カヤックパドリング中の無酸素性及び有酸素性エネルギー代謝の貢献比

中 垣 浩 平 吉 岡 利 貢 鍋 倉 賢 治

THE RELATIVE CONTRIBUTION OF ANAEROBIC AND AEROBIC ENERGY SYSTEMS DURING FLAT-WATER KAYAK PADDLING

KOHEI NAKAGAKI, TOSHITSUGU YOSHIOKA and YOSHIHARU NABEKURA

Abstract

The purposes of this study were to investigate the characteristics of physiological responses during flat-water kayaking events, and to quantify the contribution of aerobic and anaerobic energy systems. Eight male kayak paddlers participated in the study. The subjects performed an incremental test and five all-out tests (20, 40, 120, 240 and 600 sec) on a kayak ergometer. Peak oxygen uptake ($\dot{V}O_{2peak}$; $3790 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$) in the incremental test was significantly lower than maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$; $3944 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$) in the all-out test. In contrast, power at $\dot{V}O_{2peak}$ (154.0 W) was significantly higher than power at $\dot{V}O_{2max}$ (144.1 W). The contributions of energy systems were calculated by measurements of the accumulated oxygen uptake and accumulated oxygen deficit. The relative anaerobic energy system contributions for 200 m (40 sec), 500 m (120 sec), and 1000 m (240 sec) averaged 71%, 43%, and 26%, respectively. These higher relative anaerobic energy system contributions, due to higher anaerobic capacity in kayak athletes, and the smaller muscle mass involved in kayak paddling limit oxygen uptake when exercise intensity is high. Furthermore, slower exercise cadence in kayak paddling leads to higher muscular tension, and thus may enhance the limiting of oxygen uptake.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2008, 57 : 261~270)

key word : accumulated oxygen deficit, energy system, supramaximal exercise, kayak paddling, flat-water kayak

I . 緒 言

カヌー・カヤック競技の一つであるフラットウォーターレーシングは、水の流れのない静水域に規定された直線コースで着順を競う競技である。レースは 200 m, 500 m 及び 1000 m の 3 種目で実施され、それぞれの運動時間はおおよそ 40, 120 及び 240 秒である。

カヤックパドリングは、上肢・体幹を主に使う運動である。上肢中心の運動であるアームクランキングでは、下肢中心の運動と比較して活動筋量が少ない¹⁾ために筋緊張が高くなりやすく²⁾、そのため血流の制限^{1,3)}及び酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の制限が起こることが指摘されている⁴⁾。これらを考慮するとカヤックパドリングは、活動筋の筋緊張の増加に伴う血流の制限によって有酸素性エネルギー代謝が制限されやすく、特に高強度運動時には無酸素性エネルギー代謝に依存しやすい運動形態であると推察される。

運動中のエネルギー需要量(消費量)及び有酸素性・無酸素性エネルギー代謝量の定量化は、古くから多くの研究で試みられてきた。最大下強度の運動では、その大半を有酸素性エネルギー代謝に依存するため、 $\dot{V}O_2$ の測定によって運動中のエネルギー需要量及び有酸素性エネルギー代謝量の評価が可能となる。一方、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) が得られる強度を超える超最大強度の運動では、有酸素性及び無酸素性エネルギー代謝が共に関与するため、 $\dot{V}O_2$ の測定だけでは無酸素性エネルギー代謝量及び運動全体のエネルギー需要量を評価することはできない。

di Prampero et al.⁵⁾は、ATP-CP 系のエネルギー供給量を筋量から ($37.0 \text{ mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ muscle mass}$)、解糖系のエネルギー供給量を最高血中乳酸濃度から

($3.0 \text{ mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{body mass per mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ increase in blood lactate concentration above the resting level)それぞれ推定し, 無酸素性エネルギー代謝の定量化を試みた。しかし, 血中乳酸濃度と筋中乳酸濃度が一致しないことが指摘され^{6,7)}, 広く普及するには至らなかった。そこでこれに変わる無酸素性エネルギー代謝量の定量化として, 酸素債(Oxygen Deficit: OD)の概念が用いられるようになった。この方法は, 最大下運動中における強度と $\dot{V}\text{O}_2$ の直線関係から, 超最大強度での酸素需要量を推定し, 超最大運動時の酸素需要量と総酸素摂取量(AO, 有酸素性エネルギー代謝量)の差から総酸素債(AOD, 無酸素性エネルギー代謝量)を求める方法⁸⁾である。この方法の欠点として, 超最大強度と最大下強度での機械的効率に差がないという仮定に基づくことなどが指摘されている⁹⁾が, 現在では無酸素性エネルギー代謝量を定量化する最も標準的な方法として広く普及している^{10~16)}。

このようにして, 運動中のエネルギー代謝を理解することは, 競技パフォーマンスの向上を目的とした適切なトレーニングプログラムの作成に必要不可欠である。そのため, 陸上短一中距離種目をはじめ多くの超最大強度の競技種目において, 運動中の無酸素性及び有酸素性代謝量が定量化されている^{10, 13~16)}。しかしその大半は, 走運動に代表されるような下肢中心の運動におけるものであり, カヤックパドリングのような上肢中心の運動で, 種々の運動時間におけるエネルギー代謝量を検討した研究は見当たらない。前述の通り高強度の上肢中心の運動では, 有酸素性エネルギー代謝が制限されやすいと推察されるため, 仮に下肢中心の運動と運動時間が等しくても, 無酸素性エネルギー代謝量の貢献度が高くなる可能性がある。

そこで本研究では, カヤック選手を対象に20–600秒のオールアウトパドリングテストを実施することによって, 1) カヤック競技中の運動強度, 呼吸循環応答及び推定エネルギー需要量に対する AOD の割合を明らかにすること, 2) 各測定値を運動時間が同等である陸上短一中距離競技や競泳競技を対象とした研究結果と比較することによって, カヤックパドリング中の生理応答の特徴を明らかにすることを目的とした。

Ⅱ. 方 法

A. 被検者

被検者は, 大学カヌー部に所属する男子フラットウォータカヤック選手8名であった。被検者の身体プロフィール, 年齢及び競技歴を Table 1 に示した。被検者には事前に文書及び口頭にて実験内容及び危険性を説明し, 書面にて同意を得た。なお, 本研究は筑波大学大学院人間総合科学研究科研究倫理委員会の承認(2007年度363番)を得て実施した。

B. 実験デザイン

実験は2種のテストで構成された。すなわち, 有酸素性能力を測定するための漸増負荷テスト及び運動中のエネルギー需要量に対する AOD と AO の割合を測定するためのオールアウトテストであった。両テストともにカヤックエルゴメータ(I. Bergmann A/S 社製, Dansprint Pro)を用いて測定した。なお, このカヤックエルゴメータは空気抵抗式であり, フラホイールに流入する気体の性質(気温, 湿度)によって牽引の重さが変化する。したがって, 全てのテストの前にキャリブレーションを実施し, 牽引の重さを揃えた(エルゴメータの Drag resistance coefficient を32に設定)。また, 両テストともにストロークレート(SR)は自由とし, 発揮されたパワー(W)及びSRは, 一ストローク毎にコンピュータに取り込んだ。

C. 測定項目及び測定方法

1. 漸増負荷テスト

漸増負荷テストとして1ステージ5分(休息2分)で, 疲労困憊に至るまで負荷を漸増する多段階間欠負荷法を用いた¹⁷⁾。すなわち, 5分間のウォーミ

Table 1. Descriptive characteristics of the subjects.

	Age year	High m	Weight kg	BMI	Career year
A	21	1.80	83.8	25.9	13
B	19	1.72	70.4	23.8	6
C	20	1.77	66.4	21.2	2
D	20	1.73	71.4	23.9	8
E	21	1.68	65.6	23.2	5
F	21	1.68	54.6	19.3	9
G	19	1.76	69.6	22.5	7
H	19	1.70	85.6	29.6	10
Mean	20.0	1.73	70.9	23.7	7.5
SD	0.9	0.04	10.0	3.1	3.3

ングアップに続き、カヤックエルゴメータに座った状態で2分間の安静状態を保持した後、運動を開始した。最初の負荷を20 Wとし、それ以降はステージ毎に20 Wずつ漸増させた。空気抵抗式エルゴメータの発揮パワーは、エルゴメータではなく被検者が調整するため、厳密に発揮パワーを規定することができない。したがって、各ステージにおける5分間の発揮パワーの平均値から、実際の発揮パワーを求めた。運動中の酸素摂取量($\dot{V}O_2$)は自動呼吸ガス分析装置(Mijnhardt社製, Oxycon- α)を用いて1呼吸毎に測定し、15秒毎に平均した。各ステージにおける $\dot{V}O_2$ は、後半2分間(3-5分)の平均値を用いた。心拍数(HR)はHRモニター(Polar社製, S810i)及びディスプレイ(日本光電社製, Vitorode M-150)を用いて1拍毎に測定した。また、各ステージ終了直後にBorgのスケールを用いて主観的運動強度(RPE)を問診するとともに、休息中及びexhaustion直後、3分後及び5分後に指尖から採血し、血中乳酸濃度(La)を血中乳酸分析装置(YSI社製, 1500SPORT)によって測定した。

漸増負荷テスト中に得られた $\dot{V}O_2$ の最高値を $\dot{V}O_{2peak}$ とした。 $\dot{V}O_{2peak}$ の判定は、 $\dot{V}O_2$ のプラトーが出現すること、呼吸交換比が1.1以上であること、exhaustion後のLaの最高値が $10 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上に達していること、RPEが19あるいは20であること及び年齢から推定される最大心拍数(HRmax, $220 - \text{年齢}$)にほぼ達していることの5項目中2項目以上に当てはまることを条件とし¹⁸⁾、15秒平均値の連続する2点(30秒間)の最高値を用いた。

2. オールアウトテスト

20, 40, 120, 240及び600秒間のオールアウトテスト(以下T20, T40, T120, T240及びT600)によって運動中のAODとAOの割合及びパフォーマンスを測定した。すなわち、5分間のウォーミングアップに続き、カヤックエルゴメータに座った状態で2分間の安静状態を保持した後、上記の内、いずれかの時間での全力パドリングをおこなわせた。各テストはランダムに実施し、運動中の発揮パワー、 $\dot{V}O_2$ 及びHRは漸増負荷テスト時と同様な方法で測定したが、発揮パワー及び $\dot{V}O_2$ は10秒毎に平均した。なお、各テストで到達した $\dot{V}O_2$ の最高値($\dot{V}O_{2 \text{ obtained}}$)は、T20及びT40では10秒平均値、

T120, T240及びT600では連続する3点(計30秒)の平均値を用いて評価し、得られた5種の $\dot{V}O_{2 \text{ obtained}}$ の最高値を $\dot{V}O_{2max}$ とした。

AODはMedbø et al.⁸⁾の方法に従い算出した。漸増負荷テストから導出したパワー(X軸)と $\dot{V}O_2$ (Y軸)の関係から、一次回帰直線($r^2 = 0.998 \pm 0.001$)を求め、オールアウトテスト時の発揮パワーから酸素需要量を算出した。このようにして求めた酸素需要量とオールアウトテスト時の酸素摂取量の差から酸素借を求めた。

D. 統計処理

各測定値は、すべて平均値±標準偏差で示した。統計的有意差は、適時t-testを実施、あるいは一元配置の分散分析をおこなった後、Bonferroni法による多重比較を実施することによって検定した。なお、統計的有意水準は5%未満とした。

Ⅲ. 結 果

Table 2に漸増負荷テスト時に測定された $\dot{V}O_2$ の最高値($\dot{V}O_{2peak}$)及びその時の発揮パワー、オールアウトテスト中に測定された $\dot{V}O_2$ の最高値($\dot{V}O_{2max}$)、 $\dot{V}O_{2max}$ 時の発揮パワー及びその時の運動経過時間を示した。 $\dot{V}O_{2peak}$ 及び $\dot{V}O_{2max}$ は、それぞれ $3790 \pm 542 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 及び $3944 \pm 498 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ であり、漸増負荷テストによって測定された $\dot{V}O_2$ の最高値($\dot{V}O_{2peak}$)よりも、オールアウトテストで測定された $\dot{V}O_2$ の最高値($\dot{V}O_{2max}$)の方が、全員で高値を示した。なお、 $\dot{V}O_{2max}$ は被検者B(T240時に測定)を除き、T600時に出現した。また、 $\dot{V}O_{2peak}$ 及び $\dot{V}O_{2max}$ 時の発揮パワーはそれぞれ $154.0 \pm 23.1 \text{ W}$ ($103.6 \pm 6.3\% \dot{V}O_{2max}$)及び $144.1 \pm 24.3 \text{ W}$ ($97.9 \pm 6.9\% \dot{V}O_{2max}$)であり、 $\dot{V}O_{2peak}$ 時の発揮パワーの方が有意に高くなった。これらの結果の典型例として、Figure 1に被検者Aの漸増負荷テスト及びT600時に発揮されたパワー(酸素需要量に変換)及び $\dot{V}O_2$ の変化を示した。この例では、 $\dot{V}O_{2peak}$ は182.3 W時に得られ、 $\dot{V}O_{2max}$ はT600の360-390秒にかけて現れた(163.2 W, Table 2)ことになる。

Figure 2に各オールアウトテスト中に発揮されたパワーから推定した運動強度($\% \dot{V}O_{2max}$)の経時的変化を示した。運動時間が短いテストほど任意の時

Table 2. Aerobic parameter in Incremental test and All-out test.

	Incremental Test				All-out Test				
	$\dot{V}O_{2peak}$		Appearance of $\dot{V}O_{2peak}$		$\dot{V}O_{2max}$		Appearance of $\dot{V}O_{2max}$		
	$ml \cdot min^{-1}$	$ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$	W	% $\dot{V}O_{2max}$	$ml \cdot min^{-1}$	$ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$	W	% $\dot{V}O_{2max}$	sec
A	4848	57.9	182.3	99.5	4870	58.1	163.2	90.2	360
B	3944	56.0	169.2	95.8	4055	57.6	167.7	95.1	200
C	3037	45.7	116.7	108.5	3329	50.1	104.4	99.0	430
D	3910	54.8	163.5	105.9	4210	59.0	151.4	99.3	360
E	3804	58.0	157.7	115.2	3842	58.6	150.2	110.7	370
F	3214	58.9	120.7	98.6	3349	61.3	114.2	94.4	260
G	3810	54.7	160.1	100.1	4107	59.0	167.6	104.0	550
H	3750	43.8	161.8	105.2	3787	44.2	133.6	91.1	370
Mean	3790 *	53.7 *	154.0 *	103.6 *	3944	56.0	144.1	97.9	363
SD	542	5.7	23.1	6.3	498	5.8	24.3	6.9	105

*Significant difference ($P < 0.05$) between tests.

Figure 1. Oxygen uptake and power output for subject A for the incremental test (left) and T600 (right).

間での運動強度も有意に高くなる傾向があった。T20 及び T40 では、運動時間の増加に伴い発揮パワーは低下したが、T120, T240 及び T600 の最終10-20秒間は発揮パワーの維持あるいは増加が起こり、ラストパートが認められた。

T20, T40, T120, T240 及び T600 中の平均パワーは、それぞれ 373.8 ± 66.7 W, 304.8 ± 50.3 W, 217.2 ± 32.5 W, 173.3 ± 23.5 W 及び 146.3 ± 19.5 W であった。それぞれの運動強度は $191.2 - 249.8\%$, $162.2 - 217.7\%$, $126.8 - 151.2\%$, $101.9 - 127.8\%$, $89.7 - 110.6\% \dot{V}O_{2max}$ の範囲にあり、平均値では

それぞれ $224.3 \pm 19.1\%$, $187.0 \pm 19.0\%$, $138.4 \pm 8.4\%$, $114.5 \pm 8.5\%$ 及び $99.5 \pm 6.4\% \dot{V}O_{2max}$ に相当した (Table 3)。

各オーアウトテストにおけるエネルギー需要量(発揮パワーから推定)及び $\dot{V}O_2$ の経時変化を Figure 3 に示した。Figure 3 中の灰色で示した部分、すなわちエネルギー需要量と $\dot{V}O_2$ の差は酸素債(OD)を表している。各テストの時間内に到達した $\dot{V}O_2$ の最高値は、T20, T40, T120, T240 及び T600 でそれぞれ $33.6 \pm 11.0\%$, $74.6 \pm 18.8\%$, $91.4 \pm 4.2\%$, $95.8 \pm 2.5\%$ 及び $99.8 \pm 0.6\% \dot{V}O_{2max}$ obta-

Figure 2. Mean (±SD) for exercise intensity recorded every 10-s during all-out test. Significant difference ($P < 0.05$) between all tests, except for 0-40 sec T240 vs T600; 30-40 sec T40 vs T120; 110-120 sec T120 vs T240.

Table 3. Average power (Power), exercise intensity (% $\dot{V}O_{2max}$), stroke rate (SR), % $\dot{V}O_{2max}$ obtained, %HRmax obtained, accumulated oxygen (AO), accumulated oxygen deficit (AOD) and anaerobic metabolism (%AOD) in the all-out tests.

		T20	T40	T120	T240	T600
Power (W)	Mean	373.8 ± 66.7 <i>abcd</i>	304.8 ± 50.3 <i>efg</i>	217.2 ± 32.5 <i>hi</i>	173.3 ± 23.5 <i>j</i>	146.3 ± 19.5
	Range	261.9 – 460.9	217.6 – 376.9	167.4 – 262.8	138.9 – 209.3	112.4 – 171.9
% $\dot{V}O_{2max}$ (%)	Mean	224.3 ± 19.1 <i>abcd</i>	187.0 ± 19.0 <i>efg</i>	138.4 ± 8.4 <i>hi</i>	114.5 ± 8.5 <i>j</i>	99.5 ± 6.4
	Range	191.2 – 249.8	162.2 – 217.7	126.8 – 151.2	101.9 – 127.8	89.7 – 110.6
SR (strokes/min)	Mean	140.8 ± 15.5 <i>abcd</i>	128.8 ± 13.2 <i>efg</i>	108.1 ± 9.4 <i>hi</i>	98.8 ± 7.6 <i>j</i>	88.6 ± 5.4
	Range	117.1 – 161.3	105.6 – 149.2	86.7 – 117.3	84.5 – 110.7	77.3 – 95.1
% $\dot{V}O_{2max}$ obtained (%)	Mean	33.6 ± 11.0 <i>abcd</i>	74.6 ± 18.8	94.1 ± 4.2	95.8 ± 2.5	99.8 ± 0.6
	Range	14.1 – 46.0	36.6 – 93.3	88.2 – 99.1	92.4 – 100.0	98.2 – 100.0
%HRmax obtained (%)	Mean	89.0 ± 2.9 <i>bcd</i>	91.7 ± 2.5 <i>fg</i>	94.0 ± 3.0 <i>i</i>	95.7 ± 1.7 <i>j</i>	100.0 ± 0.0
	Range	84.0 – 93.0	88.2 – 94.3	89.2 – 98.1	93.3 – 98.8	100.0 – 100.0
AO (ml)	Mean	344 ± 106 <i>abcd</i>	1436 ± 263 <i>efg</i>	6210 ± 647 <i>hi</i>	13389 ± 1515 <i>j</i>	35820 ± 4161
	Range	133 – 466	1110 – 1819	5372 – 7307	11349 – 15843	30974 – 44575
AOD (mlO ₂ eq)	Mean	2604 ± 437 <i>abc</i>	3470 ± 568 <i>e</i>	4682 ± 795	4611 ± 1190	(3294 ± 2305)
	Range	1840 – 3423	2511 – 4329	3549 – 5979	2629 – 5885	(585 – 7563)
%AOD (%)	Mean	88.2 ± 3.8 <i>abcd</i>	70.6 ± 4.2 <i>efg</i>	42.8 ± 3.3 <i>hi</i>	25.5 ± 5.4 <i>j</i>	(8.3 ± 5.5)
	Range	83.4 – 95.2	62.7 – 75.9	37.6 – 47.8	15.9 – 33.3	(1.6 – 17.8)

Significant difference ($P < 0.05$) between tests; ^aT20 vs T40; ^bT20 vs T120; ^cT20 vs T240; ^dT20 vs T600; ^eT40 vs T120; ^fT40 vs T240; ^gT40 vs T600; ^hT120 vs T240; ⁱT120 vs T600; ^jT240 vs T600.

ined に相当し、T600 と比較して T40、T120 及び T240 での % $\dot{V}O_{2max}$ obtained は低くなる傾向 ($p = 0.06 - 0.07$) があった (Table 3)。

OD はいずれのテストにおいても運動経過時間の増加に伴い低下する傾向にあった (Figure 3)。各テストにおける OD の総量、すなわち AOD は T20、T40、T120、T240 及び T600 でそれぞれ 2604 ± 437 mlO₂eq、 3470 ± 568 mlO₂eq、 4682 ± 795 mlO₂eq、 4611 ± 1190 mlO₂eq 及び 3294 ± 2305 mlO₂eq であった。T600 では中間局面 (240–480 sec) において実際の酸素摂取量よりも発揮パワーから推定した酸素需要量が下回る現象 (酸素摂取量から推定した発揮パワーを実際の発揮パワーが下回る、すなわち運動効率の著しい悪化) が多くの者でみられ、ばらつきが

大きくなったため、無酸素性エネルギー代謝量の分析からは除いた (Table 3)。

運動全体のエネルギー需要量に対する無酸素性エネルギー代謝量 (AOD) 及び有酸素性エネルギー代謝量 (AO) の割合を Figure 4 に示した。AOD の割合 (%AOD) は、T20、T40、T120 及び T240 でそれぞれ 83.4–95.2%、62.7–75.9%、37.6–47.8% 及び 15.9–33.3% の範囲にあり、平均値ではそれぞれ $88.2 \pm 3.8\%$ 、 $70.6 \pm 4.2\%$ 、 $42.8 \pm 3.3\%$ 及び $25.5 \pm 5.4\%$ であった (Table 3)。

IV. 考 察

本研究ではカヤック競技中のエネルギー代謝を明らかにするために、200 m (40 秒)、500 m (120 秒) 及

Figure 3. Oxygen deficit (show in grey) and oxygen uptake (show in white) in 10-s time intervals for the T20 (A), T40 (B), T120 (C), T240 (D), and T600 (E). Data are mean values.

Figure 4. Relative energy system contribution for any given duration.

び 1000 m (240 秒) レースをモデルとしたオールアウトテストを実施した。さらに 20 秒及び 600 秒のテストを実施し、運動時間の同等な他競技の研究結果と比較することによってカヤックパドルリング中のエネルギー代謝の特徴を明らかにすることを目的とした。

その結果、カヤック競技の 200 m, 500 m 及び 1000 m レースにおける運動強度は、それぞれ 162.2

–217.7% (187.0%), 126.8–151.2% (138.4%) 及び 101.9–127.8% (114.5%) $\dot{V}O_{2max}$ に相当し (Figure 2 及び Table 3), 推定エネルギー需要量に対する AOD の割合 (%AOD) はそれぞれ 62.7–75.9% (70.6%), 37.6–47.8% (42.8%) 及び 15.9–33.3% (25.5%) を占めると類推された (Figure 3 及び Table 3)。

本研究のオールアウトテスト (T20, T40, T120

及び T240)で規定した時間は、陸上競技では 200 m, 400 m, 800 m 及び 1500 m 走の記録とほぼ一致する。これらの競技選手を対象とした研究において、200 m では71–81%AOD, 400 m では57–58%AOD, 800 m では34–40%AOD 及び 1500 m では16–23%AOD という報告がなされている^{13–16)}。また、競泳選手を対象とした研究では約30秒, 60秒及び120秒で疲労困憊に至る泳運動時の %AOD がそれぞれ69%, 52%及び36%であることが示されている¹⁰⁾。これらの結果と比較して本研究の T20 から T240 の値は 2–12%程度高くなった。さらに、各テストにおける運動強度も Spencer et al.¹³⁾の報告した値(200 m, 400 m, 800 m 及び 1500 m でそれぞれ201%, 151%, 113%及び 103% $\dot{V}O_{2max}$)よりも10–20%程度高値を示した。

このように競技時間の等しい陸上競技や競泳競技と比較して、任意の運動時間における %AOD 及び % $\dot{V}O_{2max}$ が高くなった主要因として、1) 運動形態、特に活動筋群の相違、2) これらの要因を含む被検者集団の体力特性の差の2つが考えられる。カヤックパドリングは上肢中心の運動であり、走運動のような下肢中心の運動とは運動形態が著しく異なる。活動筋群の差に注目したエリートカヤック選手を対象とした研究では、カヤックパドリング時の $\dot{V}O_{2max}$ (4670 ml $\cdot$ min⁻¹; 58 ml $\cdot$ kg⁻¹ $\cdot$ min⁻¹)は走運動時のそれ(5360 ml $\cdot$ min⁻¹; 67 ml $\cdot$ kg⁻¹ $\cdot$ min⁻¹)と比較して有意に低くなる(85–90%)ことが示されている¹⁹⁾。さらに上肢中心の運動では、活動筋量が少ないために筋緊張の増加による血流の制限^{1,3)}及び $\dot{V}O_2$ の制限を招きやすいことが指摘されている⁴⁾。実際に、本研究においてもラストスパートを試みていると思われる T120 及び T240 の最終10秒間の $\dot{V}O_2$ は低下する傾向がみられるとともに、T120 及び T240 の % $\dot{V}O_{2max}$ obtained は運動強度の低い T600 よりも低くなる傾向があった。また、T600(Bのみ T240)中に測定された $\dot{V}O_2$ の最高値($\dot{V}O_{2max}$)よりも、漸増負荷テストで測定された $\dot{V}O_2$ の最高値($\dot{V}O_{2peak}$)の方が有意に低くなり、さらにその時の発揮パワーは漸増負荷テストにおいて有意に高くなった。これらの結果は、1) 最大運動時の収縮期血圧は、サイクリスト及びサッカー選手が自転車エルゴメータで測定した値よりも、カヤック選手がカヤックエルゴメータで測定した値で有意

に高くなる²⁰⁾、2) カヤック選手のトレーニングには長時間の有酸素性トレーニングが多く含まれているにもかかわらず、持久性競技選手に観察される遠心性の心肥大ではなく、筋力・パワー系競技選手にみられる求心性の心肥大が起こる²¹⁾、3) アームクラッキングによる有酸素性トレーニングによって心壁厚が増加する²²⁾、という研究結果と合わせて、間接的ではあるもののカヤックパドリングでは筋緊張の増加に伴う末梢血管抵抗の増加及び $\dot{V}O_2$ の制限が起こりやすいことを立証する。

さらに他の運動形態と比較して著しく遅い運動リズムもこれを助長する一因であると考えられる。一流ランナーの 1500 m 競技中のピッチは 180–228 steps $\cdot$ min⁻¹であるのに対し²³⁾、運動時間のほぼ等しい T240 で測定された SR は 84.5–110.7 strokes $\cdot$ min⁻¹であり、著しい差があった。最も運動時間の短い T20 における SR でさえ 117.1–161.3 strokes $\cdot$ min⁻¹であり、カヤックパドリング時の運動リズムは非常に遅い。アームクラッキングでは漸増負荷テストにおける $\dot{V}O_{2peak}$ が、被検者固有の回転数で測定した条件と比較して、固有の回転数+10%で測定した条件で有意に高くなることが明らかになっている²⁴⁾。したがって、カヤックパドリング特有の遅い運動リズム(SR)も活動筋の緊張及びその時間を高め、結果として末梢血管抵抗の増加及び $\dot{V}O_2$ を制限する一因となると推察される。

このような $\dot{V}O_2$ を制限しやすいというカヤックパドリングの特徴は、体力特性にも影響を及ぼし、カヤック競技中の高い運動強度及び高い %AOD の一因となる。すなわち 1) 有酸素性能力($\dot{V}O_{2max}$)が低いこと($\dot{V}O_{2max}$ が低いと AOD に対して AO を増加することができないため、AOD の割合が高くなる)、2) 無酸素性能力(AOD, 特に AOD の最高値)が高いこと、の両方あるいはどちらか一方が本研究の結果に関与していると考えられる。特に陸上競技の研究では、各種目の専門選手が被検者となっているのに対し、本研究では同一被検者が幅広い運動時間で測定(一般にカヤック選手は 200–1000 m の全てのレースに参加)しているため、これらの差が測定値に与える影響は大きい。したがって、今回の $\dot{V}O_{2max}$ 及び AOD の測定値がカヤック選手として標準的な水準にあるのかを検討するとともに、これらの値を先行研究の被検者と比較する必要

がある。

我々が以前に報告した²⁵⁾カヤック選手のこれらの測定値は, それぞれ $3770 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 及び $3550 \text{ mlO}_{2\text{eq}}$ (2 分間値) であり, $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ は同等の水準にあるものの AOD に著しい差が見られた。本研究に参加した被検者は, ナショナルチームに所属する選手や, ジュニア期にナショナルチームに所属経験のある選手を多く含んでいる。さらに, 彼らの所属する大学カヌー部は, 2007年度の全日本学生選手権において男子カヤック部門第2位の成績を収めている。また, 本研究での T120 のパワー (217.2 W , $3.07 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$) は, 先行研究 (200.8 W , $2.85 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$) よりも高かった。したがって, 先行研究との AOD の差は, 本研究に参加した被検者の競技レベルが平均的に高いことに起因すると思われる。これらのことから, 今回の被検者はカヤック選手として高いトレーニングレベルにあるといえるが, カヤック選手として極端な $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ や AOD の特性を有する集団ではないと判断できる。また, 前述した陸上競技 200 m 及び 400 m 選手の $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ は, $4045 - 4256 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($56 - 60 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) であり, 各距離における AOD は 200 m では $2020 - 2280 \text{ mlO}_{2\text{eq}}$ ($28 - 30 \text{ mlO}_{2\text{eq}} \cdot \text{kg}^{-1}$), 400 m では $3034 - 3278 \text{ mlO}_{2\text{eq}}$ ($41 - 48 \text{ mlO}_{2\text{eq}} \cdot \text{kg}^{-1}$) であった^{13, 15, 16)}。同様に, 800 m 及び 1500 m 選手の $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 及び AOD を評価すると, それぞれ約 $4200 - 4700 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($62 - 72 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 及び約 $3100 - 4900 \text{ mlO}_{2\text{eq}}$ ($49 - 71 \text{ mlO}_{2\text{eq}} \cdot \text{kg}^{-1}$) であり, 水泳選手では約 $3800 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($55 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 及び約 $3700 \text{ mlO}_{2\text{eq}}$ ($54 \text{ mlO}_{2\text{eq}} \cdot \text{kg}^{-1}$) であった¹⁰⁾。このように本研究のカヤック選手は, 水泳選手とは同等な $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ を有するが AOD はそれより高く, 陸上選手と比較すると $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ は低く, AOD は同等かそれ以上の高い水準にあった。特に 200 m から 1000 m までオールラウンドにこなすカヤック選手の AOD が, 陸上短距離専門の選手と同等であったことは, カヤック選手の無酸素性能力が非常に高いレベルにあることを意味する。

一方, 陸上選手と比較して $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の水準が低いという体力特性は, 1) 活動筋量が少ない, 2) 運動強度が高くなると $\dot{V}\text{O}_2$ の制限が起こるという上肢中心の運動形態にみられる特徴を反映するものであり, さらにカヤックパドルリング特有の遅い運

動リズムもこれを助長すると考えられる。したがって, 他競技と比較して高い運動強度及び %AOD は, 高い AOD に対して AO を増加できないことに起因するものであるといえる。

V. ま と め

カヤック競技 200 m, 500 m 及び 1000 m レースにおける運動強度は, それぞれ $162.2 - 217.7\%$ (187.0%), $126.8 - 151.2\%$ (138.4%) 及び $101.9 - 127.8\%$ (114.5%) $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ に相当し, 推定エネルギー需要量に対する AOD の割合 (%AOD) はそれぞれ $62.7 - 75.9\%$ (70.6%), $37.6 - 47.8\%$ (42.8%) 及び $15.9 - 33.3\%$ (25.5%) を占めると類推された。これらは, 運動時間のほぼ等しい陸上競技種目や競泳競技種目を対象とした研究の値よりも高く, 無酸素性エネルギーの貢献率が高いことが明らかとなった。カヤックパドルリングの 1) 上肢中心の運動である, 2) 運動リズムが遅いという運動特性は, いずれも $\dot{V}\text{O}_2$ を制限するものであり, カヤック選手の無酸素性能力は他競技と比較して高い水準にあったものの, 有酸素性能力は劣っていた。したがって, 他競技と比較して高い運動強度及び %AOD は, 高い AOD に対して AO を増加できないことに起因すると推察された。ただし, 本研究の被検者数は 8 名と少なく, カヤックパドルリングの特性を十分に反映していない可能性もあり, 今後検討する余地がある。

(受理日 平成20年1月21日)

引用文献

- 1) Sawka, M. N., Miles, D. S., Petrofsky, J. S., Glaser, R. M. Arterial carbon dioxide estimates during upper body exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.*, (1982) **48**, 415-422.
- 2) Sawka, M. N., Foley, M. E., Pimental, N. A., Toner, M. M., Pandolf, K. B. Determination of maximal aerobic power during upper-body exercise. *J Appl Physiol.*, (1983) **54**, 113-117.
- 3) Simmons, R., Shephard, R. J. Effects of physical conditioning upon the central and peripheral circulatory responses to arm work. *Int Z Angew Physiol.* (1971) **30**, 73-84.
- 4) Weissland, T., Marais, G., Robin, H., Vanvelcenaher, J., Pelayo, P. Relationship in humans between spontaneously chosen crank rate and power output during upper body exercise at different levels of intensity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.*, (1999) **79**, 230-

- 236.
- 5) di Prampero, P. E. Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol.*(1981) **89**, 143-222.
- 6) Green, S., Dawson, B. Measurement of anaerobic capacities in humans. Definitions, limitations and unsolved problems. *Sports Med.*(1993) **15**, 312-327.
- 7) Gastin, P. B. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med.* (2001) **31**, 725-741.
- 8) Medbø, J. I., A. C. Mohn, I. Tabata, R. Bahr, O. Vaage, O. M. Sejersted Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J. Appl. Physiol.*, (1988) **64**, 50-60.
- 9) Bangsbo, J. Oxygen deficit: a measure of the anaerobic energy production during intense exercise? *Can J Appl Physiol.*(1996) **21**, 350-363.
- 10) 平井雄介, 小笠原悦子, 田畑 泉, 超最大強度の水泳運動における無酸素性及び有酸素性エネルギー供給機構の貢献度, *Jpn. J. Sports. Sci.*, (1993), **12**, 124-129 .
- 11) Olesen, H. L., Raabo, E., Bangsbo, J., Secher, N. H. Maximal oxygen deficit of sprint and middle distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.*(1994) **69**, 140-146.
- 12) Craig, N. P., Norton, K. I., Conyers, R. A., Woolford, S. M., Bourdon, P. C., Stanef, T., Walsh, C. B. Influence of test duration and event specificity on maximal accumulated oxygen deficit of high performance track cyclists. *Int J Sports Med.*(1995) **16**, 534-540.
- 13) Spencer, M. R., Gastin, P. B. Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc.*,(2001) **33**, 157-162.
- 14) Duffield, R., Dawson, B., Goodman, C. Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events. *J Sci Med Sport.*,(2004) **7**, 302-313.
- 15) Duffield, R., Dawson, B., Goodman, C. Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running. *J Sports Sci.*,(2005a) **23**, 299-307.
- 16) Duffield, R., Dawson, B., Goodman, C. Energy system contribution to 1500- and 3000-metre track running. *J Sports Sci.*,(2005b) **23**, 993-1002.
- 17) Bishop, D. Physiological predictors of flat-water kayak performance in women. *Eur J Appl Physiol.* (2000) **82**, 91-97.
- 18) 山地啓司, 最大酸素摂取量の科学, 改訂第2版, 杏林書院: 東京, (2001), 74-86 .
- 19) Tesch, P. A. Physiological characteristics of elite kayak paddlers. *Can J Appl Sport Sci.*,(1983) **8**, 87-91.
- 20) Iglesias Cubero, G., Batalla, A., Rodriguez Reguero, J. J., Barriales, R., González, V., de la Iglesia, J. L., Terrados, N. Left ventricular mass index and sports: the influence of different sports activities and arterial blood pressure. *Int J Cardiol.*,(2000) **75**, 261-265.
- 21) Gates, P. E., Campbell, I. G., George, K. P. Concentric left ventricular morphology in aerobically trained kayak canoeists. *J Sports Sci.*,(2004) **22**, 859-865.
- 22) Gates, P. E., George, K. P., Campbell, I. G. Concentric adaptation of the left ventricle in response to controlled upper body exercise training. *J Appl Physiol.*, (2003) **94**, 549-554.
- 23) 松尾彰文, '91世界陸上における中長距離決勝レースのスピード, ピッチおよびストライドについて, *J. J. Sports Sci.*(1992), **11**, 636-642 .
- 24) Weissland, T., Pelayo, P., Vanvelcenaher, J., Marais, G., Lavoie, J. M., Robin, H. Physiological effects of variations in spontaneously chosen crank rate during incremental upper-body exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.*,(1997) **76**, 428-433.
- 25) 中垣浩平, 吉岡利貢, 梅村義久, 鍋倉賢治, 我が国のフラットウォーターカヤック選手の体力特性 . *トレーニング科学*, (2006), **18**, 229-239.