V}O_{2ext}$ の関係を被験者毎に検討したところ、両者の間には $r$ が0.87~1.00の強い線形関係が認められた。このときの発揮パワーと $\dot{V}O_{2ext}$ の直線回帰式の傾きは、 $10.81 \pm 2.50$  mL/min/wattであった。

表9-1. SRテストの各試技における発揮パワー、ストロークレート、 $IAA_{total}$ および $\dot{V}O_2$ .

	24 strokes/min	28 strokes/min	32 strokes/min	36 strokes/min
Power output (watt)	182.4 ± 22.4	182.7 ± 21.7	182.5 ± 22.8	183.5 ± 20.9
Stroke rate (strokes/min)	24.0 ± 0.1 *	27.9 ± 0.2 *	31.7 ± 0.4 *	35.7 ± 0.6 *
$IAA_{total}$ (count/min)	42.3 ± 3.5 *	49.0 ± 4.0 *	55.3 ± 4.9 *	60.8 ± 5.0 *
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	2873.2 ± 295.2 <sup>c,d</sup>	2869.4 ± 281.7 <sup>c,d</sup>	2959.4 ± 297.0 <sup>a,b,d</sup>	3110.9 ± 249.0 <sup>a,b,c</sup>

\*: 他の全ての試技と有意差あり, a: SR24試技との間で有意差あり, b: SR28試技との間で有意差あり, c: SR32試技との間で有意差あり, d: SR36試技との間で有意差ありを示す。いずれも  $p < 0.05$ 。

## 3.3. OD

図9-4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<sub>SR</sub>およびOD<sub>IAA</sub>)を示した。OD<sub>SR</sub>およびOD<sub>IAA</sub>は, それぞれ  $7.0 \pm 0.8$  および  $7.0 \pm 0.7$  lO<sub>2</sub>Eq であり, OD<sub>SR</sub> ( $6.6 \pm 0.8$  lO<sub>2</sub>Eq) 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<sub>SR</sub> と OD<sub>IAA</sub> の間には, 有意な差は認められなかった。図9-5にOD<sub>SR</sub> と OD<sub>IAA</sub> 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<sub>SR</sub> と OD<sub>IAA</sub> 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<sub>SR</sub> と OD<sub>IAA</sub> の関係を検討したところ, 両推定方法の差は  $-0.03 \pm 0.41$  lO<sub>2</sub>Eq 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9-6,  $r = -0.12, p = 0.76$ )。

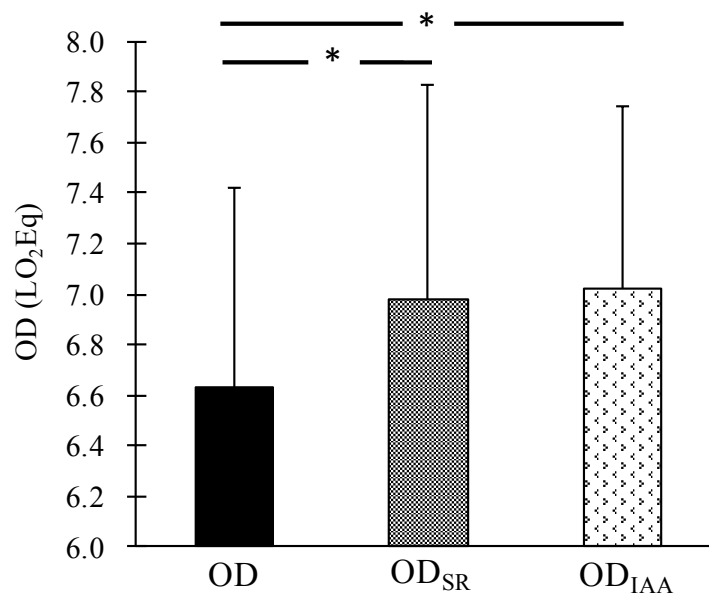


図9-4. 各条件によって推定したOD.

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<sub>SR</sub>およびOD<sub>IAA</sub>. \*は条件間で有意差が認められたことを示す ( $p < 0.05$ ).

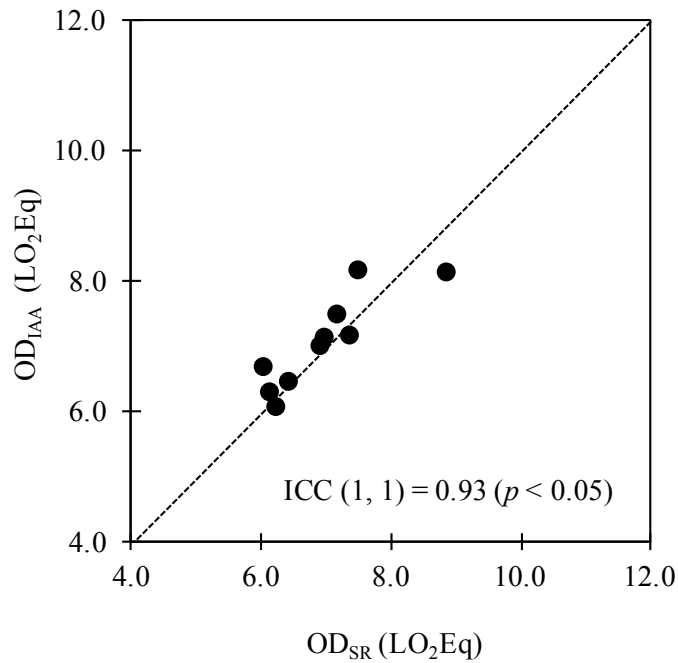


図9-5. OD<sub>SR</sub> と OD<sub>IAA</sub> の関係.

図中の破線は Y = X の直線を表す.

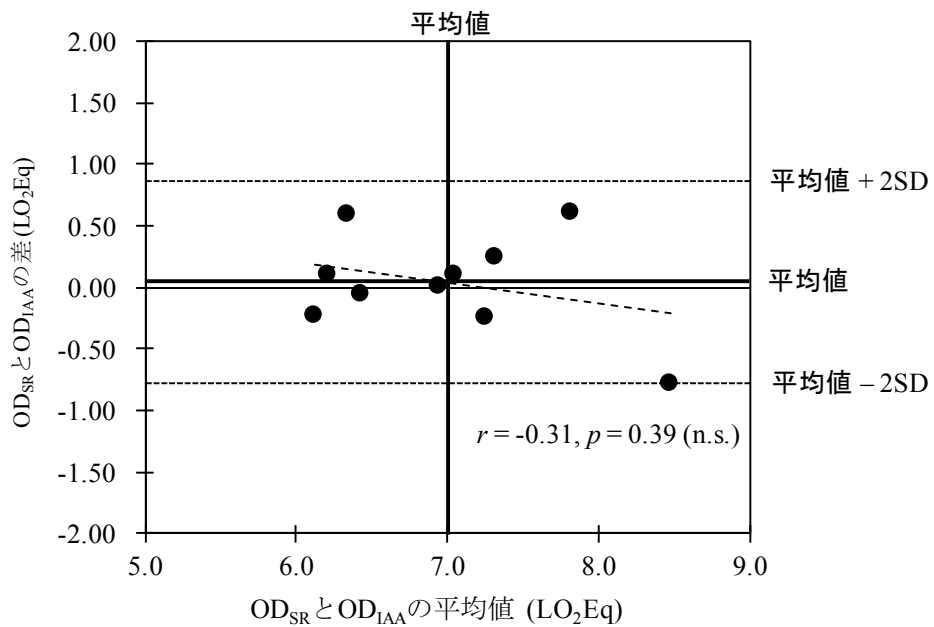


図9-6. ブランド・アルトマンプロットによる OD<sub>SR</sub> と OD<sub>IAA</sub> の関係性の検討.

各被験者における OD<sub>SR</sub> および OD<sub>IAA</sub> の平均値を全被験者で平均した値は  $7.0 \pm 0.8$  IO<sub>2</sub>Eq であり, OD<sub>SR</sub> と OD<sub>IAA</sub> の差の平均値は  $0.03 \pm 0.41$  IO<sub>2</sub>Eq であった.

#### 4. 考 察

本研究の目的は、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法について、推定された OD に超最大テスト時のストロークレートの増加分が加味されているか否かを検討することであった。この目的を達成するために、従来の AOD 法 (通常条件) に加えて、最大下テストにおけるストロークレートを調整することで超最大テスト時のストロークレートの増加分を補正する方法 (SR 増加条件) および  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって、超最大テスト中の OD をそれぞれ推定し、それらを比較検討した。その結果、SR 増加条件で推定した  $OD_{SR}$  および  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した  $OD_{IAA}$  は、通常条件によって推定した OD よりもそれぞれ有意に高い値を示した。また、 $OD_{SR}$  と  $OD_{IAA}$  とはほぼ一致した値を示し、さらに両者の間には高い級内相関係数 ( $ICC(1, 1) = 0.93, p < 0.05$ ) が認められた。

##### 4.1. SR 増加条件における OD ( $OD_{SR}$ )

通常条件と比較して、SR 調整条件では、第2ステージ以降のストロークレートおよび  $IAA_{total}$  が有意に高い値を示した。このことから、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、それぞれ通常条件と比較して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 (図9-3)。ローイング時の  $\dot{V}O_2$  は、外的仕事 (すなわち発揮パワー) のみならず内的仕事 (ストロークレート) の影響を受けること (Hofmijster et al., 2009)、さらに、両条件において各ステージの外的仕事 (発揮パワー) は同一であったことから、条件間における  $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta PO$  の差は第2ステージ以降の各ステージにおける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  $IAA_{total}$  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  $IAA_{total}$  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 増加条件では、最大下テストおよび  $P_{2000}$  テストを通して発揮パワーとストロークレートおよび  $IAA_{total}$  の間で



強い直線性が認められた (図9-2)。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<sub>2000</sub> 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 増加条件によって求めた OD の推定式には、超最大テストにおける内的仕事の増加が加味されていたと考えられ、OD<sub>SR</sub> 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。

#### 4.2. IAA 条件における OD (OD<sub>IAA</sub>)

OD<sub>IAA</sub> は OD よりも有意に高い値を示し、かつ OD<sub>SR</sub> とはほぼ等しい値を示すことが明らかになった。さらに、OD<sub>IAA</sub> と OD<sub>SR</sub> の間には高い級内相関係数 (ICC (1, 1) = 0.93,  $p < 0.05$ ) が確認された。これらの結果は、IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法 (IAA 条件) によって推定された OD には、SR 調整条件と同様に、P<sub>2000</sub> テストにおける内的仕事の増加分が加味されていたことを示唆している。

本研究の結果から、IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法で推定した OD には、最大下テストのストロークレートを調整する方法 (SR 調整条件) によって推定した OD と同様に、超最大テストにおけるストロークレートの増加による内的仕事の増加分が加味されていることが明らかになった。一方、SR 調整条件は、超最大テストおよびそこで得られた発揮パワーとストロークレートを基準としてストロークレートを調整した最大下テストを実施する方法であり、IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法と比較して、より簡便にローイング時の OD が推定できる方法であるとも考えられる。しかし、本研究では、各被験者が一定の発揮パワーおよびストロークレートを維持できる実験条件 (P<sub>2000</sub> テスト) で運動を行わせたが、オールアウト形式のテストのように運動開始直後から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。また、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 調整条件によって、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、それぞれの

局面における発揮パワーとストロークレートを全て把握し、それを踏まえて発揮パワーとストロークレートを調整した最大下テストをそれぞれ実施する必要がある、現実的とはいえない。さらに、ローイング動作は、自転車運動のペダリング動作とは異なり、1ストロークの動きがクランクによって規定されていない。そのため、ストロークレートが同一であっても、実際の内的仕事量が異なる可能性も考えられる。以上の点を考え合わせると、 $IAA_{total}$ を用いた AOD 法は、オールアウトテストや 2000 m テストのような運動中のストロークレートおよび 1 ストローク中の動作が変化する可能性がある条件において OD を推定するうえで有用な方法であると考えられる。

## 5. 結 論

本研究の結果から、最大下テスト時のストロークレートを調整する方法 (SR 増加条件) では、最大下テストおよび  $P_{2000}$  テストを通してストロークレートおよび  $IAA_{total}$  が発揮パワーに対して直線的に増加し、その結果、推定した  $OD_{SR}$  は従来の AOD 法で推定した OD よりも有意に高い値を示すことが明らかになった。さらに、IAA 条件で推定した  $OD_{IAA}$  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。これらの結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法は、超最大運動におけるストロークレートの増加による内的仕事の増加分を補正して OD が推定できることが示唆された。

## 第10章 研究課題 IV

## ローイングにおける MAOD の測定プロトコルの検討

## 1. 目的

ここまでに得られた結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって、超最大テスト時のストロークレートの増加分を補正して OD が推定できることが示せた。一方、MAOD を評価する際には、被験者のエネルギー供給系の体力特性や、専門とする競技で用いられるペース戦略などを考慮して最適な測定プロトコルを設定する必要があることが指摘されている (Craig et al., 1995)。

そこで本研究では、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法を用いて、運動時間の異なる超最大テスト時の AOD を定量し、各テストにおいて MAOD に到達した被験者の数から、ローイング時の MAOD を測定する際の最適なプロトコルについて検討することを目的とした。

## 2. 方法

## 2.1. 被験者

被験者は、男子大学生ボート選手 14 名 (身長:  $1.73 \pm 0.05$  m, 体重:  $69.3 \pm 7.4$  kg, 年齢:  $20.1 \pm 1.2$  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し、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。

## 2.2. 実験内容および測定項目

### 2.2.1. 漸増負荷テスト

漸増負荷テストは、最大下およ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、エルゴメータで実施した直近の 2000 m タイムトライアル時の平均発揮パワー ( $P_{2000}$ ) の 55% とし、そこから 1 ステージ毎に 5%  $P_{2000}$  ずつ発揮パワーを漸増させ 6 ステージを実施した (55, 60, 65, 70, 75 および 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 75%  $P_{2000}$  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。被験者には加速度センサを装着させ、これまでの研究課題と同様の方法で運動中の身体加速度データを測定した。

最大下テストにおける各ステージ終了前の 1 分間および最大テストにおける 1 分間毎の呼気をダグラスバッグに採取し、それぞれ  $\dot{V}E$ ,  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  および RER を研究課題 III と同様の方法を用いて測定した。

最大下テストの開始前およびステージ間、さらに最大テスト終了後 1, 3 および 5 分後には指先から血液を採取し、研究課題 III と同様の方法で血中乳酸濃度を測定した。また、最大下テストで得られた発揮パワーに対する血中乳酸濃度の変化から、Blood Lactate Endurance Marker Software (Lactate-E, Newell et al., 2007) を用いて log-log 法 (Beaver et al., 1985) で LT を算出し、そのときの発揮パワーを  $P_{LT}$  とした。

### 2.2.2. SR テスト

漸増負荷テストと日を変えて 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変化させた。被験者は実験室に来室後、エルゴメータ上でのウォーミングアップを開始した。ウォーミングアップは 10 分間とし、最初の 5 分間は被験者の任意としたが、後半の 5 分間は  $P_{LT}$  で漕ぐよう指示した。ウォー

ミングアップ後 15 分程度の休息を挟み、本測定を開始した。被験者はエルゴメータ上で 10 分間の座位安静を保ったのち各試技を開始した。各試技の発揮パワーは  $P_{LT}$  で統一し、ストロークレートは 24, 28, 32 および 36 strokes/min とした (SR24 試技, SR28 試技, SR32 試技および SR36 試技)。各試技とも運動時間は 4 分間とし、終了前 1 分間における  $\dot{V}O_2$  および身体加速度データを漸増負荷テストと同様の方法で測定した。また、試技間では HR が十分に回復したことを確認し、それから次の試技を開始した。

### 2.2.3. パフォーマンステスト (2 min, 1 km, 1.5 km および 2 km テスト)

漸増負荷テストおよび SR テストが終了した被験者から、パフォーマンステストセッションを開始した。各テスト (2 min, 1 km, 1.5 km および 2 km テスト) はそれぞれ異なる実験日に実施した。被験者は研究室に来室後、ストレッチおよびエルゴメータを用いたウォーミングアップを実施した。ウォーミングアップの内容は、実際のレース前と同様とさせ、本セッションの全てのテストにおいて統一するよう指示した。ペース配分について、2 min テストでは可能な限り高い発揮パワーで運動を遂行するよう指示した (オールアウト形式)。また、それ以外のテストでは、最も短い時間で漕ぎ切れると被験者が判断したペース配分を採用するよう指示した。テスト中はエルゴメータで測定された 1 ストローク毎の発揮パワーおよびストロークレートをエルゴメータに接続したパーソナルコンピュータへ取り込み、2 min テストでは 1 分毎、1 km および 1.5 km テストは 250 m 毎の平均発揮パワーおよび平均ストロークレートを算出した。運動中の呼気ガスパラメータ、HR および  $IAA_{total}$  は、他の研究課題と同様の方法で測定した。なお、データのサンプリング間隔は、2 min テストでは 1 分毎、また 1 km, 1.5 km および 2 km テストでは 250 m 毎とした。

### 2.3. 算出項目

$IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって、各パフォーマンステスト中の OD を推定し、そこか

らテスト中の  $\dot{V}O_2$  を差し引くことによって AOD を算出した。各テストにおける %Anaerobic は、それぞれ推定した OD を AOD で除することによって算出した。各テストで測定された AOD のうち、最も高い値を MAOD とした。先行研究によって、AOD を繰り返して測定した場合、測定誤差の 95 % 信頼区間が測定値の 80 % ~ 128 % に相当することが報告されている (Doherty et al., 2000)。そこで、本研究では、各被験者の MAOD の 95 % 信頼区間を算出し、その範囲を基準として MAOD に到達していたか否かを判断した。各パフォーマンステストで測定された  $\dot{V}O_2$  の最高値を最高酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2peak}$ ) とし、漸増負荷テストで測定した  $\dot{V}O_{2max}$  に対する割合を  $\dot{V}O_2$  obtained として算出した。また、各パフォーマンステストにおける 1 ストローク中の動作の変容を評価するため、 $IAA_{total}$  をストロークレートによって除することによって、1 ストロークあたりの身体活動量 ( $IAA_{total} / SR$ ) を算出した。

#### 2.4. 統計処理

結果は全て平均値  $\pm$  標準偏差にて示した。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。SR テストにおける試技間、各パフォーマンステストの分析区間および各パフォーマンステストで得られた測定指標の差の検定には、それぞれ、試技、分析区間およびテストを要因とした一元配置の分散分析を用い、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。測定項目間の関係性の検討には、単回帰分析を用い、ピアソンの積率相関係数によって関係性の強さを評価した。なお、危険率 5 % 未満で統計的有意性を判断した。

### 3. 結果

#### 3.1. 漸増負荷テストおよび SR テスト

表 10 - 1 に漸増負荷テストの結果を示した。 $\dot{V}O_{2max}$  および  $HR_{max}$  は、それぞれ  $3939.0 \pm 539.6$  ml/min および  $192.6 \pm 7.6$  beats/min であった。 $P_{LT}$ 、 $P_{OBLA}$  および  $La_{max}$  は、それぞれ

200.4 ± 14.2 watt, 246.2 ± 25.6 watt および 9.26 ± 1.76 mmol/l であった。また、最大下テストで求めた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の間には、 $r$  が 0.95~1.00 の直線関係が認められた。

表 10-2 に SR テストにおける各試技の発揮パワー、ストロークレート、 $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$  を示した。発揮パワーには試技間で有意な差は認められなかった。 $IAA_{total}$  は、ストロークレートの増加に伴って有意に増加した。また、 $\dot{V}O_2$  は SR24 試技または 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増大する傾向が認められた。 $\dot{V}O_2$  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  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を検討した結果、両指標の間には  $r$  が 0.92~1.00 の直線関係が認められ、直線回帰式の傾きは  $22.4 \pm 9.6$  ml/a.u. であった。また、最大下テストの各ステージで測定した  $IAA_{total}$  から推定した  $\dot{V}O_{2rest+int}$  と、同じく各ステージで測定した  $\dot{V}O_2$  の差分である  $\dot{V}O_{2ext}$  は、発揮パワーと強い直線関係を示した ( $r$  が 0.93~1.00)。

表 10-1. 漸増負荷テストの結果.

Subject	$\dot{V}O_{2max}$ (ml/min)	$HR_{max}$ (beats/min)	$P_{LT}$ (watt)	$P_{OBLA}$ (watt)	$[La]_{b\ max}$ (mmol/l)
A	4007.6	204.0	202.9	258.0	10.22
B	4461.3	191.8	210.0	281.8	6.87
C	3092.2	191.0	183.6	233.9	10.25
D	3949.6	181.0	190.0	231.6	10.09
E	4693.5	183.2	210.0	293.1	6.10
F	3566.4	206.0	174.6	209.9	9.63
G	4944.1	197.3	220.0	265.0	12.83
H	3774.3	195.3	190.0	227.6	8.87
I	3817.5	186.8	188.6	232.3	8.33
J	3140.8	186.8	213.0	212.0	9.67
K	3810.2	193.1	217.0	260.4	8.75
L	4177.9	188.0	210.0	260.1	7.89
M	3771.8	199.03	196.0	235.4	10.85
3939.0 ± 539.8 192.6 ± 7.6 200.4 ± 14.2 246.2 ± 25.6 9.26 ± 1.76					

表 10-2. SR テストの各試技における発揮パワー, ストロークレート,  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$ .

	24 strokes/min	28 strokes/min	32 strokes/min	36 strokes/min
Power (watt)	197.3 ± 12.1	198.0 ± 12.5	197.9 ± 12.1	199.9 ± 12.4
Stroke rate (strokes/min)	23.9 ± 0.3 *	27.8 ± 0.3 *	31.8 ± 0.5 *	35.3 ± 0.6 *
$IAA_{total}$ (count/min)	43.8 ± 4.2 *	50.1 ± 4.3 *	56.5 ± 4.7 *	64.1 ± 6.1 *
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	3049.6 ± 222.4 <sup>a</sup>	3000.2 ± 256.8 <sup>a,b</sup>	3106.3 ± 277.5 <sup>a</sup>	3328.7 ± 300.2 *

\*は全ての試技間で有意差が認められたことを示す. a は SR36 試技との間で, b は SR32 試技との間で有意差が認められたことを示す. いずれも  $p < 0.05$ .

### 3.2. パフォーマンステスト

図 10-1 にパフォーマンステストの各区間における発揮パワーおよびストロークレートを示した. 2 min テストの発揮パワーは最初の区間 (0~1 分間) で最も高い値を示し, その後の区間で有意に低下した. 1 km, 1.5 km テストおよび 2 km テストの発揮パワーは, 最初の区間 (0~250 m) で最も高い値を示した後に緩やかに漸減し, 各テストの最初の区間の発揮パワーと後半の各区間の発揮パワーの間には有意差が認められた. 同様にストロークレートも最初の区間で最も高い値を示したが, 2 min テストではテストの前半と後半で有意差は認められなかった. 1 km および 1.5 km テストのストロークレートは, 最初の区間と比較して, それぞれ中盤 (250~500 m および 500~750 m 区間) および終盤 (1250~1500 m および 1500~1750 m 区間) において有意に低い値を示した. しかし, 2 km テストの最終区間 (1750~2000 m 区間) におけるストロークレートは, 直前の区間 (1500~1750 m 区間) と比較して有意に高い値を示した.

表 10-3 に各パフォーマンステストで得られた各指標の結果について示した. 発揮パワーおよびストロークレートは, 2 min テストにおいて最も高く, そこから 1 km, 1.5 km および 2 km テストの順に低下した.  $IAA_{total}$  は, 2 min テストにおいて最も高い値を示し, 他のテストとの間でそれぞれ有意差が認められたが, 1.5 km テストと 2 km テストの間で



は有意差が認められなかった. 1 ストロークあたりの  $IAA_{total}$  ( $IAA_{total} / SR$ ) は, 2 min テストにおいて最も高く, 他のテストとの間でそれぞれ有意差が認められた. また, 1 km テストと 1.5 km テストの間で  $IAA_{total} / SR$  に有意差は認められなかったが, 2 km テストの  $IAA_{total} / SR$  は 1.5 km テストと比較して有意に高い値を示した. 2 min テストおよび 1 km テストにおける  $\dot{V}O_2$  obtained は, より運動時間が長いテストと比較して, それぞれ有意に低い値を示した. AOD は, 2 分間テストと比較して, 1 km, 1.5 km および 2 km テストで高い値を示したが, 有意差は 2 min テストと 1 km テストの間でのみ認められた. %Anaerobic は, 2 min テストにおいて最も高い値を示し, テストの運動時間の増加に伴って有意に低下した.

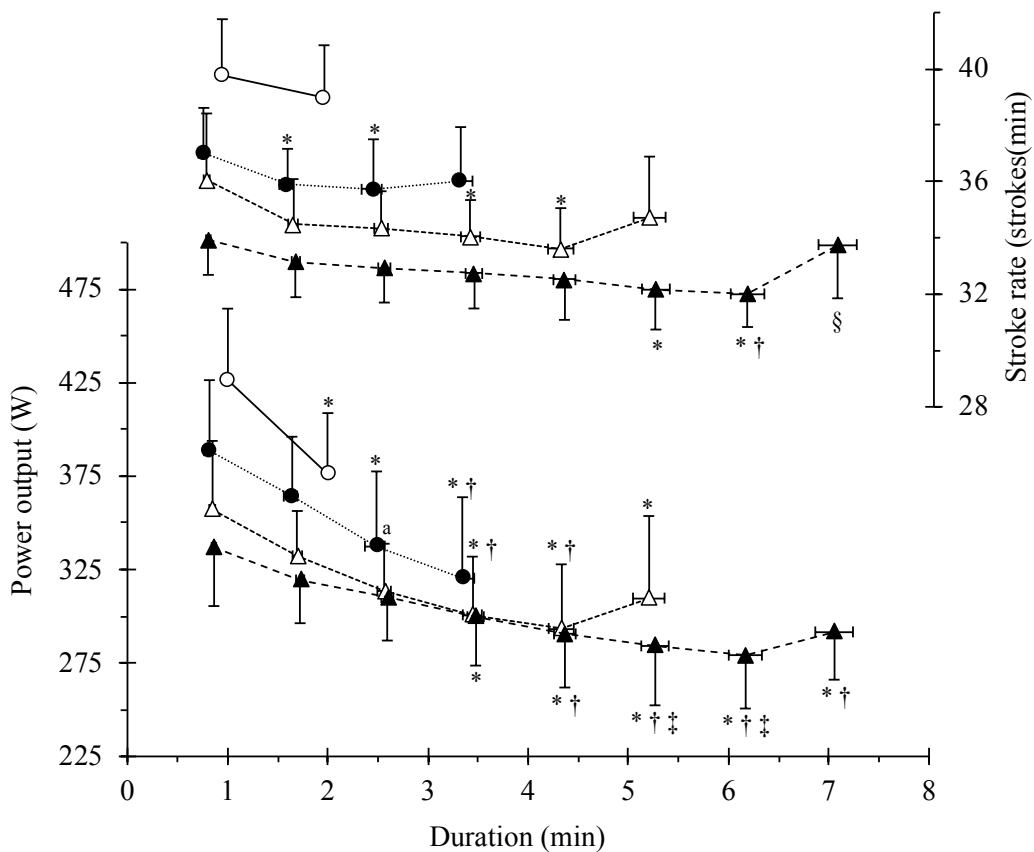


図 10-1. 各パフォーマンステスト中のストロークレート (上段) および発揮パワーの (下段) 変化.

図中○は 2 min テスト, ●は 1 km テスト, △は 1.5 km テスト, ▲は 2 km テストを表す. \*は第 1 セクションと有意差が認められたことを, †は第 2 セクションと有意差が認められたことを, ‡は第 3 セクションと差が認められたことを, §は直前のセクションと有意差が認められたことを示す.

表 10-3. 各パフォーマンステストにおける発揮パワー, ストロークレート (SR),  $\dot{V}O_2$  obtained, OD, 総酸素摂取量 (Accumulated oxygen uptake: AO), AOD, %Anaerobic および MAOD への到達率 (%MAOD).

	2 min test	1 km test	1.5 km test	2 km test
Duration (min)	2.0	3.3 ± 0.1	5.2 ± 0.2	7.1 ± 0.2
Power output (W)	401.2 ± 32.1 †	349.0 ± 37.4 †	312.2 ± 28.2 †	296.2 ± 23.0 †
SR (strokes/min)	39.4 ± 1.7 †	36.2 ± 1.4 †	34.5 ± 1.4 †	32.8 ± 1.1 †
IAA <sub>total</sub> (a.u./min)	77.5 ± 1.3 <sup>a, b, c</sup>	59.8 ± 1.1 <sup>e</sup>	57.7 ± 1.2	56.8 ± 1.1
IAA <sub>total</sub> /SR (a.u./stroke)	1.96 ± 0.13 <sup>a, b, c</sup>	1.64 ± 0.13	1.66 ± 0.12 <sup>f</sup>	1.71 ± 0.14
$\dot{V}O_2$ obtained (%)	97.8 ± 5.1 <sup>a, b, c</sup>	100.1 ± 5.1 <sup>d, e</sup>	102.1 ± 5.8	102.5 ± 5.8
OD (L·min <sup>-1</sup> )	11.7 ± 1.3 †	17.3 ± 1.8 †	24.5 ± 2.3 †	31.8 ± 2.8 †
AO (LO <sub>2</sub> eq)	6.5 ± 0.6 †	11.6 ± 0.9 †	18.7 ± 1.5 †	25.9 ± 1.7 †
AOD (LO <sub>2</sub> eq)	5.2 ± 1.1 <sup>a</sup>	5.8 ± 1.6	5.8 ± 1.8	5.9 ± 2.4
%Anaerobic (%)	44.1 ± 5.4 †	32.9 ± 6.1 †	23.4 ± 5.5 †	18.3 ± 6.0 †
%MAOD	83.7 ± 8.7 <sup>a</sup>	91.6 ± 6.8	91.6 ± 8.8	90.9 ± 10.3

n = 14

†: 全てのテスト間で有意差あり ( $p < 0.05$ )

a: 2 分間テスト v.s. 1 km テスト ( $p < 0.05$ )

b: 2 分間テスト v.s. 1.5 km テスト ( $p < 0.05$ )

c: 2 分間テスト v.s. 2 km テスト ( $p < 0.05$ )

d: 1 km テスト v.s. 1.5 km テスト ( $p < 0.05$ )

e: 1 km テスト v.s. 2 km テスト ( $p < 0.05$ )

f: 1.5 km テスト v.s. 2 km テスト ( $p < 0.05$ )

MAOD, すなわち各被験者の AOD の最高値は,  $6.4 \pm 2.1$  LO<sub>2</sub>Eq であった. 2 min, 1 km, 1.5 km および 2 km テストにおいて MAOD が出現した被験者は, それぞれ 1 名 (7%), 3 名 (21%), 4 名 (29%) および 6 名 (43%) であった. MAOD に対する各テストで得られた AOD の到達率 %MAOD は, 2 min テストにおいて最も低く  $83.7 \pm 8.7\%$  であり, 1 km テスト ( $91.6 \pm 6.8\%$ ) と比較して有意に低い値であったが, 1 km ( $91.6 \pm 6.8\%$ ), 1.5 km ( $91.6 \pm$

8.8 %) および 2 km テスト ( $90.9 \pm 10.3$  %) における %MAOD との間では、有意差が認められなかった (表 10-3)。

MAOD の測定誤差を考慮して各テストにおける MAOD への到達率を検討するために、各被験者の MAOD の測定誤差範囲を算定し、AOD がその範囲に到達していた場合を MAOD 到達試技と判断した。その結果、2 min, 1 km, 1.5 km および 2 km テストにおいて MAOD に到達していたと判断された被験者は、それぞれ 10 名 (71.4 %), 13 名 (92.9 %), 12 名 (85.7 %) および 11 名 (78.6 %) であった。

各テストにおける %MAOD とエネルギー供給系の体力の関係を検討するために、 $\dot{V}O_{2max}$  および MAOD と各テストにおける %MAOD の関係を検討した (図 10-2)。その結果、1 km テストにおける %MAOD と  $\dot{V}O_{2max}$  の間に有意な正の相関関係が認められた。一方、%MAOD と MAOD の間には、2 min テストにおいて有意な負の相関関係が、2 km テストにおいて有意な正の相関関係が認められた。

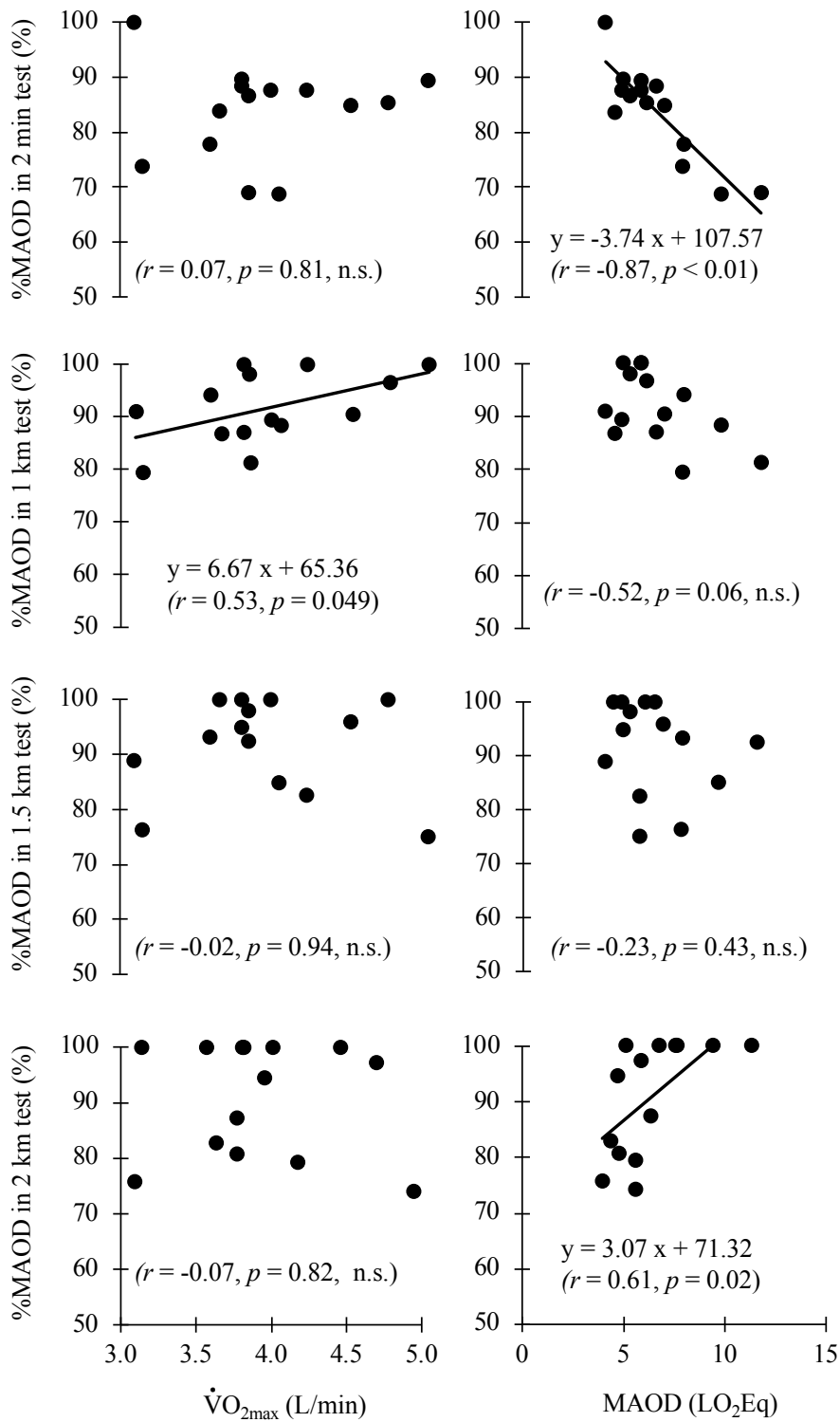


図 10-2.  $\dot{V}O_{2max}$  および MAOD と各パフォーマンステストにおける %MAOD の関係 (n = 14).

図中の破線は各被験者の AOD の変化を表し、○は各テストの平均値を表す。

#### 4. 考 察

本研究の目的は、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法を用いて、運動時間の異なる超最大テスト時の AOD を定量し、各テストにおいて MAOD に到達した被験者数から、ローイング時の MAOD を測定する際の最適なプロトコルについて検討することであった。この目的を達成するために、本研究では 2 min, 1 km テスト (運動時間:  $3.3 \pm 0.1$  分間), 1.5 km テスト (運動時間:  $5.2 \pm 0.2$  分間) および 2 km テスト (運動時間:  $7.1 \pm 0.2$  分間) のパフォーマンステストを実施し、そのときの AOD を推定した。その結果、2 min テスト時の AOD は、1 km テストと比較して有意に低い値を示すが、1 km テスト、1.5 km テストおよび 2 km テストでは有意な差は認められなかった。2 min テスト、1 km テスト、1.5 km テストおよび 2 km テストにおいて MAOD が出現した被験者数は、それぞれ 1 名 (7%), 3 名 (21%), 4 名 (29%) および 6 名 (43%) であった。同様に、MAOD の誤差範囲を加味した場合に MAOD へ到達していたと判断された被験者数は、それぞれ 10 名 (71%), 13 名 (93%), 12 名 (86%) および 11 名 (77%) であった。また、各テストにおける %MAOD と  $\dot{V}O_{2max}$  および MAOD との関係からは、%MAOD がエネルギー供給系の体力、すなわち無酸素性能力に優れた被験者ほど運動時間が短い超最大テストにおいて、また有酸素性能力が優れた被験者ほど運動時間が長い超最大テストにおいて MAOD への到達率が高くなるといった関係性は認められなかった。

##### 4.1. 運動時間と MAOD の関係

これまでに、AOD は、固定負荷を用いた場合、およそ 2 分間で疲労困憊に達する超最大運動で MAOD に到達し、それよりも運動時間を増加させても AOD は増大しないことが報告されている (Medbø et al., 1988)。また、ウィングートテストのような、運動強度が運動開始直後に著しく高く、その後、運動時間の経過とともに漸減していく運動 (オールアウトテスト) では、より短い時間 (60~90 秒) で MAOD に到達することが報告されている (Withers et al., 1991; Withers et al., 1993)。本研究の 2 min テストにおける発揮パワーは、

全ての被験者において運動開始直後に最も高い値を示し、その後、運動時間の経過に伴って緩やかに漸減していた。このことから、2分間テストのパワー発揮様式はオールアウトテストに類似したものであったと考えられる。しかし、2 min テストで MAOD が出現した被験者は1名(7%)のみであり、また、測定誤差を考慮して MAOD に到達していたと判断された被験者も10名(71.4%)であり、他のテストよりも低い値であった。Craig et al. (1995) は、有酸素性能力に優れた持久系サイクリストは、無酸素性能力に優れたスプリント系サイクリストと比較して、短時間オールアウト型の超最大テスト(70秒間)における AOD が低い値を示すことを明らかにし、その要因として、持久系サイクリストは、スプリント系サイクリストと比較して、1)  $\dot{V}O_2$  すなわち有酸素性代謝からのエネルギー供給が素早く高まるため、無酸素性代謝のエネルギー供給の貢献が低くなること、2) 解糖系による ATP 産生速度が低いこと、3) 筋内の pH 低下に対する耐性 (Buffering capacity) が低いことから、短時間の超最大テストでは MAOD を使い切る前に筋が収縮運動を持続することが困難な状態に陥っていた可能性があることを指摘している。一方、本研究では、2 min テストにおける %MAOD は  $\dot{V}O_{2max}$  と有意な相関関係を示さず、MAOD と有意な負の相関関係を示した。この結果は、2 min テストにおいて MAOD が出現した被験者が少なかったことには、被験者のエネルギー供給系の体力特性以外の要因が関与していたことを示唆している。

#### 4.2. ローイングの運動特性の影響

ローイングの運動特性として、走運動や自転車運動と比較して運動リズムが遅い点があげられる。すなわち、本研究の1 km テスト(運動時間が3.3 min)のストロークレートが36.2 strokes/minであったのに対して、運動時間が比較的近い陸上競技の1500 m 種目(運動時間がおよそ3.5 min)およびトラックサイクリング競技の4000 m 種目(運動時間がおよそ4.0 min)のピッチは、それぞれ170~230 steps/min(松尾ほか, 1997)および130-140 revolutions/min(Craig and Norton, 2001)である。これは、ローイング動作が身体を前方向へ

と移動させ次のパワー発揮の準備を行なう局面(リカバリー局面)を含んでいるためであると考えられる。このように動作によって運動リズムが制限されるローイングでは、短時間の間に発揮できる仕事量が限られ、その結果、2 min で MAOD を使い切ることができなかつた可能性がある。本研究において、2 min テストにおける%MAOD と MAOD の間に負の相関関係が認められたこと、すなわち MAOD が高い被験者ほど 2 min テストにおける MAOD への到達率が低かつたことは、この見解を支持する結果であったと考えられる。

#### 4.3. ペース戦略の影響

MAOD が出現した被験者数は、最も運動時間が長かつた 2 km テストにおいて最も多かつた(6名)が、測定誤差を考慮して MAOD に到達していたかを判定した場合、MAOD に到達していたと判定された被験者数は、1 km テストにおいて最も多く(13名, 93%), それよりも運動時間が長い 1.5 km テストおよび 2 km テストでは少なかつた(それぞれ 12名, 86% および 11名, 77%)。

MAOD を測定する際には、一定の負荷で疲労困憊まで運動を行なわせる Open-loop 型のテストプロトコル(Medbo et al., 1988)と、決められた運動時間または距離に到達するまで運動を行なわせる Closed-loop 型のテストプロトコル(Craig et al., 1995; Withers et al., 1991; Withers et al., 1993)が用いられる。Open-loop 型のテストプロトコルで評価したパフォーマンス(疲労困憊に至るまでの運動時間)は、Closed-loop 型のテストプロトコルで評価したパフォーマンス(発揮パワーまたは到達時間)と比較して、変動が大きいことが報告されている(Currell and Jeukendrup, 2008)。そこで、本研究では、Closed-loop 型のテストプロトコルを採用し、2 min テストでは運動時間を規定し、それより運動時間が長いテストとして、漕距離を規定したテスト(1 km, 1.5 km および 2 km テスト)を採用した。その結果、2 min テストでは、運動直後の発揮パワーが高く、その後運動時間の経過に伴って漸減するオールアウト型のパワー発揮で運動が行なわれていることが確認され、同様の傾向が 1

km テストにおいても認められた。一方、1.5 km テストおよび 2 km テストでは、テスト開始直後の発揮パワーが最も高く、その後運動時間の経過に伴って漸減するが、テスト終盤において、再度発揮パワーが増加することが確認された。1.5 km テストおよび 2 km テストで認められたペース戦略は、実際のレースで用いられるペース戦略とも一致していた (Garland, 2003; 松下ほか 2006)。しかし、運動開始直後の高いパワー発揮 (スタートスパート) を含むペース戦略は、早い段階から代謝性アシドーシスが生じることによって解糖系からのエネルギー供給や筋収縮が阻害される可能性も指摘されている (Fabiato and Fabiato, 1978; Foster et al., 1994; Medbø and Tabata, 1993; Hermansen, 1981)。これらの点を考え合わせると、1.5 km テストおよび 2 km テストでは、テスト前半において過度に高い強度で運動が行われたことによって、テスト後半において高い強度で運動を遂行することができず、その結果、MAOD に到達することができなかった被験者が含まれていた可能性も考えられる。本研究の結果からは、各被験者が用いたペース戦略が最適なものであったかを検討することはできないが、ローイングにおいて 1.5 km テストおよび 2 km テストを用いて MAOD を評価すると、運動中のペース戦略が測定結果に影響を及ぼす可能性があることに留意する必要があると考えられる。

#### 4.4. IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法の有用性

1 ストロークあたりの IAA<sub>total</sub> は、2 min テストにおいて特に高い値を示していた。この結果は、テスト間において 1 ストロークあたりの動作が必ずしも一定ではなかった可能性を示唆している。本研究の結果からローイング動作がどのように変容していたかを検討するとはできないが、2 min テストでは比較的前後方向へと大きく身体を移動させつつ高い発揮パワーで運動が行われており、それ以外のテストでは、身体の前後方向への移動量が相対的に減少していた可能性も考えられる。研究課題 III-2 では、最大下テストにおけるストロークレートを調整することによって、超最大テストにおけるストロークレートの増加に伴う内的仕事の増加分を補正する方法 (SR 増加条件) についても検討を行な



った。この方法は、より簡便に内的仕事の増加分を補正する方法であるといえる。しかし、本研究で確認されたような1ストローク中の動作の変容は、ストロークレートのみでは捉えることができないため、 $IAA_{total}$ を用いたAOD法は、ストロークレートを調整する方法よりもローイング時のODを推定するうえで有用な方法であると考えられる。

#### 4.1. 本研究の限界

本研究では、男子大学生ボート選手を対象としてローイング時のMAODを測定する際のプロトコルについて検討を行なった。その結果、2分間テストでは、ローイングの運動特性、すなわち運動リズムが制限されることによって、短時間で発揮できる仕事量が制限され、その結果、2 min テストではMAODには到達することができないことが示唆された。また、1.5 km テストおよび2 km テストでは、最適なペース戦略で運動が行われなかったことにより、運動時間が長いにもかかわらずMAODが得られない被験者が含まれていた可能性が考えられた。しかし、競技レベルまたは技術レベルが高く、短時間でより多くの仕事量が発揮できる選手や、1.5 km テストや2 km テストにおいて最適なペース戦略を選択できる選手を対象とした場合には、本研究とは異なる結果が得られる可能性がある。

#### 5. 結論

本研究の結果から、男子大学生ボート選手を対象としてローイング時のMAODを測定する際には、運動時間が3.3分程度である1 km テストが適していることが示唆された。また、それよりも運動時間が短い2分間テストでは、被験者にオールアウト形式のパワー発揮を行なうよう指示をしても、14名中4名の被験者でMAODが得られないことが明らかになった。また、1 km テストよりも運動時間が長い1.5 km テストおよび2 km テストでは、被験者が実際のレースと類似したペース戦略を採用させたところ、14名中2名および3名の被験者でMAODが得られなかったことから、AODがペース戦略の影響を受

ける可能性が示唆された。

## 第11章 研究課題 V (実践研究)

## 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関係

## 1. 目的

これまで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関係を検討した先行研究は、2 分間テストや 2 km テスト時の AOD を MAOD として扱い、それとローイングパフォーマンスの関係を検討している (Clark, 2016; Pripstein et al., 1999; Russell et al., 1998). しかし、研究課題 IV の結果から、2 分間テストまたは 2 km テストでは、MAOD が得られない被験者も認められることが明らかになった。

そこで、本研究では、研究課題 IV において求めた各被験者の MAOD を無酸素性エネルギー供給能力の指標として、それとローイングパフォーマンスの関係を検討することを目的とした。加えて、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法と従来の AOD 法を用いて、それぞれ 2 km テスト中の無酸素性エネルギー供給量を定量した場合に、測定方法間でどの程度の差が生じるかについても検討を行なった。

## 2. 方法

本研究では、研究課題 IV で行なった実験結果のうち、漸増負荷テストで得られた生理学的指標、MAOD および 2 km テストの結果を用いて分析を行なった。また、2 km テストでは、250 m 区間毎の AOD について  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法と従来の AOD 法の間で比較検討を行なった。そのため、方法については、研究課題 IV において未記述の分析方法についてのみ記述した。

## 2.1. 被験者

本研究の被験者は、研究課題 IV と同様であった。しかし、2 km テスト中の無酸素性

エネルギー供給動態の検討は、ダグラスバッグへの採気のタイミングが異なった被験者 1 名を除いた 13 名 (身長:  $174.0 \pm 5.1$  cm, 体重:  $69.6 \pm 7.6$  kg, 年齢:  $20.2 \pm 1.1$  歳) を対象とした。

## 2.2. 実験概要

漸増負荷テスト, SR テストおよび各パフォーマンステスト (2 min テスト, 1 km テスト, 1.5 km テストおよび 2 km テスト) の実験手順は研究課題 IV に示した通りである。

## 2.3. 算出項目

IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法によって, 各パフォーマンステスト中の AOD を推定し, その最大値を MAOD とした。2 km テストにおいて 250 m 区間毎の OD を, IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法および従来の AOD 法によってそれぞれ推定した。IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法による OD の推定方法は, 研究課題 IV に示した通りであった。一方, 従来の AOD 法では, 最大下テストで求めた発揮パワーと  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式に各区間の平均発揮パワーを外挿することによって OD を推定した。

## 2.4. 統計処理

結果は全て平均値  $\pm$  標準偏差にて示した。項目間の関係性の検討には単回帰分析を用い, ピアソンの積率相関係数 ( $r$ ) によって関係の強さを評価した。2 km テストの各分析区間における測定指標の差の検定には, 分析区間を要因とした一元配置の分散分析を用い, 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。推定方法間 (従来の AOD 法および IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法),  $\dot{V}O_{2max}$  と 2 km テストの各測定区間における  $\dot{V}O_2$  の差の検討には, 対応のある t 検定を用いた。なお, 危険率 5% 未満で統計的有意性を判断した。

## 3. 結果

2 km テストの所要時間、発揮パワー、ストロークレートおよび  $IAA_{total}$  は、それぞれ  $7.0 \pm 0.3$  分間、 $300.8 \pm 24.7$  watt、 $32.9 \pm 1.0$  strokes/min および  $64.1 \pm 4.6$  a.u./min であった。 $\dot{V}O_{2peak}$  は  $4010.7 \pm 369.8$  ml/min であり、 $\dot{V}O_{2max}$  との間に有意な差は認められなかった。2 km テスト中に測定された  $HR_{peak}$  は  $187.0 \pm 8.8$  beats/min であり、漸増負荷テストで測定された  $HR_{max}$  ( $192.6 \pm 7.6$  beats/min) よりも有意に低い値を示した。また、2 km テストで測定された  $[La]_{b peak}$  は  $10.74 \pm 0.90$  mmol/l であり、漸増負荷テストで測定された  $[La]_{b max}$  ( $9.26 \pm 1.67$  mmol/l) よりも有意に高い値を示した。

$IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって推定した 2 km テスト中の AOD は、 $6.2 \pm 2.4$  LO<sub>2</sub>Eq であり、従来の AOD 法によって推定した値 ( $4.3 \pm 1.2$  LO<sub>2</sub>Eq) よりも有意に高い値を示した。 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって評価した 2 km テスト中の %Anaerobic は  $19.0 \pm 6.0$  % であり、従来の AOD 法によって評価した値 ( $12.7 \pm 3.7$  %) よりも有意に高い値を示した。

図 11-1 に 2 km テスト中の発揮パワーと  $\dot{V}O_{2max}$  および MAOD (研究課題 IV より  $6.4 \pm 2.1$  LO<sub>2</sub>Eq) の関係を示した。ローイングパフォーマンスは、 $\dot{V}O_{2max}$  と強い正の相関関係を示したが、MAOD との間に相関関係は認められなかった。

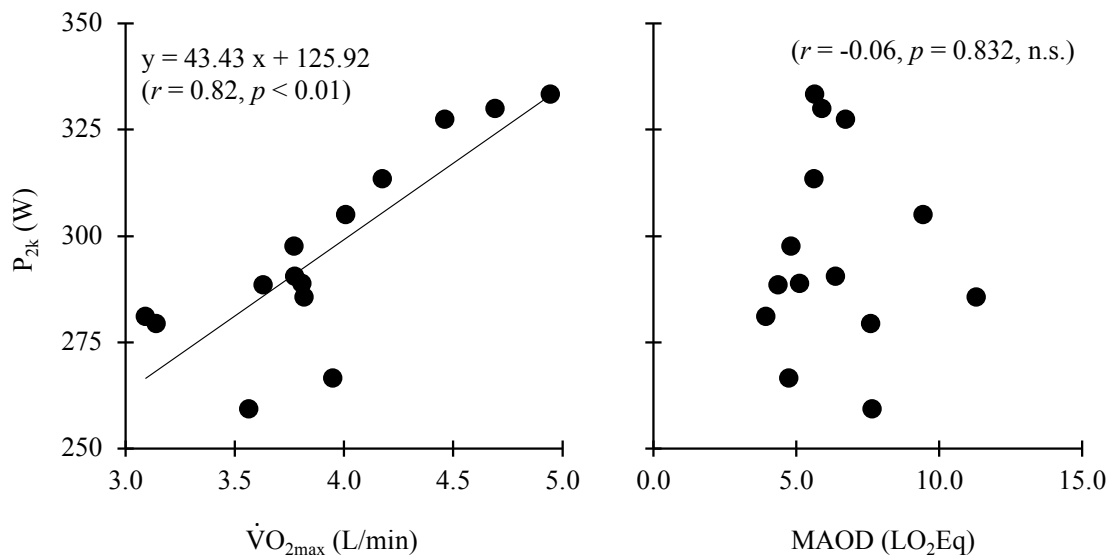


図 11-1. 2 km テスト中のパフォーマンス (平均発揮パワー,  $P_{2k}$ ) と  $\dot{V}O_{2max}$  (左図) および MAOD (右図) の関係。

図 11-2 に 2 km テスト中の発揮パワー、ストロークレート、 $IAA_{total}$  および 1 ストロークあたりの  $IAA_{total}$  ( $IAA_{total} / SR$ ) の推移を示した。発揮パワーは 0~250 m 区間で最も高い値を示した。0~250 m 区間と比較して、それ以外の区間の発揮パワーはいずれも有意に低い値を示した ( $p < 0.05$ )。1250~1750 m 区間では、発揮パワーに有意な差は認められなかったが、1750~2000 m 区間は、その直前の区間と比較して有意に高い値を示した ( $p < 0.05$ )。ストロークレートは 0~250 m 区間において最も高い値を示したが、0~750 m の範囲において各区間で有意な差は認められなかった。しかし、750~1750 m 区間は、0~250 m 区間と比較して、ストロークレートが有意に低い値を示した ( $p < 0.05$ )。1750~2000 m 区間においてストロークレートは、直前の区間と比較して有意ではないものの高い値を示した。 $IAA_{total}$  はいずれの区間においても有意な差は認められなかった。 $IAA_{total} / SR$  は、0~250 m 区間において最も低い値を示し、そこから運動時間の経過とともに 1500~1750 m 区間まで緩やかに増加した。さらに、1750~2000 m 区間における  $IAA_{total} / SR$  は、直前の区間と比較して有意に減少した。

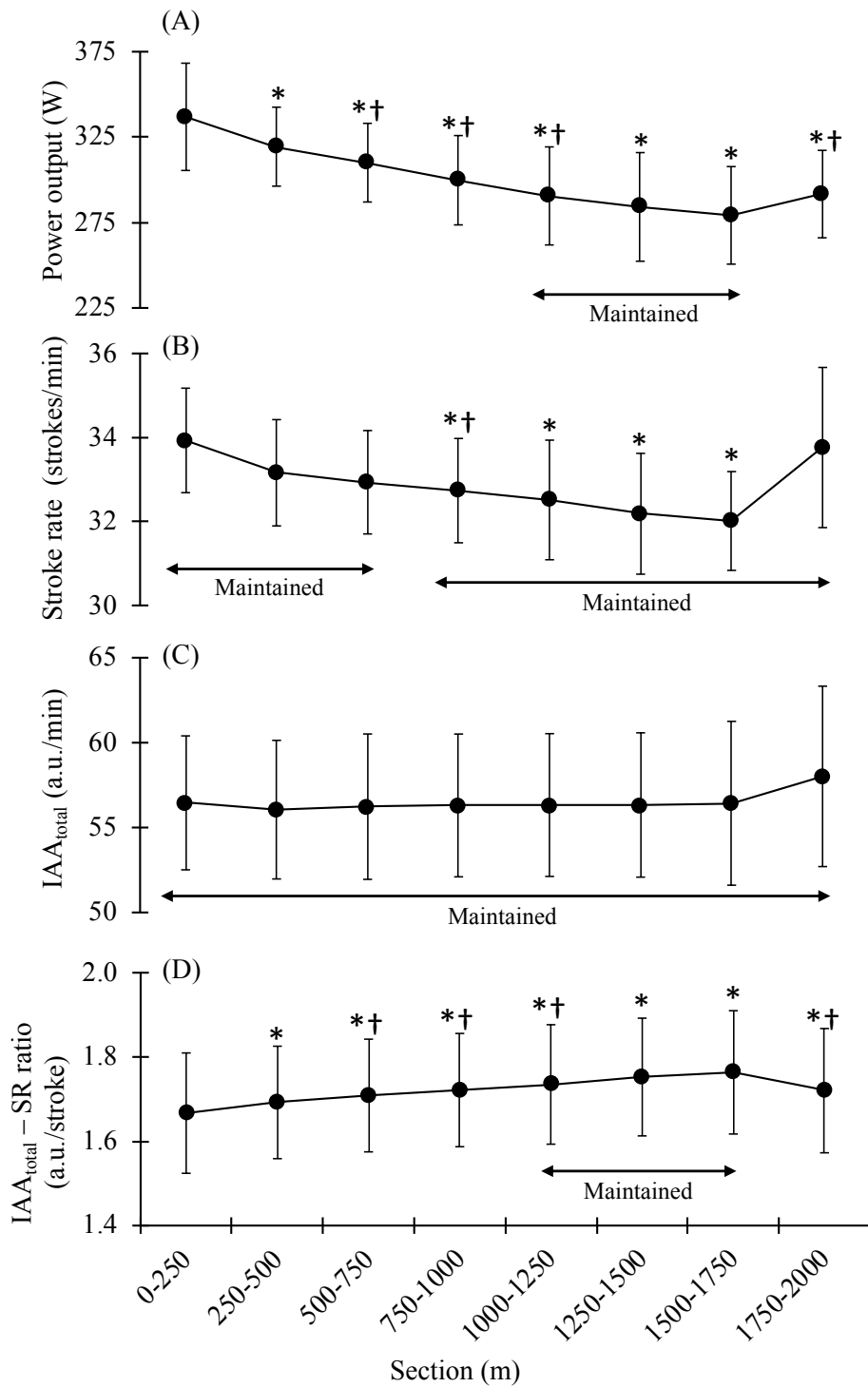


図 11 - 2.2 km テスト中の発揮パワー (A), ストロークレート (B), IAA<sub>total</sub> (C) および 1 ストロークあたりの IAA<sub>total</sub> (D) の推移 ( $n = 13$ ).

図中の\* は 0-250 m 区間と比較して有意差 ( $p < 0.05$ ) が認められたことを示し, † は直前の区間と比較して有意差 ( $p < 0.05$ ) が認められたことを示す。また, ←で示した区間は, それぞれ有意差が認められなかったことを示す。

図 11-3 に 2 km テスト中の  $\dot{V}O_2$  の推移を示した。  $\dot{V}O_2$  は、0~250 m 区間において最も低い値を示し、その後、運動時間の経過とともに増加し、750~1000 m 区間以降の区間では漸増負荷テストで測定した  $\dot{V}O_{2max}$  と有意差が認められなかった (1000 m 地点までの所要時間は  $3.3 \pm 0.1$  分間)。

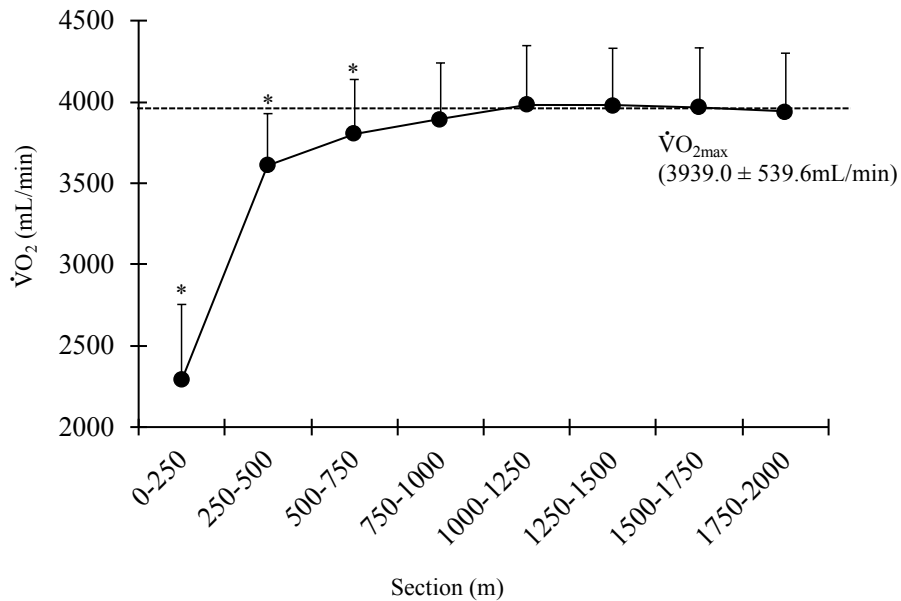


図 11-3. 2 km テスト中の  $\dot{V}O_2$  応答 ( $n = 13$ ).

図中の\* は漸増負荷テストで求めた  $\dot{V}O_{2max}$  と有意差が認められたことを示す。また、図中の破線は  $\dot{V}O_{2max}$  の平均値を示す。

図 11-4 に  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法および従来の AOD 法で推定した 2 km テスト中の AOD および %Anaerobic の推移をそれぞれ示した。各区間の AOD は、従来の AOD 法と比較して、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法においてそれぞれ有意に高い値を示した。また、AOD の推移に着目すると、両条件とも 0~250 m 区間において最も高い値を示し、その後は運動時間の経過に伴って 1250 m 地点まで有意に低下した。しかし、従来の AOD 法では、その後の 1250~2000 m 区間において各区間の AOD に有意差が認められなかったのに対して、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法では 1750~2000 m 区間の AOD がその直前の区間と比較し



て有意に高い値を示した ( $p < 0.05$ ).

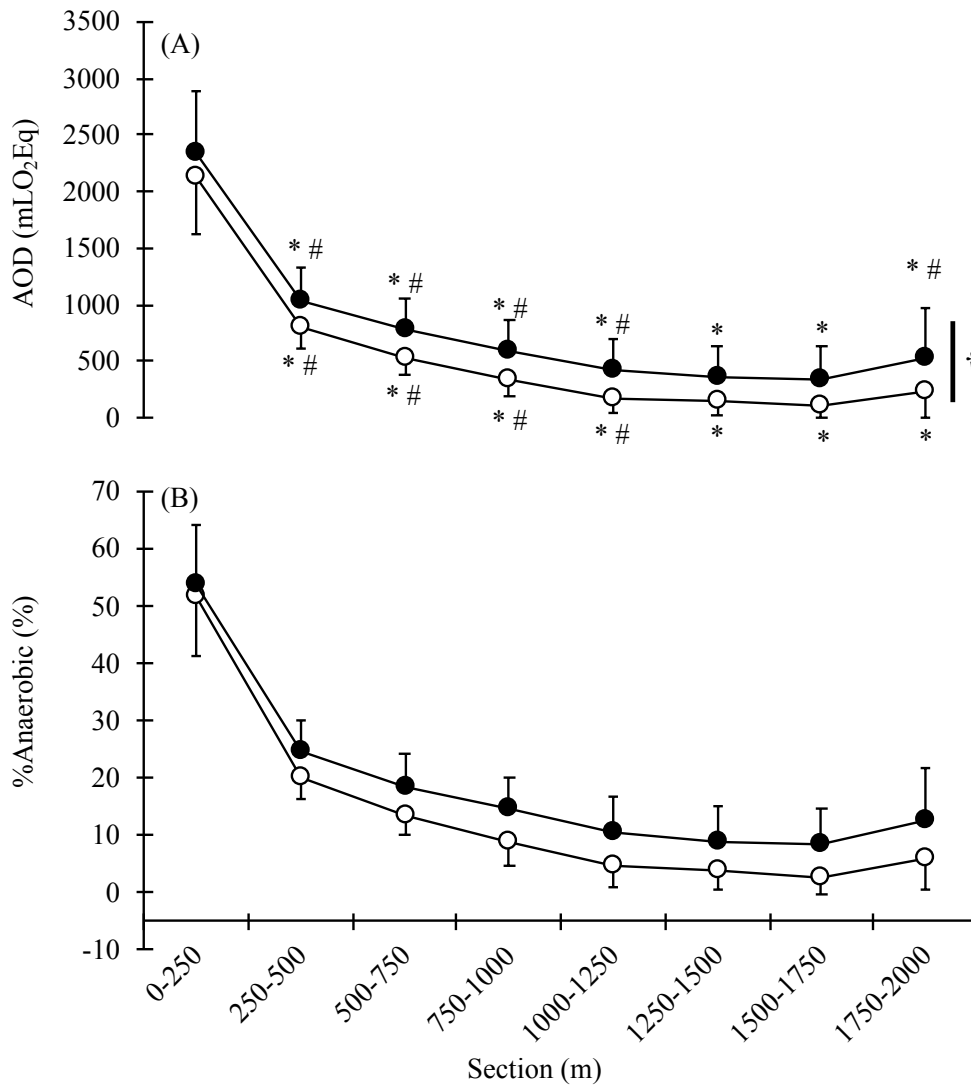


図 11 - 4. 2 km テスト中の各 250 m 区間における AOD (A) および %Anaerobic (B) の推移 ( $n = 13$ ).

図中の●は IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法によって得られた値を, ○は従来の AOD 法で得られた値を示す. \* は 0-250 m 区間と比較して有意差が認められたことを, #は直前の区間と比較して有意差が認められたことを, †は推定方法間で有意差が認められたことを示す (いずれも  $p < 0.05$ ).

#### 4. 考 察

本研究の目的は、運動時間の異なる超最大テストで求めた MAOD を無酸素性エネルギー供給能力の指標として、それと 2 km テストにおける発揮パワーとの関係から、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関係を検討することであった。さらに、本研究では、従来の AOD 法および IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法によって、2 km テスト時の無酸素性代謝を評価した場合に、方法間でどのような差が生じるかについても検討を行なった。本研究の結果から、IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法によって評価した 2 km テスト中の AOD は  $6.2 \pm 2.4$  LO<sub>2</sub>Eq であり、%Anaerobic は  $19.0 \pm 6.0$  % に達すること、さらに、これらの値はいずれも従来の AOD 法で推定した値 ( $4.3 \pm 1.2$  LO<sub>2</sub>Eq および  $12.7 \pm 3.7$  %) と比較して有意に高い値を示すことが明らかになった。しかし、2 km テスト中の発揮パワーと MAOD ( $6.4 \pm 2.1$  LO<sub>2</sub>Eq) の間に有意な相関関係は認められなかった。

##### 4.1. 2 km テスト中の無酸素性代謝

Hagerman (2010) は、2000 m レース中の血中乳酸動態を明らかにするために、6 分間のシミュレーション漕をエルゴメータで実施し、1, 2, 3, 4 および 5 分後にランダムにテストを中止させるか最後まで漕ぎ切らせ、そのときの血中乳酸濃度を測定した。その結果、血中乳酸濃度は 2 分目まで上昇し続け 16~18 mmol/L に達し、その後も比較的高い値 (14~16 mmol/L) で維持されることが明らかにした。このことから、レース中は、スタート直後から無酸素性代謝によるエネルギー供給が行われること、さらに、血中へと放出された乳酸は運動中も他の組織に取り込まれ除去されること (van Hall et al., 2009) から、レース中盤以降も無酸素性代謝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察している。本研究において、IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法および従来の AOD 法で定量した AOD は、いずれもスタート直後の区間 (0-250 m 区間) において最も高い値を示し、500 m 地点までに供給された AOD は、テスト全体で供給された AOD のそれぞれ 53.2 % および 66.4 % に相当した。さらに、その後の無酸素性代謝によるエネルギー供給動態に着目

すると、従来の AOD 法では、1250 m 地点までに供給された AOD が、テスト全体で供給された AOD の 90 % 近くに達し、その後は無酸素性代謝からのエネルギー供給がほとんど行われていないという結果が得られた。一方、IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法では、1250 m までに供給された AOD は、テスト全体で供給された AOD の 80 % 程度であり、その後も無酸素性代謝からのエネルギー供給が持続的に行われていた。このことから、IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法で得られた結果は、血中乳酸濃度の動態から中盤以降も無酸素性代謝の貢献が維持されることを指摘した先行研究 (Hagerman, 2010) の結果を支持するものであり、2 km テストでは中盤以降においても無酸素性代謝からのエネルギー供給が一定の割合で維持されることを示唆している。この点は、IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法によって 2 km テスト中のエネルギー代謝を検討することによって明らかにされた本研究の重要な知見である。

また、1750~2000 m 区間では、その直前の区間と比較して、発揮パワーおよびストロークレートが増加しており、いわゆるラストスパートが確認された。レース中盤以降 (1000 m 以降)、有酸素性代謝からのエネルギー供給 ( $\dot{V}O_2$ ) はほぼ最大に達しており、IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法で定量した最終区間の AOD は、その直前の区間の AOD と比較して有意に高い値を示した。この結果は、レース終盤のラストスパート局面における無酸素性代謝からのエネルギー供給の重要性を示唆するものである。

#### 4.2. ローイングパフォーマンスとエネルギー供給能力の関係

ローイングパフォーマンスは、漸増負荷テストで測定した  $\dot{V}O_{2max}$  またはパフォーマンステスト中の  $\dot{V}O_{2peak}$  と強く関連することが報告されており (Bourdin et al., 2004; Cosgrove et al., 1999; Kramer et al., 1994; Lacour et al., 2007, 2009; Messonnier et al., 1997)、有酸素性エネルギー供給能力の重要性が指摘されている。本研究においても、2 km テスト時の発揮パワーと  $\dot{V}O_{2max}$  の間に非常に強い正の相関関係が認められた。一方、無酸素性エネルギー供給能力については、ローイングパフォーマンスと関連が認められたとする報告 (Clark, 2016; Pripstein et al., 1999) と、認められなかったとする報告 (Russell et al., 1998) が混在し

ているが、本研究において 2 km テスト時の発揮パワーと MAOD の間には有意な相関関係が認められなかった。

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関係に影響を及ぼす要因としては、被験者の有酸素性エネルギー供給系の体力およびそれに起因するパフォーマンスレベルが考えられる。先行研究 (Bourdin et al., 2004; Cosgrove et al., 1999; Kramer et al., 1994; Lacour et al., 2007, 2009; Messonnier et al., 1997) および本研究の結果から、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を決定する最も強力な決定因子であることは明らかである。そのため、有酸素性エネルギー供給能力のばらつきが大きく、それに伴ってパフォーマンスレベルのばらつきも大きな集団を対象とした場合には、無酸素性エネルギー供給能力の差によってローイングパフォーマンスの差が説明できないことが考えられる。本研究の漸増負荷テストで測定した  $\dot{V}O_{2max}$  は、最も低い被験者で 3092.2 ml/min であり、最も高い被験者では 4944.1 ml/min であった。さらに、2 km テストの所要時間は 6.5~7.2 分間であり、被験者の競技レベルは日本代表の選考基準に到達しているレベルから一般的な大学生ボート選手レベルまで広範に及んでいた。さらに、運動時間が短くなるほど無酸素性代謝の貢献割合が増加すること (Duffield et al., 2004, 2005a, b) を考え合わせると、 $\dot{V}O_{2max}$  およびそれに起因するローイングパフォーマンスがより高いレベルで等質な被験者を対象とした場合には、本研究とは異なる結果が得られる可能性がある。

## 5. 結 論

本研究の結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で評価した 2 km テスト中の AOD および %Anaerobic は、それぞれ  $6.2 \pm 2.4$  LO<sub>2</sub>Eq および  $19.0 \pm 6.0$  % であり、従来の AOD 法と比較してそれぞれ有意に高い値を示すことが明らかになった ( $4.3 \pm 1.2$  LO<sub>2</sub>Eq および  $12.7 \pm 3.7$  %). しかし、ローイングパフォーマンスと MAOD の間には有意な相関関係は認められなかった。その要因として、本研究で対象とした被験者では、ローイングパフォーマンス

ンスのより強い決定要因である  $\dot{V}O_{2max}$  のばらつきが大きく、無酸素性エネルギー供給能力とパフォーマンスの関係性が認められなかった可能性も考えられた。しかし、2 km テストの中盤以降は、 $\dot{V}O_2$  がほぼ  $\dot{V}O_{2max}$  に到達していたこと、無酸素性代謝が一定の割合で貢献し続けていたこと (およそ 10 %), さらに、レースの最終区間ではその直前の区間よりも発揮パワーが有意に高くなり、かつ最終区間の AOD はその直前の区間と比較して有意に高い値を示したことなどを総合すると、無酸素性代謝からのエネルギー供給はレース中盤以降において高い発揮パワーを維持するために重要な要因となる可能性が考えられた。

## 第12章 総合考察

1. ストロークレートの増加が  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$  に及ぼす影響

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、運動中のペダル回転数が  $\dot{V}O_2$  に及ぼす影響が盛んに研究されており、それらは  $\dot{V}O_2$  が最小となる特定のピッチ (経済ピッチ) が出現すること、すなわち経済ピッチからピッチを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 (Coast and Welch, 1985; Foss and Hallen, 2004; Gaesser and Brooks, 1975; Marsh and Martin, 1993; Seabury et al., 1977). 研究課題 I-1 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または減少させた結果、ローイングにおいてもストロークレートと  $\dot{V}O_2$  の間に同様の関係、すなわち  $\dot{V}O_2$  が特定のストロークレート (経済ストロークレート) においても最も低い値を示し、そこからストロークレートを増加させても減少させても  $\dot{V}O_2$  が増大することが確認された。自転車運動を対象とした先行研究では、経済ピッチよりもピッチを増加させた際に  $\dot{V}O_2$  を増大させる要因として、1) ペダリング動作そのもの (すなわち内的仕事) の増加 (Foss and Hallen, 2004, 2005), 2) 筋の収縮頻度の増加に伴う筋小胞体からの  $Ca^{2+}$  の出し入れの頻度が増加することによる ATP 消費量の増加 (森元ほか, 2005), 筋の内部抵抗の増加 (Gaesser and Brooks, 1975) などが指摘されている。一方、ローイングは、身体重心を前後方向へと大きく移動させつつパワー発揮を繰り返すという特性を有していることから、クランクに沿って下肢のみを回転させる運動である自転車運動と比較して、身体を移動させる仕事量、すなわち内的仕事量が比較的大きな運動であることが指摘されている (Di Prampero et al., 1971, Fukunaga et al., 1986). このことから、ローイングにおいて経済ストロークレートよりもストロークレートを増加させた際の  $\dot{V}O_2$  の増大は、特に内的仕事量の増大と強く関連すると考えられた。研究課題 I-1 において、経済ストロークレートが出現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  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の増加量 (それぞれ  $\Delta IAA_{total}$  と  $\Delta \dot{V}O_2$ ) の関係を検討したところ、両者の間に強い相関関係が認められた。 $IAA_{total}$  が歩行運動や走運動のような身体重心の移動を伴う運動中の身体活動量の指標と

して用いられていることや、そのときのエネルギー消費量と正の相関関係を示すこと (Bouten et al., 1994; Eston et al., 1998; Iwashita et al., 2003; Nichols et al., 1999) を踏まえると、 $\Delta IAA_{total}$  と  $\Delta \dot{V}O_2$  の間に有意な正の相関関係が認められたことは、ローイング時のストロークレートの増加に伴う  $\dot{V}O_2$  の増大がローイング動作中の身体活動量、すなわち内的仕事量の増加と強く関連していることを示唆している。

研究課題 I-2 では、研究課題 I-1 で検討した発揮パワー条件 (90 %  $P_{LT}$ ) に加えて、100 %  $P_{LT}$ 、さらに、発揮パワーすなわち外的仕事を伴わずに内的仕事 (身体を移動させる仕事) のみを行わせる条件として、負荷のかかっていないハンドルを持ちローイング動作を繰り返す無負荷条件についても同様の検討を行なった。その結果、いずれの条件においても  $\dot{V}O_2$  が最も低い値を示した試技からストロークレートの増加に伴って  $IAA_{total}$  および  $\dot{V}O_2$  が増大することが確認された。さらに、 $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を被験者毎に検討した結果、いずれの条件においても両者の間には強い直線関係が認められることが明らかになった。特に、内的仕事のみを行なわせた無負荷条件において  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間に強い直線関係が認められたことは、 $IAA_{total}$  によってローイング時の内的仕事に対する  $\dot{V}O_2$  が推定できることを示唆している。しかし、各条件で得られた  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線回帰式の傾き ( $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ ) を比較したところ、90 % および 100 % LT 条件では無負荷条件と比較して有意に高い値を示した。その要因として、90 % および 100 % LT 条件では、漕ぎ終わりの局面においてハンドルを牽引してパワー発揮を行なうことによって、後方へと移動してきた身体を減速させる作用が生じるのに対して、無負荷条件ではそうした作用が生じなかったため、ストロークレートを増加させた際の身体活動量の増加量に対する  $\dot{V}O_2$  の増大が大きくなっていった可能性が考えられた。一方、90 % LT 条件と 100 % LT 条件では、 $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$  に有意差は認められなかった。これらの結果から、ハンドルに対するパワー発揮すなわち外的仕事量を伴う条件であれば、発揮パワーが異なる場合であっても、ストロークレートを増加させた際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間には同様の直線関係が出現することが示唆された。そこで本研究では、ハンドルへのパワー発揮を伴う条件 ( $P_{LT}$ ) で求めた  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の直線関係を用いて、ストロークレートの増加分を補正して酸素需要量を推定する AOD 法について検討を行なった。

## 2. IAA<sub>total</sub>を用いた AOD 法

自転車運動を対象とした先行研究 (Cavagna and Kaneko, 1977; Minetti et al., 2001; Widrick et al., 1992; Winter, 1979; Willems et al., 1995) では, 外的仕事量すなわちクランクに対して発揮された仕事量と, 下肢そのものを回転させる仕事量 (内的仕事量) を別々に定量し, その合計を運動中の総仕事量として評価する指標が用いられている. そこで本研究では, ストロークレートの増加分を補正して OD を推定するため, 発揮パワーおよび IAA<sub>total</sub> から, それぞれ外的仕事に対する OD (OD<sub>ext</sub>) および内的仕事に対する OD (OD<sub>int</sub>) を別々に推定し, その合計を運動中の OD とした. 研究課題 II の結果から, IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法で推定した OD および AOD は, 従来の AOD 法と比較して, それぞれ  $6.4 \pm 3.0\%$  および  $14.0 \pm 7.7\%$  高い値を示すことが明らかになった. この結果は, 従来の AOD 法では, ローイング時の OD を過少に評している可能性があるという本研究の仮説を支持するものであった. そこで, 研究課題 III では, IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法によって推定した OD および AOD の妥当性を明らかにするために, さらなる検討を実施した. 研究課題 III-1 では, IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法によって推定した AOD と, 無酸素性代謝, 特に解糖系によるエネルギー供給によって生じる乳酸の総蓄積量 ( $Q_{LaA}$ ) との関係について検討を行なった. その結果, いずれの AOD 法においても推定した AOD は,  $Q_{LaA}$  の間に中程度の相関関係を示すことが確認されたが, 方法間で相関関係の強さに差は認められなかった. この結果は, IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法および従来の AOD 法によって推定した AOD は, 無酸素性代謝によるエネルギー供給を反映する指標 ( $Q_{LaA}$ ) とそれぞれ関連することを示唆する結果ではあったものの, 推定方法の妥当性を検討することはできなかった. しかし, IAA<sub>total</sub> を用いた AOD 法で推定した AOD は, 従来の AOD 法と比較して  $14.0\%$  高い値を示し, さらに推定方法間における AOD の差には被験者間で大きなばらつきが認められた ( $4.2\sim 26.5\%$ ). 推定方法間における AOD の差は OD の差に起因するが, その要因として超最大テストと最大下テストにおけるストロークレートの乖離の程度が関与している可能性が考えられた. そこで, 研究課題 III-2 では, 最大下テストのストロークレートを調整することによって, 超最大テストと最大下テストにおけるストロークレートの乖離を小さくする方法 (SR 増加条件) を用いて OD を推定し, それ比較することによって IAA<sub>total</sub>



を用いた AOD 法の妥当性を検証した。その結果、SR 増加条件では、最大下および超最大テストを通して、発揮パワーとストロークレートおよび  $IAA_{total}$  の間に強い直線関係が認められた。さらに、推定した  $OD_{SR}$  は、従来の AOD 法で推定した OD よりも有意に高い値を示したが、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した  $OD_{IAA}$  とはほぼ一致した値を示し、かつ  $OD_{IAA}$  と  $OD_{SR}$  の間には強い級内相関係数 ( $ICC(1,1) = 0.93, p < 0.05$ ) が認められた。これらの結果は、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法では、ストロークレートの増加に伴う内的仕事の増加分を補正して OD が妥当に推定されていたことを示唆するものであった。

### 3. ローイングにおける MAOD の測定方法

固定負荷を用いた場合、2 分程度で疲労困憊に至る超最大運動において MAOD が得られることが報告されている (Medbø et al., 1988; Karlsson and Saltin, 1970)。一方、Whethers et al. (1991, 1993) は、自転車運動を対象として、ウィングートテストのようなオールアウト型のパワー発揮様式を用いた場合には、運動開始直後の運動強度が高くなるため、より短い時間 (45~60 秒間) で MAOD が得られることを報告している。しかし、研究課題 IV の結果から、ローイングの場合、運動時間が 2 分間の超最大テスト時の AOD は、MAOD の  $83.7 \pm 8.7\%$  であり、ほとんどの被験者 (14 名中 13 名) で MAOD が得られないことが明らかになった。Muniz et al. (2017) は、持久系サイクリスト ( $\dot{V}O_{2max}$ :  $4.53 \pm 0.54$  L/min) において、運動時間が  $123 \pm 31$  秒の超最大運動では MAOD に到達した被験者が全体の 28% であり、同様に運動時間が  $173 \pm 48$  秒の超最大運動では 48% であったことを報告している。これは、有酸素性能力に優れる持久系サイクリストでは、無酸素性能力に優れるスプリント系サイクリストと比較して、運動強度が低くオールアウトに至るまでの時間が長い超最大テストにおいて MAOD が得やすいことを報告した Craig et al. (1995) の研究結果とも一致している。しかし、研究課題 IV において、2 min テスト時の %MAOD は、有酸素性エネルギー供給能力の指標である  $\dot{V}O_{2max}$  との間で有意な相関関係を示さなかったが、無酸素性エネルギー供給能力の指標である MAOD との間で有意な負の相関関係を示した。この結果は、2 min テストにおける %MAOD が、被験者のエネルギー供給系の体力特性以外の要因の影響を受けていたこと、さらに、無酸素性エネルギー供給能力

が高い被験者ほど 2 min テストにおける%MAOD への到達率が低かったことを示唆している。これらの結果と、ローイングは運動リズムが自転車運動や走運動と比較して著しく低いことを考え合わせると、2 min テストにおいて%MAOD が低い値を示したことや、MAOD が得られた被験者が少なかったことは、運動リズムが制限されることによって短時間で発揮可能な最大仕事量が制限されることにより MAOD を使い切ることができなかったことが影響を及ぼしていた可能性があった。

MAOD には、測定間で 7% 程度の測定誤差が含まれることや、測定誤差の 95% 信頼区間が測定値の 80% ~ 128% に相当することが報告されている (Doherty et al., 2000; Weber and Schneider, 2001)。そこで、各被験者の MAOD の 95% 信頼区間を基準として、各テストで得られた AOD が MAOD に到達していたか否かを判定した結果、2 min, 1 km, 1.5 km および 2 km テストにおいて MAOD に到達していたと判断された被験者の割合は、それぞれ 71.4%, 92.9%, 85.7% および 78.6% であった。1.5 km および 2 km テストは、比較的運動時間が長いテスト (それぞれ  $5.2 \pm 0.2$  および  $7.1 \pm 0.2$  min) であったにも関わらず、MAOD が得られなかった被験者が多かったが、これにはテスト中のペース戦略が影響を及ぼしていた可能性が考えられた。すなわち、1.5 km および 2 km テストでは、スタート直後において特に高いパワー発揮 (スタートスパート) が行われ、それによってより早い段階で代謝性アシドーシスが生じ (Fabiato and Fabiato, 1978; Foster et al., 1994; Medbo and Tabata, 1993; Hermansen, 1981), その結果、テスト中盤以降において高い運動強度が維持できず MAOD が得られなかった被験者が含まれていた可能性も考えられた。ペース戦略と運動中のエネルギー代謝については、さらなる検討が必要ではあるが、研究課題 IV で得られた結果から、ローイングを対象とした場合は、1 km テスト (運動時間が  $3.3 \pm 0.1$  分間) を用いることによって比較的多くの被験者において MAOD が得られることが示唆された。

#### 4. $IAA_{total}$ を用いた AOD 法の意義

研究課題 III - 2 で用いた最大下テストのストロークレートを調整する方法 (SR 増加条件) は、最も簡易的に超最大テスト時のストロークレートの増加分を補正する方法である

といえる。しかし、2 km テスト中のストロークレートは一定ではなく、スタート直後の高い値を示した後に運動時間の経過に伴って漸減し、最終区間で再度上昇した。したがって、最大下テストのストロークレートを調整する方法を用いてストロークレートの増加分を補正するためには、2 km テストの各局面で得られた発揮パワーおよびストロークレートを基準として、それぞれストロークレートを調整した最大下テストを実施する必要がある、現実的ではない。さらに、2 km テストにおける 1 ストロークあたりの  $IAA_{total}$  ( $IAA_{total}/SR$ ) に着目すると、テストの前半と比較してテストの中盤で有意に高い値を示すことが明らかになった。この結果は、2 km テスト中はストロークレートに加えて、1 ストローク中の身体活動量も変化していたことを示唆している。こうした 1 ストローク中の身体活動量の変化は、クランクなどによって動作が規定されていないローイングの運動特性によるものであると考えられる。また、ストロークレートのみでは、1 ストローク中の身体活動量の変化を捉えることができないため、2 km テスト中のエネルギー代謝を評価する際には、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法が有用であると考えられる。

##### 5. トレーニング現場への示唆

研究課題 V の結果から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で評価した 2 km テスト中の無酸素性代謝の貢献割合は 19.0 % であり、従来の AOD 法で評価した値 (12.7 %) よりも有意に高い値を示すことが明らかになった。しかし、ローイングパフォーマンスは、 $\dot{V}O_{2max}$  と強い相関関係を示したが、MAOD とは関連が認められなかった。一方、Clark (2016) は、ナショナルレベルの男性ボート選手を対象として、ローイングパフォーマンス (所要時間) と AOD の間に有意な負の相関関係が認められたことを報告している ( $\rho = -0.71, p < 0.001$ )。運動中の %Anaerobic は、運動時間が短いほど高い値を示すことが知られている (Gastin, 2001; Li et al., 2015; Duffield et al., 2004, 2005a, b; Spencer et al., 1996)。さらに、Clark (2016) が対象とした被験者は、本研究の被験者と比較して、2 km テストに要した時間が短く (6 分 45 秒 v.s. 7 分 00 秒)、さらに  $\dot{V}O_{2max}$  が高くより等質であった ( $4.64 \pm 0.54$  L/min v.s.  $4.0 \pm 0.37$  L/min)。このことから、ローイングパフォーマンスの決定要因である  $\dot{V}O_{2max}$  が高く、

かつ等質な集団を対象とした場合には、テストの所要時間も短くなり、%Anaerobic が高まることによって、ローイングパフォーマンスと MAOD の間に関連が認められる可能性が考えられる。しかし、研究課題 V で得られた結果、すなわち、2 km テストの中盤以降は、1)  $\dot{V}O_2$  がほぼ  $\dot{V}O_{2max}$  に到達していたこと、2) 無酸素性代謝が一定の割合で貢献し続けていたこと (およそ 10 %)、さらに、3) レースの最終区間ではその直前の区間よりも発揮パワーが有意に高くなり、かつ最終区間の AOD はその直前の区間と比較して有意に高い値を示したことなどを総合すると、無酸素性代謝からのエネルギー供給はレース中盤以降において高い発揮パワーを維持するために重要な要因となる可能性が考えられた。

## 6. 本研究の限界

本研究で検証した  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法を実施するためには、事前に最大下テストおよび SR テストを実施し、外的仕事および内的仕事に対する酸素需要量の推定式を求める必要がある。特に、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る必要がある。一般的に、ボート選手はストロークレートの増加によって艇速度 (発揮パワー) を増加させることから (Di Prampero et al., 1971)、競技経験が浅く、ローイング動作に十分に慣れていない被験者を対象とした場合には、指示された発揮パワーとストロークレートを一定に保つことができず、 $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の間に直線性が得られない可能性も考えられる。したがって、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法を用いる際には、被験者の技術レベルを考慮する必要がある。また、本研究の被験者は、主に全日本レベルの大会への出場資格を有する男子大学生ボート選手であった。したがって、より競技レベルの高い被験者や女子ボート選手においても同様の結果が得られるかについては、さらなる検討を行なう必要がある。

## 7. 結 論

本研究では、ローイング時のストロークレートが最大下強度では発揮パワーに対して緩やかにかつ直線的に増加するのに対して、超最大強度ではその直線から逸脱して高い値を示すことに着目して、こうしたストロークレートの増加分を補正して OD を推定する AOD 法について検討を行なった。さらに、その方法を用いたローイング時の MAOD を測定するためのプロトコルについても検討を行ない、以下の知見を得た。

- 1) 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) が出現し、そのうち経済ストロークレートよりもストロークレートを増加させた際の  $\dot{V}O_2$  の増大には  $IAA_{total}$  (身体活動量) すなわち内的仕事量の増加が強く関連していることが明らかになった (研究課題 I-1 および I-2)。
- 2) ストロークレートを増加させた際の  $IAA_{total}$  と  $\dot{V}O_2$  の関係を被験者毎に検討すると、LT 時の発揮パワーの 90 % および 100 % で発揮パワーを固定した条件 (90 % LT および 100 % LT 条件) において、それぞれ強い直線関係が得られ、かつ直線回帰式の傾き ( $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta IAA_{total}$ ) は同等であり、ストロークレートテストを実施する際には LT 時の発揮パワーを用いることが妥当であること (研究課題 I-2)。
- 3)  $IAA_{total}$  を用いた AOD 法で推定した AOD は、 $Q_{LaA}$  と中程度の相関関係を示し (研究課題 III-1)、同様に OD は最大下テストのストロークレートを調整する方法で推定した OD とほぼ一致した値を示したことより、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって超最大テスト時のストロークレートの増加分を補正して OD を妥当に推定することが可能であること。

- 4) 男子大学生ボート選手を対象とした場合、ほとんどの被験者が 2 分間の超最大テストでは MAOD に到達できず、1 km テスト (運動時間が  $3.3 \pm 0.1$  min) において最も多くの被験者で MAOD が得られること (研究課題 IV).

以上の点から、 $IAA_{total}$  を用いた AOD 法によって、ローイング時のストロークレートの増加による内的仕事量の増加分を補正して OD および AOD を定量することが可能であり、そうして測定した 2 km テスト中の AOD および %Anaerobic は従来の AOD 法よりもそれぞれ高い値を示すことが明らかになった。また、ローイングにおいて MAOD を測定する際には、運動時間が 3.3 分程度であり、かつ被験者が日常的に実施しているプロトコルである 1 km テストが有用であることが明らかになった。

今後は、さらに  $\dot{V}O_{2max}$  およびパフォーマンスレベルの等質な集団を対象として、パフォーマンスと MAOD の関係について検討することによって、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関係についてより詳細な知見が得られると考えられる。

## 謝 辞

本論文を作成するにあたり、指導教官である筑波大学人間総合科学研究科教授の鍋倉賢治先生には、卒業論文からローイングという研究テーマに取り組むうえで、研究全般にわたり多大なご指導を賜りましたことを心より感謝いたします。

ご多忙の中、副査を引き受けて頂いた筑波大学人間総合科学研究科教授の西保岳先生には、得られたデータから本研究の知見およびその意義について貴重な御助言を賜りましたことを心より感謝いたします。また、同教授の藤井範久先生には、ローイング中の動作を加速度センサによって評価するという本研究の取り組みに対して、測定方法、解析方法、およびそのデータの持つ意味や可能性について、貴重な御助言を賜りましたことを心より感謝いたします。これらのご指導に対して、深く感謝の意を表します。

また、筑波大学人間総合科学研究科教授の徳山薫平先生には、加速度データから代謝量を評価する試みに対して、ローイングの運動特性も踏まえて、その有用性について貴重な御助言を頂きましたことを感謝申し上げます。また、同准教授の木越清信助先生には、競技パフォーマンスとエネルギー供給系の関係から本研究の意義を深めるうえで貴重な御助言を頂きましたことを感謝申し上げます。

鍋倉研究室の先輩である環太平洋大学准教授の吉岡利貢氏、山梨学院大学准教授の中垣浩平氏、茨城キリスト教大学准教授の中村和照氏には、体力学分野の意義について多くの御助言を頂きました。また、実験の実施に際して御協力頂いた鍋倉研究室の諸氏に御礼申し上げると共に、被験者として参加して頂いた筑波大学漕艇部および茨城大学漕艇部の方々に感謝申し上げます。

最後に、長い学生生活を経済的にも精神的にも支えて頂いた両親に心から感謝いたします。

## 第13章 引用文献

- Ahlquist, L. E., Bassett, D. R., Jr., 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. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 65 (4): 360-364.
- Aisbett, B., Le Rossignol, P., McConell, G. K., Abbiss, C. R., and Snow, R. (2009) Effects of starting strategy on 5-min cycling time-trial performance. *Journal of Sports Sciences* 27 (11): 1201-1209.
- Allen, P. S., Matheson, G. O., Zhu, G., Gheorgiu, D., Dunlop, R. S., Falconer, T., Stanley, C., and Hochachka, P. W. (1997) Simultaneous <sup>31</sup>P MRS of the soleus and gastrocnemius in Sherpas during graded calf muscle exercise. *American Journal of Physiology* 273 (3 Pt 2): R999-1007.
- Åstrand, P.-O. and Rodahl, K. (1987) *Textbook of work physiology : physiological bases of exercise*. Applied sports physiology: Rowing. McGraw-Hill, New York. pp670-674
- Bangsbo, J. (1996) Oxygen deficit: a measure of the anaerobic energy production during intense exercise? *Canadian Journal of Applied Physiology* 21 (5): 350-363; discussion 364-359.
- Bangsbo, J. (1998) Quantification of anaerobic energy production during intense exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 30 (1): 47-52.
- Bangsbo, J., Gollnick, P. D., Graham, T. E., Juel, C., Kiens, B., Mizuno, M., and Saltin, B. (1990a) Anaerobic energy production and O<sub>2</sub> deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. *The Journal of Physiology* 422: 539-559.
- Bangsbo, J., Gollnick, P. D., Graham, T. E., Juel, C., Kiens, B., Mizuno, M., and Saltin, B. (1990b) Anaerobic energy production and O<sub>2</sub> deficit-debt relationship during



- exhaustive exercise in humans. *Journal of Physiology* 422: 539-559.
- Bangsbo, J., Michalsik, L., and Petersen, A. (1993) Accumulated O<sub>2</sub> deficit during intense exercise and muscle characteristics of elite athletes. *International Journal of Sports Medicine* 14 (4): 207-213.
- Barclay, C. J. (2017) Energy demand and supply in human skeletal muscle. *Journal of Muscle Research and Cell Motility*.
- 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* (1985) 59 (6): 1936-1940.
- Bieuzen, F., Vercruyssen, F., Hausswirth, C., and Brisswalter, J. (2007) Relationship between strength level and pedal rate. *International Journal of Sports Medicine* 28 (7): 585-589.
- Bishop, D., Bonetti, D., and Dawson, B. (2002) The influence of pacing strategy on VO<sub>2</sub> and supramaximal kayak performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34 (6): 1041-1047.
- Bourdin, M., Messonnier, L., Hager, J. P., and Lacour, J. R. (2004) Peak power output predicts rowing ergometer performance in elite male rowers. *International Journal of Sports Medicine* 25 (5): 368-373.
- 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.
- Bret, C., Lacour, J. R., Bourdin, M., Locatelli, E., De Angelis, M., Faina, M., Rahmani, A., and Messonnier, L. (2013) Differences in lactate exchange and removal abilities between high-level African and Caucasian 400-m track runners. *European Journal of Applied Physiology* 113 (6): 1489-1498.
- Bret, C., Messonnier, L., Nouck Nouck, J. M., Freund, H., Dufour, A. B., and Lacour, J. R. (2003) Differences in lactate exchange and removal abilities in athletes specialised in

- different track running events (100 to 1500 m). *International Journal of Sports Medicine* 24 (2): 108-113.
- Calbet, J. A., Chavarren, J., and Dorado, C. (1997) Fractional use of anaerobic capacity during a 30- and a 45-s Wingate test. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 76 (4): 308-313.
- Calbet, J. A., De Paz, J. A., Garatachea, N., Cabeza de Vaca, S., and Chavarren, J. (2003) Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J Appl Physiol* (1985) 94 (2): 668-676.
- Cannon, D. T., Bimson, W. E., Hampson, S. A., Bowen, T. S., Murgatroyd, S. R., Marwood, S., Kemp, G. J., and Rossiter, H. B. (2014) Skeletal muscle ATP turnover by <sup>31</sup>P magnetic resonance spectroscopy during moderate and heavy bilateral knee extension. *Journal of Physiology* 592 (23): 5287-5300.
- Cavagna, G. A. and Kaneko, M. (1977) Mechanical work and efficiency in level walking and running. *Journal of Physiology* 268 (2): 467--481.
- Chad, K. E. and Wenger, H. A. (1988) The effect of exercise duration on the exercise and post-exercise oxygen consumption. *Canadian Journal of Sport Sciences* 13 (4): 204-207.
- Chatel, B., Bret, C., Edouard, P., Oullion, R., Freund, H., and Messonnier, L. A. (2016) Lactate recovery kinetics in response to high-intensity exercises. *European Journal of Applied Physiology* 116 (8): 1455-1465.
- Clark, J. R. (2016) Energy system contribution to 2000-m rowing ergometry using the accumulate oxygen deficit. University of Pretoria, South Africa
- Clifford, P. S., Hanel, B., and Secher, N. H. (1994) Arterial blood pressure response to rowing. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26 (6): 715-719.
- 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.
- Cosgrove, M. J., Wilson, J., Watt, D., and Grant, S. F. (1999) The relationship between selected physiological variables of rowers and rowing performance as determined by a 2000 m ergometer test. *Journal of Sports Sciences* 17 (11): 845-852.
- Craig, I. S. and Morgan, D. W. (1998) Relationship between 800-m running performance and accumulated oxygen deficit in middle-distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 30 (11): 1631-1636.
- Craig, N. P. and Norton, K. I. (2001) Characteristics of track cycling. *Sports Medicine* 31 (7): 457-468.
- Craig, N. P., Norton, K. I., Conyers, R. A., Woolford, S. M., Bourdon, P. C., Stanef, T., and Walsh, C. B. (1995) Influence of test duration and event specificity on maximal accumulated oxygen deficit of high performance track cyclists. *International Journal of Sports Medicine* 16 (8): 534-540.
- Cunningham, D.A., Goode, P. B., and Critz, J. B. (1975) Cardiorespiratory response to exercise on rowing and bicycle ergometer. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 7: 37-43.
- Currel, K. And Jeukendrup, A. E. (2008) Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance. *Sport Med.* 38: 297-316.
- de Campos Mello, F., de Moraes Bertuzzi, R. C., Grangeiro, P. M., and Franchini, E. (2009) Energy systems contributions in 2,000 m race simulation: a comparison among rowing ergometers and water. *European Journal of Applied Physiology* 107 (5): 615-619.
- Deka, P., Berg, K., Harder, J., Batelaan, H., and Mc, G. M. (2017) Oxygen cost and physiological responses of recreational badminton match play. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 57 (6): 760-765.
- DFfR (2017) Reglement for TU cuppen 2017 (Rules for procedure for TU cup 2017).

[https://roning.dk/wp-content/uploads/2017/05/Reglement-for-TU-cuppen-2017\\_Ver2.pdf](https://roning.dk/wp-content/uploads/2017/05/Reglement-for-TU-cuppen-2017_Ver2.pdf).

Accessed 5/24 2017

Di Prampero, P. E., Cortili, G., Celentano, F., and Cerretelli, P. (1971) Physiological aspects of rowing. *Journal of Applied Physiology* 31 (6): 853-857.

di Prampero, P. E. and Ferretti, G. (1999) The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respiration Physiology* 118 (2-3): 103-115.

Dimmer, K. S., Friedrich, B., Lang, F., Deitmer, J. W., and Broer, S. (2000) The low-affinity monocarboxylate transporter MCT4 is adapted to the export of lactate in highly glycolytic cells. *Biochemical Journal* 350 Pt 1: 219-227.

Droghetti, P., Jensen, K., and Nilsen, T. S. (1991) The total estimated metabolic cost of rowing. *FISA Coach* 2 (2): 1-4.

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.

Faina, M., Billat, V., Squadrone, R., De Angelis, M., Koralsztein, J. P., and Dal Monte, A. (1997) Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 76 (1): 13-20.

FISA (2017) FISA RULE BOOK. Accessed 5/24 2017

- Folkow, B., Gaskell, P., and Waaler, B. A. (1970) Blood flow through limb muscles during heavy rhythmic exercise. *Acta Physiologica Scandinavica* 80 (1): 61-72.
- Foss, O. and Hallen, J. (2004) The most economical cadence increases with increasing workload. *European Journal of Applied Physiology* 92 (4-5): 443-451.
- Foss, O. and Hallen, J. (2005) Cadence and performance in elite cyclists. *European Journal of Applied Physiology* 93 (4): 453-462.
- Foster, C., deKoning, J. J., Hettinga, F., Lampen, J., Dodge, C., Bobbert, M., and Porcari, J. P. (2004) Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition. *International Journal of Sports Medicine* 25 (3): 198-204.
- Freund, H. and Gendry, P. (1978) Lactate kinetics after short strenuous exercise in man. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 39 (2): 123-135.
- Freund, H., Oyono-Enguelle, S., Heitz, A., Marbach, J., Ott, C., Zouloumian, P., and Lampert, E. (1986) Work rate-dependent lactate kinetics after exercise in humans. *J Appl Physiol* (1985) 61 (3): 932-939.
- Freund, H. and Zouloumian, P. (1981a) Lactate after exercise in man: I. Evolution kinetics in arterial blood. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 46 (2): 121-133.
- Freund, H. and Zouloumian, P. (1981b) Lactate after exercise in man: IV. Physiological observations and model predictions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 46 (2): 161-176.
- Fukunaga, T., Matsuo, A., Yamamoto, K., and Asami, T. (1986) Mechanical efficiency in rowing. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 55 (5): 471-475.
- Gaesser, G. A. and Brooks, G. A. (1975) Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *Journal of Applied Physiology* 38 (6): 1132-1139.
- Gaesser, G. A. and Brooks, G. A. (1984) Metabolic bases of excess post-exercise oxygen

- consumption: a review. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 16 (1): 29-43.
- Garland, S. W. (2005) An analysis of the pacing strategy adopted by elite competitors in 2000 m rowing. *British Journal of Sports Medicine* 39 (1): 39-42.
- Gastin, P. B. (2001) Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine* 31 (10): 725-741.
- Gastin, P. B., Costill, D. L., Lawson, D. L., Krzeminski, K., and McConnell, G. K. (1995) Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 27 (2): 255-263.
- Gastin, P. B. and Lawson, D. L. (1994a) Influence of training status on maximal accumulated oxygen deficit during all-out cycle exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 69 (4): 321-330.
- Gastin, P. B. and Lawson, D. L. (1994b) Variable resistance all-out test to generate accumulated oxygen deficit and predict anaerobic capacity. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 69 (4): 331-336.
- Gray, S. R., De Vito, G., Nimmo, M. A., Farina, D., and Ferguson, R. A. (2006) Skeletal muscle ATP turnover and muscle fiber conduction velocity are elevated at higher muscle temperatures during maximal power output development in humans. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 290 (2): R376-382.
- Green, S. and Dawson, B. T. (1995) The oxygen uptake-power regression in cyclists and untrained men: implications for the accumulated oxygen deficit. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 70 (4): 351-359.
- Green, S., Dawson, B. T., Goodman, C., and Carey, M. F. (1996) Anaerobic ATP production and accumulated O<sub>2</sub> deficit in cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 28 (3): 315-321.
- Hagberg, J. M., Mullin, J. P., Giese, M. D., and Spitznagel, E. (1981) Effect of pedaling rate on

- submaximal exercise responses of competitive cyclists. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 51 (2): 447-451.
- Hagerman, F. C. (1984) Applied physiology of rowing. *Sports Medicine* 1 (4): 303-326.
- Hagerman, F. C. (2000) ボート競技の生理学. スポーツ運動科学ーバイオメカニクスと生理学ー. 西村書店, 東京. pp738-763
- Hagerman, F. C., Connors, M. C., Gault, J. A., Hagerman, G. R., and Polinski, W. J. (1978) Energy expenditure during simulated rowing. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 45 (1): 87-93.
- Hagerman, F. C. and Lee, W. D. (1971) Measurement of oxygen consumption, heart rate, and work output during rowing. *Medicine and Science in Sports* 3 (4): 155-160.
- Hagerman, F. C. and Staron, R. S. (1983) Seasonal variables among physiological variables in elite oarsmen. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences Journal Canadien des Sciences Appliquées Au Sport* 8 (3): 143-148.
- Hansen, E. A., Jorgensen, L. V., and Sjogaard, G. (2004) A physiological counterpoint to mechanistic estimates of "internal power" during cycling at different pedal rates. *European Journal of Applied Physiology* 91 (4): 435-442.
- 八田秀雄. (2009) 乳酸と運動生理・生化学ーエネルギー代謝の仕組みー. 市村出版, 東京.
- Hermansen, L. (1969) Anaerobic energy release. *Med SciSports Exercise* 1 (1): 32-35.
- Hill, A. V. (1928) The Diffusion of Oxygen and Lactic Acid through Tissues. *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Containing Papers of a Biological Character* 104 (728): 39-96.
- 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.

- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., and Hanin, J. (2009) Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 41 (1): 3-13.
- Hughson, R. L., Green, H. J., Phillips, S. M., and Shoemaker, J. K. (1996) Physiological limitations to endurance exercise. *The Physiology and Pathophysiology of Exercise Tolerance*. Springer US, New York. pp211-217
- Huxley, A. F. (1957) Muscle structure and theories of contraction. *Progress in Biophysics and Biophysical Chemistry* 7: 255-318.
- Ingham, S. A., Whyte, G. P., Jones, K., and Nevill, A. M. (2002) Determinants of 2,000 m rowing ergometer performance in elite rowers. *European Journal of Applied Physiology* 88 (3): 243-246.
- 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.
- Jackson, D. H., Reeves, T. J., Sheffield, L. T., and Burdeshaw, J. (1973) Isometric effects on treadmill exercise response in healthy young men. *Am J. Cardiol.* 31 (3): 344-350.
- Jones, A. M., Grassi, B., Christensen, P. M., Krstrup, P., Bangsbo, J., and Poole, D. C. (2011) Slow component of VO<sub>2</sub> kinetics: mechanistic bases and practical applications. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43 (11): 2046-2062.
- Jones, D. A., Turner, D. L., McIntyre, D. B., and Newham, D. J. (2009) Energy turnover in relation to slowing of contractile properties during fatiguing contractions of the human anterior tibialis muscle. *Journal of Physiology* 587 (Pt 17): 4329-4338.
- Karlsson, J. and Saltin, B. (1970) Lactate, ATP, and CP in working muscles during exhaustive exercise in man. *Journal of Appl. Physiol.* 29 (5): 596-602.
- 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.
- Kemp, G. J., Meyerspeer, M., and Moser, E. (2007) Absolute quantification of phosphorus metabolite concentrations in human muscle in vivo by  $^{31}\text{P}$  MRS: a quantitative review. *NMR in Biomedicine* 20 (6): 555-565.
- Kramer, J. F., Leger, A., Paterson, D. H., and Morrow, A. (1994) Rowing performance and selected descriptive, field, and laboratory variables. *Canadian Journal of Applied Physiology* 19 (2): 174-184.
- Krleza, J. L., Dorotic, A., Grzunov, A., and Maradin, M. (2015) Capillary blood sampling: national recommendations on behalf of the Croatian Society of Medical Biochemistry and Laboratory Medicine. *Biochemia Medica* 25(3): 335-358.
- Krogh, A. and Lindhard, J. (1920) The changes in respiration at the transition from work to rest. *Journal of Physiology* 53 (6): 431-439.
- Kushmerick, M. J., Meyer, R. A., and Brown, T. R. (1992) Regulation of oxygen consumption in fast- and slow-twitch muscle. *American Journal of Physiology* 263 (3 Pt 1): C598-606.
- Lacour, J. R., Bouvat, E., and Barthelemy, J. C. (1990) Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 61 (3-4): 172-176.
- Lacour, J. R., Messonnier, L., and Bourdin, M. (2007) The leveling-off of oxygen uptake is related to blood lactate accumulation. Retrospective study of 94 elite rowers. *European Journal of Applied Physiology* 101 (2): 241-247.
- Lacour, J. R., Messonnier, L., and Bourdin, M. (2009) Physiological correlates of performance. Case study of a world-class rower. *European Journal of Applied Physiology* 106 (3):

407-413.

Li, Y., Niessen, M., Chen, X., and Hartmann, U. (2015) Overestimate of relative aerobic contribution with maximal accumulated oxygen deficit: a review. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 55 (5): 377-382.

Maciejewski, H., Bourdin, M., Lacour, J. R., Denis, C., Moyen, B., and Messonnier, L. (2013) Lactate accumulation in response to supramaximal exercise in rowers. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 23 (5): 585-592.

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.

Margaria, R., Cerretelli, P., Diprampero, P. E., Massari, C., and Torelli, G. (1963) Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. *Journal of Applied Physiology* 18: 371-377.

Margaria, R., Edwards, H. T., Dill, D. B. (1933) THE POSSIBLE MECHANISMS OF CONTRACTING AND PAYING THE OXYGEN DEBT AND THE RÔLE OF LACTIC ACID IN MUSCULAR CONTRACTION. *American Journal of Physiology* 106: 689-715.

Marsh, A. P. and Martin, P. E. (1993) The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 25 (11): 1269-1274.

松尾彰文, 杉田正明, 井本岳秋, 若山章信, 小林寛道. (1997) 陸上競技中距離レースにおける世界一流選手のスピード、ピッチとストライドの変動. *日本体育学会大会号* (48): 325.

松下雅雄, 中村夏美, 藤原昌, 千足耕一. (2006) 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.

Medbø, J. I., Mohn, A. C., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., and Sejersted, O. M. (1988) Anaerobic

- capacity determined by maximal accumulated O<sub>2</sub> deficit. *J Appl Physiol* (1985) 64 (1): 50-60.
- Medbo, J. I. and Sejersted, O. M. (1985) Acid-base and electrolyte balance after exhausting exercise in endurance-trained and sprint-trained subjects. *Acta Physiologica Scandinavica* 125 (1): 97-109.
- Medbø, J. I. and Tabata, I. (1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J Appl Physiol* (1985) 67 (5): 1881-1886.
- Medbø, J. I. and Tabata, I. (1993) Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *J Appl Physiol* (1985) 75 (4): 1654-1660.
- Mero, A. (1988) Blood lactate production and recovery from anaerobic exercise in trained and untrained boys. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 57 (6): 660-666.
- Messonnier, L., Freund, H., Bourdin, M., Belli, A., and Lacour, J. R. (1997) Lactate exchange and removal abilities in rowing performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29 (3): 396-401.
- Messonnier, L., Freund, H., Denis, C., Dormois, D., Dufour, A. B., and Lacour, J. R. (2002) Time to exhaustion at VO<sub>2</sub>max is related to the lactate exchange and removal abilities. *International Journal of Sports Medicine* 23 (6): 433-438.
- Mickelson, T. C. and Hagerman, F. C. (1982) Anaerobic threshold measurements of elite oarsmen. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 14 (6): 440-444.
- Minetti, A. E. (2011) Bioenergetics and biomechanics of cycling: the role of 'internal work'. *European Journal of Applied Physiology* 111 (3): 323-329.
- Minetti, A. E., Pinkerton, J., and Zamparo, P. (2001) From bipedalism to bicyclism: evolution in energetics and biomechanics of historic bicycles. *Proceedings: Biological Sciences*

268 (1474): 1351-1360.

森健一, 吉岡利貢, 白松宏輔, 荏山靖, 尾縣貢. (2011) 有酸素性能力の相違が Wingate test におけるエネルギー供給比に及ぼす影響. 体力科学 60 (5): 503-510.

森元雄亮, 得居雅人, 平木場浩二. (2005) 自転車駆動運動時の内的仕事とエネルギー代謝の関係. 日本生理人類学会誌 10 (1): 40-41.

Morton, D. P. and Gustin, P. B. (1997) Effect of high intensity board training on upper body anaerobic capacity and short-lasting exercise performance. Australian Journal of Science and Medicine in Sport 29 (1): 17-21.

Muniz-Pumares, D., Pedlar, C., Godfrey, R. J., and Glaister, M. (2017) Accumulated Oxygen Deficit During Exercise to Exhaustion Determined at Different Supramaximal Work-Rates. Int J Sports Physiol. Perform. 12 (3): 351-356.

中村夏実. (2007) 加速度計を用いた水上競技のパフォーマンス評価の可能性 (特集 水上競技の科学). バイオメカニクス研究 11 (2): 113-123.

中村夏実, 山本正嘉, 荻田太. (2010) ローイングエルゴメータ漕における 3 次元の身体加速度の積分値. トレーニング科学 22 (2): 125-132.

Newell, J., Higgins, D., Madden, N., Cruickshank, J., Einbeck, J., McMillan, K., and McDonald, R. (2007) Software for calculating blood lactate endurance markers. Journal of Sports Sciences 25 (12): 1403-1409.

Nichols, J. F., Morgan, C. G., Chabot, L. E., Sallis, J. F., and Calfas, K. J. (2000) Assessment of physical activity with the Computer Science and Applications, Inc., accelerometer: laboratory versus field validation. Research Quarterly for Exercise and Sport 71 (1): 36-43.

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.

- Nolte, V. (2011) Rowing faster. Improving anaerobic threshold. Human Kinetics, Leeds.
- 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.
- Noordhof, D. A., Skiba, P. F., and de Koning, J. J. (2013) Determining anaerobic capacity in sporting activities. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 8 (5): 475-482.
- Nummela, A. and Rusko, H. (1995) Time course of anaerobic and aerobic energy expenditure during short-term exhaustive running in athletes. *International Journal of Sports Medicine* 16 (8): 522-527.
- Ohkuwa, T., Kato, Y., Katsumata, K., Nakao, T., and Miyamura, M. (1984) Blood lactate and glycerol after 400-m and 3,000-m runs in sprint and long distance runners. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 53 (3): 213-218.
- Olesen, H. L., Raabo, E., Bangsbo, J., and Secher, N. H. (1994) Maximal oxygen deficit of sprint and middle distance runners. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 69 (2): 140-146.
- Ozyener, F., Rossiter, H. B., Ward, S. A., and Whipp, B. J. (2001) Influence of exercise intensity on the on- and off-transient kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. *Journal of Physiology* 533 (Pt 3): 891-902.
- Paterson, D. H., Cunningham, D. A., and Bumstead, L. A. (1986) Recovery O<sub>2</sub> and blood lactic acid: longitudinal analysis in boys aged 11 to 15 years. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 55 (1): 93-99.
- Patterson, R. P. and Moreno, M. I. (1990) Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22 (4): 512-516.
- Pluim, B. M., Zwinderman, A. H., van der Laarse, A., and van der Wall, E. E. (2000) The

- athlete's heart. A meta-analysis of cardiac structure and function. *Circulation* 101 (3): 336-344.
- Poole, D. C. and Jones, A. M. (2012) Oxygen uptake kinetics. *Compr Physiol* 2 (2): 933-996.
- 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* (1985) 94 (4): 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. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 79 (6): 491-494.
- Ramsbottom, R., Nevill, M. E., Nevill, A. M., and Hazeldine, R. (1997) Accumulated oxygen deficit and shuttle run performance in physically active men and women. *Journal of Sports Sciences* 15 (2): 207-214.
- Redfield, R. and Hull, M. L. (1986) On the relation between joint moments and pedalling rates at constant power in bicycling. *Journal of Biomechanics* 19 (4): 317-329.
- Rosiello, R. A., Mahler, D. A., and Ward, J. L. (1987) Cardiovascular responses to rowing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 19 (3): 239-245.
- Russell, A. P., Le Rossignol, P. F., Snow, R. J., and Lo, S. K. (2000) The precision of estimating the total energy demand: Implications for the determination of the accumulated oxygen deficit. *Journal of Exercise Physiology online* 3 (2): 55-63.
- 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. *Journal of Sports Sciences* 16 (8): 749-754.
- 佐伯徹郎, 鍋倉賢治, 高松薫. (1999) 漸増負荷走テストにおける生理的応答からみた中距離走者と長距離走者の相違. *体力科学* 48 (3): 385-392.
- 佐竹昌之, 池上晴夫. (1985) 長距離走におけるピッチとストライドの変化が走効率に

- 及ぼす影響. 体育學研究 30 (3): 231-239.
- 佐竹昌之, 前河洋一, 青柳幸利, 姜熙成, 池上晴夫. (1987) 走運動及び自転車運動におけるピッチと酸素摂取量の関係. 体育學研究 32 (2): 91-97.
- Sawka, M. N. (1986) Physiology of upper body exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 14: 175-211.
- Schnabel, A. and Kindermann, W. (1983) Assessment of anaerobic capacity in runners. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 52 (1): 42-46.
- Scott, C. B., Roby, F. B., Lohman, T. G., and Bunt, J. C. (1991) The maximally accumulated oxygen deficit as an indicator of anaerobic capacity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 23 (5): 618-624.
- 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.
- Secher, N. H. (1983) The physiology of rowing. *Journal of Sports Sciences* 1 (1): 23-53.
- Secher, N. H. (1993) Physiological and biomechanical aspects of rowing. Implications for training. *Sports Medicine* 15 (1): 24-42.
- Secher, N. H., Clausen, J. P., Klausen, K., Noer, I., and Trap-Jensen, J. (1977) Central and regional circulatory effects of adding arm exercise to leg exercise. *Acta Physiologica Scandinavica* 100 (3): 288-297.
- Secher, N. H., Vaage, O., Jensen, K., and Jackson, R. C. (1983) Maximal aerobic power in oarsmen. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 51 (2): 155-162.
- 社団法人日本ボート協会 (2009) 競漕規則 -平成 21 年 6 月改訂-.  
[http://www.jara.or.jp/jara/rule0717\\_H21\\_06.pdf](http://www.jara.or.jp/jara/rule0717_H21_06.pdf). Accessed 5/24 2017
- Siegmund, G. P., Edwards, M. R., Moore, K. S., Tiessen, D. A., Sanderson, D. J., and McKenzie, D. C. (1999) Ventilation and locomotion coupling in varsity male rowers. *J Appl Physiol* 87 (1): 233-242.

- Sjogaard, G., Hansen, E. A., and Osada, T. (2002) Blood flow and oxygen uptake increase with total power during five different knee-extension contraction rates. *J Appl Physiol* (1985) 93 (5): 1676-1684.
- Smith, T., Hopkins, W., and Taylor, N. (1994) Respiratory responses of elite oarsmen, former oarsmen, and highly trained non-rowers during rowing, cycling and running. *Europ J Appl Physiol* 69 (1): 44-49.
- Spencer, M. R. and Gatin, 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.
- Spencer, M. R., Gatin, P. B., and Payne, W. (1996) Energy system contribution during 400 to 1500 metres running. *New Studies in Athletics* 11 (4): 59-66.
- Spriet, L. L., Soderlund, K., Bergstrom, M., and Hultman, E. (1987) Anaerobic energy release in skeletal muscle during electrical stimulation in men. *Journal of Applied Physiology* 62 (2): 611-615.
- Steinacker, J. M. (1993) Physiological aspects of training in rowing. *International Journal of Sports Medicine* 14 Suppl 1: S3-10.
- Szal, S. E. and Schoene, R. B. (1989) Ventilatory response to rowing and cycling in elite oarsmen. *J Appl Physiol* (1985) 67: 264-296.
- Taylor, H. L., Buskirk, E., Henschel, A. (1955) Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J Appl Physiol* (1985) 8 (1): 73-80.
- Thomas, C., Bishop, D. J., Lambert, K., Mercier, J., and Brooks, G. A. (2012) Effects of acute and chronic exercise on sarcolemmal MCT1 and MCT4 contents in human skeletal muscles: current status. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 302 (1): R1-14.
- van Hall, G. (2010) Lactate kinetics in human tissues at rest and during exercise. *Acta Physiologica*



- (Oxf) 199 (4): 499-508.
- van Hall, G., Stromstad, M., Rasmussen, P., Jans, O., Zaar, M., Gam, C., Quistorff, B., Secher, N. H., and Nielsen, H. B. (2009) Blood lactate is an important energy source for the human brain. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* 29 (6): 1121-1129.
- Volianitis, S., Yoshiga, C. C., Nissen, P., and Secher, N. H. (2004) Effect of fitness on arm vascular and metabolic responses to upper body exercise. *American Journal of Physiology: Heart and Circulatory Physiology* 286 (5): H1736-1741.
- Wells, R., Morrissey, M., and Hughson, R. (1986) Internal work and physiological responses during concentric and eccentric cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 55 (3): 295-301.
- Weber, C. L. and Schneider, D. A. (2001) Reliability of MAOD measured at 110% and 120% of peak oxygen uptake for cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 33 (6): 1056-1059.
- Whipp, B. J. and Ward, S. A. (1990) Physiological determinants of pulmonary gas exchange kinetics during exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22 (1): 62-71.
- Widrick, J. J., Freedson, P. S., and Hamill, J. (1992) Effect of internal work on the calculation of optimal pedaling rates. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 24 (3): 376-382.
- Willems, P. A., Cavagna, G. A., and Heglund, N. C. (1995) External, internal and total work in human locomotion. *Journal of Experimental Biology* 198 (Pt 2): 379-393.
- Winter, D. A. (1979) A new definition of mechanical work done in human movement. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 46 (1): 79-83.
- 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.
- Yoshiga, C. C. and Higuchi, M. (2003) Rowing performance of female and male rowers. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 13 (5): 317-321.
- 吉田雄大, 高橋信二, 千葉智則. (2013) 3 軸加速度センサを用いたシャトルランにおける走行特性の評価. *体育学研究* 58 (1): 35-44.
- Zagatto, A. M., Leite, J. V., Papoti, M., and Beneke, R. (2016) Energetics of Table Tennis and Table Tennis-Specific Exercise Testing. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 11 (8): 1012-1017.
- Zouloumian, P. and Freund, H. (1981a) Lactate after exercise in Man: II. Mathematical model. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 46 (2): 135-147.
- Zouloumian, P. and Freund, H. (1981b) Lactate after exercise in man: III. Properties of the compartment model. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 46 (2): 149-160.