過剰 CO₂ 排出量と短時間高強度運動パフォーマンスとの関係： 過剰 CO₂ 排出量の測定方法の相違に着目して

前村 公彦¹⁾ 鈴木 康弘²⁾ 高松 薫³⁾

Relationship between excess CO₂ output and short-duration intensive exercise performance: with different measuring method of excess CO₂ output

Hirohiko Maemura¹, Yasuhiro Suzuki² and Kaoru Takamatsu³

Abstract

The purpose of this study was to investigate the relationship between excess CO₂ output and short-duration intensive exercise performance with different methods for measuring excess CO₂ output. Ten university competitive sprinters performed incremental exercise (I.Ex.) and short-duration (10-s, 20-s, 30-s, and 40-s) intensive exercise (S.I.Ex.) on a cycle ergometer. In I.Ex., excess CO₂ output (CO₂ excess@I.Ex.) was calculated by subtracting the predicted $\dot{V}CO_2$ from the measured $\dot{V}CO_2$ after the ventilatory threshold. In S.I.Ex., excess CO₂ output (CO₂ excess@S.I.Ex.) was calculated by subtracting $\dot{V}O_2$ from $\dot{V}CO_2$ during and after exercise. Mean power was measured as an index of S.I.Ex. performance. CO₂ excess@I.Ex. was not significantly correlated with mean power. However, CO₂ excess@S.I.Ex. was significantly correlated with mean power in 20-s, 30-s and 40-s maximal cycle pedaling (20-s $r=0.652$, $P<0.05$; 30-s $r=0.708$, $P<0.05$; 40-s $r=0.759$, $P<0.01$). These results suggest that excess CO₂ output (CO₂ excess@S.I.Ex.) during and after short-duration intensive exercise could be an important factor in determining short-duration intensive exercise performance.

Key words : lactic acid, buffering capacity, bicarbonate buffering system, pedaling exercise

(Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 50: 27-35, January, 2005)

-
- 1) 筑波大学体育科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
2) 国立スポーツ科学センター
〒115-0056 東京都北区西が丘 3-15-1
3) 筑波大学体育科学系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
連絡先 前村公彦

1. *Doctoral Program in Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. *Japan Institute of Sports Sciences*
3-15-1 Nishigaoka, kita-ku, Tokyo 115-0056
3. *Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
Corresponding author maemura@fitness.taiiku.tsukuba.ac.jp

キーワード：乳酸、緩衝能力、重炭酸緩衝作用、ペダリング運動

I 緒 言

短時間高強度運動時にみられる体液の酸—塩基平衡の乱れは、おもに乳酸の蓄積に起因している。この乳酸の蓄積に伴う活動筋や血中 pH の低下は、代謝性アシドーシスを招来し、筋疲労をもたらす主要な要因の一つとされている。そのために、pH の低下を抑制する能力すなわち緩衝能力は、短時間で高強度な運動形態を有する競技において、パフォーマンスを決定する重要な要因の一つであると考えられる。

生体内では、生理的な pH の範囲内において、乳酸はほぼ完全に水素イオン (H^+) と乳酸イオン (La^-) とに解離する。乳酸から解離して血中に排出された H^+ のおよそ 90—94 % は、重炭酸イオン (HCO_3^-) によって緩衝され、その結果として代謝性以外の過剰な CO_2 として体外に排出される (Beaver et al., 1986)。近年、運動時に認められる過剰 CO_2 排出量を定量化することによって、重炭酸系による緩衝作用の大きさを評価することが検討されてきている (平木場ほか, 1990; Hirakoba et al., 1992; 稲木ほか, 1993; 伊藤ほか, 2001; 前村ほか, 2003; 鈴木ほか, 1998, 2000; 矢野ほか, 1984; Yano, 1987; Yunoki et al., 1999, 2000)。矢野ほか (1984) は、漸増負荷運動中における換気性作業閾値 (Ventilatory Threshold; VT) 以降にみられる過剰 CO_2 排出量を定量化 (Figure 1) し、これを CO_2 excess と定義した。これまでに CO_2 excess に関する研究では、持久性競技者における CO_2 excess は、短距離競技者および一般人と比較して有意に高い値であること (Yano, 1987; 平木場ほか, 1987)。また、 CO_2 excess と有酸素性能力の指標である最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$ max) や無酸素性作業閾値での酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$ @AT)、さらには 12 分間走の走行距離との間に有意な正の相関関係があることなどが報告されている (平木場ほか, 1987, 1990)。このように、これまでは、

Figure 1 Calculation of CO_2 excess during incremental exercise. In present study, CO_2 excess is expressed as CO_2 excess@LEx. (Modified Yano et al., 1984).

漸増負荷運動を用いて乳酸由来の H^+ に対する重炭酸緩衝作用の大きさが評価され、 CO_2 excess の大きさは、比較的高強度の持久性運動におけるパフォーマンスを評価する上で、重要な因子になり得ることが示唆されてきている。

しかし、本来、血液中の HCO_3^- によって緩衝された結果として排出される過剰な CO_2 は、乳酸が多量に生成されるような高強度運動時に作られるために、 CO_2 excess の大きさは、解糖系への依存度の高い短時間で高強度の運動パフォーマンスに影響を及ぼすものと考えられる。このことに関して、前村ほか (2003) は、短時間高強度運動中および運動後における過剰 CO_2 排出量 (Excess- CO_2) を定量化し、この大きさと 40 秒全力ペダリングにおける Mean power との間に有意な正の相関関係を認め、Excess CO_2 が短時間高強度運動パフォーマンスの優劣に関与している可能性を示唆している。

これらのことを考慮すると、運動時に認められる過剰 CO_2 排出量は、測定方法の相違によって運動パフォーマンスに対する貢献のしかた、すなわち、運動時に生成される H^+ に対する緩衝作用の役割が異なることが推察されるが、このような観点から過剰 CO_2 排出量と運動パフォーマンスとの関係を検討した研究はみられない。

そこで本研究では、過剰 CO_2 排出量と短時間高

強度運動パフォーマンスとの関係を、過剰CO₂排出量の測定方法の相違に着目して検討することを目的とした。

なお本研究では、測定方法の相違による過剰CO₂排出量を区別するために、漸増負荷運動における過剰CO₂排出量 (CO₂excess) を CO₂excess@I.Ex. (I.Ex.: Incremental exercise), 短時間高強度運動における過剰CO₂排出量 (Excess-CO₂) を CO₂excess@S.I.Ex. (S.I.Ex.: Short-term intensive exercise) と呼ぶこととする。

II 方 法

1. 被検者

被検者には、大学陸上競技部に所属し、400m走を専門とする男子10名 (年齢 21.3 ± 0.8 歳, 身長 180.7 ± 4.7 cm, 体重 68.9 ± 5.7 kg, 自己ベスト記録 49.7 ± 1.5 s) を用いた。実験を開始するにあたり, すべての被検者に本研究の目的, 運動テストで疲労困憊まで追い込むことの苦痛, および実験に伴う危険性などを詳細に説明し, いかなる時でも実験への参加をとりやめることができるという条件の下で参加の同意書を得た。

2. 測定項目および測定方法

1) 漸増負荷運動テスト

漸増負荷運動テストでは、自転車エルゴメーター (モナーク社製, Ergomedic 818E) を用いて漸増負荷によるペダリング運動を行わせた。負荷は、運動開始から4分間を無負荷とし, その後, 疲労困憊に達するまで1分ごとに0.5kpずつ漸増させた。ペダリングの回転数は60rpmとし, この回転数を維持できないと検者が判断したときに運動を終了させた。被検者には, 漸増負荷運動テストの前にウォーミングアップとして1kpの負荷でのペダリング運動を5分程度行わせた。運動テストは, ウォーミングアップ終了約10分後に開始した。

運動中および運動後における酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) を測定するために, 自動呼気ガス分析器 (Mijnhard 社製, OXY-

CON-GAMMA) を用いて, 運動開始2分前から運動終了15分後までbreath by breath法により10秒毎に連続して呼気ガス分析を行った。この方法ではフェイスマスクから採取したガスサンプルは, ツインチューブサンプルラインを通してガス分析器に送られる。ガス分析器の較正は, テストの開始前にN₂-CO₂混合標準ガス (O₂: 0%, CO₂: 4.394%) を用いて行い, また, ツインチューブを通過するガスの移動時間の補正および定量シリンジによる流量計の較正も行った。

得られた酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) をもとにして, 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$), 過剰CO₂排出量 (CO₂excess@I.Ex.) を算出した。CO₂excess@I.Ex.は, 矢野ほか (1984) の示した方法により算出した (Figure 1)。すなわち, 漸増負荷運動時における換気性作業閾値 (Ventilatory Threshold; VT) 以前の $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}CO_2$ の回帰直線を求め, その直線をVT以降にも外挿し, この外挿により予測された $\dot{V}CO_2$ と実測された $\dot{V}CO_2$ との差を運動終了時まで加算することによって算出した。なお, VTの決定は, $\dot{V}E$ および $\dot{V}CO_2$ が急激に増加する点, $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ が増加することなく $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ が上昇する点から総合的に判断した (Wasserman et al., 1973)。

血中乳酸濃度測定のために, 運動終了1, 3, 5分後に指先より採血した。測定は, 採血後直ちに自動血中乳酸分析器 (1500sport, YSI 社製) を用いて行った。なお, 代表値には, 3回の測定のうちの最高値 (La peak) を採用した。

2) 短時間高強度運動テスト (実験B)

短時間高強度運動テストでは, トルクが任意に設定でき, ペダルの回転数に応じた電圧を外部に出力することができるハイパワー自転車エルゴメーター (竹井器機社製, TTK 1254a) を用いて, 10秒, 20秒, 30秒および40秒の全力ペダリング運動を行わせた。なお, 運動テストとしてこれらの時間による全力ペダリング運動を用いたのは, 解糖系への依存度の高い陸上競技の短距離種目である100m走, 200m走および400m走やスピードスケートの500mの運動時間が約10秒—45秒であるという理由からである。被検者にはテストの

前に十分な練習を行わせ、ペダリング運動に慣れさせた。ウォーミングアップは1kpの負荷でのペダリング運動を5分程度行わせた後、3秒間の全力ペダリング運動を5分程度の休息を挟んで2回行わせた。また、運動テストは、ウォーミングアップ終了約10分後に開始した。テスト時の負荷は体重 $\times 0.075\text{kp}$ とし、運動はスタートから全力で行わせた。自転車運動時のパワーは1秒ごとにコンピューターに取り込み、それを基に体重当たりの平均パワー (Mean power/BW) を算出した。なお、疲労の影響を考慮して被検者は各ペダリング運動を1日1試技行うこととし、各試技間には1—3日の間隔を設けた。また、テストの順番はランダムとした。

漸増負荷運動テストと同様の方法で、運動中および運動後の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ および終末呼気 CO_2 分圧 (PET CO_2) を測定し、得られた呼気ガスデータから、短時間高強度運動における単位時間当たりの過剰 CO_2 排出量 ($\dot{V}CO_2\text{excess@S.I.Ex.}$)、および運動開始から運動終了15分までの過剰 CO_2 排出量の総量 ($CO_2\text{excess@S.I.Ex.}$) を、以下に示す式によって1分ごとに算出した (Cerretelli and Di Prampero, 1987 ; Figure 2)。

$$\dot{V}CO_2\text{excess@S.I.Ex.} = \dot{V}CO_2 - \dot{V}O_2$$

$$CO_2\text{excess@S.I.Ex.} = \sum \dot{V}CO_2\text{excess@S.I.Ex.} \cdot \Delta t$$

なお、 Δt は、1/6分を示す。

血中乳酸濃度測定のために、運動終了1, 3, 5, 7分後に指先より採血した。測定は、採血後直ちに自動血中乳酸分析器 (1500sport, YSI社製) を用いて行った。なお、代表値には、4回の測定

Figure 2 Calculation of Excess CO_2 during and after the short-duration intensive exercise. In present study, Excess CO_2 is expressed as $CO_2\text{ excess@S.I.Ex.}$ (Modified Cerretelli and Di Prampero, 1987).

のうちの最高値 (La peak) を採用した。

いずれのテストにおいても、自転車のサドルの高さは被検者がもっともこぎやすい高さとした。また、運動中はサドルから腰を浮かせないように指示し、足部はストラップによって固定した。

3. 統計処理

各測定項目の値はすべて平均値 $\pm$ 標準偏差で示した。各試技間での平均値の差の検定には、一元配置の分散分析を用い、F値が有意であった場合には、Fisher's PLSD法を用いて多重比較を行った。また、2変数間の相関係数の算出には、ピア

Table 1 Results of 10-s, 20-s, 30-s and 40-s maximal cycle sprinting.

	Mean power (W/kg)	La peak (mmol/L)	$CO_2\text{ excess @ S.I.Ex.}$ (ml/kg)	PET CO_2 decrease (mmHg)
10-s	10.0 $\pm$ 0.5	4.6 $\pm$ 0.4	42.7 $\pm$ 2.9	6.1 $\pm$ 0.3
20-s	9.3 $\pm$ 0.5	8.7 $\pm$ 1.0	82.3 $\pm$ 10.1	10.3 $\pm$ 1.1
30-s	8.5 $\pm$ 0.4	11.1 $\pm$ 0.6	100.9 $\pm$ 4.2	12.2 $\pm$ 0.4
40-s	8.0 $\pm$ 0.5	10.6 $\pm$ 0.7	109.0 $\pm$ 8.9	13.0 $\pm$ 0.9
Difference	10s $\gg$ 20s $\gg$ 30s > 40s	40s, 30s $\gg$ 20s $\gg$ 10s	40s > 30s $\gg$ 20s $\gg$ 10s	40s $\gg$ 30s $\gg$ 20s $\gg$ 10s

n=10

Values are mean $\pm$ SD

$\gg$: $p < 0.01$, $>$: $p < 0.05$

ソンの積率相関分析を用いた。なお、統計処理の有意性は危険率5%未満で判定した。

III 結 果

漸増負荷運動テストにおける $\dot{V}O_2\text{max}$ は $54.1 \pm 2.2\text{ml/kg/min}$ 、 $\text{CO}_2\text{excess@I.Ex.}$ は $36.2 \pm 6.0\text{ml/kg}$ 、 La peak は $8.9 \pm 0.9\text{mmol/L}$ であった。

Table 1に、短時間高強度運動テストにおけるMean power, La peak , $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ および PETCO_2 の減少量($\text{PETCO}_2\text{ decrease}$)を各運動時間ごとに示した。

Mean powerは、運動時間が長いほど有意に低値を示すことが認められた。一方、 La peak は、30秒ペダリング運動と40秒ペダリング運動の間には有意な差は認められなかったが、両運動とも10秒および20秒ペダリング運動と比較して有意に高値を示すことが認められた。また、 $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ および $\text{PETCO}_2\text{ decrease}$ は、運動時間が長いほど有意に高値を示すことが認めら

れた。

Table 2に、短時間高強度運動テストにおけるMean powerと漸増負荷運動テストにおける $\dot{V}O_2\text{max}$ および $\text{CO}_2\text{excess@I.Ex.}$ との相関係数を示した。

Mean powerと $\dot{V}O_2\text{max}$ および $\text{CO}_2\text{excess@I.Ex.}$ の間には、いずれの運動時間においても有意な相関関係は認められなかった。

Table 3に、短時間高強度運動テストにおけるMean powerと La peak および $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ との相関係数を示した。

Mean powerと La peak の間には、20秒、30秒および40秒ペダリング運動において、いずれも有意な正の相関関係(20-s $r=0.654$, $P<0.05$; 30-s $r=0.747$, $P<0.05$; 40-s $r=0.692$, $P<0.05$)が認められた。また、Mean powerと $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ の間には、20秒、30秒および40秒ペダリング運動において、いずれも有意な正の相関関係(20-s $r=0.652$, $P<0.05$; 30-s $r=0.708$, $P<0.05$; 40-s $r=0.759$, $P<0.01$)が認められた。また、その相関係数は運動時間が長いほど高値を示した。

Figure 3に、短時間高強度運動テストにおける $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ と $\text{PETCO}_2\text{ decrease}$ との関係を示した。

$\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ と $\text{PETCO}_2\text{ decrease}$ との間に

Table 2 Correlation coefficients between mean power in 10-s, 20-s, 30-s and 40-s maximal cycle sprinting and $\dot{V}O_2\text{max}$ and $\text{CO}_2\text{excess@I.Ex.}$ in incremental exercise.

	$\dot{V}O_2\text{max}$	$\text{CO}_2\text{excess@I.Ex.}$
Mean power		
10-s	0.336	0.113
20-s	0.099	0.352
30-s	-0.004	0.116
40-s	-0.081	0.197

Table 3 Correlation coefficients between mean power and La peak and $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ in 10-s, 20-s, 30-s and 40-s maximal cycle sprinting.

	La peak	$\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$
Mean power		
10-s	0.371	0.573
20-s	0.654*	0.652*
30-s	0.747*	0.708*
40-s	0.692*	0.759**

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

Figure 3 Relation of $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ and $\text{PETCO}_2\text{ decrease}$ in 10-s, 20-s, 30-s and 40-s maximal cycle sprinting.

は、有意な相関関係 ($r=0.942$, $P<0.01$) が認められた。

IV 考 察

短時間高強度運動を最大努力で行った場合には、運動時間が長くなるにつれて解糖系への依存度が高くなり、その結果、多くの乳酸が活動筋において生成される。このことは、本研究で用いた全力ペダリング運動においても確認された。すなわち、La peak は、30 秒ペダリング運動と 40 秒ペダリング運動との間には有意な差は認められなかったが、両運動とも 10 秒および 20 秒ペダリング運動と比較して有意に高値を示すことが認められた (Table 1)。また、Mean power と有酸素性エネルギー供給能力の指標である $\dot{V}O_2\max$ との間には、いずれの運動時間においても有意な相関関係は認められなかったが (Table 2)、Mean power と La peak との間には、20 秒、30 秒および 40 秒ペダリング運動において、いずれも有意な正の相関関係が認められた (Table 3)。

乳酸生成に伴う筋 pH の低下は、解糖系の律速酵素であるホスホフルクトキナーゼ (PFK) 活性の抑制や、興奮—収縮連関の阻害などによって筋のエネルギー代謝を変化させ、筋疲労をもたらすことが知られている (Hultman and Sahlin, 1980)。生体には、筋 pH の低下を抑制し、pH の恒常性を維持しようとする働き (緩衝能) が備わっている。高い緩衝能を有すると、乳酸の蓄積に伴う筋 pH の低下を抑制することができ、より多くのエネルギーを解糖系から得ることができるであろう。そしてその結果として、高強度の運動の持続が可能となると考えられる。つまり、緩衝能は短時間高強度運動パフォーマンスを左右する重要な要因の一つになると考えられる。また、乳酸から解離して血中に排出された H^+ の 90—94 % は、 HCO_3^- によって緩衝される (Beaver et al., 1986) ために、重炭酸系による緩衝効率は、短時間高強度運動パフォーマンスの優劣に影響することが推察される。そこで本研究では、短時間高強度運動パフォーマンスと重炭酸緩衝系の指標であ

る過剰 CO_2 排出量との関係を、過剰 CO_2 排出量の測定方法の相違に着目して検討することを目的とした。

本研究では最初に、短時間高強度運動テストにおける Mean power と漸増負荷運動を用いて測定された過剰 CO_2 排出量 ($CO_2\text{excess@IEx.}$) との関係について検討した。その結果、Mean power と $CO_2\text{excess@IEx.}$ との間にはいずれの運動時間においても有意な相関関係は認められなかった (Table 2)。短時間高強度運動時には活動筋において多量の乳酸が蓄積するために、運動時における活動筋 (非重炭酸系) での緩衝能がパフォーマンスの優劣に関与すると考えられている (Parkhouse et al., 1985)。しかし、漸増負荷運動時には乳酸が全身へ拡散されるので、漸増負荷運動を用いて測定された $CO_2\text{excess@IEx.}$ は、全身での緩衝能を反映しているために、短時間高強度運動パフォーマンスの優劣には関与しなかったものと推察される。しかし、鈴木ほか (1998) は、競泳自由形選手を対象に、回流水槽を用いて 1.53m/sec での運動持続時間と重炭酸系の緩衝効率の指標である $CO_2\text{excess}$ を血中乳酸濃度の増加量 (ΔLa) で除した値 ($CO_2\text{excess}/\Delta La$) との関係を検討した結果、両者の間に有意な正の相関関係を認め、 $CO_2\text{excess}/\Delta La$ の高い者ほど短時間で高強度の水泳運動を長く持続できる可能性を示唆している。鈴木たちの研究と本研究における結果の相違は、運動時間の相違があげられる。鈴木たちの研究では、exhaustion 時の運動時間は平均で 75 秒 (60 秒—85 秒) であるのに対し、本研究で用いた運動時間は 10 秒—40 秒であった。Medbø and Tabata (1993) は、30 秒程度で疲労困憊に至る運動では約 35 %、60 秒程度の運動では約 50 %、120 秒程度の運動では約 65 % が有気的エネルギー供給機構からエネルギーの供給を受けていることを報告している。このことを考慮すると、75 秒前後の運動では、本研究で用いた 10 秒—40 秒の全力運動に比べて、有酸素系からのエネルギー供給の貢献が大きいものと考えられる。このことは、漸増負荷運動を用いて測定された $CO_2\text{excess@IEx.}$ は、有酸素性のエネルギー

供給が関与してくる運動パフォーマンスの優劣に影響してくる可能性を示唆するものであり、CO₂excessと有酸素性からのエネルギー供給の貢献が高いと考えられる12分間走における走行距離との間に有意な正の相関関係を認めた平木ほか(1990)の報告を支持するものである。なお、鈴木ほか(1998)の研究では、重炭酸系の緩衝効率を反映する指標として、血中乳酸濃度の増加量に対するCO₂excessの比率(CO₂excess/ Δ La)を用いている。しかし、CO₂excessは、乳酸から解離したH⁺をHCO₃⁻によって緩衝した結果として排出されるCO₂量をVT以降から運動終了時まで加算して求めているのに対して、 Δ Laは、最高血中乳酸濃度と安静時の乳酸濃度の差から求めていることから、CO₂excess/ Δ Laが重炭酸系の緩衝効率を反映する指標として用いることには疑問が残る。したがって、この指標の妥当性および有用性については、今後さらに検討する必要がある。

本研究では次に、短時間高強度運動におけるMean powerと短時間高強度運動を用いて測定された過剰CO₂排出量(CO₂excess@S.I.Ex.)との関係について検討した。その結果、20秒、30秒および40秒ペダリング運動におけるMean powerとCO₂excess@S.I.Ex.との間に有意な正の相関関係が認められ、その相関係数は運動時間が長いほど高値を示した(Table 3)。このことは、CO₂excess@S.I.Ex.の大小は、解糖系への依存度の高い運動パフォーマンスの優劣に関与すること、すなわち、CO₂excess@S.I.Ex.の大きい者ほど、乳酸の蓄積が著しく認められる運動時において筋pHの低下を抑制することができ、その結果として高いパワー発揮を維持することができた可能性を示唆するものである。上述したように、短時間高強度運動時には活動筋において多量の乳酸が蓄積するために、運動時における活動筋での緩衝能がパフォーマンスの優劣に関与すると考えられている(Parkhouse et al., 1985)。短時間高強度運動時に生成された乳酸は、運動時には活動筋で緩衝され、それが運動後に全身へ拡散されることによって、重炭酸緩衝系へ緩衝作用が置き換え

られている可能性のあることを考慮すると、運動後のCO₂excess@S.I.Ex.は、運動時における活動筋での緩衝能を反映している可能性が考えられる。

運動時における活動筋での緩衝が、運動後に重炭酸系での緩衝に置き換わる過程、すなわちCO₂の過剰排出が運動後に遅れて起きるという現象には、さまざまな要因が関与しているものと考えられる。その要因の一つに、クレアチンリン酸(PCr)の加水分解と再合成(クレアチンキナーゼ平衡反応: PCr + H⁺ + ADP → Cr + ATP)による影響が考えられる。Haltman and Sahlin (1980)は、運動時に乳酸が生成されたことによって生じたH⁺は、PCrの加水分解によって取り込まれるが、運動後はPCrの再合成によって再び放出されることを報告している。また、運動後にPCrの再合成によって放出されたH⁺は、筋から血中へすばやく拡散される(Kemp et al., 1997)。血液中の緩衝作用は、主に重炭酸系によって行われているので、筋から血中へ拡散されたH⁺は、HCO₃⁻によって緩衝され、その結果、CO₂の過剰排出が運動後に引き起こされるものと考えられる。また、その他の要因として、呼吸性の補償作用による影響も考えられる。重炭酸系による緩衝作用は活動筋および血液中の二酸化炭素分圧が一定に保たれている開放系においてのみ作用することから(Hultman and Sahlin, 1980)、活動筋→血液→肺胞へのCO₂の除去、すなわち呼吸性の補償作用の程度が重炭酸系による緩衝効率を促進させるものと考えられる。そこで本研究では、呼吸性の補償作用の程度を反映する指標である終末呼気CO₂分圧(PETCO₂)の減少量とCO₂excess@S.I.Ex.との関係について検討した結果、両者の間には有意な正の相関関係が認められた(Figure 3)。このことは、過剰換気に伴うPETCO₂の減少は、重炭酸系による緩衝効率を高めるために重要な役割を担っており、呼吸性の補償作用の程度がCO₂excess@S.I.Ex.の大きさに影響を及ぼしていることを示唆するものである。このように、短時間高強度運動においてCO₂の過剰排出が運動後に遅れて起きるという現象には、クレアチンキナー

ぜ平衡反応や呼吸性の補償作用の程度が関与しているものと考えられる。

本研究の結果、10秒ペダリング運動においては、Mean powerと $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ との間に有意な相関関係は認められなかった (Table 3)。このことは、主にATP-PC系のエネルギー供給に依存すると考えられる10秒程度の運動では乳酸の蓄積は少なく、活動筋での緩衝作用、および血中での重炭酸緩衝作用は運動パフォーマンスを規定する要因にはならない可能性を示唆するものである。このことは、10秒ペダリング運動においては、La peakとMean powerとの間に有意な相関関係が認められなかった (Table 3) ことから支持される。なお本研究では、短時間高強度運動パフォーマンスの指標として10秒—40秒間の全力ペダリング運動を体重の7.5%の負荷で行わせた際のMean powerを用いた。しかし、短時間高強度運動パフォーマンスに対する重炭酸緩衝作用の重要性をより明らかにするためには、40秒以上の運動時間 (約50秒—120秒) や負荷の大きさ、運動様式などを変えて、今後さらに検討する必要がある。

まとめとして、本研究では、運動時に認められる過剰 CO_2 排出量は、測定方法の相違によって運動パフォーマンスに対する貢献のしかたが異なり、多量の乳酸が生成されるような短時間高強度運動パフォーマンスの優劣には、短時間高強度運動を用いて測定された $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ の大きさが重要な要因であることが示唆された。

V 要 約

本研究では、重炭酸緩衝作用の大きさを反映する指標である過剰 CO_2 排出量に焦点を当て、その大きさが短時間高強度運動パフォーマンスの優劣を評価できるか否かを、過剰 CO_2 排出量の測定方法の相違に着目して検討することを目的とした。

この課題を明らかにするために、短距離競技者10名に、漸増負荷運動と運動時間の異なる10秒、20秒、30秒および40秒の短時間高強度運動を行わせ、漸増負荷運動では、 $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ 、 $\text{CO}_2\text{ex-$

cess@I.Ex. およびLaを測定し、短時間高強度運動では、各ペダリング運動におけるMean power, La, $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ および PETCO_2 を測定した。

本研究の主な結果は以下に示す通りである。

①短時間高強度運動におけるMean powerと漸増負荷運動における $\text{CO}_2\text{excess@I.Ex.}$ との間には、いずれの運動時間においても有意な相関関係は認められなかった。

②20秒、30秒および40秒ペダリング運動におけるMean powerと $\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$ との間に有意な正の相関関係 (20-s $r=0.652$, $P<0.05$; 30-s $r=0.708$, $P<0.05$; 40-s $r=0.759$, $P<0.01$) が認められ、その相関係数は運動時間が長いほど高値を示した。

以上の結果から、本研究では、短時間高強度運動中および運動後の過剰 CO_2 排出量 ($\text{CO}_2\text{excess@S.I.Ex.}$) は、特に解糖系への依存度の高い運動パフォーマンスの優劣に影響する可能性が示唆された。

文 献

- Beaver, W.L., Wasserman, K., and Whipp, B.J. (1986) Bicarbonate buffering of lactic acid generated during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 60: 472-478.
- Cerretelli, P. and Di Prampero, P.E. (1987) Gas exchange in exercise. In: Farhi, L.E. and Tenney, S.M. (Eds.) *Handbook of Physiology*, Sec. 3, The Respiratory System, Vol. IV, Am. Physiol. Soc.: Bethesda, Maryland, pp. 297-339.
- Hultman, E. and Sahlin, K. (1980) Acid-base balance during exercise. *Exerc. Sports Sci. Rev.*, 7: 41-128.
- 平木場浩二・丸山敦夫・美坂光治 (1987) 漸増運動時における $\dot{V}\text{CO}_2$ および $\dot{V}\text{E}$ の動態と有酸素的作業能力. *九州体育学研究* 1: 37-44.
- 平木場浩二・丸山敦夫・美坂光治 (1990) 運動時の乳酸生成による CO_2 過剰排出と持久性パフォーマンスとの関係. *体力科学*, 39: 69-77.
- Hirakoba, K., Maruyama, A., Inaki, M., and Misaka, K. (1992) Effects of endurance training on excessive CO_2 expiration due to lactate production in exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 64: 73-77.
- 伊藤 稜・鈴木康弘・蒲原一之・高松薫 (2001) 漸

- 増負荷運動中における非代謝性CO₂排出量の評価の信頼性. 体力科学, 50 : 129-138.
- 稲木光晴・久野譜也・阿武 泉・板井悠二・勝田 茂 (1993) 漸増負荷運動による筋pHの低下と過剰CO₂排出量との関係. 体力科学, 42 : 53-58.
- Kemp, G.J., Thompson, C.H., Taylor, D.J., and Radda, G.K. (1997) Proton efflux in human skeletal muscle during recovery from exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 76: 462-471.
- 前村公彦・鈴木康弘・伊藤 稯・蒲原一之・高松 薫 (2003) 短時間高強度運動における過剰CO₂排出量の評価法およびパフォーマンスとの関係. 体育学研究, 48 : 679-690.
- Medbø, Y. and Tabata, I. (1993) Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *J. Appl. Physiol.*, 75: 1654-1660.
- Parkhouse, W.S., McKenzie, D.C., Hochachka, P.W., and Ovalle, W.K. (1985) Buffering capacity of deproteinized human vastus lateralis muscle. *J. Appl. Physiol.*, 58: 14-17.
- 鈴木康弘・稲木光晴・勝田 茂 (1998) 高強度の水泳運動における持続時間および重炭酸緩衝能からみた競泳自由形選手の特性. いばらき健康・スポーツ科学, 17 : 11-17.
- 鈴木康弘・高橋英幸・板井悠二・高松 薫 (2000) 水泳選手のレジスタンストレーニングが過剰CO₂排出量およびスイムパフォーマンスに及ぼす影響. 体力科学, 49 : 355-364.
- Wasserman, K., Whipp, B.J., Koyal, S.N., and Beaver, W.L. (1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 35: 236-243.
- 矢野徳郎・浅野勝巳・野村武男・松坂 昇・平木場 浩二 (1984) 漸増負荷運動時の $\dot{V}CO_2$ の動態. 体力科学, 33 : 201-210.
- Yano, T. (1987) The difference in CO₂ kinetics during incremental exercise among sprinters, middle, and long distance runners. *Jpn. J. Physiol.*, 37: 369-378.
- Yunoki, T., Horiuchi, M., and Yano, T. (1999) Kinetics of excessCO₂ output during and after intensive exercise. *Jpn. J. Physiol.*, 49: 139-144.
- Yunoki, T., Horiuchi, M., and Yano, T. (2000) Excess-CO₂ output response during and after short-term intensive exercise in sprinters and long-distance runners. *Jpn. J. Physiol.*, 50: 199-205.

(平成15年12月12日受付)
(平成16年9月4日受理)