

短時間高強度運動における運動強度とエネルギー供給比率との関係： 個人内変動に着目して

白木 駿佑¹⁾ 尾縣 貢²⁾ 木越 清信²⁾

Shunsuke Shiraki¹, Mitsugi Ogata² and Kiyonobu Kigoshi²: The relationship between exercise intensity and energy contribution in short-duration intensive exercise. *Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.*

Abstract: This study investigated the relationship between exercise intensity and energy contribution in short-duration intensive exercise. Two competitive university sprinters performed 30-s pedaling tests at 4 high intensity levels, following a submaximal test to determine the energy contribution during the 30-s pedaling tests by using the linear regression between exercise power and O₂ demand. The energy contribution in each subject was almost constant during the 30-s pedaling tests at the 4 high intensity levels. Furthermore, O₂ uptake and peak blood lactate concentration increased with increasing O₂ demand in each subject. These results suggest that the energy contribution during short-duration intensive exercise at different high intensity levels is almost constant and that aerobic and anaerobic energy increase with increasing exercise intensity in each individual.

Key words : pedaling, aerobic energy, anaerobic energy, blood lactate

キーワード : 自転車運動, 有酸素性エネルギー供給, 無酸素性エネルギー供給, 血中乳酸濃度

1 緒 言

短時間高強度運動のエネルギー供給比率(酸素摂取量と酸素借の割合)に関する研究はこれまで数多く行われている。Medbø and Tabata(1989)は、30秒、1分、2—3分で疲労困憊に至る高強度自転車運動中の代謝応答について検討している。そして、有酸素性エネルギー供給比はそれぞれ30±1%、47±2%、65±2%であったことを報告している。さらにエネルギー供給比率は、運動時間に応じて対数関数的に変化することを報告している。このことは、水泳運動(Ogita et al., 2003)や走運動(Duffield and Dawson, 2003)においても認められている。したがって、エネルギー供給比率は運動時間に強く依存することが分かる。

一方で、エネルギー供給比率と運動強度との関

係を調査した研究は、ほとんど行われていない。Ogita et al. (1999)は、水泳運動において異なる強度(30秒、1分、2—3分、4—5分で疲労困憊に至る強度)で運動させた時の運動開始から30秒間の有酸素性・無酸素性エネルギー供給比率は、強度間において有意差が認められなかったことを報告している。すなわち、短時間運動では強度によらずエネルギー供給比率は一定であることを示唆している。しかしながら、このとき用いられた運動強度では、運動開始30秒間における相対的な強度が個々によって異なると考えられ、強度間のエネルギー供給比率を適切に比較できていない可能性がある。また、平均値では個々で異なる個人内変動を正確に捉えることができないため、個人ごとに検討する必要がある。さらに、運動様式によって結果が異なることも考えられる。したがって、運動強度とエネルギー供給比率との関係に

1) 筑波大学大学院人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

2) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
連絡先 白木駿佑

1. *University of Tsukuba, Graduate school of Comprehensive Human Sciences*

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

2. *University of Tsukuba, Faculty of Health and Sport Sciences*
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

Corresponding author shunsuke_run@yahoo.co.jp

については更なる検討の余地があり、個人内変動に着目することでより詳細な強度間の比較ができるものと考えられる。

そこで、本研究の目的は、短時間高強度運動を対象として異なる運動強度におけるエネルギー供給比率を明らかにすることとし、個人内変動について被験者2名により得られた結果を取り急ぎ報告する。

II 方法

1. 被験者

被験者は、大学陸上競技部に所属し、短距離走を専門とする男性2名とした。身体特性および事前に測定した30秒Wingate-Test (WinT)の結果をTable 1に示した。なお、WinTの値は体重で規格化した。実験を行うにあたり、被験者には本研究の目的、運動に伴う苦痛、不快感および危険性などを詳細に説明し、いかなる時でも実験の中断ができるという条件の下で参加の同意を得た。なお、本研究は筆者が所属する組織の倫理委員会の承認を得て実施した。

2. 実験手順

短時間運動として30秒ペダリングテストをそれぞれの被験者に対し4種類の強度で行わせた。運動中のエネルギー供給比率を算出するために、先立って間欠的漸増負荷テストを行わせ、発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式を被験者ごとに作成した。間欠的漸増負荷テストの後、20分程度の十分な休息後行わせ、30秒ペダリングテストを1度の実験で2種類実施した。30秒ペダリン

グテストの強度を変えて、このプロトコルを2日行った。なお、30秒ペダリングテストの間には、20–30分程度の十分な休息を挟み、運動開始10分前にはペダリングの練習を5秒程度の運動時間で行わせた。また、前運動による代謝の影響を最小限にするため、30秒ペダリングテストについては一度の実験内で低い強度を優先的に行った。なお、運動前には安静時の酸素摂取量を測定し、試技間に差がないことを確認してから運動を実施した。

全ての測定は、3日以内に行われ、それぞれの測定に疲労の影響がないよう行われた。また、代謝の日内変動を考慮して、毎回同じ時間に実験室に来室し、測定を行った。なお、実験当日は、激しい運動を控え、実験室来室2時間までに飲食を終えるよう事前に指示した。

3. 測定項目および測定方法

(1) 30秒ペダリングテスト

超最大強度の30秒ペダリング運動を自転車エルゴメータ (PowermaxVII, コンビウエルネス社)を用いて、4種類の強度で行わせた。各強度は、事前に測定したWinTの平均パワーを基準に50–100%の範囲になるように負荷を設定した。なお、様々な強度の運動を実施するために、個人ごとに異なる負荷設定を行った。各試技では、負荷 (kp) および目標回転数を設定し、被験者には運動開始直後、目標回転数まですぐさま上昇させ、その回転数を維持するよう指示した。その目標回転数は、負荷に応じて漸増するよう設定した。一般的には負荷によらず定めた回転数を用いるが、内的仕事量を等しくする反面、低回転数・高負荷のペダリング運動はぎこちない動作になり発揮できるパワーが低下する。実際に、回転数90rpmの場合と回転数を負荷に応じて漸増した場合のペダリング運動を行わせたところ、後者でより高いパワー発揮ができることを確認した。この要因として、回転数が一定の場合、高強度の試技で負荷が極端に高くなってしまいペダリング運動がスムーズに行われなくなってしまうことが挙げられる。すなわち、高負荷でペダリングするためには上半身を使

Table 1 Physical Characteristics and results of Wingate-Test (WinT) in each subject

Subject	A	B
Age (yrs)	24	23
Height (cm)	171.0	174.9
Weight (kg)	67.4	63.8
Body fat (%)	10.5	8.7
WinT Peak power (W/kg)	13.6	14.7
WinT Mean power (W/kg)	10.8	10.9

って踏み込むようにする必要があるため、ペダリング動作が断続的になってしまう。また、高負荷に対する低い回転数は、筋張力が高まると報告されており (Löllgen et al., 1980), 筋内圧の増加により無酸素性代謝およびそれに伴う筋疲労が促進される (高石, 2004) こともその要因であると考えられる。また、このことは低回転数・高負荷の試技が筋張力および筋内圧を高め、エネルギー代謝応答に影響を与えることも示唆している。以上のことから回転数は負荷に応じて漸増させることが有効であると考えられる。回転数を漸増させることに伴う内的仕事量の増加に関しては、強度が高くなると回転数による酸素摂取量への影響は小さくなるため (Löllgen et al., 1980), 内的仕事量の増加は酸素摂取量に大きな影響を与えないと考えられる。したがって、本研究では、負荷と回転数との関係および回転数と内的仕事量との関係が直線関係にあることを前提とし、式 (1) と式 (2) を用いて、ペダリングテストでの負荷および目標回転数を決定した。なお、式 (1) と式 (2) は、Coast and Welch (1985) の報告している値を用いて作成した発揮パワーと回転数の直線回帰式である。

$$\text{Pedal frequency (rpm)} = 0.14 \times \text{power (W)} + 37 \quad (\text{式 } 1)$$

$$\text{Load (kp)} = (\text{Power (W)}) / (\text{Pedal frequency (rpm)} \times 0.98) \quad (\text{式 } 2)$$

運動中の発揮パワーは 30 秒間の平均値を算出し、体重で規格化した。また、呼気ガス指標は、自動呼気ガス分析器 (AE310SRC, ミナト医科学社) を用いて、呼気ガス採集法により分析した。酸素摂取量は 5 秒毎に値を平均して算出した。安静時酸素摂取量は運動前 1 分間の平均値とした。運動中の酸素借は、最大下テストで得られた個々の発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式を用いて、ペダリングテストの発揮パワーから外挿法によって酸素需要量を算出し、酸素需要量に運動中の酸素摂取量を減じて算出した。そして、酸素需要量に対する酸素摂取量を有酸素性エネルギー供給比 (%Aero), 酸素需要量に対する酸素借を無

酸素性エネルギー供給比 (%Anaero) として算出した。また、無酸素性代謝の指標として血中乳酸濃度の測定を行った。運動の前後に簡易型血中乳酸測定器 (Lactate-Pro, アークレイ社) を用いて、指尖から採血し測定を行った。運動後の血中乳酸濃度は、3 分、5 分、7 分後に測定し、そのうち最も高い値を最高血中乳酸濃度 (PBLa) とした。なお、5 分後の測定の際に血中乳酸濃度が 3 分後と比較して明らかな減少傾向にあった場合、7 分後の測定は行わなかった。

(2) 間欠的漸増負荷テスト (最大下テスト)

最大下テストは自転車エルゴメータ (Powermax VII, コンビウエルネス社) を用いて行われ、最大下強度で 4 分間の運動を 2 分間の休息を挟み 4 ステージ行った。強度や時間は先行研究を参考にした (Finn et al., 2000)。なお、自転車エルゴメータ運動では、負荷に対して酸素摂取量が最も小さくなる至適なペダル回転数 (以下「至適回転数」と略す) が存在すると知られている (Böning et al., 1984; Coast and Welch, 1985)。このことは、適さない回転数で最大下テストを行った場合、超最大運動での酸素需要量が過大または過小評価されてしまう可能性が考えられる。しかしその至適回転数は、被験者のペダリング技術によって個人差が生じること、また、必ずしも負荷に対して直線的に増加しないことが先行研究により報告されており (Böning et al., 1984), 至適回転数は明確に定めることが出来ないと考えられる。しかし先行研究 (Böning et al., 1984; Coast and Welch, 1985) の結果から、至適回転数に近い回転数を用いることは、至適回転数における酸素摂取量と比較して大きな差異を生じさせないと推察できる。したがって、至適回転数は明確に定めることが出来ないものの、それに近い回転数を用いることが必要であると考えられる。そのため、30 秒ペダリングテストと同様に式 (1) と式 (2) を用いて負荷および目標回転数を算出した。同じ式を用いることは、30 秒ペダリングテストと最大下テストとの強度間においても負荷と回転数との関係および回転数と内的仕事量との関係が直線関係にあること

を想定している。そこで、最大下テストの設定負荷および目標回転数は、2.1 kp—52 rpm, 2.4 kp—55 rpm, 2.6 kp—57 rpm, 2.8 kp—59 rpm の4ステージとした。

運動中の呼気ガス指標には、30秒ペダリングテストと同様の方法を用いて分析した。なお、各ステージでの酸素需要量は、4分間のうち後半の2分間の酸素摂取量を平均することで算出した。

4. 統計処理

測定項目の一部は、平均値±標準偏差で示した。

III 結果

30秒ペダリングテストの結果をTable 2に示し

た。相対強度は、事前に測定したWinTの平均パワーを基準とする相対値とし、Subject AおよびSubject Bはそれぞれ70.4—92.8%, 53.1—98.6%であった。

Figure 1には、30秒ペダリングテスト各試技における相対強度に対するエネルギー供給比率を被験者ごとに示した。Subject Aは、強度がより高い3試技において有酸素性エネルギー供給比は一定を示した(23%)。Subject Bは、Subject Aと比較して相対強度の範囲が大きく、有酸素性エネルギー供給比は強度によってばらつきがみられた(23%—27%)ものの、高強度ではSubject Aと同様にほぼ一定の値を示した。

Figure 2には、30秒ペダリングテストにおける酸素需要量と各測定項目との関係を示した(Figure 2-I: 酸素需要量と酸素摂取量との関係;

Table 2 The result of 30s pedaling tests in several loads in each subject

	Subject A				Subject B			
	5.0	5.1	5.3	5.5	4.2	4.9	5.0	5.4
	Load (kp)							
Mean pedal cadence (rpm)	105	116	119	126	89	107	109	129
Power (W)	514	578	620	678	368	513	533	684
Power (W/kg)	7.6	8.6	9.2	10.1	5.8	8.0	8.4	10.7
Relative intensity (%)	70.4	79.1	84.9	92.8	53.1	74	76.9	98.6
Peak blood lactate (mM)	8.0	10.4	13.0	15.8	4.0	6.6	9.0	15.6
O ₂ demand (ml/kg/min)	89.3	99.6	106.3	115.6	70.9	96.4	99.9	126.4
O ₂ uptake (ml/kg/min)	19.1	23.2	24.8	26.1	19.1	23.2	24.6	29.7
O ₂ deficit (ml/kg/min)	70.3	76.4	81.5	89.5	51.8	73.2	75.3	96.7
Aerobic contribution (%)	21.3	23.3	23.3	22.6	26.9	24	24.6	23.5
Anaerobic contribution (%)	78.7	76.7	76.7	77.4	73.1	76	75.4	76.5

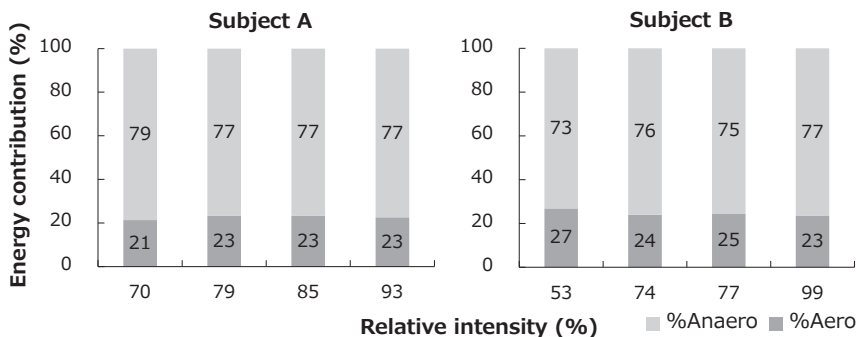


Figure 1 Comparison of energy contribution at several relative intensities in 30s pedaling tests in each subject

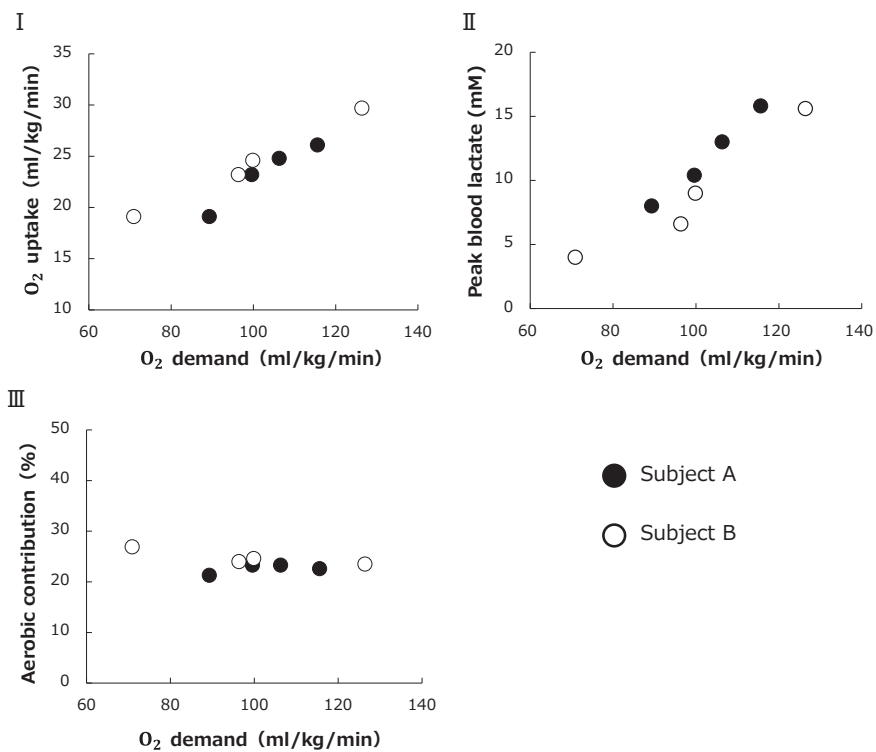


Figure 2 Relationships between O₂ demand and some parameters
 I : O₂ demand and O₂ uptake, II : O₂ demand and peak blood lactate,
 III : O₂ demand and aerobic contribution

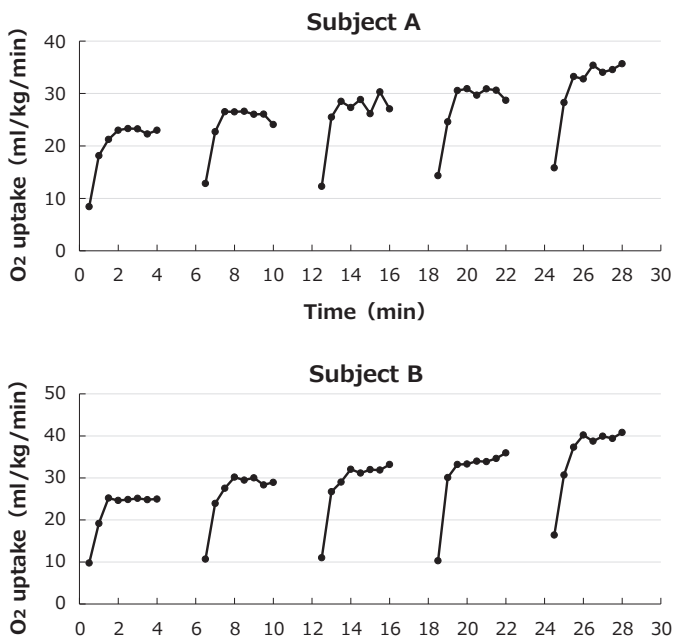


Figure 3 Results of oxygen uptake kinetics during excises in the submaximal test

Figure 2-II：酸素需要量と最高血中乳酸濃度との関係；Figure 2-III：酸素需要量と有酸素性エネルギー供給比との関係）。それぞれの関係を被験者ごとに検討した場合、酸素需要量と酸素摂取量との間には、2名の被験者とも酸素需要量が高まれば、酸素摂取量も高まるという共変関係がみられた（Figure 2-I）。また、酸素需要量と最高血中乳酸濃度との間には、2名の被験者とも酸素需要量が高まれば、最高血中乳酸濃度が高まるという共変関係がみられた（Figure 2-II）。一方、酸素需要量と有酸素性エネルギー供給比との間には、2名の被験者とも共変関係はみられなかった（Figure 2-III）。

Figure 3 に最大下テストにおける運動中の酸素摂取動態を被験者ごとに示した。なお、値は30秒平均の値を算出した。また、発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式における決定係数は0.9965（Subject A）および0.9983（Subject B）であった。

IV 考 察

本研究の目的は、短時間高強度運動における運動強度とエネルギー供給比率との関係を個人内変動に着目し検討することであった。本研究の結果から、相対強度に対するエネルギー供給比率は、Subject A においてほぼ一定であり（Figure 1-Subject A）、Subject B においても強度の増加に伴って、有酸素性エネルギー供給比は小さくなる傾向がみられるものの強度の高い3つの試技では、ほぼ一定であった（Figure 1-Subject B）。Ogita et al. (1999) は、異なる運動強度で運動させた時の運動開始から30秒間の有酸素性・無酸素性エネルギー供給比率は、強度間において有意差が認められなかったことを報告している。このことは、運動強度が異なってもエネルギー供給比率が変わらないことを示唆しており、本研究では、相対強度を用いて個人内変動について詳細に検討した。その結果、Ogita et al. (1999) の報告をおおむね支持するものとなった。運動強度が増加しているにもかかわらず、エネルギー供給比率がほぼ一定である背景には、運動強度と酸素摂

取量との間に共変関係がみられることが挙げられる。すなわち本研究の結果から酸素需要量が高まれば、有酸素性エネルギー供給量も大きくなる共変関係が2名の被験者でみられた（Figure 2-I）。加えて、無酸素性エネルギー供給量の指標と考えられている最高血中乳酸濃度と酸素需要量との間にも2名の被験者で共変関係がみられた（Figure 2-II）。このことは、運動強度が大きい運動ほど、無酸素性エネルギー供給量も大きくなることを示唆している。これらの結果に加えて、酸素需要量と有酸素性エネルギー供給比との間には2名の被験者とも共変関係がみられなかった（Figure 2-III）。以上のことから、短時間高強度運動においてエネルギー供給比率はほぼ一定の値を示すこと、また、有酸素性および無酸素性エネルギー供給量は運動強度に応じて増加することが示唆された。

運動強度が高まれば、酸素摂取量は大きくなるという共変関係（Figure 2-I）は、全力強度以下の運動においてより高い酸素摂取量を獲得する能力があるにもかかわらず、運動強度にあわせて酸素摂取量が調節されている可能性や酸素摂取量が無酸素性代謝や筋活動量などに連関している可能性を示唆している。実際に、スタート時の強度が高い場合より多くの速筋繊維が動員されるため、酸化的リン酸化に重要なリンゴ酸アスパラギン酸シャトルに加え、グリセロリン酸シャトルの貢献も高まり、酸素消費が高まることが報告されている（Wasserman et al., 1995）。活動筋の酸素消費が高まることは酸素摂取応答を高めることから、運動開始時にどの程度筋が動員されるかによって酸素摂取量が変化すると考えられる。このことはあくまで推測に留まるため、運動強度に酸素摂取量が対応している現象について更なる研究が求められる。

運動強度が高まれば、最高血中乳酸濃度は大きくなるという共変関係（Figure 2-II）について、血中乳酸濃度は、無酸素性エネルギー供給機構である解糖系の亢進によって高まることが知られており、血中乳酸濃度は、間接的ではあるものの無酸素性エネルギー供給量を反映していると考えら

れている。一方で、血中乳酸濃度は、乳酸の生成と除去のバランスを示しているとも考えられており（八田，2015；Hill and Vingren, 2011），乳酸の作られる量，使われる量は選手の生理的特性によって異なる（森丘，2008）ことから，個人間で単純に値を比較することは難しい。実際に，Medbø and Toska（2001）は，2分で疲労困憊に至る運動とそれと同負荷での1分間の運動における筋中乳酸濃度と血中乳酸濃度などを測定し，血中乳酸濃度は無酸素性エネルギー供給量を適切に評価していないと結論づけている。一方，本研究で個人内変動に着目したところ2名の被験者とも酸素需要量と血中乳酸濃度との間に共変関係がみられた（Figure 2-II）。このことは，血中乳酸濃度は同一個人内において無酸素性エネルギー供給量を反映していることを示唆している。したがって，短時間運動における個人内変動という限局された場合において血中乳酸濃度は無酸素性エネルギー供給量を評価している可能性がある。

本研究における測定方法に関して，エネルギー供給比率は，酸素摂取量と酸素借の比率により算出した（酸素借法）。また，酸素借は，最大下テストで得られた個々の発揮パワーと酸素需要量の直線回帰式を用いて，ペダリングテストの発揮パワーから外挿法によって酸素需要量を算出し，酸素需要量に運動中の酸素摂取量を減じて算出した。しかし，酸素借法は，多くの研究者によって問題点が指摘されている（Bangsbo, 1998; Li et al., 2015）。一方で，自転車運動に関しては，酸素借法の有効性を示唆している研究も存在する（Hill and Vingren, 2011; Medbø and Tabata, 1993）。問題点はあるものの，酸素借を用いてエネルギー供給比率を算出している研究は数多くなされており，無酸素性エネルギー供給量を推定する手法として現在最も一般的に用いられているため，本研究でもこの手法を用いた。また，本研究で用いた最大下テストは，ステージ数を4段階とし，各運動時間は4分とした。両被験者ともに各ステージでの酸素摂取量は2分の時点で定常状態に近い値を示した（Figure 3）。また，Subject Aは，各ステージの後半2分間における30秒平均の値に多少の変

動が見られたため，後半2分間の平均値を酸素需要量とみなすことは妥当であったと考えられる。しかしながら，より精度の高い直線回帰式を作成するためには最大下テストのステージ数を増やす必要があると考えられるが，本研究では被験者の負担を考慮し4段階とした。

本研究の結果から個人内変動に着目したところ短時間高強度運動において，異なる運動強度であってもエネルギー供給比率はほぼ一定であることが示唆された。また，酸素需要量と酸素摂取量および最高血中乳酸濃度との間には共変関係がみられ，運動強度の増加に応じて有酸素性および無酸素性エネルギー供給量は増加することが示唆された。一方で，本研究の問題点として発揮パワーと酸素需要量との直線回帰式の精度や被験者数の少なさが挙げられる。そのため，運動強度とエネルギー供給比率との関係について更なる研究が求められる。

文 献

- Bangsbo, J. (1998) Quantification of anaerobic energy production during intense exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 30: 47-52.
- Böning, D., Gönen, Y., and Maassen, N. (1984) Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *Int. J. Sports Med.*, 5: 92-97.
- Coast, J. R. and Welch, H. G. (1985) Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 53: 339-342.
- Duffield, R. and Dawson, B. (2003) Energy system contribution in track running. *New Studies in Athletics*, 18(4): 47-56.
- Finn, J., Gastin, P., Withers, R., and Green, S. (2000) The estimation of peak power and anaerobic capacity of athletes. In: Gore, C. J. (ed.) *Physiological tests for elite athletes*. Human kinetics, pp.37-49.
- 八田秀雄 (2015) 新版 乳酸を活かしたスポーツトレーニング. 講談社, pp.41.
- Hill, D. W. and Vingren, J. L. (2011) Maximal accumulated oxygen deficit in running and cycling. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 36: 831-838.
- Li, Y., Niessen, M., Chen, X., and Hartmann, U. (2015) Overestimate of relative aerobic contribution with maximal accumulated oxygen deficit: a review. *J. Sports. Med. Phys. Fitness*, 55: 377-382.

- Löllgen, H., Graham, T., and Sjogaard, G. (1980) Muscle metabolites, force, and perceived exertion bicycling at varying pedal rates. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 12: 345-351.
- Medbø, J. I. and Tabata, I. (1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.*, 67: 1881-1886.
- Medbø, J. I. and Tabata, I. (1993) Anaerobic energy release in working muscle during 30s to 3 min of exhaustive bicycling. *J. Appl. Physiol.*, 75: 1654-1660.
- Medbø, J. I. and Toska, K. (2003) Lactate release, concentration in blood, and apparent distribution volume after intense bicycling. *Jpn. J. Physiol.* 51: 303-312.
- 森丘保典 (2008) 血中乳酸濃度をどう活かすか—陸上競技 2—。八田秀雄編著, 乳酸をどう活かすか。杏林書院, pp.79-92.
- Ogita, F., Onodera, T., Tamaki, H., Toussaint, H., Hollander, P., and Wakayoshi, K. (2003) Metabolic profile during exhaustive arm stroke, leg kick and whole body swimming lasting 15 s to 10 min. *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, 361-366.
- Ogita, F., Onodera, T., Tanaka, T., and Tabata, I. (1999) The relative contribution of aerobic and anaerobic energy release in the first minute of supramaximal swimming. *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, 5: 133.
- 高石鉄雄 (2004) 最適なベダリング速度。バイオメカニクス研究, 8: 42-51.
- Wasserman, K., Stringer, W. W., and Casaburi, R. (1995) Is the slow component of exercise O_2 a respiratory adaptation to anaerobiosis? *Adv. Exp. Med. Biol.*, 393: 187-194.

(2016年11月14日受付)
(2018年1月19日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2018/3/2