一定負荷運動時のガス交換動態から見た換気高進と 二酸化炭素過剰排出との連関について

中 村 好 男** 恩 田 悦 守* 村 岡 功*

EXCESS CO₂ OUTPUT INDEPENDENT OF HYPERVENTILATION DURING CONSTANT-LOAD EXERCISE

YOSHIO NAKAMURA, ETSUMORI ONDA and ISAO MURAOKA

Abstract

Gas exchange kinetics during constant-load exercise were measured to investigate the possibility that excess CO₂ output during exercise might not be dependent on hyperventilation. Five healthy males performed twelve minutes of cycle exercise, including two minutes of 0 W pedaling, at 20, 40, 50, 60, 70, and 80% of their maximal work rate (WRmax) determined on the basis of preliminary ramp exercise of 30 W/min. Minute ventilation, O₂ uptake, and CO₂ output were measured breath-by-breath. Excess CO₂ output and CO₂ stores were calculated, assuming that the respiratory quotient (RQ) in tissue is constant during constant-load exercise and that the respiratory exchange ratio at the mouth level is equal to the RQ during the steady-state phase. Excess CO₂ output was observed at levels of WR greater than 40% WRmax after initial CO₂ storage, where $\dot{V}_{CO_2}/\dot{V}_E$ decreased gradually as though in parallel with the kinetics of CO₂ storage. $\dot{V}_{O_2}/\dot{V}_E$, however, appeared to be constant after the initial peak. These data suggest that $\dot{V}_E$ is closely correlated with $\dot{V}_{O_2}$ rather than $\dot{V}_{CO_2}$ during constant-load exercise, indicating that excess CO₂ output to compensate lactate production is independent of hyperventilation.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1991, 40 : 437~446)

key words : exercise, excess CO₂, hyperventilation, gas exchange kinetics

I. 緒 言

換気閾値 (VT) は、漸増運動中の分時換気量 ($\dot{V}_E$) および二酸化炭素排出量 ($\dot{V}_{CO_2}$) の非直線的な上昇点として定められている^{16,17)}。これは当初、「組織での低酸素状態→乳酸産出→換気高進→CO₂の過剰排出(乳酸の緩衝)」という図式で説明されてきた。これら一連の過程の中で、産出された乳酸が呼吸性の緩衝を受けるという立場にたてば、血中乳酸の蓄積時には $\dot{V}_E$ の増大によって $\dot{V}_{CO_2}$ が調節され、結果的に P_{ETCO_2} が一定に保たれることが必要になる。この局面は isocapnic buffering phase と呼ばれており、乳酸の緩衝を

意味するいわゆる「真の AT」を判定するためには重要な現象であるとみなされている^{16,20)}。

しかしながら、最近この図式に対していくつかの観点から疑問が投げかけられるようになってきた。例えば、「低酸素→乳酸」^{4,5)}あるいは「乳酸→換気高進」^{7,10)}という因果関係に対しては、多くの反証が報告されている。さらに、著者ら(1990)¹³⁾は、ランブ運動の負荷漸増率が緩徐になるにしたがって過剰 $\dot{V}_{CO_2}$ が少なくなり、2 W/minの漸増率では呼吸交換比(RER)の増大も見られないことを報告した。もしもこのとき、 $\dot{V}_{CO_2}$ と同様に $\dot{V}_E$ も急増しないのであれば、上記の現象は「乳酸→換気高進→CO₂の過剰排出」という図式によって

*早稲田大学人間科学部

〒359 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15

** (財)パブリックヘルスリサーチセンター

〒169 東京都新宿区西早稲田1-1-1 ヨートー早稲田ビル

School of Human Sciences, Waseda University

Mikajima, Tokorozawa, Saitama, 359

Public Health Research Foundation

Nishiwaseda 1-1-1, Shinjuku, Tokyo, 169

一元的に理解することも可能である。しかし, このような定常状態に近いゆっくりとした漸増運動の場合にも $\dot{V}_E$ は急上昇し, その急上昇が起こる強度は通常の漸増運動と同様であることが知られている⁹⁾。

すなわち, 「負荷強度に対する $\dot{V}_E$ の応答は漸増率の大小にかかわらず同様であるが, $\dot{V}_{CO_2}$ の応答については漸増率の影響を受ける」ということである。それゆえ, このことは換気高進と CO_2 過剰排出との間にも因果関係がないことを示唆するものである。しかし, 今までこの点に関してはあまり問題視されてこなかった。これは, 乳酸の産出と換気の高進さらには HCO_3^- による緩衝とを結びつけるためには, 換気と $\dot{V}_{CO_2}$ との関連すなわち「isocapnic buffering phase」の存在を前提としなければならなかったからであると思われる。

一方, Whipp (1987)²¹⁾ および Casaburi ら (1989)³¹⁾ は, 高強度の一定負荷運動における $\dot{V}_{CO_2}$ の応答を決定する要因として, 1) $\dot{V}_{O_2}$ の緩徐な増大に符合した有酸素的な CO_2 の産出, 2) 活動筋から産出された乳酸を緩衝するための運動初期の急激な CO_2 の排出, 3) 過換気による CO_2 排出の3つをあげている。このうち, 後者2つが過剰 CO_2 を意味するものであるが, ここでさらに問題となるのは, 果たしてこの両者が対応しているものなのか, それとも独立した調節現象であるのかということであろう。彼らが用いた一定負荷運動は, 漸増運動とは明らかに様式が異なっているものの, 過渡状態が継続する漸増運動よりも, 運動中の $\dot{V}_E$ と $\dot{V}_{CO_2}$ との対応を明瞭にする上では好都合であったと思われる。

そこで, 本研究では, 一定負荷運動における $\dot{V}_{O_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$, $\dot{V}_E$ の動態を観察することによって, 換気の高進と CO_2 の過剰排出の機序と両者の対応関係を検討し, 漸増運動中にみられる $\dot{V}_E$ の非直線の上昇と $\dot{V}_{CO_2}$ の過剰排出とが異なる機序で出現する可能性を示すことを目的とした。

II. 方 法

被験者は, 喫煙習慣のない健康成人男子5名で

あり, 彼らの年齢, 身長, 体重は各々 27.6 ± 5.2 歳 (平均値 $\pm$ SD, 以下同), 173.6 ± 4.6 cm, 66.9 ± 6.4 kg であった。全ての被験者に対して, 実験の主旨, 内容および危険性について説明をし, いつでも実験を辞退できることを理解させた上で, 実験参加の同意を得た。

運動には, 電磁ブレーキ式自転車エルゴメーター (エルゴメーター 232 C, コンビ) を用いた。全ての被験者は, 一回のランプ負荷運動と, 6種類の負荷での最大下運動を行なった。ランプ負荷運動は, 2分間の 0 W ペダリング (空こぎ) の後に, 2秒間に 1 W (30 W/分) の漸増率で疲労困憊に至るまで行うものであった。ここで使用したエルゴメーターは, 指定された仕事率が維持されるようにペダル回転数に合わせて負荷抵抗を調節するように作成されているが, 被験者には概ね 60 rpm を維持するように指示した。検者による激励にもかかわらずペダルの回転数が 40 rpm 以上を維持することができなくなった時点を疲労困憊と判断した。

最大下一定負荷運動の強度は, 疲労困憊時の負荷強度 (WRmax) の 20, 40, 50, 60, 70, および 80% とした。被験者は, 2分間の空こぎの後に, 引続いて各々の負荷強度で 10分間運動した。被験者には, ランプ負荷運動と同様に, 60 rpm を維持するように指示したが, ペダルの回転数が 40 rpm 以上を維持することができなくなった場合を疲労困憊と判断して, 運動を終了させた。なお, 被験者には, 運動の2時間前から飲食を禁じた。

運動中の肺換気動態はブレスバイブレスで計測された。用いた装置は, ミナト医科学社製のガス分析器 (MG-300) および呼吸モニター (RM-300) であった。被験者が装着するマスクの先端に熱線流量計を固定して, 吸・呼気流量を計測し, また, 熱線流量計の開口部上方から約 230 ml/min の流量でサンプルガスを吸引して, O_2 および CO_2 濃度を計測した。ここで用いられているセンサは, ジルコニア式 O_2 センサおよび赤外線 CO_2 センサであった。

本研究で用いた呼吸分析計は, ガスセンサ応答を一次遅れ系で同定して濃度信号を補正し, サン

ブル部からセンサまでのむだ時間を差引いた後に流量信号と積算することによって、呼吸気中の O_2 および CO_2 量を一呼吸ごとに算出しようとしている。このような計測法は一般的ではあるが、一分間の $\dot{V}_E$, $\dot{V}_{O_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$ などを求めようとする場合には、ダグラスバッグ法あるいはミキシングチャンバー法などに比べて精度が劣ることは避けられない。しかし、本研究では、このような精度の低下を最小限に止めるために、1) ガスセンサの定常ゲインの較正、2) 定量シリンジによる流量計の較正、3) サンプル流量の計測によるセンサむだ時間の補正、4) エルゴメーター駆動に熟練した被験者が一定負荷運動を行なった際の計測データの確認、を適宜行なうことによって機器の管理を行った。

ランブ負荷運動の肺換気データから、2種類の方法を用いて各被験者の VT を求めた。第一の手法は2名の判定者の視認によるもの(視認法)であり、第二の手法は $\dot{V}_{CO_2}$ - $\dot{V}_{O_2}$ プロットの二直線回帰によって残差が最少となる二直線の交点を求めるもの(V-slope 法)¹¹⁾である。視認法の判定指標としては、換気変量の時系列グラフにおける $\dot{V}_E$ の非直線の上昇、 $\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$ の上昇を伴わない $\dot{V}_E/\dot{V}_{O_2}$ の上昇、 P_{ETCO_2} の低下を伴わない P_{ETCO_2} の上昇、呼吸数の上昇あるいは上昇率の急増の4つ^{2,6,12,16,17)}を用い、それらの指標を同時に視認したうえで総合的に判定した。

このような総合判定法は、先行研究の中にも多数報告されているが、その具体的基準は示されておらず、追試が不可能な場合が多い、本研究でも、判定者の主観的基準に準拠しているという点で、追試は不可能であるが、その曖昧さを最小限にするために、両判定者が別個に判定し、その結果が異なる例については、個々の変量の屈曲点を別個に定めた上で、最も多くの指標の屈曲が認められる点を VT と判定した。結果についての先見を与えないように、視認法による判定は V-slope 法に先立って行なわれた。

V-slope 法についても、Wasserman ら(1987)²⁰⁾が記しているように、低強度と高強度のデータを判定者の主観に基づいて排除しているので、厳密

な意味では追試が不可能であるが、前述の判定者のうち一名が $\dot{V}_{CO_2}$ - $\dot{V}_{O_2}$ プロット上に視認した屈曲点と概ね一致していることを確認したうえで、V-slope 法による VT とした。

前者については、VT と判定された時点での WR, $\dot{V}_{O_2}$ を算出した。後者については、決定される指標が $\dot{V}_{CO_2}$ - $\dot{V}_{O_2}$ プロット上の交点に対応する $\dot{V}_{O_2}$ であるので、その際の WR は一意には定まらない。そこで、その $\dot{V}_{O_2}$ の $\pm 5\%$ 以内の $\dot{V}_{O_2}$ を示したプレス時の WR の平均値として求めた。また、終了直前の30秒間の肺換気データを平均して、疲労困憊時の値(以下、peak 値)とした。

代謝以外の要因に起因する CO_2 排出量(CO_2 の過剰排出量)を、Yano(1986)²²⁾の方法に準じて、1) 組織での呼吸交換比(RQ)が運動中一定に保たれる、2) 定常状態では口腔レベルでの呼吸交換比(RER)が RQ と等しくなる、という2つの仮定のもとで算出した。すなわち、一定負荷運動終了直前30秒間の RER を RQ とみなして、一定負荷運動開始後の $\dot{V}_{O_2}$ と $\dot{V}_{CO_2}$ とから、「過剰 $CO_2 = \dot{V}_{CO_2} - RER \times \dot{V}_{O_2}$ 」として算出した。

ただし、各々の被験者の VT を超える強度に関しては、運動開始 8~10分間の $\dot{V}_{O_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$, $\dot{V}_E$ のブレスバイブレスデータについて時間に対する回帰を施し、そのいずれか一つの変量の相関が 1% 水準で有意に正であった場合については、定常が得られていないと判断して、この処理から除外した。ここで算出される CO_2 過剰排出量は単位時間あたりの値であり、これが正の時には体内の CO_2 store が減少していることを意味し、負の場合には CO_2 store が増加していることを意味している^{11,12)}。そこで、次式の様に、運動中の CO_2 過剰排出量を符合を変えて積算することによって、運動開始時点からの CO_2 store の変化分とした。

$$CO_2 \text{ store} = \sum (-\text{過剰 } CO_2)$$

III. 結 果

表1に、各被験者の VT, peak 値および各々の一定負荷運動での継続時間を示した。60%WR max 以下の強度での一定負荷運動については、全ての被験者は10分間継続することが可能であっ

Table 1. Ventilatory threshold and peak values during incremental exercise, and exercise duration of constant load exercise.

subj.	VT				peak				Exercise Duration		
	WR (W)		$\dot{V}_{O_2}$ (l/min)		WR (W)	$\dot{V}_{O_2}$ (l/min)	$\dot{V}_{CO_2}$ (l/min)	$\dot{V}_E$ (l/min)	20~60% WRmax	70% WRmax (sec)	80% WRmax
	eye	V-slope	eye	V-slope							
E O	95	68	1.27	1.22	240	2.89	3.35	102.6	600	600	329
H H	112	124	1.66	1.65	310	3.96	4.30	143.3	600	600	395
Y N	126	79	1.68	1.28	290	3.50	3.99	164.6	600	600	306
H T	124	99	1.49	1.29	290	2.91	3.62	124.8	600	600	230
K T	80	69	1.09	1.01	190	2.14	3.07	119.6	600	330	267
mean	107	88	1.44	1.29	264	3.08	3.67	131.0	600	546	305
S D	20	24	0.25	0.23	49	0.69	0.49	23.7	0	121	63

た。VT 出現時の WR および $\dot{V}_{O_2}$ の peak 値に対する割合は、熟練した判定者の視認による方法と二直線回帰法とで、各々 $40.8 \pm 3.0\%$ WRmax と $33.2 \pm 5.4\%$ WRmax, ならびに $47.2 \pm 4.2\%$ $\dot{V}_{O_2}$ max と $42.4 \pm 3.9\%$ $\dot{V}_{O_2}$ max であり、ともに平均値では有意差がみられなかった。ただし、個人毎にみると、被験者 HH を除いては視認法によって決定された VT が WR, $\dot{V}_{O_2}$ ともに高く、その差は最高 (被験者 YN) で 47 W (37%), 0.4 l/min (24%) にも達した。

図 1 に、20, 40, 50, 60, 70, 80% WRmax の各々の強度での一定負荷運動時の $\dot{V}_{O_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$, $\dot{V}_E$ を示した。まず、各被験者毎に 30 秒毎の平均値を算出し、各人の peak 値に対する割合を求めた。図に記されているのは、各強度での被験者間の平均値である。ただし、70% WRmax 以上の強度については全被験者が完了できた継続時間まででプロットを打切っている。なお、縦軸は各被験者の疲労困憊時のデータに対するパーセントを表わしており、空こぎ時の $\dot{V}_{O_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$, $\dot{V}_E$ は、それぞれ peak 値の 13.6 ± 3.5 , 17.4 ± 2.0 , $12.3 \pm 1.6\%$ であった。

$\dot{V}_{O_2}$ についてみると、20% WRmax では運動開始後 2 分程度で一定の値に達しており、その終了時の値は peak 値の $33.8 \pm 3.8\%$ であった。これに対して、40, 50% WRmax では 3 分経過後も徐々に増加を続け、60% WRmax では一定値に落ち着くのが運動開始後 7 分あたりであった。さらに、

Fig. 1. The kinetics of $\dot{V}_{O_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$, and $\dot{V}_E$ at the various intensities of work load. The symbols of $\circ$, $\square$, $\triangle$, $\bullet$, $\blacksquare$, and $\blacktriangle$ represent 20, 40, 50, 60, 70, and 80% of the individual maximal work rate (WRmax), respectively.

70%WRmax 以上の負荷では、一定の値に落ち着くことなく、終了時までゆっくりと上昇していた。40, 50, 60, 70%WRmax の10分目の値(被験者 KT の70%WRmax のデータを除く)はそれぞれ、peak 値の 58.2 ± 5.6 , 66.9 ± 6.2 , 84.2 ± 8.9 , $93.0 \pm 6.8\%$ であった。80%WRmax では全ての被験者が途中で継続不能になったが、その終了時の $\dot{V}_{O_2}$ は peak 値の $96.2 \pm 4.6\%$ であり、おおむね疲労困憊時の値にまで達していた。

$\dot{V}_{CO_2}$ についてみると、60%WRmax 以下の負荷では、運動開始後3分程度で一定の値に達していた。また、70%WRmax の負荷においても、被験者 KT が途中終了した5分30秒の時点まで、全被験者の平均値は3分目の値と同等であった。この終了時の値は20, 40, 50, 60, 70%WRmax の負荷に対してそれぞれ、peak 値の 25.0 ± 2.0 , 44.2 ± 5.1 , 51.2 ± 4.6 , 66.1 ± 11.1 , $81.0 \pm 9.3\%$ であった。一方、80%WRmax の負荷での終了時の $\dot{V}_{CO_2}$ は、peak 値の $92.6 \pm 10.3\%$ に達していた。

$\dot{V}_E$ についてみると、20, 40, 50%WRmax では運動開始後3分程度で、60%WRmax では7分

程度で、それぞれ一定の値に達していた。その終了時の値はそれぞれ、peak 値の 21.7 ± 2.7 , 39.2 ± 7.3 , 45.6 ± 7.8 , $65.0 \pm 19.0\%$ であった。これに対して、70%WRmax 以上の負荷では、一定の値に落ち着くことなく、終了時までゆっくりと上昇した。70%WRmax の10分目の値(被験者 KT のデータを除く)と80%WRmax の終了時の値はそれぞれ、peak 値の 86.8 ± 25.0 と $104.3 \pm 20.9\%$ であった。

図2は、各負荷での CO_2 過剰排出(負の部分は CO_2 の排出不足を表わす)の推移と体内の CO_2 store (負の部分は CO_2 shortage) 変化、さらにそれに対応する $\dot{V}_{CO_2}/\dot{V}_E$ および $\dot{V}_{O_2}/\dot{V}_E$ の推移を示したものである。実線は5名の被験者の平均値、破線はその標準偏差を示している。ただし、60%WRmax の負荷については、前述の条件によって1名(被験者 HT)のデータが取り除かれている。また、70%WRmax の負荷については、条件を満たしたものが2名だけであったため、分析の対象から除外した。

20%WRmax の場合には、運動開始直後に CO_2

Fig. 2. The time courses of excess CO_2 , CO_2 store, and ventilatory efficiencies for O_2 and CO_2 . The real line (—) and the broken lines (.....) represent the mean and the standard deviations for five subjects, respectively.

の排出不足が生じるものの、運動中に CO_2 の過剰排出を生じることはなく、3分目以降は代謝による CO_2 産出と肺からの CO_2 の排出量とが釣りあっていた。これに対して、40%WRmax 以上の強度の場合には、運動開始直後の CO_2 の排出不足は各々に認められるものの、1分目から逆に CO_2 の過剰排出が生じ、2～3分でピークに達した後、過剰排出が徐々に減少していった。

CO_2 排出の過不足と $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ との変化を対応させると、 CO_2 の排出不足が起こる局面では $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ が急上昇するのに対して、40%WRmax 以上の強度での CO_2 の過剰排出の局面では $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ が徐々に低下していった。体内での CO_2 store の増減に関しては、20%WRmax については運動初期に CO_2 store が上昇して3分程度で最大に達しているが、40%WRmax 以上の強度では、1～2分で最大に達した後には低下している。ここで、その増減の時期だけに着目すれば、 CO_2 store が増加する局面では $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ が増加し、 CO_2 store が減少する局面では逆に $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ は減少していることが明らかである。すなわち、一定負荷運動中の $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ の推移は、体内の CO_2 store の推移と対応しているように思われた。

IV. 論 議

本研究では Yano(1986)²²⁾ の方法に準じて、運動終了時の $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ が全て代謝由来であるとみなして、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ から $\dot{V}_{\text{O}_2}$ と運動終了時 RER との積を差引くことによって、代謝以外に起因する CO_2 の過不足を求めようとした。ここでは、前述したように2つの仮定が前提とされているが、これらは必ずしも一般的な了解事項ではない。しかしながら、以下に述べる理由から、この方法によっても特に誤った解釈が導かれる可能性は少ないものと思われる。

まず、第一の仮定である組織での運動時呼吸商については、Hughson ら(1985)¹¹⁾は運動開始時の RQ の応答について、①時定数45秒で指数関数的に上昇する、②開始直後に定常値に達する、③開始直後に1.0 となってその後指数関数的(時定数45秒)に定常値に達する、という3つのモデルを

仮定し、さらに、運動開始時の CO_2 蓄積についての検討では、その推定値自体がモデルによって異なり、①が最も少なく、③が上限を与えるものと報告している。本研究では3つのモデルの中の中間的な値を示すという理由で②のモデルを用いた。しかし、利用するモデルによって過剰 CO_2 の計算値が異なることから、その絶対値自体を問題にすることは困難であるかもしれない。ただし、彼らは同じ論文の中で、強度に応じて CO_2 store が低下していること、および、その時間的な推移についてはモデル間に差異がないことも示している。したがって、過剰 CO_2 あるいは CO_2 store の絶対値を問題にするのでなければ、特に大きな問題はないと考えられる。

第二の仮定は、運動終了時の定常性であるが、本研究では、運動終了前2分間の $\dot{V}_{\text{O}_2}$ 、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ 、 $\dot{V}_E$ が有意な増加を示したもののについては定常性を疑って処理対象から除外している。しかし、その条件を満たした場合でも、完全に定常であると断定するわけにはいかない。なぜなら、本研究に参加した被験者の場合、50%WRmax 以上の強度では全員が VT を上回っており、運動終了時にも過剰 CO_2 が継続していた可能性もあるからである。したがって、その際の RER が組織での RQ と全く等しいという保証はない。しかし、真の RQ は不明であるので、本研究では運動終了時の過剰 CO_2 が0 であるとして計算したものである。ただし、もし運動終了時に過剰 CO_2 があった場合、本研究の便宜的な計算によって、過剰 CO_2 については過小評価、 CO_2 store については過大評価をすることになる。それゆえ、 CO_2 の過剰排出および CO_2 store の変化分については、この様な過誤評価の可能性に留意した上で結果を解釈することが必要であるかもしれない。

本研究では、いずれの負荷においても、運動開始直後には過剰 CO_2 が負となり、肺からの CO_2 排出が不足していることが示された(図2)。これは、RQ 推定のモデルにかかわらず観察されてきた¹¹⁾現象であり、運動初期の $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の応答が $\dot{V}_{\text{O}_2}$ よりも遅い¹⁹⁾ということからも理解できる。一方、2分目以降の過剰 CO_2 については、20%の負荷

強度ではほとんどゼロであるのに対して、40%以上の負荷の場合には一度正の値を示してから漸次低下していった。50%WRmax以上の強度の運動時の過剰CO₂については、先述の理由により、過小評価の可能性もあるが、その場合でも運動初期のある時点で負から正に転じることにまちがいはない。すなわち、このような強度の運動においては、2分目以降にCO₂の過剰排出が起こっているということであり、また、その過剰排出の程度は強度に応じて増大した。

一般にVTの出現する強度では、血中乳酸濃度は安静時より高いレベルにある^{1,8)}。それゆえ、50%WRmax以上の強度では運動開始直後に血中乳酸の蓄積が始まることは明らかであり、40%WRmaxの強度においても乳酸の蓄積が起こっていた可能性も高い。したがって、このようなCO₂の過剰排出が血中乳酸の緩衝と対応していると考え²¹⁾のは自然である。しかし、そのような過剰 $\dot{V}_{CO_2}$ が出現する局面において、 $\dot{V}_{CO_2}/\dot{V}_E$ の値が低下し続けていた。 $\dot{V}_{CO_2}/\dot{V}_E$ の変化について考える際には $\dot{V}_{CO_2}$ の応答と $\dot{V}_E$ の応答の双方について検討しなければならないが、例えば、図1の60%WRmaxの結果についてみると、 $\dot{V}_{CO_2}$ は運動開始後3分目以降はほぼ同一の値を保っているのに対して、 $\dot{V}_E$ は3分目以降も徐々に上昇している。すなわち、過剰CO₂がピークに達した3分目の時点では、 $\dot{V}_E$ は必ずしも十分には高進されていなかったということになる。

また、3分目以前の $\dot{V}_E$ と $\dot{V}_{CO_2}$ との対応に関しても、全ての強度において、運動開始直後に $\dot{V}_{CO_2}/\dot{V}_E$ が急増するという結果は、この間の $\dot{V}_{CO_2}$ の上昇が $\dot{V}_E$ の上昇率を上回っていることの現われである。すなわち、過剰CO₂は $\dot{V}_E$ の応答とは対応していないということになる。このことは、一定負荷運動初期に産出される血中乳酸がCO₂の過剰排出によって緩衝される際にも、 $\dot{V}_E$ の高進を伴う必要がないということを示唆するものである。

筋から血中に放出される乳酸の多くが重炭酸系によって緩衝されることは周知の事実である。この時、混合静脈血中CO₂含量($C_{\bar{V}CO_2}$)が同一であ

っても、緩衝の結果として「 $HCO_3^- + H^+ \rightleftharpoons CO_2 + H_2O$ 」の平衡が右方へ推移するために、静脈血 P_{CO_2} は増大する。したがって、静脈血と肺胞での P_{CO_2} 勾配が大きくなり、同一の $\dot{V}_E$ に対するCO₂の排出量すなわちCO₂の換気効率が増大することは予想される。このようなメカニズムを念頭におくと、乳酸の産出とその緩衝は、それ自体で $\dot{V}_{CO_2}$ の過剰排出の原因となり、必ずしも $\dot{V}_E$ の上昇を伴う必要はないということが理解できる。

一方、Whipp (1987)²¹⁾ および Casaburi ら (1989)³⁾は、一定負荷運動の $\dot{V}_{CO_2}$ 動態を検討する際に、代謝以外に由来するCO₂を緩衝CO₂と換気CO₂とに分離している。そこでは各々の機序については触れられていないが、上記のようなメカニズムを念頭におけば、CO₂の過剰排出に関してその両者は独立したものであることが理解できる。すなわち、一定負荷運動という条件の下では、乳酸を緩衝するためのCO₂の排出には換気の高進を伴わないということを認識することは不自然ではないといえよう。しかし、このことが漸増運動中にもあてはまるかどうかは、これまでの報告の中では必ずしも明らかにはされていなかった。

著者ら (1990)¹³⁾は、2 W/min という非常にゆっくりとした漸増率のランブ運動においては、CO₂の過剰排出がほとんど認められず、 $\dot{V}_{CO_2}-\dot{V}_{O_2}$ グラフにおける屈曲点の判定が不明瞭になるという結果を示した。しかし、2 W/min のランブ運動でも、負荷に対する血中乳酸の動態が10 W/minの場合と同等であることも示されている¹⁵⁾。したがって、血中乳酸の増加率は2 W/minの場合では10 W/minの場合の1/5ということになる。もし、肺胞からのCO₂の過剰排出が血中乳酸の増加率、すなわち HCO_3^- による緩衝の結果として増大する $C_{\bar{V}CO_2}$ によって影響されているのだとしたら、2 W/min のランブ運動時にはCO₂の過剰排出がほとんど認められないという結果も容易に解釈ができる。

しかしながら、負荷と $\dot{V}_E$ との関係も2 W/minと10 W/minとで同等であった¹⁵⁾。このことは、

漸増負荷運動中の CO_2 の過剰排出が $\dot{V}_E$ の高進だけに起因するという解釈を否定するものである。なぜなら、乳酸濃度の場合とは異なり $\dot{V}_E$ は単位時間当りの変量であることから、 $\dot{V}_E$ の高進が過剰 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ を誘因するのであれば、ランプの漸増率によらず過剰 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の動態が同等になるはずだからである。すなわち、高強度の一定負荷運動にみられる乳酸緩衝に起因する CO_2 の過剰排出が $\dot{V}_E$ と関連しないという本研究の結果は、一定負荷運動だけにみられる特徴的な現象ではなく、漸増負荷運動時にも出現するものであるということができよう。おそらく、漸増率の大きなランプ運動でみられる“isocapnic buffering”は、 $\dot{V}_E$ の高進と CO_2 の過剰排出との因果関係を示しているというよりも、むしろそのような条件下での両者の「一致」を示しているといったほうが無難である。

本研究の結果より、我々は運動中の $\dot{V}_E$ の高進と CO_2 の過剰排出とが必ずしも因果関係によって表出される現象ではないということを主張する。今まで、漸増運動中のこの両者の出現は、どちらも VT の徴候として同一視されることが多かった。一般に視認法による総合判定には $\dot{V}_E$, $\dot{V}_{\text{CO}_2}$, RER, $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{O}_2}$, $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{CO}_2}$, $P_{\text{ET}\text{O}_2}$, $P_{\text{ET}\text{CO}_2}$ の時系列グラフ、あるいは $\dot{V}_{\text{O}_2}$ に対するプロットが用いられる。このうち、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ と RER は CO_2 の過剰排出時点を特定するものであり、その他の判定指標は $\dot{V}_E$ の高進時点を特定するものである。ただし、このような総合判定では $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{O}_2}$ および $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の変化点が最も顕著に認識される²⁾といわれている。したがって、一般的な視認法による VT は、 $\dot{V}_E$ の急上昇点をとらえることが多くなる可能性がある。一方、Beaver ら (1986) によって提案された V-slope 法は、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ - $\dot{V}_{\text{O}_2}$ プロットの屈曲を判定するものであり、これによって決定された VT は、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の過剰排出点を特定していることになる。そこで、本研究ではあえてその両者の差異を論じるために、 $\dot{V}_E$ の高進だけを現わす変量によって VT を視認判定し、V-slope 法によって決定された VT と比較した。

もちろん、前者が主観的手法であるのに対して

後者は客観的手法であるという点で、後者の方が信頼性が高いと判断される¹⁾こともある。しかし、V-slope 法を提案した Beaver ら (1986)¹⁾ の論文で報告された個人値について見ると、視認法による VT と V-slope 法による VT との間には、最低でも 0.07 l/min, 10 名中 9 名については 0.18 l/min 以上の $\dot{V}_{\text{O}_2}$ 値の開きがあり、その差の割合は $11.3 \pm 3.1\%$ であった。そして、この両者の大小関係には特に一貫性はなく、被験者間の平均値には有意差がなかったと報告されている。

本研究でも、視認法によって判定された VT と V-slope 法によって判定された VT との間に平均値では有意な差は観察されなかったが、個々のデータについて見てみると、その差は $\dot{V}_{\text{O}_2}$ にして、0.05, 0.01, 0.40, 0.20, 0.08 l/min であった。このうち、 $\dot{V}_{\text{O}_2}$ の差が 0.2 l/min 以上である 2 名については、両判定法の判定誤差というにはあまりにも大きい。Beaver ら (1986) も、V-slope 法の判定例を示すにあたって、2 名の判定者の視認法による判定結果が WR にして 90 W, $\dot{V}_{\text{O}_2}$ にして 1 l/min 以上という事例を報告している¹⁾。一方、V-slope 法によって決定された値は、片方の判定者の値に近かった。

従来、このような判定者間の不一致は、VT を評価する上では許容されてはいなかったが、もし、漸増運動中の $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の急増時点と $\dot{V}_E$ の高進時点とが必ずしも一致しなくても構わないという認識に基づけば、両者の不一致も理解できる。おそらく、一方の判定者は $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の急増あるいは RER の増大に着目して VT を判定し、もう一方の判定者は $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{O}_2}$ あるいは $P_{\text{ET}\text{O}_2}$ の上昇に着目して VT を判定したのであろう。当然の事ながら、前者の判定結果は V-slope 法によるものとよく一致する。この事例に関しては、6 名の判定者の内 4 名が「判定不能」と回答したと記されているが、「 $\dot{V}_E$ の高進と $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の急増とが一致する」という先入見があれば、そのどちらかを特定できないのもやむを得ない。もし、両判定基準を別個に評価することを許容したとしたら、全判定者がほぼ同等の 2 時点をそれぞれの閾値であると判定したものと推測される。

Fig. 3. Ventilatory efficiency for CO_2 related to the exercise intensity. (A) $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ during incremental exercise, (B) $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ at the transition phase of constant load exercise, and (C) $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ at the steady-state phase of constant load exercise. Each symbol represents the mean value for five subjects and the vertical lines represent the standard deviation. In (B) and (C), each pair of the adjacent symbols was connected by broken line because the respective data were obtained from the separate trials, while the data of (A) were obtained from the continuous trial for each subject.

図3 Aは、漸増負荷運動中の $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ を強度に対して示したものである。符合は被験者間の平均値、縦線は標準偏差を示している。また、この図は連続する試行のデータを人為的に区分して算出したものであるため、符合の間を実線で結んだ。これは全被験者の平均値であるために、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ が一定値を保つという、いわゆる isocapnic buffering の徴候は隠されてしまっている。一方、一定負荷運動において、8～10分のデータがおおむね一定であると見せた 70%WRmax 以下の

強度の事例（被験者 KT の70%を除く）について、その間の $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ を強度に対してプロットしたのが図3 Cである。明らかに、各強度に対する定常値と漸増運動中の値とは対応していない。しかし、一定運動中の1分目の $\dot{V}_{\text{CO}_2}/\dot{V}_E$ を強度に対してプロットすると図3 Bのようになり、その傾向は漸増運動中のものとはほぼ一致していた。

もちろん、同じ非定常状態とはいっても、漸増運動と一定運動の過渡期とは条件が異なり、傾向が一致したといっても単なる「類似」以上のものではないかもしれない。しかし一方で、漸増運動中に観察されるデータが、ある非定常状態の継続的推移を表出したものに過ぎないということを強調するには十分であろう。もし、漸増運動中に得られるデータが、単なる過渡的応答の連続に過ぎないとしたら、たとえば、その漸増率といった条件の変化によって、異なった結果を現わす¹³⁾としても不思議ではない。

要約すると、本研究は一定負荷運動中の $\dot{V}_E$ の高進と $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の過剰排出とが必ずしも対応していないことを示している。血中乳酸の上昇はそれ自体で過剰 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の要因となり、 $\dot{V}_E$ の高進を伴う必要はないと言える。この解釈が漸増運動中にも適用できるとしたら、VT の機序についての従来の認識に新たな視点を投じるものである。つまり、 $\dot{V}_E$ の高進として判定される VT と $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の過剰排出開始時点として判定される VT とが異なる指標であるかもしれないということである。

また、漸増運動中の $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の応答は、一定運動中の定常値を反映しているというよりも、過渡期の値を反映しているようにみうけられた。漸増運動中の $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{CO}_2}$ が単なる過渡的応答の連続に過ぎないとしたら、そこで得られた種々の変量の閾値状現象は、もしそれが異なる機序で発現するものであったとしても、あたかも同時に出現しているかのように観察されることもあると言えよう。従来、換気の増加によって決定された VT^{8, 14, 16)}と $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の過剰排出によって決定された VT¹¹⁾とは、同一のものであると認識されていたが、そのメカニズムは必ずしも同一なものであるとは思われない。

本論文の執筆に際し、草稿を熟読したうえで貴重なご示唆を戴いた加賀谷淳子教授（日本女子体育大学）に対し、感謝の意を表します。

(受付 平成2年11月10日)

文 献

- 1) Beaver, W. L., Wasserman, K. and Whipp, B. J. (1986) : A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J. Appl. Physiol.*, **60**, 2020-2027.
- 2) Caiozzo, V. J., Davis, J. A., Ellis, J. F., Azus, J. L., Vandagriff, R., Pietto, C. A. and McMaster, W. C. (1982) : A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **53**, 1184-1189.
- 3) Casaburi, R., Barstow, T. J., Robinson, T. and Wasserman, K. (1989) : Influence of work rate on ventilatory and gas exchange kinetics. *J. Appl. Physiol.*, **67**, 547-555.
- 4) Connett, R. J., Gayeski, T. E. J. and Honig, C. R. (1984) : Lactate accumulation in fully aerobic, working, dog gracilis muscle. *Am. J. Physiol.*, **246**, H 120-H 128.
- 5) Connett, R. J., Gayesky, T. E. J. and Honig, C. R. (1985) : Energy sources in fully aerobic rest-work transitions : a new role for glycolysis. *Am. J. Physiol.*, **248**, H 922-H 929.
- 6) Davis, J. A. (1985) : Anaerobic threshold : review of the concept and directions for future research. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **17**, 6-18.
- 7) Farrell, S. W. and Ivy, J. L. (1987) : Lactate acidosis and the increase in $\dot{V}_E/\dot{V}_{O_2}$ during incremental exercise. *J. Appl. Physiol.*, **62**, 1551-1555.
- 8) 福場良之, 磨井祥夫, 笹原英夫, 菊池邦雄 (1984) : 換気性 anaerobic threshold 決定法開発の試み. *体力科学*, **33**, 213-216.
- 9) Green, H. J., Hughson, R. L., Orr, G. W. and Ranney, D. A. (1983) : Anaerobic threshold, blood lactate, and muscle metabolites in progressive exercise. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **54**, 1032-1038.
- 10) Hagberg, J. M., Coyle, E. F., Carroll, J. E., Miller, J. M., Martin, W. H. and Brooke, M. H. (1982) : Exercise hyperventilation in patients with McArdle's disease. *J. Appl. Physiol.*, **52**, 991-994.
- 11) Hughson, R. L. and Inman, M. D. (1985) : Gas exchange analysis of immediate CO₂ storage at onset of exercise. *Respir. Physiol.*, **59**, 265-278.
- 12) James, N. W., Adams, G. M. and Wilson, A. F. (1989) : Determination of anaerobic threshold by ventilatory frequency. *Int. J. Sports Med.*, **10**, 192-196.
- 13) 中村好男, 玉木啓一, 村岡 功 (1990) : V-slope 法による換気閾値決定における負荷漸増率の重要性. *体力科学*, **39**, 282-283.
- 14) Orr, G. W., Green, H. J., Hughson, R. L. and Bennett, G. W. (1982) : A computer linear regression model to determine ventilatory anaerobic threshold. *J. Appl. Physiol.*, **52**, 1349-1352.
- 15) Shinohara, M., Nakamura, Y., Yamamoto, Y., Chikada, M., Mutoh, Y. and Miyashita, M. (1990) : Blood lactate and catecholamines in relation to ventilatory threshold studied by very slow ramp exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **22**, S99.
- 16) 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.
- 17) Wasserman, K. and Whipp, B. J. (1975) : Exercise physiology in health and disease. *Am. Rev. Respirat. Dis.*, **112**, 219-249.
- 18) Wasserman, K., Hansen, J. E., Sue, D. Y. and Whipp, B. J. (1986) : Principle of exercise testing and interpretation. Lea & Febiger, Philadelphia.
- 19) Whipp, B. J., Ward, S. A., Lamarra, N., Davis, J. A. and Wasserman, K. (1982) : Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **52**, 1506-1513.
- 20) Whipp, B. J. (1983) : Exercise hyperventilation in patients with McArdle's disease (Letter to the Editor). *J. Appl. Physiol.*, **55**, 1638-1639.
- 21) Whipp, B. J. (1987) : Dynamics of pulmonary gas exchange. *Circulation*, **76**, suppl. VI, 18-28.
- 22) Yano, T. (1986) : Immediate CO₂ storage capacity at the onset of exercise. *Jpn. J. Physiol.*, **36**, 1241-1252.