

運動時の換気応答と呼吸の entrainment の検討

工 学 院 大 学 大 藪 由 夫

(共同研究者) 国 際 武 道 大 学 佐 藤 み ど り

千 葉 大 学 本 田 良 行

Studies on Ventilatory Response in Relation with Respiratory Entrainment during Bicycle Ergometer Exercise

by

Yoshio Ohyabu

Kogakuin University

Midori Sato

International Budo University

Yoshiyuki Honda

Chiba University

ABSTRACT

To clarify possible affection of respiratory entrainment to hyperpnea during moderate exercise, bicycle exercises with three different pedalling rates (35, 60, 80rpm) with equal oxygen consumption were conducted.

Twelve normal subjects (one man and 11 women) were studied the ventilatory responses during moderate exercises in room air breathing or progressive isocapnic hypoxia.

The results were as follows:

1) Respiratory frequency during exercises (60, 80rpm) in six subjects was higher than of 30rpm exercise in room air breathing. Accordingly, respiratory responses of these six subjects (entrainment group) were compared with that of the other six subjects (non-entrainment group).

2) Minute ventilation in room air breathing in the entrainment group was also larger than that of the non-entrainment group during exercises (60, 80rpm). At 80rpm exercise, significant difference was seen between

two groups.

3) Significant difference between two groups was still found in respiratory frequency in hypoxia (at P_{ETO_2} 50mmHg) during 80rpm exercise.

4) It is suggested that respiratory entrainment is likely to affect the ventilatory response during exercise and rate of rhythmic movement during exercise must be considered in the studies of exercise hyperpnea.

緒 言

運動中の呼吸は、しばしばその身体運動の影響を受けて変化することは経験的によく知られている。すなわち身体運動に同調してみられる呼吸の変化は、“呼吸の entrainment” と言われており、舞踊、体操、剣道、ヨーガ、水泳、陸上中長距離走等の領域では、それらの身体運動と呼吸の entrainment の関係が深い関心をもって論じられている。

ところで運動中に観察される換気亢進は、今日までさまざまな方向から検討が加えられてきているが、そのメカニズムの解明は、未だ完全にはなされていない。

本研究は、そのような運動中の換気亢進に対す

る運動リズムの関与を解明する手がかりとして行なわれた。すなわち酸素摂取量一定の条件下で3種類の異なったリズムの運動を行なわせ、空気呼吸及び低酸素下での呼吸の entrainment の換気応答への影響を検討した。

研究 方 法

対象：健常成人男女12名（男1名，女11名）であり，その身体的特徴は，表1に示した。

実験方法：被験者には，自転車エルゴメータによる3種類の異なったリズムの運動（35，60，80 rpm）を行なわせた。なおその際の抵抗負荷は，いずれの運動時の酸素摂取量も同一となるよう，あらかじめ予備実験から算出した値（2.0，1.0，0.5kp）にそれぞれ調整した。

表1 Physical characteristics of the subjects.

Subj.	Age (yrs)	Weight (kg)	Height (cm)	$\dot{V}O_2$ at rest (ml/min)	Sex
1 Y.O.	35	75.0	170.0	272	Male
2 M.S.	29	55.0	163.0	294	Female
3 A.N.	18	61.0	166.5	317	Female
4 K.N.	18	57.0	160.0	273	Female
5 Y.H.	19	58.0	162.0	232	Female
6 J.S.	18	56.0	164.0	325	Female
7 T.F.	19	50.0	157.0	297	Female
8 T.T.	19	64.0	164.0	348	Female
9 Y.M.	18	58.0	164.0	307	Female
10 M.Y.	18	62.0	160.5	301	Female
11 H.K.	18	63.0	158.0	351	Female
12 N.A.	18	47.0	157.0	372	Female
Mean±SD	20.6±5.5	58.8±7.2	162.2±3.9	307±39	

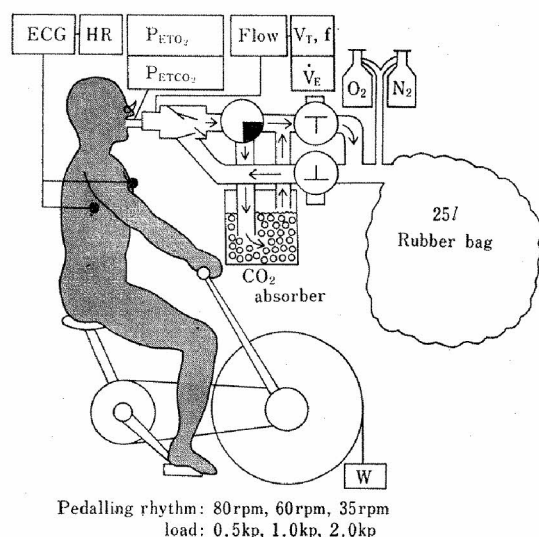


図1 Set up of the experiment
Ventilatory responses were measured by progressive hypoxia

運動は、空気呼吸下で5分間継続実施した。さらにその後、progressive hypoxia 下で続行させ、終末呼気酸素分圧 (P_{ETO_2}) が 50mmHg に到達した時点で停止した。また低酸素実験中の終末呼気炭酸ガス分圧 (P_{ETCO_2}) は、空気呼吸時の値を維持した。

測定項目：運動中の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) は、いずれも空気呼吸下での運動開始3分目から5分目の計2分間の呼吸をダグラスバッグに採集し、測定した。 P_{ETO_2} 及び P_{ETCO_2} は、呼気ガスモニター (三栄) により、一回換気量 (V_T)、呼吸数 (f)、分時換気量 ($\dot{V}_E$) は、熱線流量計 (ミナト) で測定した。

結 果

図2は、本実験で得られた記録波形である。Subj. J.S では、空気呼吸時の呼吸数は、ペダル回転数の多い 80rpm 時のほうが 35rpm 時よりも多い傾向を示した。またこの傾向は、低酸素下でも継続された。一方、Subj. Y.M も、空気呼吸時では 80rpm 時の呼吸数が 35rpm 時のそれよりも多い傾向を示した。しかし低酸素による呼吸の drive が生じた状態では、80rpm 時と 35rpm 時の呼吸数には顕著な差を認めなくなった。

1. ペダル回転数別にみた呼吸応答の検討

空気呼吸時の呼吸応答：表2は、ペダル回転数別に空気呼吸時での呼吸数、 P_{ETCO_2} 、 P_{ETO_2} 、分時換気量、酸素摂取量をそれぞれの平均値と標準偏差で示した。すなわち呼吸数 (回/分) は、それぞれ 24.8 ± 7.9 (80rpm), 24.8 ± 4.5 (60rpm), 23.4 ± 6.7 (35rpm) であり、いずれの回転数においてもほぼ同様の値が得られた。 P_{ETCO_2} 及び P_{ETO_2} (mmHg) は、それぞれ 43.6 ± 4.2 , 104.0 ± 6.7 (80rpm), 42.5 ± 3.9 , 104.0 ± 5.7 (60rpm), 43.5 ± 3.3 , 102.1 ± 4.7 (35rpm) であり、いずれの group 間にも顕著な差を認めなかった。

また分時換気量 (l/min) は、それぞれ 25.9 ± 7.2 (80rpm), 25.8 ± 4.6 (60rpm), 24.7 ± 4.0 (35rpm) であり、いずれの group 間にも顕著な差をみなかった。さらに酸素摂取量 (l/min) は、それぞれ 1.091 ± 0.242 (80rpm), 1.101 ± 0.147

表2 Respiratory responses during pedalling exercises.

Pedalling rate	Air breathing				
	f (l/min)	P_{ETCO_2}	P_{ETO_2}	$\dot{V}_E$ (l/min)	$\dot{V}O_2$ (l/min)
80rpm	24.8 ± 7.9	43.6 ± 4.2	104.0 ± 6.7	25.9 ± 7.2	1.091 ± 0.242
60rpm	24.8 ± 4.5	42.5 ± 3.9	104.0 ± 5.7	25.8 ± 4.6	1.101 ± 0.147
35rpm	23.4 ± 6.7	43.5 ± 3.3	102.1 ± 4.7	24.7 ± 4.0	1.106 ± 0.137

Values are mean $\pm$ SD f, respiratory frequency P_{ETCO_2} , P_{ETO_2} : mmHg,
 $\dot{V}_E$: minute ventilation, $\dot{V}O_2$: oxygen uptake

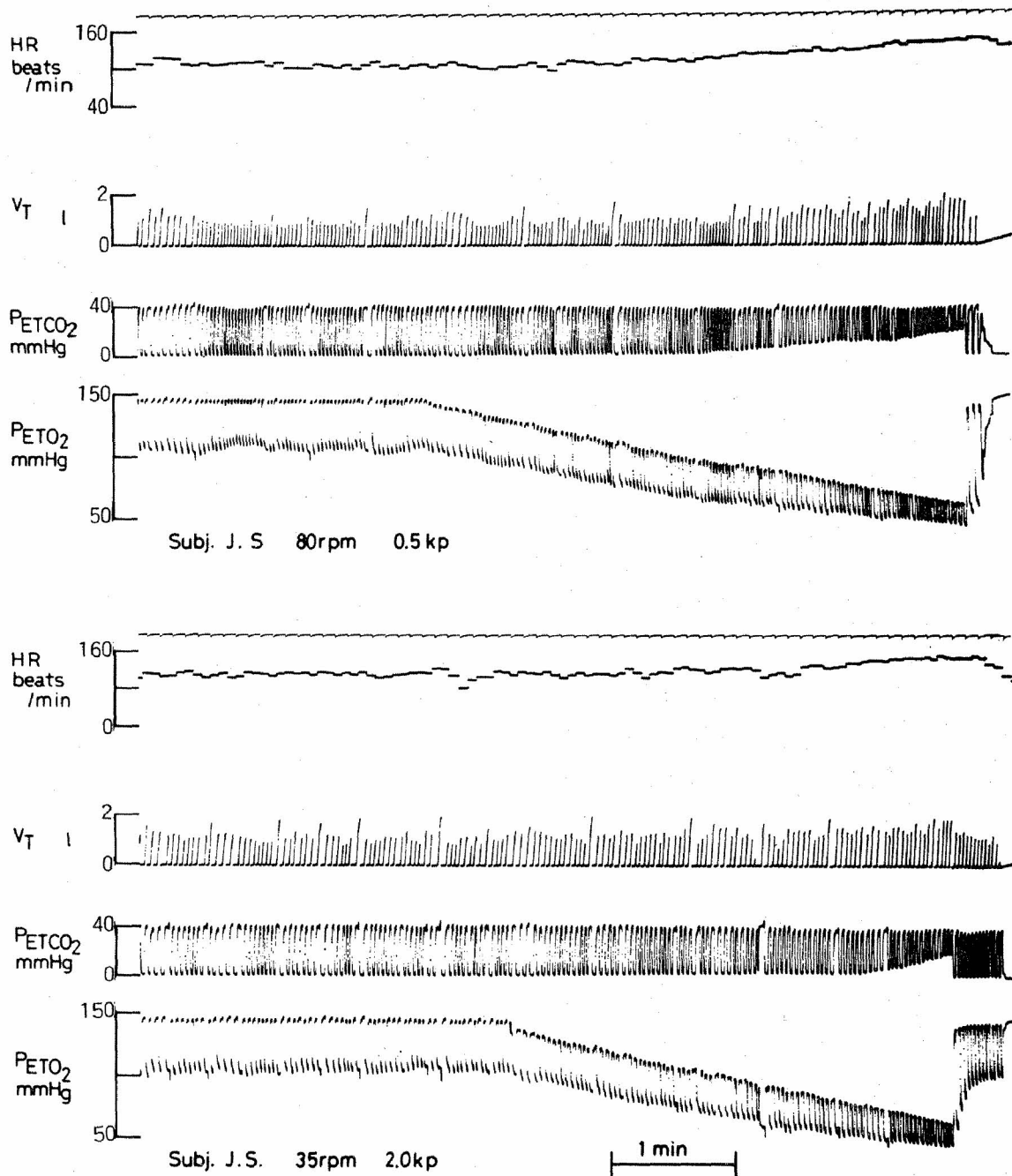


图2 — a Some examples of ventilatory response to progressive isocapnic hypoxia during exercise in subj. J.S. and Y.M.

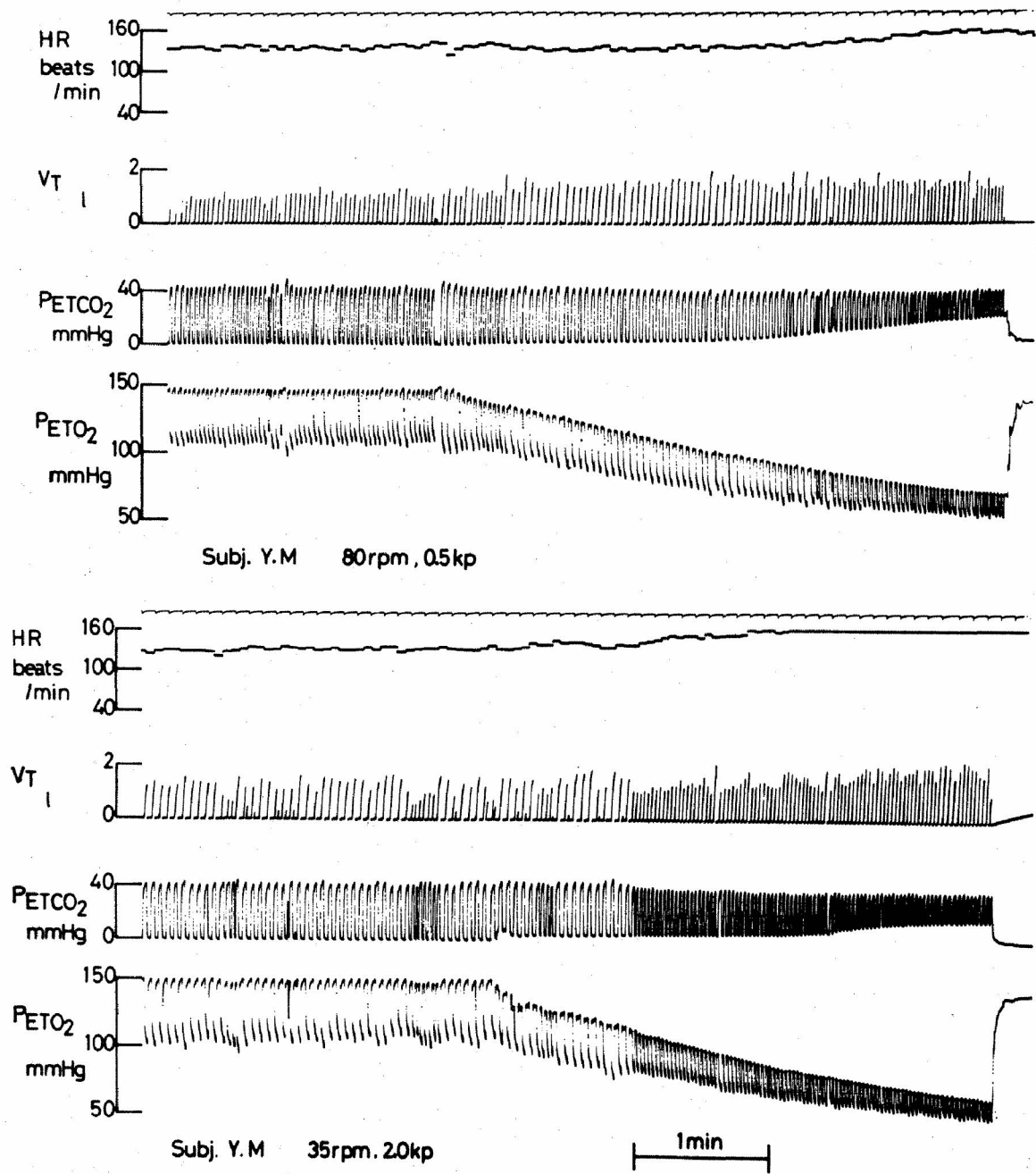


图 2 — b

(60rpm), 1.106 ± 0.137 (35rpm) であり, いずれの group もほぼ同一の値が得られた.

2. Entrainment group と Non-entrainment group の対比からみた呼吸応答の検討

ペダル回転数別に group 間の比較を行なうと, 上述のように顕著な差異はみられなかった. しかし個別に検討すると, 図 2— a, b に示したようにペダル回転数の多い運動では, 少ない運動よりも呼吸数の多い例がみられた. 従って本研究では, 60rpm と 80rpm の運動において空気呼吸時の呼吸数が 35rpm の運動中の呼吸数よりも多いのを entrainment group とし, 少ない者を non-entrainment group とした. その結果, entrainment group は, それぞれ 6 名 (60rpm, 80rpm) であり, non-entrainment group に属した者もそれぞれ 6 名 (60rpm, 80rpm) であった.

空気呼吸時の呼吸応答: 表 3, 図 3 は, entrainment group と non-entrainment group の呼吸応

答の比較を行なったものである. なおパーセント表示してあるものは, 35rpm の運動時の値を基準 (100) として相対的变化率 (%) をみたものである.

空気呼吸時の呼吸数 (%) は, それぞれ 133 ± 22 (entrainment group), 84 ± 18 (non-entrainment group) (80rpm), 127 ± 25 (entrainment group), 93 ± 7 (non-entrainment group) (60rpm) であり, いずれのペダル回転数の運動においても両 group 間に有意差を認めた. また分時換気量 (l/min) は, それぞれ 30.6 ± 4.1 (entrainment group), 21.2 ± 6.7 (non-entrainment group) (80rpm), 26.1 ± 4.5 (entrainment group), 25.5 ± 5.1 (non-entrainment group) (60rpm) であった. さらに 35rpm 時の分時換気量を基準 (100) とした相対的变化率でみた分時換気量 (%) は, それぞれ 119 ± 12 (entrainment group), 89 ± 12 (non-entrainment group) (80rpm), 110 ± 10 (entrainment group), 100 ± 15 (non-entrainment group) (60rpm) であった.

表 3 Comparison of the respiratory responses between entrainment and non-entrainment groups.

Pedalling rate (rpm) Subj. n	80		60	
	Ent-G 6	Non-ent-G 6	Ent-G 6	Non-ent-G 6
Room air breathing				
f (%)	$133 \pm 22^{**}$	84 ± 18	$127 \pm 25^{*}$	93 ± 7
$\dot{V}_E$ (l/min)	$30.6 \pm 4.1^{*}$	21.2 ± 6.7	26.1 ± 4.5	25.5 ± 5.1
$\dot{V}_E$ (%)	$119 \pm 12^{**}$	89 ± 12	110 ± 10	100 ± 15
PETCO ₂ (%)	100 ± 4	102 ± 7	98 ± 2	98 ± 2
PETO ₂ (%)	103 ± 3	101 ± 3	103 ± 4	101 ± 1
Breathing during hypoxia				
f ₅₀ (%)	$121 \pm 25^{*}$	86 ± 16	96 ± 26	88 ± 13
$\dot{V}_{E50}$ (l/min)	61.5 ± 13.3	40.9 ± 22.8	40.7 ± 13.4	45.6 ± 16.5
$\dot{V}_{E50}$ (%)	120 ± 39	90 ± 32	97 ± 31	83 ± 24

Values are mean $\pm$ SD

Ent-G, Entrainment group; Non-ent-G, Non-entrainment group; f, respiratory frequency;

$\dot{V}_E$, minute ventilation; PETCO₂ or PETO₂, end-tidal CO₂ or O₂ pressure; f₅₀, respiratory frequency at PETO₂ 50mmHg; $\dot{V}_{E50}$, minute ventilation at PETO₂ 50mmHg; (%), The values obtained at exercise with 35rpm were taken as 100%, then the relative magnitude in % were calculated for the works with 60 and 80rpm, respectively. Differences between the entrainment and non-entrainment groups are significant at 5% (*) and 1% (**) levels, respectively.

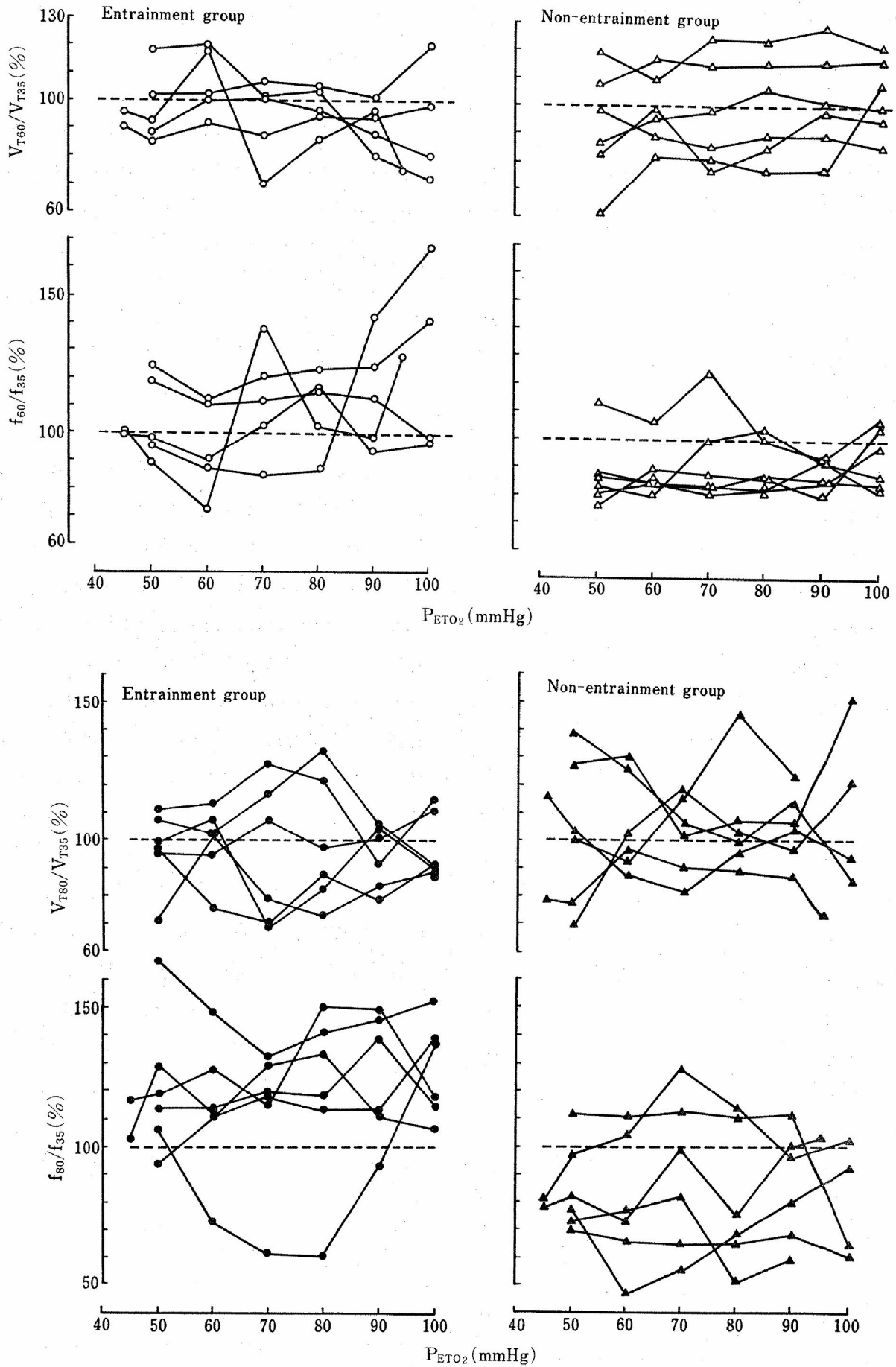


图 3 变化的潮气量和呼吸频率到渐进性缺氧

(60rpm)であった。60rpm 時では、両 group 間に有意差を認めなかったが、80rpm 時では両 group 間に有意差がみられた。

また P_{ETCO_2} (%) は、それぞれ 100 ± 4 (entrainment group), 102 ± 7 (non-entrainment group) (80rpm), 98 ± 2 (entrainment group), 98 ± 2 (non-entrainment group) (60rpm) であり、いずれの運動時においても両 group 間には有意差を認めなかった。さらに P_{ETO_2} (%) は、それぞれ 103 ± 3 (entrainment group), 101 ± 3 (non-entrainment group) (80rpm), 103 ± 4 (entrainment group), 101 ± 1 (non-entrainment group) (60rpm) であり、いずれの運動時においても両 group 間には有意差をみなかった。

低酸素下での呼吸応答：図 3 は、80rpm と 60rpm 時の progressive hypoxia 下での呼吸数と一回換気量を相対的変化率 (%) で示したものである。呼吸数は、低酸素による呼吸の drive が生じると増加傾向を示し、entrainment group においても運動リズムの呼吸数への影響が顕著でなくなった例もみられた。

P_{ETO_2} が 50mmHg に達した時点での呼吸数 (%) は、それぞれ 121 ± 25 (entrainment group), 86 ± 16 (non-entrainment group) (80rpm), 96 ± 26 (entrainment group), 88 ± 13 (non-entrainment group) (60rpm) であり、低酸素下においても entrainment group のほうが non-entrainment group よりも呼吸数の多い傾向が継続された。なお 60rpm 時では、両 group 間に有意差を認めなかったが、80rpm 時では両 group 間に有意差がみられた。さらに P_{ETO_2} が 50mmHg に達した時点での分時換気量 (l/min) は、それぞれ 61.5 ± 13.3 (entrainment group), 40.9 ± 22.8 (non-entrainment group) (80rpm), 40.7 ± 13.4 (entrainment group), 45.6 ± 16.5 (non-entrainment group) (60rpm) であった。いずれの運動時においても両 group 間には、有意差を認めな

くなった。さらに 35rpm 時の値を基準 (100) とした相対的変化率 (%) で比較すると、それぞれ 120 ± 39 (entrainment group), 90 ± 32 (non-entrainment group) (80rpm), 97 ± 31 (entrainment group), 83 ± 24 (non-entrainment group) (60rpm) であった。いずれの運動時も entrainment group のほうが大きな値を示したが有意差はみられなかった。

考 察

運動時の換気亢進のメカニズムについては、今日種々の因子が考えられている。その主なものは、1) 四肢からの神経性駆動 (Comroe et al. 1943, Kao et al. 1955, Dixon et al. 1961, McCloskey. 1972), 2) 中枢性換気亢進 (Krogh et al. 1913, Godwin et al. 1972, Morgan et al. 1973, Homma et al. 1984, Eldridge et al. 1981, 1985), 3) 末梢性化学受容器の興奮性増大 (Weil et al. 1972, Martin et al. 1978, Honda et al. 1979, 大藪ら 1985), 4) 中枢性化学受容器の関与 (Cunningham et al. 1963, Weil et al. 1972, Spode and Schlafke 1975, Miyaura et al. 1976), 5) 体温上昇に伴う末梢化学受容器及び視床下部の興奮性増大 (Natalino et al. 1977, Peterson et al. 1977), 6) CO_2 の肺への還流量増大に伴う混合静脈血 CO_2 増大と心拍出量増大 (Wasserman et al. 1974, Miyamoto et al. 1983), 7) 無酸素性解糖の進行に伴う pH の低下 (Wasserman, 1978) などの因子があげられる。勿論これらの因子は、運動の強度、時間経過、さらに環境条件等により、その関与の度合も異なるものと思われる。また今後の研究成果により除外される因子や新たに付け加えられる因子の可能性も考えられる。

ところで呼吸の entrainment は、運動リズムが呼吸リズムに影響しているのではないかとする考えのもとに関心がもたれてきた。すなわち呼吸

の entrainment の解明は、四肢からの神経性駆動、あるいは中枢性換気亢進のような神経性因子の運動時換気亢進への関与の有無を明らかにするための手がかりとなるものである。しかしこれまでの研究結果は、運動時に呼吸の entrainment が観察されなかったとするもの (Kelman and Watson 1973, Dixon et al. 1961, Key et al. 1974), あるいは呼吸の entrainment が認められたとするもの (Agostoni and D'angelo 1976, Bechbach and Duffin 1977, Jasinskas et al. 1980, Yonge and Petersen 1983) に分かれ、運動時の呼吸の entrainment の存在そのものの有無をめぐる議論もなされてきた。

本研究では、呼吸の entrainment を 35rpm の運動時の呼吸数よりも多かった場合とした。このことは、これまで先行研究でみられた呼吸の entrainment の判定基準とは多少異なるようにも思われる。しかしそのことは、我々の研究のねらいが単に運動リズムの呼吸リズムへの関与に対してのみ検討を加えるのではなく、呼吸の entrainment が実際に運動時の換気応答にどのような影響を与えるのかに重点をおいたためである。その結果、本研究でみられた呼吸の entrainment の出現率は、ペダル回転数が多くなると高くなる訳ではなかった。しかしペダル回転数の多い 80rpm 時のほうが、呼吸の entrainment の現象が顕著であり、呼吸数の増大が著しかった。

Bechbach and Duffin (1977) は、自転車エルゴメータを用いた実験で、ペダル回転数の多い運動のほうが、呼吸の entrainment の出現率が高いことを報告している。本研究結果と傾向を異にしたのは、呼吸の entrainment の判定基準の違いによるものであろう。

Jasinskas et al. (1980) は、自転車エルゴメータを用いて 2 種類の異なった強度で運動を行なわせたところ、呼吸の entrainment の出現率は、それぞれ 87% (low work, 30~59% $\dot{V}O_{2max}$), 94

% (high work, 70~95% $\dot{V}O_{2max}$) であり、運動強度の高いほうが出現率も高い旨、報告した。また Bechbach and Duffin (1977) は、自転車エルゴメータを用いて、メトロノームに合わせてペダリング運動を行なわせた場合とスピードメータに合わせてペダリング運動を行なわせた場合の呼吸の entrainment の出現率を比較したところ、メトロノームを使用したほうがその出現率の高いことを観察している。

本研究では、3 種類の異なったリズムでペダリング運動を行なわせた。しかしその運動強度は、酸素摂取量が一定となるよう、予備実験のデータよりあらかじめ調整を行なった。これは、運動強度の違いによる換気亢進レベルの差異をなくすためである。また運動は、すべて自転車エルゴメータを用い、メトロノームに合わせてペダリング運動を行なうよう指示した。

Bechbach and Duffin (1977) は、トレッドミルを用いて中等度の運動強度のランニングを行なわせたところ、呼吸の entrainment の出現率が自転車エルゴメータを用いた場合よりも高かったと報告し、その理由として、おそらくランニングでは、腹部内容物の上下動が生じるため、呼吸の entrainment の出現率が高くなるのであろうと推察している。

本研究の運動はすべて自転車エルゴメータによるペダリング運動であり、運動の種類からの検討は、今回行なわなかった。しかしペダル回転数の多い運動ほど、その脚の動作も早くなり、それに伴う腹部や胸部筋群の収縮、弛緩のリズムも当然早くなり、そのことによる横隔膜や胸郭の呼吸運動への制限が呼吸の entrainment の主要因子であるようにも考えられる。

本研究結果より、運動時にしばしば観察される呼吸の entrainment は、空気呼吸及び低酸素下のいずれの状態においても total output として

の分時換気量には、それほど大きな影響を及ぼしていないようであり、生体の恒常性が維持されているように推察された。しかしペダル回転数の多い 80rpm 時では、空気呼吸時に呼吸の entrainment による分時換気量の有意な増加傾向が認められ、呼吸の entrainment の運動時換気亢進への影響の可能性を全く否定することは困難なように推察された。今後は、運動強度を変化させて行なうことも肝要なように思われる。

ま と め

運動時の換気亢進に対する呼吸の entrainment の関与の有無を解明するために以下の研究を行なった。すなわち酸素摂取量一定の条件下で 3 種類の異なったリズム運動を行なわせ、空気呼吸及び低酸素下での呼吸の entrainment の換気応答への影響を検討した。

対象は、成人男女 12 名であり、被験者には自転車エルゴメータによる 3 種類の異なったペダル回転数 (35, 60, 80rpm) で運動を行なわせた。なお運動中の低酸素実験は、progressive hypoxia 法を用いた。

結果は、以下に示すようである。

1) 運動中の酸素摂取量 (l/min) は、それぞれ 1.091 ± 0.242 (80rpm), 1.101 ± 0.147 (60rpm) の 1.106 ± 0.137 (35rpm) であり、いずれの group もほぼ同一の値が得られた。

2) ペダル回転数別に空気呼吸時の呼吸数 (回/ min) と分時換気量 (l/min) を比較すると、それぞれ 24.8 ± 7.9 , 25.9 ± 7.2 (80rpm), 24.8 ± 4.5 , 25.8 ± 4.6 (60rpm), 23.4 ± 6.7 , 24.7 ± 4.0 (35rpm) であり、いずれの項目も group 間に顕著な差を認めなかった。

3) 60rpm と 80rpm の運動において、空気呼吸時の呼吸数が 35rpm 時の呼吸数よりも多い者を entrainment group とし、少ない者を non-entrainment group とした。その結果, entrain-

ment group は、それぞれ 6 名 (60rpm, 80rpm) であり、non-entrainment group もそれぞれ 6 名 (60rpm, 80rpm) であった。

4) 空気呼吸時の呼吸数は、いずれの運動 (60rpm, 80rpm) においても entrainment group のほうが non-entrainment group よりも有意に大きな値を示した。

5) 空気呼吸時の分時換気量は、いずれの運動 (60rpm, 80rpm) においても entrainment group が non-entrainment group よりも大きな値を示し、特に 80rpm 時では両グループ間に有意差がみられた。

6) P_{ETCO_2} と P_{ETO_2} は、いずれの運動 (60rpm, 80rpm) においても両グループ間に有意差は認められなかった。

7) 低酸素下での呼吸数は、いずれの運動 (60rpm, 80rpm) においても entrainment group が non-entrainment group よりも大きな値を示した。特に 80rpm 時では、両 group 間に有意差を認めた。

8) 低酸素下での分時換気量 (%) は、いずれの運動 (60rpm, 80rpm) においても entrainment group が non-entrainment group よりも大きな値を示したが、両 group 間に有意差を認めなかった。

以上の結果より、運動時にしばしば観察される呼吸の entrainment は、空気呼吸及び低酸素下のいずれの状態においても換気応答に、それほど大きな影響は及ぼしていないようであった。しかしペダル回転数の多い運動では、空気呼吸時に呼吸の entrainment による換気応答の有意な増加が認められ、呼吸の entrainment の運動時換気亢進への関与を全面的に否定することは困難なように思われた。

文 献

- 1) Agostoni, E. and Dangelo, E.; The effect of

- limb movements on the regulation of depth and rate of breathing. *Respir. Physiol.* **27** : 33—52 (1976)
- 2) Bechbache, R.R. and Duffin, J.; The entrainment of breathing frequency by exercise rhythm. *J. Physiol.* **272** : 553—561 (1977)
- 3) Comroe, H.H. Jr. and Schmidt, C.F.; Reflex from the limbs as a factor in the hyperpnea of muscular exercise. *Am. J. Physiol.* **138** : 536—547 (1943)
- 4) Cunningham, D.J.C., Lloyd, B.B., Patrick, L.M.; The relation between ventilation and end-tidal PCO_2 in man during moderate exercise with and without CO_2 inhalation. *J. Physiol.* (London) : 104—106 (1963)
- 5) Dixon, M.E., Stewart, B.B., Mills, F.C., Varvis, C.J. and Bates, D.V.; Respiratory consequences of passive body movement. *J. Appl. Physiol.* **16** : 30—34 (1961)
- 6) Eldridge, F.L., Millhorn, D.E. and Waldrop, T.G.; Exercise hyperpnea and locomotion: parallel activation from the hypothalamus. *Science*, **211** : 844—846 (1981)
- 7) Eldridge, F.L., Millhorn, D.E., Kiley, J.P. and Waldrop, T.G.; Stimulation by central command of locomotion, respiration and circulation during exercise. *Respir. Physiol.* **59** : 313—337 (1985)
- 8) Godwin, G.M., McCloskey, D.I. and Mitchell, J.H.; Cardiovascular and respiratory responses to change in central command during isometric exercise at constant muscle tension. *J. Physiol.* **226** : 173—190 (1972)
- 9) Honda, Y., Myojo, S., Hasegawa, S. and Severinghaus, J.W.; Decreased exercise hyperpnea in patients with bilateral carotid chemoreceptor resection. *J. Appl. Physiol.* **46**(5) : 908—912 (1979)
- 10) Homma, I., Obata, T., Sibuya, M. and Uchida, M.; Gate mechanism in breathlessness caused by chest wall vibration in human. *J. Appl. Physiol.* **56**(1) : 8—11 (1984)
- 11) Jasinkas, C.L., Wilson, B.A. and Hoare, J.; Entrainment of breathing rate to movement frequency during work at two intensities. *Respir. Physiol.* **42** : 199—209 (1980)
- 12) Kao, F.F., Schlig, B.B. and Brooks, C.; Regulation of respiration during induced muscular in decreased dogs. *J. Appl. Physiol.* **7** : 379—386 (1955)
- 13) Kelman, G.R. and Watson, A.W.S.; Effect of added dead-space on pulmonary ventilation during sub-maximal steady-state, exercise. *Q. J. exp. Physiol.* **58** : 305—313 (1973)
- 14) Key, J.D.S., Petersen, E.S. and Christensen, H.V.; Breathing in man during steady-state exercise on the bicycle at two pedalling frequencies, and during treadmill walking. *J. Physiol.* **251** : 645—656 (1975)
- 15) Krogh, A. and Lindhard, J.; The regulation of respiration and circulation during the initial stage of muscular work. *J. Physiol.* **47** : 112—136 (1913)
- 16) Martin, B.J., Weil, J.V., Sparks, K.E., McCullough R.E. and Grover, R.F.; Exercise ventilation correlates positively with ventilatory chemoresponsiveness. *J. Appl. Physiol.* **45**(4) : 557—564 (1978)
- 17) McCloskey, D.I. and Mitchell, J.H.; Reflex cardiovascular and respiratory responses originating in exercise muscle. *J. Physiol.* **16** : 30—34 (1961)
- 18) Miyamoto, Y., Hiura, T., Tamura, T., Nakamura, T., Higuchi, J. and Mikami, T.; Dynamics of cardiac, respiratory, and metabolic function in men in response to step work load. *J. Appl. Physiol.* **52**(5) : 1198—1208 (1982)
- 19) Miyamura, M., Folgering, H.Th., Binkhorst, R.A., Smolders, F.D.J. and Kreuzer, F.; Ventilatory response to CO_2 at rest and during positive and negative work in normoxia and hyperoxia. *Pflugers Arch.* **347** : 341—350 (1976)
- 20) Morgan, W.P., Raven, P.B., Drinkwater, B.L. and Horvarth, S.M.; Perceptual and metabolic responsivity to standard bicycle ergometry following various hypnotic suggestions. *Int. J. Clin. Exp. Hypnosis*, **21** : 86—101 (1973)
- 21) Natalino, M.R., Zwillich, C.W. and Weil, J.V.; Effects of hyperthermia on hypoxic ventilatory response in normal man. *J. Lab. Clin. Med.* **89**(3) : 564—572 (1977)
- 22) 大藪由夫, 佐藤みどり, 大藪五百子; 安静時及び運動時における低酸素換気, 心拍数応答の定量的解析, 日本体育学会第36回大会号 : 255 (1985)

- 23) Petersen, E.S. and Christensen, H.V.: Effects of body temperature on ventilatory response to hypoxia and breathing pattern in man. *J. Appl. Physiol.* **42**(4) : 492—500 (1977)
- 24) Spode, R. and Schlafke, M.E.; Influence of muscular exercise on respiration after central and peripheral chemodenervation. *Pflugers.* **359**, R49 (1975)
- 25) Wasserman, K., Whipp, B.J. and Castagnia, J.; Cardiodynamic hyperpnea: Hyperpnea secondary to cardiac output increase. *J. Appl. Physiol.* **36** : 457—464 (1974)
- 26) Wasserman, K.; Breathing during exercise. *N. Engl. J. Med.* **298** : 780—785 (1978)
- 27) Weil, J.V., Byrne-Quinn, E., Sodal, I.E., Kline, J.S., McCullough, R.E. and Filley, G.F.; Augmentation of chemosensitivity during mild exercise in normal man. *J. Appl. Physiol.* **33**(6) : 813—819 (1972)
- 28) Yonge, R.P. and Petersen, S.; Entrainment of breathing in rhythmic exercise. in *Modelling and control of breathing*. ed. by Brian J. Whipp and Donald M. Wiberg, Elsevier Science Publishing Co., Inc. : 197—204 (1983)