持久性走者の長時間運動時における呼吸循環応答特性

平木場 浩 二* 浅 野 勝 己*

RESPIRATORY AND CIRCULATORY ADJUSTMENTS DURING PROLONGED EXERCISE IN ENDURANCE RUNNERS.

KOHI HIRAKOBA AND KATSUMI ASANO

Abstract

It was the purpose of this study to elucidate the difference between endurance runners and normal men in respiratory and circulatory adjustments during prolonged exercise, and to evaluate the relationship between the magnitude of the respiratory and circulatory "drift" and the endurance exercise capacity.

Ten male endurance runners (runner group), aged 19-23 years, and nine normal men (control group), aged 19-28 years, exercised on a bicycle ergometer for 60 min at a constant work load requiring 60% of $\dot{V}_{O_2\max}$ for each subject.

In the control group, $\dot{V}_E$ increased approximately 20% from 10th to 60th min of prolonged exercise ($P<0.05$), with a corresponding decrease in P_{aCO_2} ($P<0.05$), whereas in the runner group $\dot{V}_E$ and P_{aCO_2} were remained constant throughout prolonged exercise. The above differences of $\dot{V}_E$ and P_{aCO_2} responses between the control and the runner group could not be accounted for by a rising body temperature and lactic acidosis, because it was found that the magnitude of the rise in rectal temperature (T_{re}) and the behavior in lactic acid (LA) were not different for the two groups. On the other hand, we failed to find the difference of the pattern in HR and SV responses to prolonged exercise in the runner group as compared with the control group. At each comparable time period during prolonged exercise, however, the percentage changes from the values at the 10th min in HR and SV were less in the runner group than in the control group. In addition, $\dot{V}_{O_2\max}$ (ml/kg/min) correlated significantly with the percentage changes in $\dot{V}_E$ ($r=-0.534$, $P<0.05$), HR ($r=-0.565$, $P<0.05$), and SV ($r=0.588$, $P<0.01$) from 10th to 60th min of prolonged exercise.

The results of this study suggest that the endurance training may improve the magnitude of the respiratory and circulatory "drift", which appears to become a limiting factor to endurance performance.

(J. Physical Fitness Japan 1983, 32 : 293-301)

I. 緒 言

長時間運動に対する呼吸循環系の応答特性は、" $\dot{V}_E$ drift"⁶⁾²¹⁾と "cardiovascular drift"¹⁴⁾¹⁶⁾²⁶⁾²⁹⁾が生じることである。運動が中程度の強度で短時間である場合は、呼吸循環系の変量には定常状態が成立する。しかし、長時間運動になると、運動強度が一定であるにもかかわらず、時間の経過に

ともない呼吸系では主に換気量の増加 ($\dot{V}_E$ drift)⁶⁾⁷⁾⁹⁾²⁰⁾²¹⁾、循環系では血圧 (静脈圧, 動脈圧) および一回拍出量の低下とそれに対する心拍数の補償的增加 (cardiovascular drift)³⁾⁹⁾¹⁰⁾¹⁴⁾²⁰⁾²⁷⁾³⁰⁾が生じることが報告されている。

長時間運動時に認められる呼吸循環系の drift 現象は、一度成立した定常状態の維持が不可能になったことを示していると考えられるが、このこ

* 筑波大学体育科学系 〒305 茨城県新治郡桜村天王台 1-1-1

Institute of Health and Sport Science, The University of Tsukuba, Ibaraki, Japan (305)

と持久性 performance および持久性能力との関連性について検討した研究は少ない²⁰⁾²¹⁾。

Claremont et al.²⁾ および Sawka et al.³⁰⁾は、高い有気的作業能力 ($\dot{V}O_2\text{max}$) を有する持久性走者では長時間運動時の $\dot{V}E$ が相対的に一定レベルに維持され、一般人で認められる $\dot{V}E$ drift が生じなかったことを報告しているが、循環系応答においては一般人と同様に持久性走者にも cardiovascular drift が生じることが示されている²⁰⁾²⁹⁾。しかし、 $\dot{V}E$ drift および cardiovascular drift が長時間運動の1つの制限因子となり得ることも指摘されており⁶⁾¹⁰⁾²⁰⁾²¹⁾²⁹⁾、したがって、呼吸循環系の drift を狭い範囲内に維持することが、長時間運動に対する有利な適応反応であると推察される。

本研究の目的は、一般成人との比較から持久性走者の長時間運動に対する呼吸循環系の応答特性を明らかにするとともに、呼吸循環系の drift の程度と有気的作業能力との関連性について検討することである。

II. 研究 方 法

被検者は、19—23才 (20.6 ± 1.4 才) の中長距離走者10人 (runner 群) と 19—28 才 (22.9 ± 3.5 才) の健康な成人男子9人 (control 群) であった。runner 群は、陸上競技部に所属する学生と現在も持久性トレーニングを継続実施している大学院生であり、競技歴は3~10年であった。control 群には runner 群と同様の年齢および形態を有し、日常定期的な身体トレーニングを実施してい

Table 1. Anthropometric data and maximal oxygen uptake of subjects.

	Controls	Runners	P
N	9	10	
Age, yr	22.9 (3.5)	20.6 (1.4)	ns
Ht, cm	169.0 (5.5)	170.8 (3.2)	ns
Wt, kg	63.6 (5.4)	60.0 (3.9)	ns
BSA, m ²	1.74 (0.10)	1.72 (0.07)	ns
$\dot{V}O_2\text{max}$, l/min	2.94 (0.43)	3.57 (0.27)	**
$\dot{V}O_2\text{max}$, ml/kg·min	46.0 (5.61)	59.6 (2.98)	***

Values are means $\pm$ SD.

** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$, P values are significant differences between the values of controls and runners (independent t test).

ない学生を選んだ。被検者の身体特性および有気的作業能力 ($\dot{V}O_2\text{max}$) を表1に示した。

長時間運動は、Monark 社製自転車エルゴメーターを用い、座位姿勢にて行なわせた。運動時間は60分間、運動強度は60% $\dot{V}O_2\text{max}$ の一定負荷強度に設定した。なお、運動強度は、自転車エルゴメーターによる最大運動テストで得られた運動強度と酸素摂取量の関係式より算出した。

運動中は10分毎に呼吸系および循環系の各変量の測定を行ない、また血中乳酸濃度 (LA) とヘマトクリット値 (Hct) を測定するために、10分目、30分目および60分目の計3回正中皮静脈より採血を実施した。1回の採血量は約2.0 ml であった。

呼気ガス採気は Douglas bag 法で行ない、混合呼気ガス分析には標準ガスで校正した質量分析器 (Perkin-Elmer, MGA 1100) を用いた。

肺胞気 CO_2 分圧 (P_{ACO_2}) は end-tidal 法により測定した。すなわち、マウスピースと質量分析器 (吸引量: 1.0 ml/sec) を連結し、一呼吸毎に呼気ガスサンプルを分析し求めた終末呼気 P_{ETCO_2} を P_{ACO_2} とした。

換気量 ($\dot{V}E$) は乾式ガスメーターにより計量した。

心拍数 (HR) は胸部双極誘導法により心電図を記録し、1分間のR波から求めた。

一回拍出量 (SV) は、Kubicek et al.¹⁸⁾の方法に従って Minnesota Impedance Cardiography (IFM 社製, Model 400) を用いて測定した。Impedance 法の信頼性については色素稀釈法との比較から検討され、両者の間に高い相関係数 ($r=0.90$) が得られたことが報告されている⁸⁾。

LA は電気化学的酵素法に基づいた Lactate Analyzer 640 (Roche 社製) により測定した。この測定法の信頼性および妥当性については報告されている¹⁹⁾²⁴⁾。

Hct は高速遠心分離器 (12000 rpm, 5分間) を用いた毛細管法により測定し、5重検定法による変動係数 (CV) は、平均 0.65% (0.23%~2.80%) であった。

直腸温 (T_{re}) は、直腸温サーミスタ温度計 (日本光電社製) を用い、肛門部より 10~12 cm 挿入して測定した。 T_{re} の測定は運動中5分毎に行なった。

実験は、室温 $19.43 \pm 2.71^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $66.3 \pm 6.5\%$ の環境条件下で実施した。

III. 結 果

control 群および runner 群の長時間運動時における呼吸循環系の各変量の経時的変化を図 1～4 に示した。

$\dot{V}_E$ は、control 群では運動10分目の 46.5 ± 9.8 l/min から60分目の 56.5 ± 18.0 l/min まで有意に増加したが ($P < 0.05$)、runner 群においては運動中一定レベルに維持された(図1)。また、運動10分目からの $\dot{V}_E$ の変化率において、control 群は運動終了時の60分目で約20%の増加を示しており、この増加率は runner 群(約 0.6% 増)と比較して有意に大きいことが認められた ($P < 0.05$)。

P_{ACO_2} は、control 群では $\dot{V}_E$ の漸次的増加にともない、運動10分目の 44.7 ± 4.3 mmHg から

Figure 1. Changes of minute ventilation ($\dot{V}_E$) during prolonged exercise in controls and runners. The upper panel represents the changes of absolute values and the lower panel represents the percentage changes from the values at the 10th min during prolonged exercise. (a) Probability of paired t test is expressed as * for $P < 0.05$. (b) Probability of independent t test is expressed as * for $P < 0.05$.

Figure 2. Changes of alveolar P_{CO_2} (P_{ACO_2}) during prolonged exercise in controls and runners. Probability of paired t test is expressed as * for $P < 0.05$.

60分目の 39.6 ± 7.7 mmHg まで有意に低下したが ($P < 0.05$)、runner 群では運動中一定値を示した (図2)。

$\dot{V}_{\text{O}_2}$ は、両群とも時間の経過にともない運動10分目から60分目まで漸次的に増加した ($P < 0.01$, $P < 0.05$)。10分目からの変化率においては、運動終了時において control 群および runner 群でそれぞれ約13%と5%の増加を示し、runner 群の $\dot{V}_{\text{O}_2}$ の増加率が低い傾向にあったが、有意差は認められなかった (図3)。

$\dot{V}_{\text{CO}_2}$ は、control 群では運動10分目から60分目まで約10%の有意な増加を示したが ($P < 0.05$)、それに対して runner 群では運動中一定レベルに維持された (図3)。

長時間運動時には SV が時間の経過にともない漸次的に低下し、HR は $\dot{Q}$ を一定レベルに維持するために補償的に増加するといった SV と HR の応答特性が両群に共通した適応反応であることが認められた (図4)。一方、運動10分目から60分までの変化率において、HR の変化率は control 群で約+21%、runner 群で約+11%、また SV の変化率は control 群で約-18%、runner 群で約-11%といずれも runner 群の変化率が小さい傾向にあることが認められた。

Hct は、両群とも運動中相対的に一定値を示し、約46～47%に維持されていた (図5)。

LA は、control 群においては運動10分目の 2.78 ± 1.34 mmol/l から60分目の 2.29 ± 1.02 mmol/l までわずかな低下傾向を示した。runner 群の LA は、運動10分目の 2.16 ± 1.02 mmol/l から60

Figure 3. Changes of oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and carbon dioxide production ($\dot{V}CO_2$) during prolonged exercise in controls and runners. The left panels represent the changes of absolute values and the right panels represent the percentage changes from the values at the 10th min during prolonged exercise. (a) Probability of paired t test is expressed as * for $P<0.05$ and ** for $P<0.01$. (b) Probability of independent t test is expressed as * for $P<0.05$.

Figure 4. Changes of heart rate (HR) and stroke volume (SV) during prolonged exercise in controls and runners. The left panels represent the changes of absolute values and the right panels represent the percentage changes from the values at the 10th min during prolonged exercise. (a) Probability of paired t test is expressed as ** for $P<0.01$ and *** for $P<0.001$. (b) Probability of independent t test is expressed as * for $P<0.05$.

Figure 5. Changes of hematocrit (Hct) during prolonged exercise in controls and runners.

Figure 6. Changes of blood lactic acid (LA) during prolonged exercise in controls and runners. Probability of paired t test is expressed as * for $P < 0.05$.

Figure 7. Changes of rectal temperature (Tre) during prolonged exercise in controls and runners. Probability of paired t test is expressed as *** for $P < 0.001$.

Figure 8. Relationships between maximal oxygen uptake ($\dot{V}_{O_2\max}$) and the percentage changes from the 10th to 60th min values in minute ventilation ($\dot{V}_E$), heart rate (HR), and stroke volume (SV) during prolonged exercise in controls and runners.

分目の 1.44 ± 0.41 mmol/l まで有意に低下した ($P < 0.05$, 図6)。

Tre は、両群とも運動終了時の60分目で約38.6 °C の同様のレベルまで安静時の値から有意に上昇しており ($P < 0.001$, $P < 0.001$), また安静時から運動60分目までの Tre の上昇度 (ΔTre) は、control 群で 1.16 ± 0.16 °C, runner 群で 1.22 ± 0.18 °C であり、両群間に有意な差は認められなかった (図7)。

有気的作業能力 ($\dot{V}_{O_2\max}$, ml/kg/min) と $\dot{V}_E$, HR および SV の運動10分目から60分目までの変化率 (Δ %) との関係については図8に示した。

$\dot{V}_{O_2\max}$ と $\Delta \dot{V}_E$, ΔHR および ΔSV との間にはそれぞれ $r = -0.534$ ($P < 0.05$), $r = -0.565$

($P < 0.05$), $r = 0.588$ ($P < 0.01$) の有意な相関係数が得られた。

IV. 考 察

長時間運動に対する呼吸系応答の control 群と runner 群における主な差異は、前者では $\dot{V}E$ の漸次的増加とそれに対応する $PACo_2$ の有意な低下が生じたのに対し、後者では $\dot{V}E$ および $PACo_2$ が一定レベルに維持されたことである。この結果は Claremont et al.²³⁾ および Sawka et al.³⁰⁾ の報告と一致している。さらに、control 群では、運動強度が一定であるにもかかわらず、代謝率 ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$) の増加率が runner 群より大きいことが認められた。Hagberg et al.¹²⁾ によれば、一定負荷運動時の $\dot{V}O_2$ の増加は主に体温の上昇と換気量の増加 ($\dot{V}E$ drift) により説明されるとしており、本研究における control 群の代謝率の増加の大きな原因には $\dot{V}E$ drift による呼吸筋の仕事量の増大が関与しているものと考えられる。また、換気量の過剰な増加による呼吸筋の疲労は運動 performance を低下させることも報告されており²²⁾, runner 群で $\dot{V}E$ drift が認められなかったことは、長時間運動に対して有利な適応反応を示していると考えられる。

長時間運動時の $\dot{V}E$ drift を生じさせる刺激因子として血中 catecholamine の濃度の増加⁷⁾, 体温の上昇⁸⁾ および代謝性 acidosis²⁰⁾ などが考えられている。

運動時の血中 catecholamine 濃度の増加は、被検者のトレーニングの程度にも関連しており¹³⁾ ³²⁾, 長時間運動時の catecholamine 応答も control 群と runner 群で異なることが推測される。このことが runner 群の $\dot{V}E$ 応答に影響を及ぼしているのかもしれない。しかし、catecholamine 応答は、相対的な運動強度 (% $\dot{V}O_{2max}$) に依存するために両群間の catecholamine 応答に差異がないことも考えられる。さらに、Fagard et al.¹¹⁾ は、catecholamine の受容器である α -および β -adrenoceptor の遮断実験を行ない、受容器の遮断前後の運動時の $\dot{V}E$ 応答に変化を認めなかったことを報告している。Martin et al.²¹⁾ も長時間運動時の $\dot{V}E$ drift と血中 catecholamine 濃度の増加との間に有意な相関関係を認めなかったことか

ら、長時間運動時に認められる血中 catecholamine 濃度の増加だけでは $\dot{V}E$ drift を説明できないとしている。

最近、長時間運動時の $\dot{V}E$ drift は体温の上昇とは直接関連していないことが報告され²¹⁾³⁰⁾, Dempsey et al.⁶⁾ の見解を否定している。その根拠として、Dempsey et al. が用いた Skin cooling による体温の上昇を防ぐ実験方法は、長時間運動に対する代謝、循環およびホルモン応答も変動させ、そのことが、間接的に作用し、 $\dot{V}E$ 増加を防いだということを指摘している²¹⁾。さらに、体温の上昇を $\dot{V}E$ drift の刺激因子として解釈しても、本研究では Tre の上昇度には両群間に差異が認められないことから、体温の因子からでは runner 群の長時間運動時の $\dot{V}E$ 応答を説明できないと考えられる。同様に、LA は両群とも時間の経過とともに低下し、LA の動態に両群間に差異がないことから、 $\dot{V}E$ drift に及ぼす代謝性 acidosis の影響も消去できるものと思われる。

Martin et al.²¹⁾ は、 $\dot{V}E$ drift の生じる一因に死腔換気量 ($\dot{V}D$) の増加を報告している。その原因として体温の上昇により血液が中枢から末梢へ移行するために、中枢血液量 (central blood volume, CBV) の低下が生じ、そのことが肺泡レベルでの相対的な過呼吸 (hyperventilation) を招来し、 $\dot{V}D$ の増加につながるという機序を想定している。Ekelund¹⁰⁾ は、長時間運動10分目から60分目までの $\dot{V}E$ および $\dot{V}D$ の増加との間に高い相関関係 ($r = 0.89$) を認めており、 $\dot{V}D$ の増加は、CBV の低下による換気血流比 ($\dot{V}A/\dot{Q}C$) の不均衡と関連することを報告している。したがって、 $\dot{V}E$ drift をもたらす $\dot{V}D$ の増加が、CBV の低下によって生じると解釈するならば、runner 群で $\dot{V}E$ drift が認められなかったことは、CBV の低下が control 群よりも少ない可能性のあることを示唆している²³⁾。

本研究においては、長時間運動時に認められる時間の経過ともなった SV の漸次的低下と HR の補償的増加は runner 群にも共通した応答特性であることが確認された。しかし、運動10分目からの変化率を比較すると、runner 群では control 群よりも HR および SV の変化率が小さいことが認められた。

長時間運動時の循環系応答特性である **cardio-vascular drift** の生じる機序については多くの論議がなされている⁹⁾¹⁴⁾¹⁶⁾²⁶⁾²⁷⁾³¹⁾。

長時間運動時には体温が上昇するので⁶⁾²⁰⁾²¹⁾³⁰⁾、体温も重要な因子となる。Jose et al.¹⁷⁾は、体温 1°C の上昇で HR が約 7 beats/min ほど増加することを報告している。しかし、Rowell²⁾は、長時間運動時に認められる体温の上昇だけでは HR の増加を説明できず、他の因子の関与度が大きいことを指摘している。本研究でも長時間運動時の Tre は両群ともほぼ同じレベル（約 38.6°C ）まで上昇しているにもかかわらず、runner 群における HR の増加率は小さかった。

HR は SV の低下に対して補償的に増加すると考えられる¹⁴⁾¹⁶⁾。したがって、control 群と比較して runner 群で HR の増加率が小さいことは、SV の減少率が小さいことに起因していると推察される。

長時間運動時の SV 低下の一因として血液量の低下が考えられるが、長時間運動時の血漿量は運動開始時に10～15%ほど低下するが、それ以後は一定であることが報告されている¹⁾⁵⁾¹⁰⁾²⁹⁾。本研究においても、Hct は長時間運動を通して両群とも一定値を示しており、この結果から推測すると、運動時の血漿量（血液量）も相対的に一定レベルに維持されていたということが考えられる。

長時間運動時の SV 低下の主な原因として考えられているのは、血液の末梢の容量血管への移行にともなう CBV の低下である¹⁰⁾¹⁶⁾²⁶⁾²⁹⁾³¹⁾。特に、暑い体温の上昇をとともなう長時間運動時には CBV の維持能力が重要な因子となる¹⁶⁾²⁰⁾²⁹⁾。すなわち、長時間運動時には骨格筋への血流を確保するばかりでなく体熱放散のために皮フ血流量を増加させる必要がある。これまでの報告によると、持久性走者では発汗の閾値の低いことが認められている¹⁵⁾²⁵⁾。このことが、体熱放散の効率を高め、循環系に対する **thermal stress** を軽減し、CBV の維持能力を増大させると推察される²³⁾。したがって、runner 群で HR および SV の変化率が小さいことは CBV の維持能力が優れていることを示唆していると思われる。

長時間運動時の呼吸循環系の **drift** が持久性 **performance** にどのような影響を及ぼすか明確で

ない。しかし、本研究では、長時間運動10分目から60分目までの $\dot{V}\text{E}$ 、HR および SV の変化率(%)と持久性 **performance** の1つの決定因子である $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ ⁴⁾²⁸⁾との間に有意な相関関係が認められた。すなわち、持久性走者では長時間運動時に $\dot{V}\text{E drift}$ が認められないこと²⁾³⁰⁾ および **cardio-vascular drift** の程度が control 群よりも小さいことを考慮すると、この結果は、持久性 **performance** の1つの制限因子として考えられる呼吸循環系の **drift** の程度が持久性トレーニングにより改善されることを示唆している。

V. 要 約

本研究は、持久性走者 10 名 (runner 群) および一般成人男子 9 名 (control 群) を対象に、自転車エルゴメーターによる長時間運動時 (60% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$, 60 分間) の呼吸循環系応答を測定し、一般成人男子との比較から持久性走者の呼吸循環系応答の特徴を明らかにするとともに呼吸循環系の **drift** と有気的作業能力との関連性について検討した。

結果は以下のように要約できる。

1) control 群では、 $\dot{V}\text{E}$ が運動10分目から60分目まで約20%ほど有意に増加し ($P<0.05$)、それに対応して Paco_2 は有意に低下した ($P<0.05$)。

2) runner 群では、 $\dot{V}\text{E}$ および Paco_2 は運動中一定レベルに維持され、 $\dot{V}\text{E drift}$ が認められなかった。

3) 長時間運動に対する HR および SV の適応様式には両群間に差異は認められなかった。

4) 運動 10 分目から 60 分目までの HR および SV の変化率(%)を比較してみると、runner 群では control 群よりもその変化率が小さいことが認められた (HR: $+10.7\%$ VS $+20.9\%$, SV: -11.1% VS -18.3%)。

5) 有気的作業能 ($\dot{V}\text{O}_2\text{max}$) と運動 10 分目から60分目までの $\dot{V}\text{E}$ 、HR および SV の変化率との間に有意な相関関係が認められた ($r=-0.534$, $P<0.05$, $r=-0.565$, $P<0.05$, $r=0.588$, $P<0.01$)。

6) 以上の結果は、runner 群は control 群よりも長時間運動時の呼吸循環系の **drift** の程度が小さく、その **drift** の程度は持久性トレーニングによ

り改善される可能性のあることを示唆している。

(受付 昭和58年3月26日)

文 献

- 1) Åstrand, P.-O. and Saltin, B. (1964) : Plasma and red cell volume after prolonged severe exercise. *J. Appl. Physiol.*, **19**, 829-832.
- 2) Claremont, A.D., Dempsey, J.A., Hanson, P.G. and Reddan, W.G. (1977) : Ventilatory and acid-base response to prolonged heavy work in endurance athletes. *Med. Sci. Sports*, **9**, 60 (Abstract).
- 3) Cobb, L. A. and Jhonson, W. P. (1963) : Hemodynamic relationships of anaerobic metabolism and plasma free fatty acid during prolonged exercise in trained and untrained subjects. *J. Clin. Invest.*, **42**, 800-831.
- 4) Costill, D.L., Thomason, H., and Roberts, E. (1973) : Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med. Sci. Sports*, **5**, 248-252.
- 5) Costill, D.L. and Fink, W.J. (1974) : Plasma volume changes following exercise and thermal dehydration. *J. Appl. Physiol.*, **37**, 521-525.
- 6) Dempsey, J.A., Thomson, J.M., Alexander, S.C., Forster, H.V. and Chosy, L.W. (1975) : Respiratory influences on acid-base status and their effects on O₂ transport during prolonged muscular work. In: *Metabolic Adaptation to Prolonged Exercise*. edited by H. Howald and J.R. Poortman, Birkhauser Verlag Basel, p. 56-64.
- 7) Dempsey, J.A., Gledhill, N., Reddan, W.G., Forster, H.V., Hanson, P.G. and Claremont, A.D. (1977) : Pulmonary adaptation to exercise : effects of exercise type and duration, chronic hypoxia, and physical training. *Ann. NY. Acad. Sci.*, **301**, 243-261.
- 8) Denniston, J.C., Maher, J.T., Reeves, J.T., Cruz, J.C., Cymerman, A. and Grover, R.F. (1976) : Measurement of cardiac output by electrical impedance at rest and during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **40**, 91-95.
- 9) Ekblom, B. (1970) : Effect of physical training on circulation during prolonged exercise. *Acta Physiol. Scand.*, **73**, 145-158.
- 10) Ekelund, L. G. (1967) : Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise. *Acta Physiol. Scand.* **70** (Suppl. 292).
- 11) Fagard, R., Reybrouk, T., Lijnen, P., Amery, A., Moerman, E. and Schaepestryer, A. (1980) : Alpha- and beta-adrenoceptor blockade does not affect ventilation during exercise in man. *Med. Sci. Sports and Exercise*, **12**, 375-379.
- 12) Hagberg, J.M., Mullin, J.P. and Nagle, F.J. (1978) : Oxygen consumption during constant-load exercise. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **45**, 381-384.
- 13) Hartley, L.H., Mason, J.M., Hogan, R.P., Jones, L.G., Kochen, T.A., Mougey, E.H., Wherry, F. E., Pennington, L. L. and Ricketts, P.T. (1972) : Multiple hormonal responses to prolonged exercise in relation to physical training. *J. Appl. Physiol.*, **33**, 607-610.
- 14) Hartley, L.H. (1977) : Central circulatory function during prolonged exercise. *Ann. NY. Acad. Sci.*, **301**, 189-194.
- 15) Henane, R., Flandrois, R. and Charbnnier, J.P. (1977) : Increase in sweating sensitivity by endurance conditioning in man. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.* **43**, 822-828.
- 16) Johnson, J.M. (1977) : Regulation of skin circulation during prolonged exercise. *Ann. NY. Acad. Sci.* **301**, 195-212.
- 17) Jose, A., Stitt, F. and Collinson, D. (1970) : The effects of exercise and changes in body temperature on the intrinsic heart rate in man. *Am. Heart J.*, **79**, 488-497.
- 18) Kubicek, W.G., Patterson, R.P. and Witsoe, D.A. (1970) : Impedance cardiography as a noninvasive method of monitoring cardiac function and other parameters of the cardiovascular system. *Ann. NY. Acad. Sci.*, **170**, 724-732.
- 19) Kumagai, S., Tanaka, K., Matsuura, Y.,

- Matsuzaka, A., Hirakoba, K. and Asano, K. (1982) : Relationships of the anaerobic threshold with the 5 km, 10 km, and 10 mile races. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **49**, 13-23.
- 20) Macdougall, J.D., Reddan, W.G., Layton, C.R. and Dempsey, J.A. (1974) : Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.*, **36**, 538-544.
- 21) Martin, B.J., Morgan, E.J., Zwillich, C.W. and Well, J.V. (1981) : Control of breathing during prolonged exercise. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **50**, 27-31.
- 22) Martin, B.J., Heintzelman, M. and Chen, H. (1982) : Exercise performance after ventilatory work. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **52**, 1581-1585.
- 23) Nadel, E.R. (1979) : Temperature regulation. In : *Sports Medicine and Physiology*. edited by R. H. Trauss, W. B. Saunders Company, Philadelphia, p. 130-146.
- 24) Racine, P., Klenk, H.-O. and Kochsiek, K. (1975) : Rapid lactate determination with an electrochemical enzymatic sensor : Clinical usability and comparative measurements. *Z. Klin. Chem. Klin. Biochem.*, **13**, 533-539.
- 25) Roberts, M.F., Wenger, C.B., Stolwijk, J.A.J. and Nadel, E.R. (1977) : Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **43**, 133-137.
- 26) Rowell, L.B. (1974) : Human cardiovascular adjustments to exercise and heat stress. *Physiol. Rev.*, **54**, 75-159.
- 27) Saltin, B. and Stenborg, J. (1964) : Circulatory responses to prolonged severe exercise. *J. Appl. Physiol.*, **19**, 833-838.
- 28) Saltin, B. and Åstrand, P.-O. (1967) : Maximal oxygen uptake in athletes. *J. Appl. Physiol.*, **23**, 353-358.
- 29) Sawka, M.N., Knowlton, R.G. and Crutz, J.B. (1979) : Thermal and circulatory responses to repeated bouts of prolonged running. *Med. Sci. Sports and Exercise.*, **11**, 177-180.
- 30) Sawka, M.N., Knowlton, R.G. and Claser, R.M. (1980) : Body temperature, respiration, and acid-base equilibrium during prolonged running. *Med. Sci. Sports and Exercise*, **12**, 370-374.
- 31) Smith, E.E., Guyton, A.C., Manning, R.D. and White, R.J. (1976) : Integrated mechanisms of cardiovascular response and control during exercise in the normal human. *Prog. Cardiovas. Dis.* **18**, 421-443.
- 32) Winder, W.W., Hagberg, J.M., Hickson, R.C., Ehsani, A.A. and McLane, J.A. (1978) : Time course of sympathoadrenal adaptation to endurance exercise training in man. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **45**, 370-374.