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

伊藤 穰¹⁾ 鈴木康弘¹⁾ 蒲原一之²⁾ 高松 薫³⁾

RELIABILITY OF THE ESTIMATION OF NON-METABOLIC CO₂ OUTPUT DURING INCREMENTAL EXERCISE

OSAMU ITO, YASUHIRO SUZUKI, KAZUYUKI KAMAHARA and KAORU TAKAMATSU

Abstract

It is known that lactic anions and hydrogen ions (H^+) produced during intense exercise are partly transported or diffused from muscle to blood resulting in the production of non-metabolic CO₂ through the bicarbonate buffering system. The purpose of the present study was to examine the reliability of the estimation of non-metabolic CO₂ output using respiratory gas analysis during incremental exercise. Six healthy subjects underwent an incremental pedaling exercise test accompanied by respiratory gas and arterial blood sampling. The rate of non-metabolic CO₂ output ($\dot{V}CO_2\text{-NM}$) was calculated by subtracting projected metabolic $\dot{V}CO_2$ from actual $\dot{V}CO_2$ after CO₂ threshold (CT). CT was determined using a modified V-Slope method. Bicarbonate (HCO_3^-), pH, CO₂ partial pressure and lactate concentration were measured from arterial blood samples using automatic analyzers. The kinetics of $\dot{V}CO_2\text{-NM}$ and HCO_3^- were compared throughout the exercise test. $\dot{V}CO_2\text{-NM}$ was significantly correlated with HCO_3^- decrease after CT ($r=0.976$, $p<0.001$) and the kinetics of $\dot{V}CO_2\text{-NM}$ and HCO_3^- decrease were similar during exercise. Furthermore, the amount of non-metabolic CO₂ output (NM-CO₂) calculated integrating $\dot{V}CO_2\text{-NM}$ above CT was significantly correlated with the difference in HCO_3^- between CT and exhaustion ($r=0.929$, $p<0.01$) and with the difference in arterial blood pH between rest and exhaustion ($r=0.863$, $p<0.05$). However, NM-CO₂ was not significantly related to maximum ventilation ($r=0.111$, ns). These results suggest that the estimation of non-metabolic CO₂ output during incremental exercise proposed in the present study is reliable. It was also suggested that the primary factor which influenced non-metabolic CO₂ output during incremental exercise was the addition of H^+ into blood and not hyperventilation.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2001, 50: 129~138)

key word : arterial blood sampling, bicarbonate ions, H^+ buffering, non-metabolic CO₂ output

I. 結 言

運動中の呼気ガスを分析することによって体外において観察することのできる CO₂ 排出 ($\dot{V}CO_2$) は、常に呼吸性の制御を受けており、産生された CO₂ の一部が体内にストアされたり、換気亢進に伴って産生された以上に排出されたりする。一方、運動中に体内において産生される CO₂ は、エネルギー産生に由来する代謝性 CO₂ と、以下

の式(1)の表す酸塩基平衡に基づいた重炭酸イオン (HCO_3^-) による水素イオン (H^+) の緩衝に由来する非代謝性 CO₂ とに大別することができる。

これまで、いくつかの先行研究^{1~6)}において、体外に代謝性以外に過剰に排出された CO₂ を定量することによって、重炭酸系による乳酸 (H^+) 緩衝作用の大きさを評価することが試みられてき

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⁾ 筑波大学臨床医学系
〒305-8575 茨城県つくば市天王台1-1-1

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

Doctoral program in Health and Sport Sciences, University of Tsukuba,
1-1 Tennodai 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan

Institute of Clinical Medicine, University of Tsukuba, 1-1 Tennodai 1,
Tsukuba, Ibaraki 305-8575, Japan

Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1
Tennodai 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan

た。矢野たち⁶⁾は、漸増負荷運動中における非代謝性の CO_2 を反映する指標として“ CO_2excess ”を定義し、血中乳酸の増加量との間に有意な相関関係を認めた。また、平木場たち²⁾は、 CO_2excess が持久性パフォーマンスと有意に関係していることを報告している。しかし、非代謝性 CO_2 排出量の定量には方法論上多くの問題があり、その信頼性および有用性については、未だ十分に確立しているとは言い難い状況にある。したがって、式(1)に由来した“非代謝性”の CO_2 排出量を実際に評価し得る手法について、血液中の HCO_3^- 濃度の変化との比較を通してより明確にする必要があるものと考えられる。

本研究の目的は、漸増負荷運動中における血液パラメータの変化を運動中を通して観察することにより、呼気ガス分析から得られた非代謝性 CO_2 排出量の評価方法の信頼性を検討することである。

Ⅱ. 方 法

A. 対 象

被検者は、活動的な男子大学生6名で、年齢 21.0 ± 0.9 yrs, 身長 173.2 ± 5.6 cm, 体重 65.6 ± 5.4 kg (平均±標準偏差)であった。被検者は全員、同好会レベルの陸上競技クラブに所属し、短距離走を専門としていた。被検者には、実験開始前に、運動テストで疲労困憊まで追い込むことの苦痛、および動脈血採血に伴う苦痛と危険性を詳細に説明し、いかなる時でも実験への参加を取りやめることができるという条件の下で参加の同意を得た。

B. 運動テスト

被検者は、測定の30分前までに来室し、形態測定後、運動テスト開始まで安静を保った。運動中の血液ガス動態を検討するために、この間に被検者の橈骨動脈に22ゲージの留置針を留置した。その際、被検者の苦痛を最小限にするために局所麻酔を施した。運動テストは、モナーク社製自転車エルゴメータ(Ergomedic 818E)を用いて漸増負荷法で行った。負荷は、ペダリング開始から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0.5 kp (30 W) ずつ増加した。ペダリングの回転数は60 rpm とした。エルゴメータのサドルの高さは、被検者がもっともこぎやすい高さとし、足部をストラップによって固定した。

C. 測定項目および測定方法

1. 呼気ガスパラメータ

自動呼気ガス分析器(Mijnhardt 社製 OXYCON-GAMMA)を用いて、運動テスト中の呼気ガスの動態を検討した。被検者は、フェイスマスクに取り付けられたタービン式のボリュウムトランスデューサを通して呼吸し、その際の呼気ガスの一部をサンプリングチューブを介して連続的に採取した。ガス流量、 CO_2 濃度および O_2 濃度は40 ms ごとに測定し、運動中の換気量、二酸化炭素排出量($\dot{V}\text{CO}_2$)および酸素摂取量($\dot{V}\text{O}_2$)をデータ解析用のコンピュータ(Compaq 社製 Prolinea 4/25 s)を用いてオンラインで一呼吸毎に算出した。

運動中における呼気ガス変動のパラメータとして、最大酸素摂取量($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$)、二酸化炭素排出閾値(CO_2 output threshold ; CT)における酸素摂取量($\text{CT}-\dot{V}\text{O}_2$)、非代謝性 CO_2 排出速度($\text{Non-metabolic } \dot{V}\text{CO}_2$; $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$)、および非代謝性 CO_2 排出の総量($\text{NM}-\text{CO}_2$)を算出した。CT は、V-slope 法⁷⁾に基づき、 $\dot{V}\text{O}_2$ に対する $\dot{V}\text{CO}_2$ の急増点として決定した。また、その際の二直線回帰は、統計用ソフトウェア(STATISTICA, Statsoft, Inc.)を用いて行った。一方、先行研究¹⁻⁶⁾における CO_2excess の算出方法と同様に、CT 以下の強度における $\dot{V}\text{O}_2$ - $\dot{V}\text{CO}_2$ 関係を表す直線をCT 以上の強度まで外挿することによって見かけ上の代謝性 $\dot{V}\text{CO}_2$ (代謝性に産生された CO_2 のうち、体外に排出された量)を推定したが、考察で述べるような理由から、本研究においては、この直線の傾きをできる限り1.0に近づけるという条件を加えた。さらに、従来の算出法とは、閾値の決定方法および閾値以下の直線の傾きの決定方法が異なることから、 CO_2excess に相当する部分を $\text{NM}-\text{CO}_2$ と表記し、実際の $\dot{V}\text{CO}_2$ と代謝性 $\dot{V}\text{CO}_2$ との差すなわち $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ を運動終了まで積分

Fig. 1. Schema for the calculation of non-metabolic CO₂ output ($\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ and NM-CO_2).

することによって算出した (Fig. 1).

2. 血液パラメータ

採血は、運動テスト開始 1 分前 (安静時)、運動開始後 2 分および 4 分以降 1 分毎に exhaustion までと、運動終了後 1, 3, 5 分に行った。採取した血液は、運動テスト中から終了後にかけて可能な限り素早く分析し、分析までに時間を要する場合には、ヘパリン処理したシリンジ (テルモ社製) のまま直ちに氷冷した。なお、全ての血液サンプルについて、採取後 15 分以内に血液ガスの測定を終えた。

運動中における動脈血液ガス変動のパラメータとして、二酸化炭素分圧 (PaCO_2)、水素イオン濃

度 (pHa) および血漿重炭酸イオン濃度 (HCO_3^-) を自動血液ガス分析器 (Radiometer 社製 ABL520) を用いて、また、乳酸濃度 (LA) を自動乳酸濃度分析器 (YSI 社製 1500 sports) を用いて測定した。

D. 統計処理

本研究における測定データの平均値を示す場合には、全て平均値 $\pm$ 標準偏差 (S. D.) で示した。また、測定データの有意差検定には Student's t-test を用い、相関係数の算出には Pearson の積率相関分析を用いた。いずれの場合も、有意性の判定には、危険率 5 % を採用した。

Ⅲ. 結 果

漸増負荷運動テストにおける被検者の運動時間および最大運動強度は、それぞれ 14.2 ± 1.2 (min) および 310 ± 36 (W) であった。

Table 1 に、漸増負荷テストにおける体重あたりの最大酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}/\text{BW}$)、CT 時の酸素摂取量 ($\text{CT-}\dot{V}\text{O}_2/\text{BW}$)、 NM-CO_2 、および LA、 HCO_3^- 、pHa それぞれの変化量を被検者全員について示した。ここで、LA および pHa の変化量については、安静時と exhaustion 時との差 (ΔLA および ΔpHa) を、 HCO_3^- の変化量については、安静時と exhaustion 時との差 (ΔHCO_3^-) に加え、各個人の CT に最も近い時点から ex-

Table 1. Respiratory and arterial blood parameters of the subjects in incremental exercise.

No.	Name	$\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}/\text{BW}$ [ml/min/kg]	$\text{CT-}\dot{V}\text{O}_2/\text{BW}$ [ml/min/kg]	NM-CO_2 [ml]	ΔLA [mmol/l]	ΔHCO_3^- [mEq/l]	ΔHCO_3^- (CT) [mEq/l]	ΔpHa
1	TA	49.0	21.8	4175	10.3	12.7	11.6	0.201
2	TI	51.2	27.2	3436	9.6	10.1	9.6	0.158
3	YI	51.2	25.9	3827	9.4	9.8	9.7	0.213
4	ToK	57.5	28.5	2835	8.7	10.4	8.5	0.142
5	TaK	58.8	23.8	3865	9.9	12.2	11.1	0.171
6	YN	47.8	24.8	4190	11.0	11.4	11.8	0.219
	Mean	52.6	25.3	3721	9.8	11.1	10.4	0.184
	SD	4.5	2.4	515	0.8	1.2	1.3	0.032

NM-CO_2 : the amount of non-metabolic CO₂ during incremental exercise, ΔLA : the difference of arterial blood lactate concentration between rest and exhaustion, ΔHCO_3^- : the difference of arterial plasma bicarbonate ion concentration between rest and exhaustion, ΔHCO_3^- (CT): the difference of arterial plasma bicarbonate ion concentration between the point closest to CT and exhaustion, ΔpHa : the difference of arterial blood pH between rest and exhaustion.

Fig. 2. Lactate (LA), bicarbonate (HCO_3^-), pHa and PaCO_2 responses during incremental exercise of subject 1.

haustion 時までの差 (ΔHCO_3^- (CT)) を併せて示した。 ΔHCO_3^- は ΔLA に比べて有意に大きな値を示した ($p < 0.05$)。しかし、両者間に有意な相関関係は認められなかった ($r = 0.595$, ns)。一方、 ΔHCO_3^- (CT) は ΔLA に比べて大きな値を示す傾向が認められたが、有意な差ではなかった ($p = 0.07$)。しかし、両者間には有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.941$, $p < 0.01$)。

Fig. 2 に、運動中および運動後における LA, HCO_3^- , pHa および PaCO_2 の変化の典型例を示した。LA は、運動開始の比較的早い段階から増加し始めたが、 HCO_3^- の低下は、LA の増加よりもやや遅れることが認められた。また、pHa は、負荷の漸増開始 (運動開始4分後) とともに低下し続け、運動終了後にはさらに低下した。一方、 PaCO_2 は、負荷の漸増開始から数分間は増加したがその後低下に転じ、運動終了時には安静時以下まで低下した。これらの傾向は、本研究で用いた全被検者ではほぼ同様であった。

Fig. 3 に、被検者全員における運動中の HCO_3^- の減少量と $\dot{\text{VCO}}_2\text{-NM}$ との関係を示した。 HCO_3^- の減少量を安静時から算出した場合 (左図; $r = 0.953$, $p < 0.001$) および CT 時から算出した場合 (右図; $r = 0.976$, $p < 0.001$) とともに、両者にはそれぞれ有意な正の相関関係が認められたが、特に、 $\dot{\text{VCO}}_2\text{-NM}$ は HCO_3^- の CT 時からの減少量

Fig. 3 The rate of non-metabolic CO_2 output ($\dot{\text{VCO}}_2\text{-NM}$) as a function of HCO_3^- decrease during incremental exercise.

Fig. 4. Changes in $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ and HCO_3^- decrease after CT during incremental exercise. CT was determined from respiratory analysis using a modified V-slope method.

と強い相関を示した。

Fig. 4 に、運動中における $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ の変化と CT 時を基準(ゼロ)とした HCO_3^- の減少量の変化を被検者全員について示した。両指標のタイムコースは、全ての被検者でほぼ一致していた。なお、 $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ および CT 時を基準とした HCO_3^- の減少量を表す 2 つの軸のスケールは、両指標間の相関関係($Y=116.6X+88.6$; Fig. 3 右)に基づいて設定した。また、Fig. 4 には、V-Slope 法を用いて決定した各個人の CT 到達時刻を併せて示した。各個人の CT は、 $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ が急激に増加し始める時点および HCO_3^- が急激に減少し始める時点とほぼ一致していた。

Fig. 5 に、 $\Delta\text{HCO}_3^-(\text{CT})$ と NM-CO_2 との関係を示した。両者には有意な正の相関関係が認められた($r=0.929$, $p<0.01$)。

Fig. 6 に、 NM-CO_2 と ΔpHa および運動時の最大換気量($\dot{V}_{\text{Emax}}$)との関係を示した。 NM-CO_2 と ΔpHa との間には有意な正の相関関係が認められたが($r=0.863$, $p<0.05$)、 $\dot{V}_{\text{Emax}}$ との間には有意な相関関係は認められなかった($r=0.111$, ns)。なお、運動中における $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ の最大値と $\dot{V}_{\text{Emax}}$ との間にもまた、有意な相関関係は認められなかったが($r=0.308$, ns)、 NM-CO_2 およ

Fig. 5. The relationship between HCO_3^- decrease from CT to exhaustion ($\Delta\text{HCO}_3^-(\text{CT})$) and the amount of non-metabolic CO_2 (NM-CO_2).

び $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ の最大値と ΔLA との間には、それぞれ有意な相関関係が認められた($r=0.878$, $p<0.05$ および $r=0.991$, $p<0.01$)。

Ⅳ. 論 議

本研究における最も重要な知見は、漸増負荷運動中における血漿重碳酸イオン濃度(HCO_3^-)の減少と計算上得られた非代謝性の CO_2 排出速度($\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$)のタイムコースが一致していたこと、

Fig. 6. The relationship in NM-CO₂ with pH decrease from rest to exhaustion (ΔpH) and maximum ventilation ($\dot{V}_{E\text{max}}$).

および CT から exhaustion までの血漿重炭酸イオンの減少量 (ΔHCO_3^- (CT)) と非代謝性 CO₂ 排出の総量 (NM-CO₂) との間に有意な正の相関関係が認められたことである。これらのことは、本研究の方法を用いて、呼気ガス分析から漸増負荷運動中における重炭酸緩衝作用の大きさを評価することの信頼性を示唆している。

A. 漸増負荷運動中における血液パラメータの動態について

一般に、漸増負荷運動中においては、負荷の増大に伴って筋中および血中に乳酸が蓄積し、血中の HCO_3^- 濃度は減少する^{6,8-10)}。血中乳酸濃度 (LA) が増加し始める強度は、古くから乳酸閾値 (LT あるいは LAT) などと呼ばれ、閾値そのものに対する科学的背景には議論の余地が残る¹¹⁾ にしても、その有用性は多くのトレーニング現場や医療現場において立証されている。一方、乳酸から解離した H^+ の増加は、式 (1) を右傾化させ、結果として HCO_3^- の減少を導く。しかし、本研究の結果、この HCO_3^- が減少し始める強度は LA の増加し始める強度に比べて 1 ~ 3 分程度遅れることが認められた (Fig. 2)。このことは、血中の二酸化炭素分圧 (PaCO_2) の動態まで考慮に入れることで説明することができる。LA および PaCO_2 は、運動開始後、比較的早い段階から増加する傾向を示した (Fig. 2)。これは、本研究においては比較的急激に負荷を漸増させたために (30 W/min)、血中における乳酸の代謝性除去お

よび CO₂ の呼吸性除去が追い付かなかったことを示すものと考えられる。 PaCO_2 の増加による血中 CO₂ 含有量の増加は式 (1) の左傾化を促すために、結果として HCO_3^- の減少を遅延させ、このことが、漸増負荷運動中における LA の増加と HCO_3^- の減少との間にタイムラグを生じさせたものと考えられる。このタイムラグの間は、 H^+ がフリーで存在していることになるが、それは、 pHa の減少が LA 増加および PaCO_2 の増加とほぼ同期して始まっていることから明らかである (Fig. 2)。Stringer et al.¹²⁾ は、3 種類 (moderate, heavy, および very heavy) の強度の負荷を用いて、それぞれ 6 分間の定常負荷運動を行わせ、その間の血液パラメータ動態について検討した。その結果、heavy および very heavy の強度の運動において、血中乳酸濃度の増加および標準血漿重炭酸イオン濃度 (Std HCO_3^-) の減少を認め、さらに、Std HCO_3^- の減少は乳酸濃度の増加に比べて遅れて出現するが、そのタイムラグはわずか (10 ~ 20 秒) であることを報告した。一方、本研究においては、LA 増加と HCO_3^- 減少との間に 1 ~ 3 分という Stringer et al.¹²⁾ の研究に比べて長いタイムラグが認められた。この不一致は、血漿中の HCO_3^- 濃度の表し方の違いによるものと考えられる。本研究における HCO_3^- が、血漿中における実際の値を表しているのに対して、Stringer et al.¹²⁾ の報告では、標準の値 (温度 37℃, 炭酸ガス分圧 40 torr として補正された値) が用いられた。このことを考慮すると、Stringer et al.¹²⁾ の

報告においても, Std HCO₃⁻ の減少に先立って PaCO₂ の増加および pHa の低下がほぼ同時に起きていることから, 本研究と同様に実際の血漿 HCO₃⁻ 濃度の減少は, さらに遅れて開始していたものと推察される. これらのことは, HCO₃⁻ の減少に伴う非代謝性 CO₂ 排出動態が, 必ずしも血中乳酸の動態とは一致しないことを明確に示すものであると考えられる.

一方, 運動終了時における HCO₃⁻ の安静時からの減少量 (Δ HCO₃⁻) は, LA の増加量 (Δ LA) に比べて有意に高値を示した. このことは, 運動終了時の PaCO₂ が安静時よりも低値を示したことによって説明されるかもしれない. CO₂ の呼吸性除去が追いつくにつれ, 運動開始初期に一時的に増加した PaCO₂ は徐々に低下に転ずるが, その際, 上述した運動開始初期の場合とは逆に, PaCO₂ の低下は HCO₃⁻ の低下を加速させるだろう. その他, 乳酸イオン (LA⁻) および H⁺ の血中への付加速度の差による影響も考えられる. つまり, LA⁻ および H⁺ の筋から血中への移動は, 濃度勾配に従った両者の単純拡散¹³⁻¹⁵⁾ やモノカルボン酸輸送担体 (MCT) を介した LA⁻/H⁺ 共輸送¹⁶⁻¹⁸⁾, 筋中の重炭酸緩衝に伴う CO₂ 排出¹⁹⁾, あるいは Na⁺-H⁺ 交換系²⁰⁾ などを通して行われ, それらの総量としての筋から血中への拡散速度は, LA⁻ よりも H⁺ の方が速いことが報告されている^{19, 21)}. しかし, 安静時における血中 HCO₃⁻ 濃度は, ストレスに伴う, あるいは意識的な過呼吸や息こらえなどにより容易に変化するため, 両者を単純に比較することは難しい. 本研究においては, 運動開始 1 分前に安静時の血液サンプルを採取したため, 運動テストに対する心理的ストレスが安静時の血液データに影響を及ぼした可能性も考えられる.

B. 非代謝性 CO₂ の算出について

本研究では, 先行研究¹⁻⁶⁾と同様に, 代謝性の $\dot{V}O_2$ - $\dot{V}CO_2$ 関係を表すと考えられる回帰直線を求め, 同一の $\dot{V}O_2$ レベルにおける実際の $\dot{V}CO_2$ からこの直線の表す代謝性の $\dot{V}CO_2$ を差し引くことで非代謝性の CO₂ 排出速度 ($\dot{V}CO_2$ -NM)

を算出した (Fig. 1). ただし, 先行研究^{2, 5, 6)}においては, LA が増加し始める強度 (LT) を基準とし, それ以前の範囲で直線回帰を行っているが, 本研究においては, 上述のように LA 増加と HCO₃⁻ 減少とは必ずしも同期しないという立場から, V-slope 法⁷⁾を用いて閾値を決定した. また, 一般に, V-slope 法を用いて求められた閾値は, LAT¹²⁾, あるいは VT²²⁻²⁴⁾ などと称されるが, 乳酸濃度あるいは換気量の変化を意味するこれらの閾値との明確な区別を図るため, 本研究においてはこの時点の運動強度を二酸化炭素排出閾値 (CT) と定義した.

一方, V-slope 法に準じた CT ($\dot{V}O_2$ に対する $\dot{V}CO_2$ の急増点) の決定には, 統計用ソフトウェア (STATISTICA, Statsoft, Inc.) による二直線回帰を用いた. ここで, 運動開始初期には体内への急激な CO₂ ストアの影響があること, また運動終了直前には換気亢進に伴う CO₂ の過剰排出が影響する可能性があることから, 二直線回帰を行う際には両端のデータを適当なだけ排除する必要がある. さらに, 回帰の際の初期値を変えることにより, 二直線の交点はいくつかの異なる点に収束する. このように, CT の決定にはいくつかの困難を伴うため, 本研究では, 低強度側すなわち代謝性の $\dot{V}O_2$ - $\dot{V}CO_2$ 関係を表す直線の傾きが最も 1.0 に近い回帰パターンを選択し²⁵⁾, この時の交点を CT に決定した. Yano²⁶⁾ は, 漸増負荷運動中における混合静脈血 CO₂ 分圧 (P $\bar{v}CO_2$) は, 乳酸増加の影響を受けずに仕事率に比例してほぼ線形に上昇することを報告している. このことから, CT 付近では PaCO₂ の変動が少なく (あるいは P $\bar{v}CO_2$ の増加に比べて無視できるぐらい小さい), 静脈血など体内への CO₂ の蓄積速度がほぼ一定であると仮定すると, 筋エネルギー代謝レベルでの O₂ 消費と CO₂ 排出との関係 (真の代謝性の $\dot{V}O_2$ - $\dot{V}CO_2$ 関係と平行すると考えることができる. 運動強度が増大するにつれ, 呼吸商は徐々に 1.0 に近づき, かつ運動終了時においても 1.0 を越えることはあり得ないため, 真の代謝性の関係を表す直線の傾きは理論的には 1.0 付近のかなり狭

い範囲に存在するはずであり, したがって, 二直線回帰を行う際にもこの条件を当てはめることができるものと考えられる. 本研究で選択された回帰パターンにおける CT 以下の直線の傾きは 1.017 ± 0.014 であり, その結果として算出された各人の CT は, HCO_3^- が減少し始める強度にほぼ一致していた (Fig. 4). ただし, 本研究で用いた方法が, 異なるプロトコルを用いた運動テストにおいても当てはまるかどうかは不明である. 動静脈 PCO_2 の変動あるいは H^+ , K^+ などの血中への付加速度が本研究とは異なる場合における CO_2 排出動態については, 頸動脈小体感受性に関わる呼吸制御系の問題も含めて, 今後さらに検討する必要があるものと考えられる.

C. 非代謝性 CO_2 と血液パラメータとの関連について

本研究では, 連続採血を行うことにより, 非代謝性 CO_2 排出と血漿 HCO_3^- 濃度の動態を運動中を通して直接比較した. その結果, 計算によって求められた各人の $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ は, HCO_3^- の減少とそのタイムコースが概ねよく一致していた (Fig. 4). また, $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ と CT 時を基準とした HCO_3^- の減少量との間には, 非常に強い相関関係が認められた (Fig. 3). これらのことは, $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ が運動中における動脈血中 HCO_3^- の動態をよく反映していることを示唆している. さらに, $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ を運動終了時まで積分した値である NM- CO_2 と CT 時から exhaustion 時までの HCO_3^- の減少量 ($\Delta\text{HCO}_3^-(\text{CT})$) との間にもまた, 有意な正の相関関係が認められた (Fig. 5). このことは, NM- CO_2 が運動中における動脈血中 HCO_3^- 減少の総量を反映していることを示唆しており, 非代謝性 CO_2 排出量の指標として CO_2excess を用いた先行研究^{1~6)}を支持している. 平木場たち²⁾は, 運動終了1分後ではあるが, 動脈血化された静脈血中 HCO_3^- 濃度を測定し, その安静時からの減少量と体重当たりの CO_2excess ($\text{CO}_2\text{excess}/w$) との間に有意な相関関係を認めている.

非代謝性 CO_2 排出量の大きさに影響する要因

としては, 筋から血中への H^+ 拡散の大きさ, および換気亢進があげられる. 血中への H^+ の付加および換気亢進に伴う PaCO_2 の低下は, どちらも式(1)を通して HCO_3^- 濃度の低下をもたらす. ここで, もし, 換気亢進による影響が大きいとすれば, 非代謝性 CO_2 排出量の大きなものほど運動終了時までの pH の低下が抑制されている可能性がある. しかし, 本研究の結果, NM- CO_2 と ΔpH との間にはむしろ有意な正の相関関係が認められた. また, NM- CO_2 および $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ の最大値と $\dot{V}_{E\text{max}}$ との間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった. これらのことは, 非代謝性 CO_2 排出に対する主要な因子は, 換気亢進ではなく血中への H^+ 付加の大きさである可能性を示している. 筋から血中への H^+ 拡散速度に影響する要因としては, 筋線維組成, 筋毛細血管分布および筋線維鞘における MCT 濃度などが考えられる. 筋毛細血管がより発達していると考えられる長距離走者群において, より大きな $\text{CO}_2\text{excess}/w$ が認められたとする先行研究²⁾はこの考えを支持している. しかし, 血中 pH に対する生体の感受性が運動の持続能力に影響を及ぼし, このことが, NM- CO_2 と ΔpH との間の相関関係をもたらしている可能性も残されている. この点については実験的なアシドーシス状態あるいはアルカローシス状態を作り出す²⁷⁾などして明らかにしていく必要があるだろう.

V. 総 括

本研究では, 漸増負荷運動時における非代謝性 CO_2 排出量を, 代謝性の関係を示す直線の傾きを1.0とした V-Slope 法を用いて評価し, それと連続採血によって測定された動脈血液ガスパラメータとの関係を検討した.

本研究の結果は, 以下に示す通りである.

1) 運動中における非代謝性 CO_2 排出速度 ($\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$) の大きさは, 特に CT 時を基準として算出された血漿重炭酸イオン濃度 (HCO_3^-) の減少量との間に強い相関関係を認めた ($r=0.976$, $p<0.001$).

2) $\dot{V}\text{CO}_2\text{-NM}$ と HCO_3^- の減少のタイムコース

は、全被検者においてほぼ一致していた。

3) $\dot{V}CO_2$ -NM を CT 以降 exhaustion まで積分して算出された、運動中における非代謝性 CO₂ 排出の総量(NM-CO₂)は、CT から exhaustion までの HCO_3^- の減少量 (ΔHCO_3^- (CT)) との間に有意な相関関係を認めた ($r=0.929$, $p<0.01$)。

4) NM-CO₂ はまた、血中 pH の低下量 (ΔpH_a) との間に有意な正の相関関係を認めたが ($r=0.863$, $p<0.05$)、最大換気量 ($\dot{V}_{Emax}$) との間には有意な相関関係を認めなかった ($r=0.111$, ns)。

以上の結果から、本研究の方法を用いて、漸増負荷運動中における非代謝性 CO₂ の排出動態を評価することの信頼性が示唆された。また、漸増負荷運動時における非代謝性 CO₂ 排出量に影響する主要な因子は、換気亢進ではなく血中への H^+ の付加量である可能性が示唆された。

(受理日 平成12年10月25日)

文 献

- 1) Beaver, W. L., & Wasserman, K. Muscle RQ and lactate accumulation from analysis of $\dot{V}CO_2$ - $\dot{V}O_2$ relationship during exercise. *Clin. J. Sports Med.*, (1991), **1**, 27-34.
- 2) 平木場浩二, 丸山敦夫, 美坂幸治, 運動時の乳酸生成による CO₂ 過剰排出と持久性パフォーマンスの関係, 体力科学, (1990), **39**, 69-77.
Hirakoba, K., Maruyama, A., Misaka, K. Relationship between CO₂ excess due to lactic acid production during exercise and endurance performance. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, (1990), **39**, 69-77 (in Japanese)
- 3) 稲木光晴, 久野謙也, 阿武 泉, 板井悠二, 勝田茂, 漸増負荷運動による筋内 pH の低下と過剰 CO₂ 排出量との関係, 体力科学, (1993), **42**, 53-58.
Inaki, M., Kuno, S., Anno, I., Itai, Y., Katsuta, S. Relationship between decrement of muscular pH and CO₂ excess during incremental exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, (1993), **42**, 53-58 (in Japanese)
- 4) 鈴木康弘, 高橋英幸, 板井悠二, 高松薫, 水泳選手のリ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, (2000), **49**, 355-364.
Suzuki, Y., Takahashi, H., Itai, Y., Takamatsu, K. Effects of resistance training on CO₂ excess and swimming performance in competitive swimmers. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, (2000), **49**, 355-364 (in Japanese)
- 5) Yano, T. A theoretical approach to excessive CO₂ expiration due to lactate production in exercise. *Jpn. J. Physiol.*, (1987), **37**, 937-940.
- 6) 矢野徳郎, 浅野勝己, 野村武男, 松坂 晃, 平木場浩二, 漸増負荷運動時の $\dot{V}CO_2$ の動態, 体力科学, (1984), **33**, 201-210.
Yano, T., Asano, K., Nomura, T., Matsuzaka, A., Hirakoba, K. Kinetics of $\dot{V}CO_2$ during incremental exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, (1984), **33**, 201-210 (in Japanese)
- 7) Beaver, W. L., Wasserman, K., Whipp, B. J. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J. Appl. Physiol.*, (1986), **60**, 2020-2027.
- 8) Beaver, W. L., Wasserman, K., Whipp, B. J. Bicarbonate buffering of lactic acid generated during exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1986), **60**, 472-478.
- 9) Sutton, J. R., & Jones, N. L. Control of pulmonary ventilation during exercise and mediators in the blood: CO₂ and hydrogen ion. *Med. Sci. Sports*, (1979), **11**, 198-203.
- 10) Whipp, B. J., Davis, J. A., Wasserman, K. Ventilatory control of the 'isocapnic buffering' region in rapidly-incremental exercise. *Respir. Physiol.*, (1989), **76**, 357-367.
- 11) 中村好男, 乳酸閾値と換気閾値との関連についての Beaver, Wasserman, Whipp の主張に対する疑問, 体育の科学, (1990), **40**, 453-460.
- 12) Stringer, W., Casaburi, R., Wasserman, K. Acid-base regulation during exercise and recovery in humans. *J. Appl. Physiol.*, (1992), **72**, 954-961.
- 13) Hirche, H., Hombach, V., Langohr, H. D., Wacker, U. Lactic acid permeation rate in working skeletal muscle during alkalosis and acidosis. *Pflügers Arch.*, (1972), **332**, R73.
- 14) Jones, N. L., Sutton, J. R., Taylor, R., Toews, C. J. Effect of pH on cardiorespiratory and metabolic responses to exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1977), **43**, 959-964.
- 15) Sutton, J. R., Jones, N. L., Toews, C. J. Effect of pH on muscle glycolysis during exercise. *Clin. Sci.*, (1981), **61**, 331-338.
- 16) Dubouchaud, H., Butterfield, G. E., Wolfel, E. E., Bergman, B. C., Brooks, G. A. Endurance training, expression, and physiology of LDH, MCT 1, and MCT 4 in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, (2000), **278**, E571-579.
- 17) Pilegaard, H., Domino, K., Noland, T., Juel, C., Hellsten, Y., Halestrap, A. P., Bangsbo, J. Effect of high-intensity exercise training on lactate/ H^+ transport capacity in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, (1999), **276**, E255-261.
- 18) Pilegaard, H., Terzis, G., Halestrap, A., Juel, C. Distribution of the lactate/ H^+ transporter isoforms MCT 1 and MCT 4 in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, (1999), **276**, E843-848.
- 19) Hultman, E., & Sahlin, K. Acid-base balance during exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, (1980), **8**, 41-128.
- 20) Aickin, C. C., & Thomas, R. C. An investigation of

- the ionic mechanism of intracellular pH regulation in mouse soleus muscle fibres. *J. Physiol. (London)*, (1977), **273**, 295-316.
- 21) Medbø, J. I., & Sejersted, O. M. Acid-base and electrolyte balance after exhausting exercise in endurance-trained and sprint-trained subjects. *Acta Physiol. Scand.*, (1985), **125**, 97-109.
- 22) Bhambhani, Y. N., Buckley, S. M., Susaki, T. Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1997), **29**, 402-409.
- 23) Dwyer, G. B., Wallace, J. P., Whaley, M. H. Influence of metabolic control on the ventilatory threshold in adults with non insulin-dependent diabetes mellitus. *Diabetes Res.*, (1994), **25**, 39-46.
- 24) Le Gallais, D., Hayot, M., Hue, O., Wouassi, D., Boussana, A., Ramonatxo, M., Prefaut, C. Metabolic and cardioventilatory responses during a graded exercise test before and 24 h after a triathlon. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1999), **79**, 176-181.
- 25) Schneider, D. A., Phillips, S. E., Stoffolano, S. The simplified V-slope method of detecting the gas exchange threshold. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1993), **25**, 1180-1184.
- 26) Yano, T. Kinetics of mixed venous CO₂ pressure in incremental-load exercise. *Appl. Human Sci.*, (1997), **16**, 15-18.
- 27) 鈴木政登, 河辺典子, 町田勝彦, 漸増負荷運動時血中乳酸動態におよぼす実験的酸-塩基平衡異常の影響, *体力科学*, (1995), **44**, 297-306.
Suzuki, M., Kawabe, N., Machida, K. Effects of experimental acid-base disturbance on blood lactate kinetics during incremental exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, (1995), **44**, 297-306 (in Japanese)