

()

$\dot{V}O_2 \max$ 在規定才与循環系諸因子
の相對的割合

所属学科目：体 力 学

著 者：大 柿 哲 朗

論文指導教員：青木純一郎

昭和51年3月8日

論文審査委員

栗 本 潤 夫

大 田 昌 秀

大 西 曉 夫

目 次

緒 言	-----	1
関連文献の考証	-----	4
1 $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子	-----	4
(1) $\dot{V}O_2 \max$ を制限すると考え られる dimensional factor	-----	4
(2) $\dot{V}O_2 \max$ を制限すると考え られる functional factor	-----	5
1) 肺機能に関する因子	-----	5
2) 心臓血管系機能に関する 因子	-----	8
3) 筋機能に関する因子	-----	14
2 トレーニング"による $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子の変化	-----	17
(1) トレーニング"による dimensional factor の変化	-----	17
1) 肺の dimension	-----	17
2) 心臓血管系の dimension	-----	17
(2) トレーニング"による functional factor の変化	-----	19

1) 肺機能	-----	19
2) 心臓血管系機能	-----	21
3) 筋機能	-----	24
3 まとめ	-----	26
研究方法	-----	27
1 被験者	-----	27
2 運動負荷	-----	27
(1) 相対的運動負荷の決定	-----	27
(2) 相対的運動負荷の条件	-----	28
3 測定項目および手順	-----	28
(1) exhaustion test	-----	28
1) 酸素摂取量および二酸化炭素排出量	-----	28
2) 心拍数	-----	30
(2) 相対的負荷運動	-----	30
1) 酸素摂取量および二酸化炭素排出量	-----	32
2) 心拍数	-----	32
3) 動静脈酸素差	-----	32
4) 心拍出量	-----	34

	5) 一回拍出量	-----	34
	6) 平均動脈血圧	-----	34
	7) 総末梢抵抗	-----	34
	研究結果	-----	36
1	exhaustion test によつて得 られた結果	-----	36
2	相対的負荷運動によつて 得られた結果	-----	36
	(1) 相対的負荷運動の強度	-----	36
	(2) 心拍出量	-----	37
	(3) 動静脈酸素差	-----	38
	(4) 心拍数	-----	38
	(5) 一回拍出量	-----	39
	(6) 平均動脈血圧および総末 梢抵抗	-----	40
考	察	-----	42
1	$\dot{V}O_2 \max$	-----	42
2	相対的負荷運動による 循環系諸因子の変化	-----	44
3	最大運動時における循環		

	系諸因子の相対的割合	-----	48		
4	$\dot{V}O_2 \text{ max}$ の制限因子として				
	の平均動脈血圧および総末梢抵抗	----	50		
結	論	-----	52		
要	約	-----	53		
謝	辞	-----	55		
引	用	文	献	-----	56
英	文	要	約	-----	63
表	1 ~ 3				
図	1 ~ 9				

緒 言

有氣的作業能力を示す適切な指標として最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \max$) が多く用いられている。⁹⁾⁴⁶⁾⁷⁸⁾⁸⁵⁾

$\dot{V}O_2 \max$ は Fick の原理に基づけば、

最大心拍出量 ($Q \max$) \times 最大動静脈酸素差 ($(a-\bar{v})O_2 \text{ diff } \max$)
で表わされる。⁷⁷⁾ したがって、

$$\dot{V}O_2 \max = \text{最高心拍数} (fH \max) \times \text{最大一回拍出量} (SV \max) \\ \times (a-\bar{v})O_2 \text{ diff } \max$$

ともいえる。²⁾⁷⁷⁾ さらに右辺は、

$$\text{最大平均動脈血圧} (MBP \max) / \text{最小総末梢抵抗} (TPR \min)$$

$$\times (a-\bar{v})O_2 \text{ diff } \max$$

と置きかえることが可能である。²⁾⁷⁷⁾ したがって、これまで多くの研究者によって、これらの変数が $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子を研究する際の対象となってきた。従来の研究方法を検討してみると、次の三様の方法によってこれらの変数と $\dot{V}O_2 \max$ との関連が追求されていることが解る。すなわち、その一つは $\dot{V}O_2 \max$ の高い者と低い者の変数を比較するか、トレーニング前後のこれらの変数を比較するかである。この方法

によれば、 $\dot{V}O_2 \max$ の高い者の方が SV も大きい⁸⁾²⁵⁾⁴⁹⁾⁵⁰⁾⁷⁷⁾。したがって、 $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子として SV が重要な因子として考えられる。

才二の方法は同一個人について、 $\dot{V}O_2 \max$ を構成している諸因子の最大運動に対する増加率を比較するものである。Mitchell⁶⁶⁾らは最大運動時に $\dot{V}O_2$ は立位安静時から 9.5 倍増加し、この時 \dot{Q} は 4.3 倍、 $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ は 2.2 倍増加したとして、 $\dot{V}O_2 \max$ を制限する因子が \dot{Q} であると主張した。しかし、4.3 倍の \dot{Q} の増加は fH が 2.1 倍、SV が 2.0 倍増加したことによるものであり、 fH 、SV および $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ の 3 因子で比較すれば、 $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ が最も大きな $\dot{V}O_2$ 増加を示していることとなる。

才三の方法は最大下の負荷から最大負荷に至るまでの運動中の各因子の変化に注目するものである。Ouellet⁷³⁾らによれば、 $\dot{V}O_2$ は \dot{Q} が最大に達した後も増加するという。また、SV は $\dot{V}O_2 \max$ の 40 ~ 50%、 fH が 110 ~ 130 拍/分⁸⁾²⁷⁾³²⁾³⁹⁾ のとき最大に達し、それ以後ほとんど変化

しない⁵⁾³⁹⁾という報告がある。これらの報告はQおよびSVの $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子として重要性が大きいことを物語っている。なお、MBPおよびTPRが $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子として重要であるかどうかの研究はほとんどない。

結局、Fickの原理に基づく式を構成する変数の全てが研究方法の違いにより、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限する因子として重要であるとも、逆に重要でないともいえることになってしまう。問題は単一の制限因子を同定することに無理があるのであって、各因子がどれくらいの割合で $\dot{V}_{O_2 \max}$ を規定しているかを考えなければならぬといえよう。

そこで、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ を規定すると考えられる因子の相対的割合を明らかにするために、被験者として非鍛練者と鍛練者を用いて最大下から最大運動に至るまでの循環系諸因子の変化を検討することによってこの問題に対する知見を得ようと試みた。

関連文献の考証

1 $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子

(1) $\dot{V}O_2 \max$ を制限すると考えられる dimensional factor

Åstrand⁷⁾ は 7 ~ 30 歳までの男子の総ヘモグロビン量と $\dot{V}O_2 \max$ との間に高い相関関係 ($r = .97$) を見出した。また、Holmgren と Åstrand⁴⁵⁾ は鍛練者男女 20 名の $\dot{V}O_2 \max$ は肺活量 ($r = .88$)、総肺容量 ($r = .88$)、機能的残気量 ($r = .80$)、総ヘモグロビン量 ($r = .92$)、血液量 ($r = .88$) および心容量 ($r = .90$) との間にそれぞれ高い相関関係があったことを報告した。堀居と猪飼²⁷⁾ によれば、総ヘモグロビン量だけでなく単位体重あたりのヘモグロビン量と $\dot{V}O_2 \max$ および最大心拍出量との間にも高い相関関係 ($r = .895$ および $.711$) があり、また、単位体重あたりのヘモグロビン量が大きいことが高い $\dot{V}O_2 \max$ をもたらす。したがって、ヘモグロビン量は $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子であるという。

以上の報告に基づけば、 $\dot{V}O_2 \max$ は dimensional

因子と歸して高い相関関係があるわけであるが、個人の $\text{Vo}_2 \text{ max}$ を制限する単独因子となることは考えられない。

(2) $\text{Vo}_2 \text{ max}$ を制限すると考えられる functional factor

1) 肺機能に関する因子

① 肺換気量 : Dripps と Comroe²²⁾ は 21 ~ 26 歳の 19 名の男子を対象に、最大運動中の肺換気量および最大随意換気量を測定して、前者は後者のわずか 66% だけしかないという結果を得た。また、Zoccke⁸⁸⁾ は健康な男子および肺気腫患者が 15 分間持続できる最大の肺換気量を各被験者の最大随意換気量と比較して、運動中の肺換気量が最大随意換気量の 53% (健康な男子) および 59% (肺気腫患者) しかないことを報告した。したがって、最大随意換気量を呼吸器系の最大能力とみれば、呼吸器系は最大運動時ですえも充分余裕を持っていると考えられる。

Astrand⁵⁾ は大きな肺換気をするためには呼吸

筋への負担が大きくなるとして、また、心理学的な観点から被験者は主観的に呼吸への負担を感じるとして、肺換気量は運動の制限因子となり得るとした。しかし、肺換気量が $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限するか否かという問題に対しては消極的で、結局、高地のような特殊な環境下でのみ肺換気量は $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子となるであろうと述べた。

最大下から最大運動時までの肺換気量の増加に注目して、Morehouse と Miller⁶⁹⁾ および Ouellet⁷⁰⁾ は肺換気量は $\dot{V}_{O_2 \max}$ 、心拍出量などの循環系応答が最大値に達してもさらに増加の傾向を示すので、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子とはならないと述べている。

⑥ 肺拡散能 : 肺および組織におけるガス交換は分圧の差によって行われ、ガス分圧の高い方から低い方へとガスは拡散する。一般に 1 mmHg の圧差のときの毎分拡散量を拡散係数あるいは拡散能としてあらわす⁶⁹⁾。

運動中、肺拡散能がいつ最大値に達するか

についての報告は運動強度の違い、呼吸装置のデッドスペースと抵抗の違い、被験者の鍛練度の違いおよび測定法の違いなど⁴³⁾によって必ずしも一致した結論を得ていない。たとえば、Filley³⁰⁾らは安静時の4倍の酸素摂取量を必要とする運動中に、FreyschussとHolmgren³¹⁾およびHolmgren⁴⁴⁾は心拍数が120拍分のときに、また、Riley⁷⁶⁾らは酸素摂取量が若い被験者(33歳および37歳)では2200 ml/分、老年被験者(66歳)では1200 ml/分のときに肺拡散能の最大値が発現し、それ以上に運動強度を増加しても肺拡散能は変化しないことを報告した。これに対し、Krogh⁵⁹⁾はある換気量を必要とする運動強度までは負荷の強さと無関係で、それ以上の運動強度では換気量に比例して肺拡散能は増加するという。また、個人差も大きいという。AsmussenとNielsen⁴⁾も軽い運動中の肺拡散能は安静時とほぼ同じであるが、激運動中は増加するという結果を得た。また、Lilienthal, Jr.⁶¹⁾らは低酸素状態での運動によってKrogh⁵⁹⁾と同じ

結果を得た。

Krogh⁵⁹⁾によれば、肺拡散能は低酸素状態および激運動中でも肺胞と血液とのガス交換を保証するのに充分であるという。また、動脈血の酸素飽和度は激運動中も減少しないから⁴⁾⁴¹⁾⁴³⁾⁷¹⁾たとえ酸素摂取量の増加に伴って増加するとしても肺拡散能が $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限するようには思われぬ。

以上の報告から、肺機能に関するパラメータには $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限すると考えられる因子は存在しないと結論できらるであろう。

2) 心臓血管系機能に関する因子

測定に用いた運動方法の違いによって $\dot{V}_{O_2 \max}$ に差がみられる。たとえば、トレッドミル運動と自転車エルゴメータによる $\dot{V}_{O_2 \max}$ を比較した報告では、HermansenとSaltin³⁸⁾が7%、Glasfordら³³⁾が8%、猪飼⁴⁵⁾が12%、進藤³²⁾が13.4%、そしてWyndhamら²⁵⁾が7.8%といずれもトレッドミル運動によって測定された $\dot{V}_{O_2 \max}$ の方が大きいと報告している。また、Åstrandと

Saltin⁷⁾はトレッドミル走によって測定された $\dot{V}_{O_2 \max}$ が他のどのような運動の場合より大きかったことを報告した。さらに、Taylor⁸⁵⁾らによればトレッドミル走に腕でペダリング⁸⁵⁾をすする運動を加えることによって、トレッドミル走のみの場合より大きな $\dot{V}_{O_2 \max}$ が得られたという。Åstrand⁵⁾はスキーによる $\dot{V}_{O_2 \max}$ について報告した Christensen と Högberg⁶⁾の被験者のうち2名に、サイクリングおよびトレッドミル走を行なわせ、スキーの $\dot{V}_{O_2 \max}$ と比較した。その結果、スキーで 5.24 l/分 の $\dot{V}_{O_2 \max}$ を示した被験者はサイクリングで 4.64 l/分 およびトレッドミル走で 4.57 l/分 の $\dot{V}_{O_2 \max}$ を示した。もう1名の被験者はサイクリングにおいて、作業時間が7分間で 4.3 l/分 の $\dot{V}_{O_2 \max}$ を示したが、彼は 4.35 l/分 の酸素摂取量で 50~60分間にわたってスキーを行なうことができた。

以上の報告において、ほとんどの研究者が酸素摂取量の levelling off⁵⁾⁸⁵⁾、あるいは血中乳酸濃度が 70~75 mg/ml 以上¹⁾⁵⁾⁸⁵⁾ という $\dot{V}_{O_2 \max}$ の判定基

準を用いていたにもかかわらず、このように運動種目によって $\dot{V}O_2 \max$ が異なる理由として次のことがらがあげられている。すなわち、運動に参加する筋群量が異なる³⁸⁾⁸¹⁾、筋内圧が異なる³⁸⁾³⁹⁾、実際には心臓の能力に限界がある⁵⁾⁸⁵⁾、大循環 (Central circulation) が最大になる前に局所の筋群に疲労がおこる³⁹⁾、個々の筋群で発揮される張力が異なる³⁸⁾ などである。

ここで、運動に参加する筋群量が異なるという意見に対し、Åstrand と Saltin⁶⁾ は $\dot{V}O_2 \max$ はある筋群量をこえると筋群の大きさには関係がないことを報告し、また、Hermansen らもサイクリングとランニングに必要な筋群量に差がないとした。しかし、前述の Taylor ら⁸⁵⁾、Åstrand⁵⁾ および Christensen と Högberg¹⁶⁾ の結果を考えれば、筋群量の問題以外に複雑な問題があると思われる。たとえば、4.35 l/分の酸素摂取量で 50～60 分間も運動を持続できる理由として、Christensen と Högberg¹⁶⁾ はスキーが力強い多量の筋群におよぶ¹⁶⁾ ということのほか、滑走中

に筋が収縮と "relative rest" を交互に行なうためであると説明した。

以上のことから、 $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子が大循環にあるのか、それとも末梢循環 (Peripheral circulation) にあるのかという問題が生じる。この問題を解決するためには心拍出量、一回拍出量などの大循環と筋血流量、総末梢抵抗などの末梢循環の変化に注目する必要がある。

② 大循環：心拍出量は酸素摂取量と直線関係にあるという^{2) (19) 25) 26) 27) 32)}。しかし、心拍出量と酸素摂取量との関係が $\dot{V}O_2 \max$ の発現時点まで直線関係にあるかどうかは明らかでない。Åstrand¹⁾ は少なくとも $\dot{V}O_2 \max$ の 70% まで酸素摂取量と心拍出量は直線関係にあると報告した。それ以上の強度の運動では Asmussen と Nielsen³⁾ は酸素摂取量の levelling off とともに心拍出量も levelling off するといひ、Ouellet⁷⁾ は心拍出量が最大レベルに達した後も酸素摂取量は増加しつづけることを報告している。

もし酸素摂取量の levelling off とともに心拍出量も levelling off するならば、心拍出量が $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限すると考えられる。逆に、心拍出量が最大値に達しても $\dot{V}_{O_2 \max}$ が増加するならば、心拍出量は $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限する因子として重要でないといえる。

一回拍出量は $\dot{V}_{O_2 \max}$ のほぼ 40~50%、あるいは心拍数が 110~130 拍/分で最大値に達し、それ以上の負荷でも減少の傾向はみられないといわれている。この事実は心臓の能力に余裕があるとも、逆に余裕がないともいえる。一般に、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限する因子として心拍出量および一回拍出量が最も多く考えられているが、もし心臓の能力に余裕がないという考え方に立てば、これらの度量も $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限因子として重要である。

⑥ 末梢循環 : もし Hermansen と Saltin³⁸⁾ および Glasfold³⁹⁾ らが指摘したように筋肉圧が高まると $\dot{V}_{O_2 \max}$ が制限されるようなことがあれば、それは末梢の抵抗が高まって筋血流量が

制限されていることによる結果である。

トレッドミル走において測定した $\dot{V}O_2 \max$ および最大心拍出量が自転車エルゴメータより大きいことを報告した Hermansen³⁹⁾らのデータによれば、平均動脈血圧は両運動で差はなく、総末梢抵抗はトレッドミル走の方が有意に小さかった ($P < .001$)。

Grimby³⁶⁾らは3段階の最大下および最大運動中の大腿四頭筋の血流量を測定した。その結果、筋血流量は負荷の増加とともに増加し、最大運動時で最大 ($49.5 \text{ ml}/100\text{g}\cdot\text{分}$) になったことを報告した。また、Pirnay⁷⁴⁾らも exhaustion に至るまでの運動において大腿四頭筋の血流量を測定して、Grimby³⁶⁾の結果と同様な結果を示した (最大筋血流量: $43.2 \text{ ml}/100\text{g}\cdot\text{分}$)。また、Pirnay⁷⁴⁾らは心拍数に levelling off がみられたが、筋血流量にはみられなかったことも報告している。さらに、片脚を圧迫して筋血流量を阻止した状態で最大下運動を行なわせた結果、他方の脚の筋血流量は $53.1 \text{ ml}/100\text{g}\cdot\text{分}$ で、圧迫なしの最

大運動を行なったときよりも大きい筋血流量が得られたことを報告した。

以上の報告はたとえ大循環の能力に限界があっても、局所の筋血流は充分余裕を携っており、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限する因子としてさほど重要でないことを意味している。

3) 筋機能に関する因子

④ 筋の拡散能 : Stainsby と Otis²⁴⁾ は犬の脚筋標本を用いて筋細胞内に酸素を供給するのに必要な最低の酸素張力を算出した。これを "critical oxygen tension" とよび、約 10 mmHg であることを報告した。Doll²⁰⁾ らによれば自転車エルゴメータでの最大運動時における大腿静脈血の酸素張力は 21.7 ± 3.18 mmHg であったという。また、Pirnay⁷⁴⁾ らによれば大腿静脈血酸素張力は運動負荷の増加に伴って減少し、exhaustion 時で 16.6 ± 2.4 mmHg であるという。

これらの報告は最大運動時でさえも筋の拡散量が充分であることを示唆するものである。

⑤ 筋の酸素利用能 : 活動的でない実験用

ウサギの腰筋のコハク酸脱水素酵素、コハク酸酸化酵素およびチトクローム酸化酵素の活性は活動的な野ウサギおよび馬の腰筋のこれらの活性値の3分の1〜2分の1および8分の1〜4分の1しかないという⁶⁰⁾。また、Hollloszy⁴⁰⁾は雄ネズミに激しいトレーニングを行なわせた結果、ミトコンドリアのピルビン酸酸化能力およびコハク酸脱水素酵素、コハク酸酸化酵素、チトクローム酸化酵素などの活性が2倍増加し、チトクローム濃度も2倍増加したことを報告した。

活動的な動物の筋が高い酵素活性を持つことおよびトレーニングによって酵素活性が増加することはクレブス回路および電子伝達系能力の向上を意味し、 $\dot{V}O_2 \max$ の向上を示唆するものである。したがって、筋の酸素利用能は $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子として重要な意味を持つ⁴⁰⁾ように思われる。しかし、上記の報告は $\dot{V}O_2 \max$ の測定を行なっていない。したがって、高い酵素活性あるいは酵素活性の増加が実際

に $\dot{V}O_2 \max$ の増加をもたらすかどうか、あるいは $\dot{V}O_2 \max$ を制限する因子として重要であるかどうかは明らかでない。

最近、Gollnick²⁴⁾ らはコハク酸脱水素酵素活性は持久的トレーニングを行なっているグループの筋において高く、特に自転車競技選手²⁴⁾の脚筋では一般人より2.5倍高かったことを報告した。そして、コハク酸脱水素酵素活性と骨格筋の酸化容量が等しいと仮定して、自転車競技選手の脚筋の酸化容量が一般人の2.5倍大きいにもかかわらず、 $\dot{V}O_2 \max$ は決して一般人の2.5倍大きくはないという事実を考察して、筋の酸化容量が $\dot{V}O_2 \max$ を制限するとは思えないことを示唆した。

結局、筋機能が $\dot{V}O_2 \max$ を制限するということを証明する証拠はなく、逆に Gollnick²⁴⁾ らが示すように、筋機能が $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子とはならない確率の方が高いようである。

2 トレーニングによる $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子
の変化

(1) トレーニングによる dimensional factor の変化

1) 肺の dimension

Reuschlein⁷⁵⁾らは8名のボート選手に5か月間のトレーニングを行なわせた結果、肺活量、総肺容量および最大随意換気量に何ら変化を見出すことができなかった。また、Kilbom⁵⁵⁾らもトレーニング実験で、肺活量および最大随意換気量にほとんど変化がみられなかったことを報告した。

Saltin⁸⁰⁾によれば水泳や潜水のような肺活量の大きさに依存するような種目においては呼吸器系能力は向上するが、他の運動種目のトレーニングでは一回呼吸量が個人の肺活量の50~55%しか使わない。したがって、肺の“静的”な dimension の変化に対し充分な刺激とたり得ないという。

2) 心臓血管系の dimension

Bevegård¹³⁾らは自転車競技選手の循環系の dimension を測定し、Holmgren⁴²⁾らおよび Bevegård¹²⁾らによって測定された非鍛練者の値と比較した。

その結果、総へモグロビン量および総血液量はいずれも競技者の方が大きかったことを報告した。また、心容量も同じ体格を持つ非鍛練者と比較しても大きかった。堀居と猪飼⁴⁷⁾も鍛練者の総へモグロビン量および体重あたりのへモグロビン量が一般人に比べて大きかったことを報告した。

山川ら⁴⁸⁾は5分間の走トレーニングによって女子大生の赤血球およびへモグロビン量の増加を見た。しかし、Knehrら⁵⁸⁾は中距離選手に6か月間のトレーニングを行なわせた結果、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ は約7%増加したが、へモグロビン濃度および赤血球数に変化がなかったことを報告した。また、トレーニングによって肺毛細血管血液量⁷⁵⁾、心容量⁵⁹⁾に変化はみられないと報告されている。

心臓血管系の dimension に対するトレーニング効果の食い違いについては、被験者の鍛練度の違い、トレーニング方法、強度、時間および頻度の違いによるものと考えられる。

(2) トレーニングによる functional factor の変化

1) 肺機能

② 肺換気量 : 男子 95 名および女子 38 名の一流選手を競技種目別に分け、それぞれの種目別特性をみた Saltin と Åstrand⁷⁸⁾ は $\dot{V}_{O_2 \max}$ が平均 5.75 l/分 および 3.60 l/分の大きな値を示した男子および女子の群の最大換気量はそれぞれ 158.7 l/分 および 111.8 l/分であったことを報告した。これは大きな $\dot{V}_{O_2 \max}$ を持つ者が大きな最大換気量を持つということを示している。また、Saltin ら⁸¹⁾ および Hartley ら³⁷⁾ はトレーニング実験によって、最大換気量は前者が 112 l/分から 128 l/分に、後者が 110 l/分から 109 l/分にそれぞれ増加したことを報告した。

肺換気量は酸素摂取量が levelling off した後も増加しつづける⁶⁹⁾⁷³⁾ ので、酸素を摂取するのに必要な換気量、すなわち、呼吸の効率が重要である⁶⁹⁾。しかし、最大運動時の呼吸の効率はトレーニングによっても変化しないとい¹³⁾⁵⁵⁾う。したがって、最大換気量の増加は $\dot{V}_{O_2 \max}$

の増加に關与しない¹³⁾ものと考えられる。

⑤ 肺拡散能 : Batesら¹⁴⁾によれば安静時の肺拡散能は性、年齢、身長、機能的残気量、喫煙習慣および競技能力とは關係がないという。しかし、彼らの被験者の1名の一流選手は高い肺拡散能を持っていた。また、以前によく鍛練された者1名と一般人1名に最大運動を行なわせた結果、前者が後者より高い肺拡散能を持っていたことも報告した。Magel と Andersen⁶²⁾は10名の水泳選手および9名の一般人に最大下から exhaustion に至るまでの運動を行なわせ、水泳選手は安静時および運動の全強度で一般人より有意に高い肺拡散能を持っていた(安静時: $P < .05$, 運動中: $P < .01$) ことを報告した。また、Mostyn ら⁷⁰⁾は被験者を体力別に8群に分けて運動中の肺拡散能を比較した結果、非常にすぐれた水泳選手は看護婦や医学部学生より高い肺拡散能を持っていたが、他の水泳選手や体育学部学生などの間に差はみられなかったことを報告した。Newman ら⁷¹⁾は国際レ

ベルの陸上競技選手および陸上競技選手と同
 年齢で、同体格をもつ非鍛練者の最大肺拡散
 能は前者が後者より有意に高い ($P < 0.01$) こと
 を、そして、この高い肺拡散能は高度なトレ
 ーニングの結果であることを述べている。ま
 た、非鍛練者にトレーニングを行わせた結
 果、肺拡散能は向上したという。

これらに対し、Reuschlein²⁹⁾らは優れた競技者
 が "supernormal" な肺拡散能を持つと仮定して、
 ボート選手に5か月間のトレーニングを行
 わせて一般大学生と比較した結果、肺拡散能
 へのトレーニング効果がみられなかったこと
 および鍛練者と非鍛練者にも差がみられな
 かったことを報告した。

2) 心臓血管系機能

① 大循環 : 男子鍛練者の最大心拍出量に
 ついて、 $24.1 \text{ l/min}^{21)}$ 、 $26.3 \text{ l/min}^{13)}$ 、 $27.5 \text{ l/min}^{39)}$ およ
 び $27.0 \text{ l/min}^{50)}$ という値が報告されている。また、
 Ekblom と Hermansen²⁵⁾らは国際的²⁵⁾な一流選手で 36.0
 l/min の非常に大きな最大心拍出量を報告した。

これに対し、一般成人男子についての報告値は 23.4 l/min ²⁹⁾、 22.1 l/min ⁵⁰⁾ および 23.4 l/min ⁶⁵⁾ であり、鍛練者に比べて低い。

Ekblom²⁴⁾らは一般成人男子に16週間のトレーニングを行なわせた結果、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ は 3.15 l/min から 24.2 l/min に増加し、最大心拍数は変化しなかったことを報告した。したがって、この心拍出量の増加は一回拍出量が 112 ml から 127 ml に増加したためであると説明した。

Saltin⁷⁹⁾らは20日間の“bed rest”によって、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ に28% ($P < .001$)の減少を観察したが、これは一回拍出量の28%の減少によるものであった。また、“bed rest”後53~55日間のトレーニングを行なわせた結果、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ は“bed rest”前より33% ($P < .001$)増加し、これは一回拍出量および動静脈酸素差がそれぞれ16.7%および16.4%増加したことによると説明した。

心拍出量、一回拍出量および動静脈酸素差に対するトレーニング効果をまとめると、Rowell⁷⁷⁾はトレーニング前に低い $\dot{V}_{O_2 \max}$ を持つ者は

$\dot{V}O_{2\max}$ の増加が大きく、これは若者では一回
拍出量と動静脈酸素差の等しい増加によって、
老年者では一回拍出量のみ増加によっても
たらされる。一方、初め $\dot{V}O_{2\max}$ の高い者は
 $\dot{V}O_{2\max}$ の増加が小さく、これはほとんど一回
拍出量の増加のためであることを述べている。

⑥ 末梢循環 : Ekblom と Hermansen²⁵⁾ の測定デ
ータによれば国際的な一流選手と国内レベル
の選手の $\dot{V}O_{2\max}$ に有意な差 ($P < .01$) がみられた
が、最大運動中の平均動脈血圧および総末梢
抵抗には両群の間に差はみられなかった。一
方、"bed rest" によって $\dot{V}O_{2\max}$ に 28% の減少を
観察した Saltin ら⁷⁹⁾ によれば、最大運動中の平
均動脈血圧は有意に低下 ($P < .001$) したとい
う。しかし、"bed rest" の前と後および $\dot{V}O_{2\max}$ が 33
% 増加したトレーニング前後の最大運動時の
総末梢抵抗は変化しなかった。

収縮期血圧および拡張期血圧へのトレーニ
ング効果を見た Kilbom ら⁵⁵⁾ は運動中の収縮期血
圧および拡張期血圧へのトレーニング効果が

ないことを報告した。したがって、平均動脈血圧も変化しない。同様に、Hartleyら³⁷⁾もトレーニング前後の平均動脈血圧に、さらには総末梢抵抗にも有意な変化がなかったことを報告している。

比較的大きな筋群を必要とする運動中の筋血流量を測定した例は少ない。Grimbyら³⁶⁾は自転車エルゴメータおよびトレッドミルでの3段階の最大下および最大運動中の大腿部筋血流量を測定した。その結果、鍛練者と非鍛練者の最大筋血流量に差はなく、同一相対負荷水準においても両群の間に差はみられなかったことを報告した。

以上の報告によれば、これまでの実験では末梢循環へのトレーニング効果を認めていない。

3) 筋機能

- ① 筋の拡散能 : 筋の拡散能へのトレーニング効果については全く報告されていない。
- ② 筋の酸素利用能 : 活動的な部位、ある

いは活動的な動物の筋および持久的競技者の筋において、フレーブス回路および電子伝達系に關与する酵素活性が高いことが報告されている。³⁴⁾⁶⁰⁾ また、Gollnick³⁵⁾らは筋の線維構成、酵素活性などへのトレーニング効果を検討して、トレーニングによって $\dot{V}O_2 \max$ は 3.6 ~ 25% 増加し、コハク酸脱水素酵素は 95% 増加したことを報告した。さらに、Holloszy⁴⁰⁾らは彼ら以前に報告された筋の有氣的過程に対するトレーニング効果がないという報告に対し、トレーニングに用いた運動強度が低く充分な運動刺激とならなかったとして、ネズミに激しいトレッドミル走を行わせた。その結果、種々の酵素活性およびキトクローム濃度が 2 倍増加し、ミトコンドリアの数および大きさも 60% 増加したことを報告した。電子伝達系はミトコンドリア内に存在し、ミトコンドリアの数および大きさが増加すること、およびフレーブス回路ならびに電子伝達系に關与する酵素の活性が増加することは筋の有氣的過程の

向上をもたらすであろう。

3. まとめ

以上の $\dot{V}_{O_2 \max}$ を制限すると考えられる因子および各因子に対するトレーニング効果についての報告から、肺換気量と肺拡散能を指標とする肺機能は $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子としてそれほど重要なものとは思われない。また、筋の拡散能と筋の酸素利用能からみた筋機能の因子も $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子としての証拠が少ない。さらに、心臓血管系機能の末梢循環も筋血流量は exhaustion 時でさえ充分であるらしいので $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子として重要とは考えられない。結局、心臓血管系機能の大循環が $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子でないとする証拠がなく、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ の制限因子として最も重要であると考えられる。

研究方法

1 被験者

被験者として、日常規則的に持久的トレーニングを全く行なっていない一般青年男子10名および順天堂大学体育学部陸上競技部に所属する長距離選手8名を用いた。

表-1

彼らの年齢、身長および体重を表-1に示した。非鍛練者群の年齢、身長および体重はそれぞれ 21 ± 1.5 才、 170.2 ± 2.70 cm および 64.4 ± 8.4 kg であった。一方、鍛練者群の年齢、身長および体重はそれぞれ 20 ± 1.3 才、 168.8 ± 2.44 cm および 57.8 ± 3.57 kg であり、両群の間に何ら差はみられなかった。

2 運動負荷

(1) 相対的運動負荷の決定

各被験者の相対的運動強度 (% of $\dot{V}O_2 \max$) とトレッドミルの斜度との関係を求めるために、国際体力テスト標準化委員会 (ICSPFT) によって制定された superstandard treadmill test¹⁰⁾ を用いた。すなわち、トレッドミルのスピードを毎分 $100m$

に固定し、斜度を4%から始め20% (8分)まで1分ごととに2%ずつ、そして20%以降は2分ごととに2%ずつ漸増して exhaustion に至らせた (exhaustion test)。

次に、% of $\dot{V}_{O_2 \max}$ と斜度との関係図を作成し、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ の30%、60%、90% および100%に相当する斜度を求めた。

(2) 相対的運動負荷の条件

上記の方法で求めた $\dot{V}_{O_2 \max}$ の30%、60%、90% および100%に相当する斜度で、それぞれ6分間の負荷運動を行なわせた (以下、相対的負荷運動とする)。これらの運動は $\dot{V}_{O_2 \max}$ の30%と100% および60%と90%の運動を組みあわせて、日を異にして実施した。なお、1回目と2回目の運動の間に15~45分間の休息時間をおいた。

3 測定項目および手順

(1) exhaustion test

1) 酸素摂取量 \dot{V}_{O_2} および二酸化炭素排出量 \dot{V}_{CO_2}

被験者に椅座位安静状態で充分休息させた後、1-ズクリップおよび呼吸装置(内径:19mm、死腔量:100ml)を装着して、ダグラスバッグに5分間の呼気を採集した。

運動中、非鍛練者においては運動開始から exhaustion まで1分間ずつ連続的に採気した。一方、鍛練者においては運動開始1分目から1分おきに1分間ずつ、そして exhaustion 直前の3~5分間は1分間ずつ連続して採気した。

採集された呼気は直ちに湿式実験用ガスマータ(品川製作所製, 1回転10l)を用いて計量した。同時に、その一部を瞬時酸素分析器 OM-11 (Beckman社製) および瞬時医用ガス分析器 LB-1 (Beckman社製) によって O_2 濃度 および CO_2 濃度を分析し、 $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ を STPD で求めた。

なお、これらの分析器はあらかじめショランダー-微量呼気ガス分析器 (Dayton electric社製) によって校正した。

以上の方法によって得られた $\dot{V}O_2$ の最大値

を $\dot{V}O_2 \max$ とし、その判定は $\dot{V}O_2$ の levelling off⁵⁾⁸⁵⁾ を基準とした。

2) 心拍数 fH

安静時においては採気開始後 3 分 30 秒から 4 分 30 秒までの 1 分間、そして運動中は exhaustion まで連続的に胸部導出法による心電図を記録した。記録された心電図の R 棘の数を 30 秒間ずつ数えて 1 分間値の fH を求めた。

(2) 相対的負荷運動

exhaustion test と同様に安静時の採気および心電図の記録を行った。しかし、採気終了 1 分前から呼吸装置の側枝を瞬時医用ガス分析器 LB-1 に通じ、呼気の一部を毎分 500 ml の割合で吸引し、1 呼吸ごとの CO_2 濃度を分析した。これを自動平衡式記録器(横河電機製作所製)に呼吸曲線として記録した。

採気終了と同時に、被験者に大きな呼吸を行わせ、呼吸装置上部の三方活栓をまわすことによって再呼吸用バッグ内の混合ガス (CO_2 : 4.94%, O_2 : 95.06%, 混合ガス量: 2~3 l) と被験

者の肺との閉鎖回路をつくり、再呼吸用バッグ内の混合ガスと肺胞気を平衡させた。なお、この再呼吸はメトロノームにあわせて30回^分のリズムで、そして一定の呼吸量で8~9回行なわせた。この時のCO₂濃度を再呼吸曲線として記録した。

再呼吸終了後、聴診法によって右上腕動脈部における収縮期血圧および拡張期血圧を測定した。この血圧は全実験を通して熟練した1人の測定者によって測定した。

これらの安静値測定に引き続き相対的負荷運動を6分間行なわせた。運動開始後3分45秒から5分45秒までの2分間に1分間ずつ採気し、4分30秒から6分までの間に血圧の測定を行なった。また、心電図を運動開始から終了時まで連続して記録した。

運動終了1分前から呼吸曲線を、そして運動終了15秒前から再呼吸を行なわせて再呼吸曲線を記録した。この時の再呼吸リズムは60回/分とし、8~9回の再呼吸を行なわせた。

なお、再呼吸用バッグ内の混合ガス量は4~5Lとした。

運動終了後、椅座位の状態⁵⁴⁾で15~45分間の休息をとらせ、次の段階の負荷運動を行なわせた。

1) 酸素摂取量および二酸化炭素排出量
安静時および運動時に採集された呼気から V_{O_2} および V_{CO_2} を求め、相対的負荷運動中の値として後半の1分間値を用いた。

2) 心拍数

相対的負荷運動中の f_H は運動終了前の30秒間(5分30秒~6分)の心電図から求めた。

3) 動静脈酸素差 $(a-v)O_2$ diff

動脈血 CO_2 分圧 (P_{aCO_2}) を以下の方法で求めた。end-tidal sampling 法⁵⁴⁾⁶⁸⁾によって、再呼吸前の呼吸曲線のピーク値 (CO_2 濃度) 10個を平均して肺胞気 CO_2 濃度 (F_{ACO_2}) を算出した。分圧の法則およびボイル・シャルルの法則にしたがえば、大気圧 (P_B) から飽和水蒸気圧 ($47\text{mmHg} : 37^\circ\text{C}$) を減じたもの、すなわち肺胞気内圧と F_{ACO_2} の積

が肺胞気 CO_2 分圧 (PACO_2) である。ところで、 PACO_2 と Paco_2 は等しいと仮定される⁶⁸⁾から、 Paco_2 は次式で求められる。

$$\text{Paco}_2 = \text{PACO}_2 = \text{FACO}_2 \times (\text{PB} - 47) \text{ mmHg}$$

次に、混合静脈血 CO_2 分圧 ($\text{P}\bar{\text{v}}\text{CO}_2$) を以下の方法によって求めた。再呼吸曲線のピーク値 (CO_2 濃度) を再呼吸の 1 回目を除外してプロットした。すなわち、2 回目の CO_2 濃度を横軸に、3 回目の CO_2 濃度を縦軸にとり、さらに 3 回目の CO_2 濃度を横軸、4 回目の CO_2 濃度を縦軸にプロットした。同様に 4 回目、5 回目とプロットした。そして 6 回目の CO_2 濃度を横軸、7 回目の CO_2 濃度を縦軸にそれぞれプロットした。これで 5 つの点がプロットされ、これらの点を通る回帰直線を算出して、この直線と $Y = X$ の直線の交点を混合静脈血 CO_2 濃度 ($\text{F}\bar{\text{v}}\text{CO}_2$) とみ¹⁸⁾²³⁾たし、 Paco_2 の場合と同様にして $\text{P}\bar{\text{v}}\text{CO}_2$ を求めた。

上記の方法で求めた Paco_2 および $\text{P}\bar{\text{v}}\text{CO}_2$ を酸化型 CO_2 解離曲線¹⁷⁾の図に代入して、動脈血およ

が混合静脈血の CO_2 含有量 ($C_{a\text{CO}_2}$, $C_{\bar{v}\text{CO}_2}$) へ換算した。ここで求められた $C_{\bar{v}\text{CO}_2}$ と $C_{a\text{CO}_2}$ の差に \dot{V}_{O_2} と \dot{V}_{CO_2} の比を乗じて $(a-\bar{v})\text{O}_2 \text{ diff}$ を算出した。

$$(a-\bar{v})\text{O}_2 \text{ diff} = (\dot{V}_{\text{O}_2} / \dot{V}_{\text{CO}_2}) \times (C_{\bar{v}\text{CO}_2} - C_{a\text{CO}_2})$$

4) 心拍出量 \dot{Q}

心拍出量は Fick の原理に基づき、 \dot{V}_{O_2} を $(a-\bar{v})\text{O}_2 \text{ diff}$ で除すことにより求めた。

$$\dot{Q} = \dot{V}_{\text{O}_2} / (a-\bar{v})\text{O}_2 \text{ diff}$$

5) 一回拍出量 SV

一回拍出量は \dot{Q} を fH で除すことにより求めた。

$$SV = \dot{Q} / fH$$

6) 平均動脈血圧 MBP

平均動脈血圧は収縮期血 (BP_s) と拡張期血圧 (BP_d) の差に 3 分の 1 乗倍して、 BP_d と加えることにより求めた。

$$MBP = [(BP_s - BP_d) / 3] + BP_d$$

7) 総末梢抵抗 TPR

総末梢抵抗は MBP を \dot{Q} で除すことにより求めた。

求めた。

$$TPR = MBP / Q$$

本実験は順天堂大学体育学部運動生理学教室において、昭和50年10月7日から11月2日までの間に実施した。その時の室温、相対湿度および気圧はそれぞれ $21.7 \pm 2.02^{\circ}\text{C}$ 、 $67.1 \pm 5.58\%$ および $763.1 \pm 5.24 \text{ mmHg}$ であった。

研究結果

1 exhaustion test によって得られた結果
exhaustion test による exhaustion time、 $\dot{V}O_2 \max$

表-2

および最高心拍数を表-2 に示した。

非鍛練者群および鍛練者群の exhaustion time はそれぞれ 10 分 41 秒 4 \pm 1 分 52 秒 2 および 18 分 42 秒 0 \pm 1 分 42 秒 6 で、両群の差は有意であった ($P < .001$)。

非鍛練者群および鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ はそれぞれ 46.2 \pm 5.17 ml/kg.分 および 58.6 \pm 4.75 ml/kg.分 で、両群の差は有意であった ($P < .001$)。また、 $fH \max$ は非鍛練者群が 198 \pm 7.0 拍/分、鍛練者群が 183 \pm 8.5 拍/分 で、その差も有意であった ($P < .05$)。

2 相対的負荷運動によって得られた結果

安静時および各負荷運動時に得られた循環系諸因子の値を各強度別に表-3 に示した。なお、安静値は 2 回の平均値で示した。

表-3

(1) 相対的負荷運動の強度

$\dot{V}O_2 \max$ の 30%、60%、90% および 100% と

見積った負荷運動を行なわせた結果、非鍛練者群および鍛練者群の実際の負荷強度は、30%負荷時がそれぞれ $42.7 \pm 4.64\%$ および $34.3 \pm 3.11\%$ 、60%負荷時が $63.4 \pm 5.19\%$ および $60.4 \pm 3.70\%$ 、90%負荷時が $89.3 \pm 3.20\%$ および $84.6 \pm 4.36\%$ 、そして100%負荷時が $98.9 \pm 3.82\%$ および $98.7 \pm 5.37\%$ であった。

なお、非鍛練者 K.T. は $\dot{V}O_2 \max$ の100%負荷時において、運動を6分間持続できず5分45秒で exhaustion に至った。したがって、 \dot{Q} の測定は不可能であった。この負荷での $\dot{V}H$ は5分15秒から5分45秒までの30秒間から求めた。

(2) 心拍出量

図-1 相対的負荷強度と心拍出量の関係を図-1に示した。

\dot{Q} は両群とも負荷強度の増加に比例して直線的に増加し、 $\dot{V}O_2 \max$ の100%負荷時における非鍛練者群および鍛練者群の \dot{Q} はそれぞれ 21.6 ± 1.84 l/分 および 23.1 ± 1.52 l/分 で、両

図-1

群の差は有意であった ($P < 0.05$)。負荷強度を $\dot{V}O_2 \max$ の 90% から 100% に増加させたとき、鍛練者群の \dot{Q} は有意な増加 ($P < 0.01$) を示したが、非鍛練者群の場合には有意な増加を示さなかった。

(3) 動静脈酸素差

図-2

相対的負荷強度と動静脈酸素差の関係を図-2 に示した。

$(a-v)O_2 \text{ diff}$ は両群とも負荷強度の増加に伴って増加した。しかし、負荷強度を $\dot{V}O_2 \max$ の 90% から 100% に増加させても、両群とも $(a-v)O_2 \text{ diff}$ は有意な増加を示さなかった。鍛練者群の $(a-v)O_2 \text{ diff}$ はいずれの負荷強度でも非鍛練者群より高い傾向にあり、 $\dot{V}O_2 \max$ の 100% 負荷時の非鍛練者群および鍛練者群の $(a-v)O_2 \text{ diff}$ はそれぞれ $13.6 \pm 0.66 \text{ vol\%}$ および $14.7 \pm 0.86 \text{ vol\%}$ であった ($P < 0.01$)。

(4) 心拍数

図-3

相対的負荷強度と心拍数の関係を図-3 に示した。

fH は両群とも負荷強度の増加に比例して直線的に増加した。負荷強度を $\dot{V}O_2 \max$ の 90% から 100% に増加させたとき、鍛練者群の fH は有意に増加 ($P < .05$) したが、非鍛練者群は有意な増加を示さなかった。いずれの負荷強度においても、非鍛練者群の fH は鍛練者群より高く、 $\dot{V}O_2 \max$ の 100% 負荷時の fH は非鍛練者群が 191 ± 11.5 拍/分、鍛練者群が 164 ± 10.2 拍/分であった ($P < .001$)。非鍛練者群および鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ の 100% 負荷時における fH は exhaustion test で得られた fH max に対し、前者が $96.1 \pm 3.53\%$ 、後者が $89.2 \pm 3.25\%$ であり、後者の $\dot{V}O_2 \max$ の 100% 負荷時における fH (164 ± 10.2 拍/分) と fH max (183 ± 8.5 拍/分) の差は有意であった ($P < .01$)。

(5) 一回拍出量

図-4 相対的負荷強度と一回拍出量の関係を図-4 に示した。

SV は非鍛練者群および鍛練者群とも各被験者の $\dot{V}O_2 \max$ の 35.5 ~ 103.5% で、それぞれ

101 ~ 129 ml および 125 ~ 161 ml の最大値 (SV max) に達した。SV max は前者が 119 ± 9.8 ml、後者が 153 ± 13.4 ml であり、両群の差は有意であった ($P < .001$)。

(6) 平均動脈血圧および総末梢抵抗

図-5

相対的負荷強度と平均動脈血圧の関係を図-5 に示した。

MBP は負荷強度を $V_{O_2 \max}$ の 30% から 100% まで増加させてもほとんど変化しなかった。しかし、 $V_{O_2 \max}$ の 100% 負荷時の MBP は安静時と比較して非鍛練者群および鍛練者群とも有意な減少を示した ($P < .01$ および $P < .05$)。非鍛練者群および鍛練者群の $V_{O_2 \max}$ の 100% 負荷時における MBP はそれぞれ 69.0 ± 7.48 mmHg および 69.8 ± 6.54 mmHg で、両群の間に有意な差はなかった。

図-6

相対的負荷強度と総末梢抵抗の関係を図-6 に示した。

TPR は $V_{O_2 \max}$ の 30% 負荷時において、両群とも安静時から急激な減少を示し ($P < .001$)、

以後、負荷強度の増加に伴ってほぼ直線的に減少した。その減少傾向は両群でほとんど同じであった。また、非鍛練者群および鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ の 100% 負荷時における TPR はそれぞれ $3.1 \pm 0.32 \text{ mmHg/l}\cdot\text{分}$ および $3.1 \pm 0.35 \text{ mmHg/l}\cdot\text{分}$ で類似の値を示し、他のどの負荷強度でも両群の TPR に差はなかった。

考 察

1 $\dot{V}O_2 \max$

exhaustion test で得られた非鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ は $46.2 \pm 5.17 \text{ ml/kg}\cdot\text{分}$ であった(表-2)。ICSPFT¹⁰⁾ は exhaustion の時間から予測される $\dot{V}O_2 \max$ の値を設定している。本非鍛練者群の exhaustion time は $10 \text{ 分} 41 \text{ 秒} 4 \pm 1 \text{ 分} 52 \text{ 秒} 2$ であり(表-2)、これを ICSPFT¹⁰⁾ の基準に照合すると、期待される $\dot{V}O_2 \max$ は $47.6 \pm 4.44 \text{ ml/kg}\cdot\text{分}$ となる。本研究の結果はこの期待値と類似している。また、18~20歳の一般大学生を対象に $\dot{V}O_2 \max$ を測定した Buskirk と Taylor¹⁴⁾ の値($44.6 \pm 5.5 \text{ ml/kg}\cdot\text{分}$)や一般成人男子の $\dot{V}O_2 \max$ の国際比較を行なって、 $45 \sim 55 \text{ ml/kg}\cdot\text{分}$ という範囲を示した Ikai⁵⁾ の報告値と一致した。

一方、鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ は $58.6 \pm 4.75 \text{ ml/kg}\cdot\text{分}$ であった。鍛練者群の中で最も早く exhaustion に至り、 $\dot{V}O_2 \max$ が最も低かった被験者 K.H.(表-2) は ICSPFT の基準値¹⁰⁾ と一致したが、他の被験者は彼らの exhaustion time から判断すると 6~8

ml/kg.分低かった。また、5000 m の最高記録が15分23秒² ~ 18分17秒⁰ の範囲にある陸上競技選手の $\dot{V}O_2 \max$ に、59.3 ~ 76.9 ml/kg.分を報告した金子と豊岡⁵³⁾ の値より低かった。このように、本鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ は低い。しかし、著者⁷²⁾ は本研究に用いた exhaustion test とトレッドミル走を比較して、両方法による $\dot{V}O_2 \max$ に有意な差がないという結論を得た。また、 $\dot{V}O_2 \max$ の判定基準に $\dot{V}O_2$ の levelling off^{57,58)} を用いたが、全員に levelling off がみられた。したがって、本鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ が低いという結果は実験方法に起因した結果とは思われない。

鍛練者群の $fH \max$ (183 ± 8.5 拍/分) は非鍛練者群 (198 ± 7.0 拍/分) より有意に低かった ($P < 0.05$)。トレーニングによる $fH \max$ の変化については明確な結論がでていない。本研究の結果は Hartley³⁷⁾ および Saltin⁸⁰⁾ のトレーニングによって $fH \max$ が減少するという報告と一致しているが、Douglas と Becklake²¹⁾ および Ekblom²⁴⁾ はトレーニングによって $fH \max$ は変化しないこ

とを報告している。

2 相対的負荷運動による循環系諸因子の変化

運動に対する呼吸循環系の再調整は5~6分で充分であり⁶⁾、 \dot{Q} は運動開始後30~60秒¹⁵⁾であるいは運動開始後2分⁶⁷⁾で定常状態に達することが報告されている。したがって、本研究の相対的負荷運動の運動時間(6分間)は呼吸循環系の再調整のために充分であったと思われる。

ところで、鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ の100%負荷時の $\dot{V}O_2$ が $\dot{V}O_2 \max$ の92.2~106.5%であるにもかかわらず、 fH は $fH \max$ の83.7~91.8%しかなかった。本研究は $\dot{V}O_2 \max$ の判定基準に $\dot{V}O_2$ のlevelling offを用いており、 $\dot{V}O_2 \max$ は必ずしもexhaustion直前の $\dot{V}O_2$ ではない。これに対し、 $fH \max$ はほとんどがexhaustion直前の値であった。このことは $\dot{V}O_2 \max$ の発現時点で fH はまだその最大値に達していなかったことを示唆する。しかし、非鍛練者群においては

$\dot{V}O_2 \max$ の 100 % 負荷時の fH は $fH \max$ の 92.6 ~ 104.4% であり、100 % 負荷時の $\dot{V}O_2$ の 92.3 ~ 104.6% (表-3) とほぼ一致する。したがって、鍛練者群における $\dot{V}O_2 \max$ の 100 % 負荷時の fH が $fH \max$ の 83.7 ~ 91.8% しかたない理由は明らかでないが、 $\dot{V}O_2$ の levelling off 後もなお鍛練者は fH を増加させながら exhaustion まで運動を継続させることが出来るかもしれない。

$\dot{V}O_2 \max$ の 100 % 負荷時における非鍛練者群の \dot{Q} (21.6 ± 1.18 l/分) は一般成人男子についての Faulkner ら²⁹⁾ (23.4 l/分) および Mitchell ら⁶⁶⁾ (23.4 l/分) の報告値より小さく、猪飼と宮村⁵⁰⁾ による値 (22.1 l/分) とほぼ一致した。一方、鍛練者群の \dot{Q} (23.1 ± 1.52 l/分) は Hermansen ら³⁹⁾ (27.5 l/分)、猪飼と宮村⁵⁰⁾ (27.0 l/分) の報告値より小さく、Åstrand ら⁸⁾ による値 (24.1 l/分) とほぼ一致した。ここで猪飼と宮村⁵⁰⁾ の被験者の \dot{Q} を体重あたりで見ると 385 ml/kg・分で、本研究の鍛練者群の体重あたりの \dot{Q} は 392 ± 22.3 ml/kg・分である。したがって、本鍛練者群の \dot{Q} (l/分) が小さい

ので本被験者の体重が軽い ($57.8 \pm 3.57 \text{ kg}$) ことによると考えられる。

最大下運動中の \dot{Q} および $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ は負荷強度と直線関係にあった。本結果は最大下運動時の \dot{Q} が負荷強度の増加に比例して直線的に増加する^{7) (3) 19) 38)}、また、最大下運動時の $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ も負荷強度と直線関係にある^{8) 27) 28) 42) 63)} という報告と一致する。しかし、負荷強度を $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の 90% から 100% に増加させても、非鍛練者群の \dot{Q} 、非鍛練者群および鍛練者群の $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ は有意な増加を示さなかった。このことは $\dot{V}O_2$ よりも \dot{Q} の方が早く最大値に達するという Ouellet⁷³⁾ らの結果を支持するものであり、また、 $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ も $\dot{V}O_2$ より早く最大値に達することを示唆する。

$\dot{V}O_2 \text{ max}$ の 100% 負荷時において得られた \dot{Q} および $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ をピーク値 ($\dot{Q} \text{ peak}$ および $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff peak}$) とし、それぞれのピーク値に対する最大下の \dot{Q} および $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ の割合を図-7 および図-8 に示した。

図-7

図-8

非鍛練者群の % of \dot{Q} peak は負荷強度が低いときには鍛練者群よりも高い。これに対し、% of $(a-v)O_2$ diff peak は鍛練者群の方が高い。このことは $(a-v)O_2$ diff の増加は混合静脈血の O_2 含有量の低下によってもたらされる²⁶⁾⁶⁶⁾ から、鍛練者は非鍛練者よりも酸素利用率が高いことを意味する²⁶⁾。

fH はいずれの相対的負荷強度においても非鍛練者群の方が鍛練者群より約20拍分高く、両群は平行関係にあった(図-3)。これに対し、SV はどの強度においても鍛練者群の方が高く(図-4)、群の平均では $\dot{V}O_2$ max の約60%で最大であった。一方、非鍛練者群の平均では $\dot{V}O_2$ max の約40%で最大であった。

\dot{Q} は fH と SV の積である。 \dot{Q} peak 発現時を除いて、非鍛練者群と鍛練者群の \dot{Q} はどの相対的負荷強度でも近似した値である(図-1)。この事実は最大下運動において、非鍛練者群は高い fH によって、また、鍛練者群は大きい SV によってほぼ同じ \dot{Q} をもたらしめている

ことによる。

3 最大運動時における循環系諸因子の相対的割合

非鍛練者群と鍛練者群の $\dot{V}_{O_2 \max}$ の差ほどの因子による差が最も大きいであろうか。 $\dot{V}_{O_2 \max}$ の100%負荷時における鍛練者群の \dot{V}_{O_2} は非鍛練者群の1.16倍である。これは \dot{Q} および $(a-v)O_2 \text{ diff}$ がそれぞれ1.06倍および1.09倍大きいためである。また、1.06倍の \dot{Q} は f_H が0.86倍であるので、 SV が1.22倍大きいことによる。したがって、非鍛練者群と鍛練者群の $\dot{V}_{O_2 \max}$ の差は SV の差によって最も大きな影響を受けていることによる。また、 SV_{\max} は非鍛練者群が $119 \pm 9.8 \text{ ml}$ で、鍛練者群が $153 \pm 13.4 \text{ ml}$ であり、後者は前者の1.28倍大きい SV_{\max} を持っている。これらのことは SV が $\dot{V}_{O_2 \max}$ への貢献度が最も高いことを示すものである。

$\dot{V}_{O_2 \max}$ の100%負荷時における循環系諸因子について、安静時からの増加率が図-9に示

図-9

した。

非鍛練者群および鍛練者群の $\dot{V}O_2$ はそれぞれ 10.4 倍および 14.1 倍増加した。これは \dot{Q} がそれぞれ 3.9 倍および 5.3 倍増加し、 $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ が両群とも 2.7 倍増加したことによる。したがって、非鍛練者と鍛練者の $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の増加率の差による。非鍛練者群および鍛練者群の \dot{Q} の増加は fH がそれぞれ 2.5 倍および 2.8 倍、 SV がそれぞれ 1.7 倍および 1.9 倍増加したことによる。

さらに、安静時からの $\dot{V}O_2$ の増加率を 100% とすると、非鍛練者群において \dot{Q} が 58%、 $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ が 42% の割合である。また、58% の \dot{Q} は fH が 37%、 SV が 21% を占めている。一方、鍛練者群において \dot{Q} が 63%、 $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ が 37% の割合を占め、 \dot{Q} の 63% の割合は fH が 39% および SV が 24% を占めている。これを式で表わすと、

非鍛練者群が

$$100\% (\dot{V}O_2) = 58\% (\dot{Q}) + 42\% ((a-\bar{v})O_2 \text{ diff})$$

$$100\%(\dot{V}O_2) = 37\%(fH) + 21\%(SV) + 42\%(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$$

鍛練者群が

$$100\%(\dot{V}O_2) = 63\%(\dot{Q}) + 37\%(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$$

$$= 39\%(fH) + 24\%(SV) + 37\%(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$$

となる。

したがって、鍛練者は非鍛練者に比べて、 \dot{Q} が大きな割合を占めている。また、 fH 、 SV および $(a-\bar{v})O_2 \text{ diff}$ の 3 因子の中では SV が大きな意味を持つものと考えられる。

4 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の制限因子としての平均動脈血圧および総末梢抵抗

MBP は安静時およびどの運動強度でも両群において差がなかった。 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の高い状態 ("bed rest" 前) において MBP も高い状態にある⁷⁹⁾ という報告があるが、本研究の結果は、明らかに $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の異なる被験者群間において、また、同一被験者でも $\dot{V}O_2 \text{ max}$ に差がみられたトレッドミル走と自転車エルゴメータ運動の間³⁹⁾ に MBP の差はみられないという報告、すなわち、MBP は $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の大きさに関係がないとい

の結果と一致する。

TPR は負荷強度の増加に伴って減少するという報告²⁹⁾³⁹⁾があり、本研究も負荷強度の増加に伴って減少した。また、Ekblom と Hermansen²⁵⁾ および Hermansen³⁹⁾らの報告と同様に、どの負荷強度においても両群の差はみられなかった。さらに、 $\text{Vo}_2 \text{max}$ の 100 % 負荷時における TPR は非鍛練者群が $3.1 \pm 0.32 \text{ mmHg/l.分}$ 、鍛練者群が $3.1 \pm 0.35 \text{ mmHg/l.分}$ であり(表-3)、国際的な一流選手の 3.11 mmHg/l.分 という報告値と一致した。

以上のことから MBP および TPR は $\text{Vo}_2 \text{max}$ の制限因子として無視できる。

結 論

最大下運動において鍛練者は非鍛練者より酸素利用率が高い。また、最大下の同一相對負荷時における非鍛練者と鍛練者の心拍出量は近似値を示す。しかし、その値は非鍛練者では高い心拍数に、鍛練者では大きい一回拍出量に依存している。

非鍛練者と鍛練者の $\dot{V}O_2 \max$ の差は一回拍出量の差に最も大きく依存しており、 $\dot{V}O_2 \max$ を規定する因子の相對的割合は、非鍛練者において心拍出量が 58% (心拍数: 37%, 一回拍出量: 21%)、動靜脈酸素差が 42% である。また、鍛練者において心拍出量が 63% (心拍数: 39%, 一回拍出量: 24%)、動靜脈酸素差が 37% である。

平均動脈血圧および総末梢抵抗はいずれの負荷強度でも両群の差はなく、 $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子として無視できるものである。

要 約

$\dot{V}O_2 \max$ を規定する因子の相対的割合を明らかにするために、一般青年男子 10 名 (非鍛練者群) および長距離選手 8 名 (鍛練者群) を対象にトレッドミル運動を行わせ、3 段階の最大下運動および最大運動中の循環系諸因子の変化を検討した。

非鍛練者群および鍛練者群の $\dot{V}O_2 \max$ はそれぞれ $46.2 \pm 5.17 \text{ ml/kg}\cdot\text{分}$ および $58.6 \pm 4.75 \text{ ml/kg}\cdot\text{分}$ であった ($P < 0.001$)。また、 $\dot{V}O_2 \max$ の 100% 負荷時において、鍛練者群の心拍出量 (Q)、動静脈酸素差 ($(a-v)O_2 \text{ diff}$) および一回拍出量 (SV) は危険率 5%、1% および 0.1% 水準でそれぞれ有意に大きかった。

最大下運動において、 Q 、 $(a-v)O_2 \text{ diff}$ および心拍数 (f_H) は負荷強度の増加と直線的な関係にあった。一方、 SV は非鍛練者群で $\dot{V}O_2 \max$ の約 40%、鍛練者群で約 60% に相対する強度でそれぞれ最大値に達した。その最大値は後者 ($153 \pm 13.4 \text{ ml}$) の方が前者 ($119 \pm 9.8 \text{ ml}$) の 1.28

倍大きかった。最大下運動においては、鍛練者群の方が酸素利用率が高かった。また、同一の \dot{Q} 水準で見ると、非鍛練者群では fH が高く、鍛練者群では SV が大きかった。

$\dot{V}O_2 \max$ を規定する諸因子の相対的割合は非鍛練者では

$$\begin{aligned} 100\%(\dot{V}O_2) &= 58\%(\dot{Q}) + 42\%((a-\bar{v})O_2 \text{ diff}) \\ &= 37\%(fH) + 21\%(SV) + 42\%((a-\bar{v})O_2 \text{ diff}) \end{aligned}$$

と表わされる。一方、鍛練者群では

$$\begin{aligned} 100\%(\dot{V}O_2) &= 63\%(\dot{Q}) + 37\%((a-\bar{v})O_2 \text{ diff}) \\ &= 39\%(fH) + 24\%(SV) + 37\%((a-\bar{v})O_2 \text{ diff}) \end{aligned}$$

となる。したがって、鍛練者群の大きい $\dot{V}O_2 \max$ は \dot{Q} および SV に依存していると結論される。

なお、平均動脈血圧および総末梢抵抗にはどの負荷強度においても両群の差はなく、 $\dot{V}O_2 \max$ の制限因子として無視できるものであると考えられる。

謝 辞

稿を終るに臨み、被験者の御世話を賜わりました本間肇氏ならびに被験者として心身の労苦を惜しまず御協頂いた日本大学生産工学部の学生諸氏、順天堂大学医学部進学課程および同大学体育学部陸上競技部の学生諸氏に心から感謝の意を表わします。

引用文献

- 1) Andersen, K. L. : Aerobic work capacity in middle-aged Norwegian men. J. Appl. Physiol., 20 432-436 (1965)
- 2) Andersen, K. L. : The cardiovascular system in exercise. In Falls, H. B. ed. Exercise physiology. 1st ed. 79-128, Academic Press: New York (1968)
- 3) Asmussen, E. and M. Nielsen : Cardiac output during muscular work and its regulation. Physiol.Rev., 35 778-800 (1955)
- 4) Asmussen, E. and M. Nielsen : Alveolo-arterial gas exchange at rest and during work at different O₂ tension. Acta physiol. scand., 50 153-166 (1960)
- 5) Åstrand, P.-O. : Experimental studies of physical working capacity in relation to sex and age. Munksgaard: Copenhagen (1952)
- 6) Åstrand, P.-O. and B. Saltin : Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. J. Appl. Physiol., 16 971-976 (1961)
- 7) Åstrand, P.-O. and B. Saltin : Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. J. Appl. Physiol., 16 977-981 (1961)
- 8) Åstrand, P.-O., T. E. Cuddy, B. Saltin and J. Stenberg : Cardiac output during submaximal and maximal work. J. Appl. Physiol., 19 268-274 (1964)
- 9) Åstrand, P.-O. and K. Rodahl : Textbook of work physiology. 1st ed. 115-183, McGraw-Hill : New York (1970)
- 10) Atha, J. : Physical fitness measurements. In Larson, L. A. ed. Fitness, health, and work capacity international standards for assessment. 1st ed. 449-492, Macmillan: New York (1974)
- 11) Bates, D.V., N.G. Boucot and A. E. Dormer : The pulmonary diffusing capacity in normal subjects. J. Physiol., 129 237-252 (1955)
- 12) Bevegård, S., A. Holmgren and B. Jansson : The effect of body position on the circulation at rest and during exercise, with special reference to the influence on the stroke volume. Acta. physiol. scand., 49 279-298 (1960)

- 13) Bevegård, S., A. Holmgren and B. Jonsson : Circulatory studies in well trained athletes at rest and during heavy exercise, with special reference to stroke volume and the influence of body position. Acta physiol. scand., 57 26-50 (1963)
- 14) Buskirk, E. and H. L. Taylor : Maximal oxygen intake and its relation to body composition, with special reference to chronic physical activity and obesity. J. Appl. Physiol., 11 72-78 (1957)
- 15) Cerretelli, P., R. Sikand and L. E. Farhi : Readjustments in cardiac output and gas exchange during onset of exercise and recovery. J. Appl. Physiol., 21 1345-1350 (1966)
- 16) Christensen, E. H. and P. Högberg : Physiology of skiing. Arbeitsphysiologie, 14 292-303 (1950)
- 17) Christiansen, J., C. G. Douglas and J. S. Haldane : The absorption and dissociation of carbon dioxide by human blood. J. Physiol., 48 244-271 (1914)
- 18) Collier, C. : Determination of mixed venous CO₂ tensions by rebreathing. J. Appl. Physiol., 9 25-29 (1956)
- 19) Cunningham, D. A., P. B. Goode and J. B. Gritz : Cardiorespiratory responses to exercise on a rowing and bicycle ergometer. Med. Sci. in Sports, 7 37-43 (1975)
- 20) Doll, E., J. Keul and C. Maiwald : Oxygen tension and acid-base equilibria in venous blood of working muscle. Am. J. Physiol. 215 23-29 (1968)
- 21) Douglas, F. G. V. and M.R. Becklake : Effect of seasonal training on maximal cardiac output. J. Appl. Physiol., 25 600-605 (1968)
- 22) Dripps, R. D. and H. Comroa : The respiratory and circulatory response of normal man to inhalation of 7.6 and 10.4 per cent CO₂ with a comparison of the maximal ventilation produced by severe muscular exercise, inhalation of CO₂ and maximal voluntary hyperventilation. Am. J. Physiol., 149 43-51 (1947)
- 23) Defares, J. G. : Determination of P \bar{V} CO₂ from the exponential CO₂ rise during rebreathing. J. Appl. Physiol., 13 159-164 (1958)
- 24) Ekblom, B., P.-O. Åstrand, B. Saltin, J. Stenberg and B. Wallström : Effect of training on circulatory response to exercise. J. Appl. Physiol., 24 518-528 (1968)

- 25) Ekblom, B. and L. Hermansen : Cardiac output in athletes. J. Appl. Physiol., 25 619-625 (1968)
- 26) Ekblom, B. : Effect of physical training on oxygen transport system in man. Acta physiol. scand., Suppl. 328 1-45 (1969)
- 27) Eriksson, B. O. G. Grimby and B. Saltin : Cardiac output and arterial blood gases during exercise in pubertal boys. J. Appl. Physiol., 31 348-352 (1971)
- 28) Eriksson, B. O. : Physical training, oxygen supply and muscle metabolism in 11- 13-year old boys. Acta physiol. scand., Suppl. 284 1-48 (1972)
- 29) Faulkner, J. A., D. E. Roberts, R. L. Elk and J. Conway : Cardiovascular responses to submaximum and maximum effort cycling and running. J. Appl. Physiol., 30 457-461 (1971)
- 30) Filley, G. F., D. J. MacIntosh and G. W. Wright : Carbon monoxide uptake and pulmonary diffusing capacity in normal subjects at rest and during exercise. J. clin. Invest., 33 530-539 (1954)
- 31) Freyschuss, U. and A. Holmgren : On the variation of DLCO with increasing oxygen uptake during exercise in healthy ordinarily untrained young men and women. Acta physiol. scand., 65 193-206 (1965)
- 32) Gilbert, R. and J. H. Auchincloss, Jr. : Comparison of cardiovascular responses to steady- and unsteady-state exercise. J. Appl. Physiol., 30 388-393 (1971)
- 33) Glasford, R. G., C. H. Y. Baycroft, A. W. Sedgwich and R. B. J. Macnab : Comparison of maximal oxygen uptake values determined by predicted and actual method. J. Appl. Physiol., 20 509-513 (1965)
- 34) Gollnick, P. D., R. B. Armstrong, C. W. Saubert IV, K. Piehl and B. Saltin : Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. J Appl. Physiol., 33 312-319 (1972)
- 35) Gollnick, P. D., P. B. Armstrong, B. Saltin, C. W. Saubert IV, W. L. Sembrowch and R. E. Sehpherd : Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human skeletal muscle. J. Appl. Physiol., 34 107-111 (1973)
- 36) Grimby, G. E. Haggendal and B. Saltin : Local xenon 133 clearance from the quadriceps muscle during exercise in man. J. Appl. Physiol., 22 305-310 (1967)

- 37) Hartley, L.H., G. Grimby, Å. Kilbom, N. J. Nilsson, I. Åstrand, J. Bjure, B. Ekblom and B. Saltin : Physical training in sedentary middle-aged and older man. III. Cardiac output and gas exchange at submaximal and maximal exercise. Scand. J. clin. Lab. Invest., 24 335-344 (1969)
- 38) Hermansen, L. and B. Saltin : Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. J. Appl. Physiol., 26 31-37 (1969)
- 39) Hermansen, L., B. Ekblom and B. Saltin : Cardiac output during submaximal and maximal treadmill and bicycle exercise. J. Appl. Physiol., 29 82-86 (1970)
- 40) Holloszy, O. : Biochemical adaptations in muscle. Effects of exercise on mitochondrial oxygen uptake and respiratory enzyme activity in skeletal muscle. J. Biol. Chem., 242 2278-2282 (1967)
- 41) Holmgren, A. and H. Linderholm : Oxygen and carbon dioxide tensions of arterial blood during heavy and exhaustive exercise. Acta physiol. scand., 44 203-215 (1958)
- 42) Holmgren, A., B. Jonsson and T. Sjöstrand : Circulatory data in normal subjects at rest and during exercise in recumbent position, with special reference to the stroke volume at different work intensities. Acta physiol. scand., 49 343-363 (1960)
- 43) Holmgren, A. and M. B. McIlroy : Effect of temperature on arterial blood gas tensions and pH during exercise. J. Appl. Physiol., 19 243-245 (1964)
- 44) Holmgren, A. : On the variation of DLCO with increasing oxygen uptake during exercise in healthy trained young men and women. Acta physiol. scand., 65 207-220 (1965)
- 45) Holmgren, A. and P.-O. Åstrand : DL and the dimensions and functional capacities of the O₂ transport system in humans. J. Appl. Physiol., 21 1463-1470 (1966)
- 46) Holmgren, A. : Cardiorespiratory determinants of cardiovascular fitness. Canad. Med. Ass. J., 96 697-702 (1967)
- 47) 堀居昭, 猪飼道夫 : 人体総ヘモグロビン量からみた全身持久性の研究. 体育学研究, 16 216-222 (1972)
- 48) 猪飼道夫 : エルゴメータの比較検討. 日本体育協会スポーツ科学委員会報告 (1967)
- 49) 猪飼道夫, 宮村実晴 : 心拍出量からみた全身持久性 -2- 体育の科学, 17 344-349 (1967)
- 50) 猪飼道夫, 宮村実晴 : 毎分心拍出量の性・年齢別比較. 体育学研究, 14 175-183 (1970)

- 51) Ikai, M., Shindo and M. Miyamura : Aerobic work capacity of Japanese people. Res. J. Phys. Ed., 14 137-142 (1970)
- 52) Kaijser, L. : Limiting factors for aerobic muscle performance. The influence of varying oxygen pressure and temperature. Acta physiol. scand., Suppl. 346 1-96 (1970)
- 53) 金子公宥, 豊岡示朗 : 1時間のトレッドミル走行における代謝と体温変化. 日本体育協会スポーツ科学委員会研究報告書 5 23-30 (1973)
- 54) 金上晴夫: 肺胞換気と死腔. 高木健太郎, 岡本彰祐編. 生理学下系Ⅱ. 血液・呼吸の生理学. 第1版. 483-500. 医学書院: 東京(1968)
- 55) Kilbom, Å., L. H. Hartley, B. Saltin, J. Bjure, G. Grimby and I. Åstrand : Physical training in sedentary middle-aged and older men. I. Medical evaluation. Scand. J. clin. Lab. Invest., 24 315-322 (1969)
- 56) Kilbom, Å. : Physical training in women. Scand. J. clin. Invest., 28 1-34 (1971)
- 57) Klausen, K. : Comparison of CO₂ rebreathing and acetylen methods for cardiac output. J. Appl. Physiol., 20 763-766 (1965)
- 58) Knehr, C.A., D.B.Dill and Newfeld : Training and its effects on man at rest and at work. J. Physiol., 136 148-169 (1942)
- 59) Krogh, M. : The diffusion of gases through the lungs of man. J. Physiol., 49 271-300 (1915)
- 60) Lawrie, R. A. : The activity of the cytochrome system in muscle and its relation to myoglobin. Biochem. J., 55 298-305 (1953)
- 61) Liliethal, J. L. Jr., R. L. Riley, D. D. Proemmel and R. E. Franke : An experimental analysis in man of the oxygen pressure gradient from alveolar air to arterial blood during rest and exercise at sea level and at altitude. Am. J. Physiol., 147 199-216 (1946)
- 62) Magel, J.R. and K. L. Andersen : Pulmonary diffusing capacity and cardiac output in young trained Norwegian swimmers and untrained subjects. Med. Sci. in Sports, 1 131-139 (1969)
- 63) Margaria, R. and P. Cerretelli : The respiratory system and exercise. In Falls, H. B. ed. Exercise physiology. 1st ed. 43-78, Academic Press: New York (1968)
- 64) 真嶋英信 : 生理学. 第2版, 289-317. 文光堂 : 東京(1974)

- 65) McNab, R. B. J., P. R. Conger and P. S. Taylor : Differences in maximal and submaximal work capacity in men and women. J. Appl. Physiol., 27 644-648 (1969)
- 66) Mitchell, J. H., B. J. Sproule and C. B. Chapman : The physiological meaning of the maximal oxygen intake test. J. clin. Invest., 37 538-547 (1958)
- 67) 宮村実晴：心臓拍出量からみた全身持久性。体育学研究，11 69-76 (1966)。
- 68) 百瀬達也：肺内ガス組成。高木健太郎，岡本彰祐編。生理学大系Ⅱ。血液・呼吸の生理学。第1版，454-482，医学書院：東京 (1968)
- 69) Morehouse, L.E. and A. T. Miller, Jr. : Physiology of exercise 6th ed. 139-153, Mosby: Saint Louis (1971)
- 70) Mostyn, E. M., S. Helle, J. B. L. Gee, L. G. Bentivoglio and D. V. Bates : Pulmonary diffusing capacity of athletes. J. Appl. Physiol., 18 687-695 (1963)
- 71) Newman, F., N. F. Smalley and M. L. Yhomson : Effect of exercise, body and lung size on CO diffusion in athletes and nonathletes. J. Appl. Physiol., 17 649-655 (1962)
- 72) 大橋哲朗：負荷固定走行法および2種類の斜度漸増法による最大酸素摂取量測定法の比較。順天堂大学体育学部卒業論文 (1974) 未刊行
- 73) Ouellet, Y., S. C. Poh and M. R. Becjlaek : Circulatory factors limiting maximal aerobic exercise capacity. J. Appl. Physiol., 27 874-880 (1969)
- 74) Pirnary, F., M. Lamy, J. Dujadin, R. Deroanne and J. M. Petit: Analysis of femoral venous blood during maximum muscular exercise. J. Appl. Physiol., 33 289-292 (1972)
- 75) Reuschlein, P. S., W. G. Reddan, J. Burpee, J. B. L. Gee and J. Rankin : Effect of physical training on the pulmonary diffusing capacity during submaximal work. J. Appl. Physiol., 24 152-158 (1968)
- 76) Riley, R. L., R. H. Shephard, J. E. Cohn, D. G. Carroll and B. W. Armstrong : Maximal diffusing capacity of the lungs. J. Appl. Physiol., 6 573-587 (1954)
- 77) Rowell, L. B. : Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. Physiol. Rev., 54 75-159 (1974)
- 78) Saltin, B. and P.-O. Åstrand : Maximal oxygen uptake in athletes J. Appl. Physiol., 23 353-358 (1967)

- 79) Saltin, B., G. Blomqvist, J. H. Mitchell, R. L. Johnson, Jr., K. Wildenthal and C. B. Chapman : Response to exercise after bed rest and after training. A longitudinal study of adaptive changes in oxygen transport and body composition. Circulation, 38 Suppl. 7 1-78 (1968)
- 80) Saltin, B.: Physiological effects of physical conditioning. Med. Sci. in Sports, 1 50-56 (1969)
- 81) Saltin, B. L. H. Hartley, Å. Kilbom and I. Åstrand : Physical training in sedentary middle-aged and older men. II. Oxygen uptake, heart rate, and blood lactate concentration at submaximal and maximal exercise. Scand. J. clin. Lab. Invest., 24 323-334 (1969)
- 82) Secher, N. H., R. A. Binkhorst and F. B. Petersen : Maximal oxygen uptake during arm cranking and combined arm plus leg exercise. J. Appl. Physiol., 36 515-518 (1974)
- 83) 進藤宗洋 : トレッドミルと自転車エルゴメーターによる最大酸素摂取量の比較. 体育学研究, 13(5) 401-402(1969)
- 84) Stainsby, W. N. and A. B. Otis : Blood flow, blood oxygen tension, oxygen uptake, and oxygen transport in skeletal muscle. Am. J. Physiol., 206 858-866 (1964)
- 85) Taylor, H. L., E. Buskirk and A. Henschel : Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance J. Appl. Physiol., 8 73-80 (1955)
- 86) Wyndham, C. H., N. B. Strydom, W. P. Leary and C. G. Williams : Studies of the maximum capacity of men for physical effort part 1 : A comparison of methods of assessing the maximum oxygen intake. Int. Z. angew. Physiol., 22 285-295 (1966)
- 87) 山川純, 宮原富幸子, 児玉玲子 : 女子における全身持久性 Training 効果. 体育の科学, 20 91-95(1970)
- 88) Zocche, G. P., H. W. Fritts, Jr. and A. Cournand : Fraction of maximal breathing capacity available for prolonged hyperventilation. J. Appl. Physiol., 15 1073-1074 (1960)

Relative contribution of selected cardiovascular parameters
to the maximal oxygen uptake.

Tetsuro OHKAKI

(1) It was the purpose of the present study to determine the relative contribution of some selected cardiovascular parameters to the maximal oxygen uptake in the sedentary and the trained men.

(2) Ten healthy young men and 8 long distance runners volunteered for subjects.

(3) They were subjected to 2 series of experimental exercise of treadmill walking; 1) Exhaustive walking and 2) Three submaximal and maximal walking for 6 minutes, respectively. Oxygen uptake, heart rate, cardiac output and arterial blood pressure were measured at rest and during submaximal and maximal walking. Then stroke volume, arterio-venous oxygen difference and total peripheral resistance were calculated.

(4) Maximal oxygen uptakes for the untrained and the trained were 46.2 ± 5.17 ml/kg·min and 58.6 ± 4.75 ml/kg·min, respectively. Stroke volume, arterio-venous oxygen difference and cardiac output during maximal walking were also significantly larger in the trained. The larger $\dot{V}O_2$ max for the trained was suggested to be dependent on the stroke volume.

(5) At the submaximal levels, cardiac output, arterio-venous oxygen difference and heart rate linearly increased with the work load in both groups. But stroke volume for the trained and the untrained reached each maximal value at about 60% and 40% of $\dot{V}O_2$ max, respectively.

(6) In the trained the efficiency of oxygen utilization was higher than the untrained. And at a given cardiac output the untrained had the higher heart rate and the trained had the larger stroke volume.

(7) The relative contribution of heart rate, stroke volume and arterio-venous oxygen difference as a limiting factor for $\dot{V}O_2$ max was estimated as follows:

for the untrained;

$$100\% (\dot{V}O_2) = 37\%(\text{heart rate}) + 21\%(\text{stroke volume}) + 42\% \\ (\text{arterio-venous oxygen difference})$$

for the trained;

$$100\% (\dot{V}O_2) = 39\%(\text{heart rate}) + 24\%(\text{stroke volume}) + 37\% \\ (\text{arterio-venous oxygen difference})$$

(8) The mean arterial blood pressure and total peripheral resistance appeared not to be contributive to maximal oxygen uptake.

Table 1. Physical characteristics of the subjects.

Subject	Age yr	Stature cm	Weight kg
Untrained			
T.Y.	19	172.6	75.4
H.N.	20	172.0	66.8
M.O.	20	169.0	52.9
T.S.	21	173.0	62.3
M.S.	21	172.0	64.0
H.S.	22	170.0	58.3
Y.O.	22	170.0	62.4
K.T.	22	168.0	80.6
M.Y.	23	164.0	64.7
M.K.	24	171.0	56.2
\bar{X}	21	170.2	64.4
SD	1.5	2.70	8.40
Trained			
S.S.	19	165.6	54.7
H.K.	19	172.0	63.6
M.I.	20	170.0	61.1
Y.M.	20	169.5	57.0
K.T.	20	166.0	55.4
T.O.	21	170.0	61.0
K.H.	21	171.0	54.0
Y.D.	23	166.5	55.8
\bar{X}	20	168.8	57.8
SD	1.3	2.44	3.57

Table 2. Exhaustive time, $\dot{V}O_2$ max and maximal heart rate obtained in maximal work on a treadmill walking.

Subject	Exhaustive time min sec	$\dot{V}O_2$ max ml/kg.min	fH max beats/min
Untrained			
T.Y.	10'00"0	39.6	199
H.N.	11'05"6	46.0	200
M.O.	11'02"0	49.9	194
T.S.	11'32"9	50.6	203
M.S.	9'06"2	45.1	209
H.S.	10'00"0	45.3	194
Y.O.	10'32"2	45.7	184
K.T.	7'01"6	36.4	205
M.Y.	13'30"2	50.8	200
M.K.	13'04"6	52.9	195
\bar{X}	10'41"4	46.2	198
SD	1'52"2	5.17	7.0
Trained			
S.S.	18'16"6	54.9	195
H.K.	20'17"2	64.8	184
M.I.	18'45"2	55.5	174
Y.M.	18'45"6	55.9	188
K.T.	20'25"2	63.3	186
T.O.	18'39"0	57.7	178
K.H.	14'56"2	52.6	170
Y.D.	19'30"8	64.1	190
\bar{X}	18'42"0	58.6	183
SD	1'42"6	4.75	8.5

Table 3. Cardiovascular data obtained in exercise ranging from 30% to 100% of $\dot{V}O_2$ max.

	Untrained				Trained			
	$\dot{V}O_2$ ml/min	% of $\dot{V}O_2$ max %	\dot{Q} l/min	(a-v) O_2 diff vol%	fH beats/min	SV ml	MBP mmHg	TPR mmHg/l.min
at rest	290	9.7	5.19	5.59	76	68	84	16.2
T.Y.	284	9.4	6.41	4.43	70	63	73	16.5
H.N.	235	9.0	5.17	4.55	81	64	87	16.8
M.O.	246	7.5	5.30	4.64	69	77	83	15.7
T.S.	303	10.6	6.49	4.67	96	68	85	13.1
M.S.	302	11.5	4.90	6.16	80	61	71	14.5
H.S.	304	10.6	5.18	5.87	66	79	82	15.8
Y.O.	307	10.4	7.86	3.91	92	85	78	9.9
K.T.	344	10.5	6.39	5.38	82	78	74	13.2
M.Y.	240	7.9	5.05	4.75	72	70	86	17.0
M.K.	X	9.7	5.79	5.00	78	71	81	14.9
SD	35.0	1.28	.955	.716	9.9	8.0	8.5	2.24
30%	1500	49.9	15.32	9.79	122	126	82	5.4
T.Y.	1220	39.9	11.21	10.88	120	93	71	6.3
H.N.	1040	39.9	12.37	8.42	110	112	75	6.1
M.O.	1233	37.6	14.50	8.50	120	120	58	4.0
T.S.	1302	45.8	16.69	7.80	148	113	77	4.6
M.S.	1203	46.0	15.22	7.90	118	129	73	4.8
H.S.	1239	43.3	12.02	10.31	96	125	42	3.5
Y.O.	1404	47.8	13.48	10.41	144	94	52	3.9
K.T.	1378	41.7	16.08	8.57	128	126	85	5.3
M.Y.	1084	35.5	14.91	7.27	116	129	81	5.4
M.K.	X	42.7	14.18	8.99	122	117	70	4.9
SD	141.2	4.64	1.83	1.259	15.2	13.6	14.2	.94
60%	1819	61.0	16.08	11.31	136	118	73	4.5
T.Y.	1952	63.5	14.56	13.40	142	103	66	4.5
H.N.	1631	62.2	16.17	10.09	158	103	84	5.3
M.O.	2198	66.6	19.50	9.53	166	118	75	3.8
T.S.	1656	57.9	17.51	9.46	166	106	60	3.4
M.S.	1607	61.2	16.38	9.81	140	117	77	4.7
H.S.	1993	69.3	16.51	10.22	134	123	57	3.5
Y.O.	2180	74.1	15.72	13.87	178	88	65	4.1
K.T.	1971	60.4	17.20	11.46	144	119	56	3.3
M.Y.	1760	57.8	17.26	10.20	136	127	93	5.4
M.K.	X	63.4	16.69	10.94	150	112	71	4.2
SD	215.9	5.19	1.308	1.574	15.7	11.9	12.1	.74
90%	2626	88.0	20.87	12.58	176	119	74	3.5
T.Y.	2814	91.3	19.27	14.60	186	104	75	3.9
H.N.	2412	92.0	18.77	12.85	178	105	56	3.0
M.O.	2956	89.6	20.19	14.99	192	105	79	3.9
T.S.	2521	88.1	20.96	12.03	200	105	61	2.9
M.S.	2150	81.8	21.74	9.89	172	126	53	2.4
H.S.	2660	92.5	19.60	13.57	180	109	68	3.5
Y.O.	2574	87.5	19.96	12.89	198	101	73	3.7
K.T.	2926	89.6	21.26	13.76	180	118	68	3.2
M.Y.	2800	92.1	22.03	12.71	178	124	64	2.9
M.K.	X	89.3	20.47	12.99	184	112	67	3.3
SD	246.9	3.20	1.080	1.427	9.6	9.2	8.5	.49
100%	2999	99.8	20.99	14.29	186	113	62	3.0
T.Y.	3051	99.4	20.71	14.73	192	108	68	3.3
H.N.	2490	95.4	19.68	12.65	186	106	59	3.0
M.O.	3025	92.3	22.00	13.75	188	117	79	3.6
T.S.	2695	94.8	21.39	13.22	206	104	67	3.1
M.S.	2736	104.6	21.28	12.86	190	112	77	3.6
H.S.	2968	103.7	22.22	13.36	174	128	64	2.9
Y.O.	2931	99.9			214	81		
K.T.	3283	99.1	23.74	13.83	188	126	65	2.7
M.Y.	3054	99.9	22.65	13.48	182	125	68	3.0
M.K.	X	98.9	21.63	13.57	191	115	69	3.1
SD	225.1	3.82	1.184	.660	11.5	9.1	7.5	.32

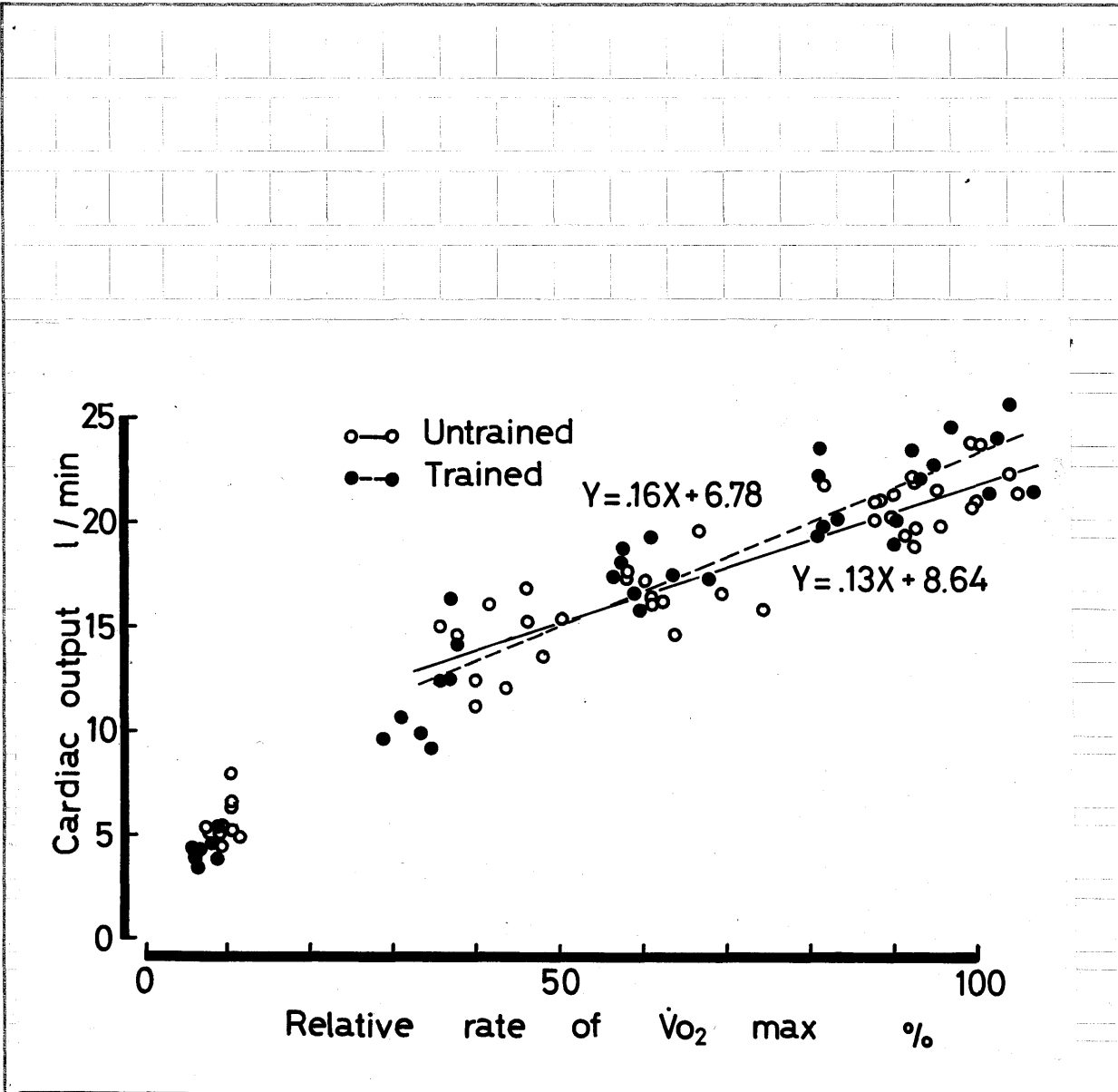


Fig 1. Cardiac output in relation to relative rate of $\dot{V}o_2$ max.

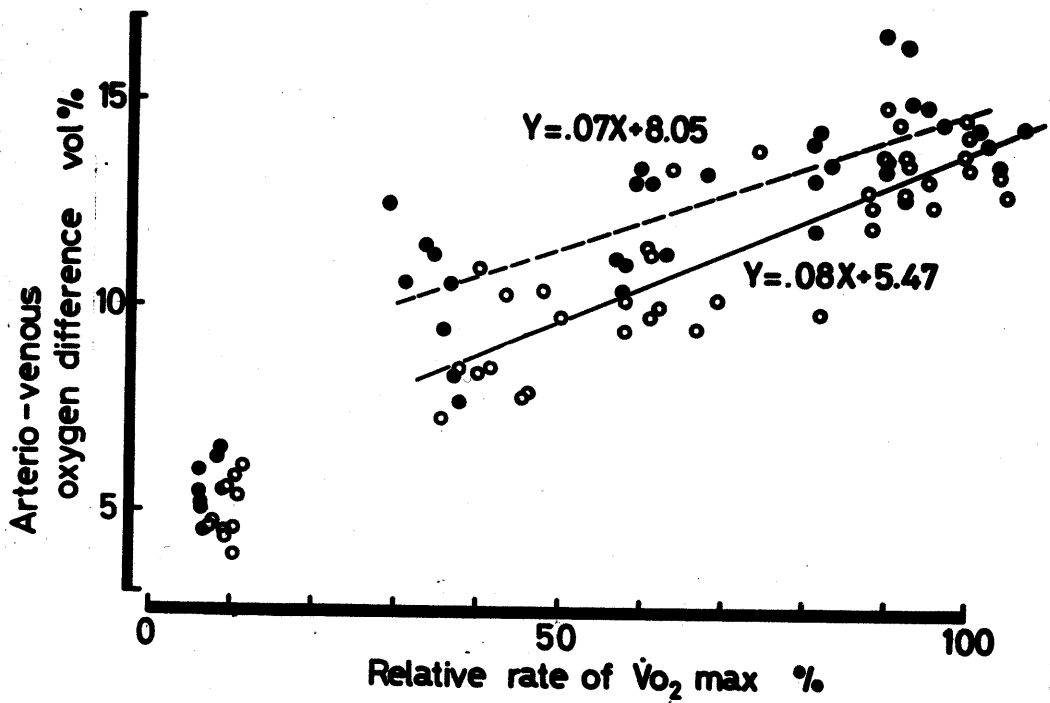


Fig 2. Arterio-venous oxygen difference in relation to relative rate $\dot{V}o_2$ max.

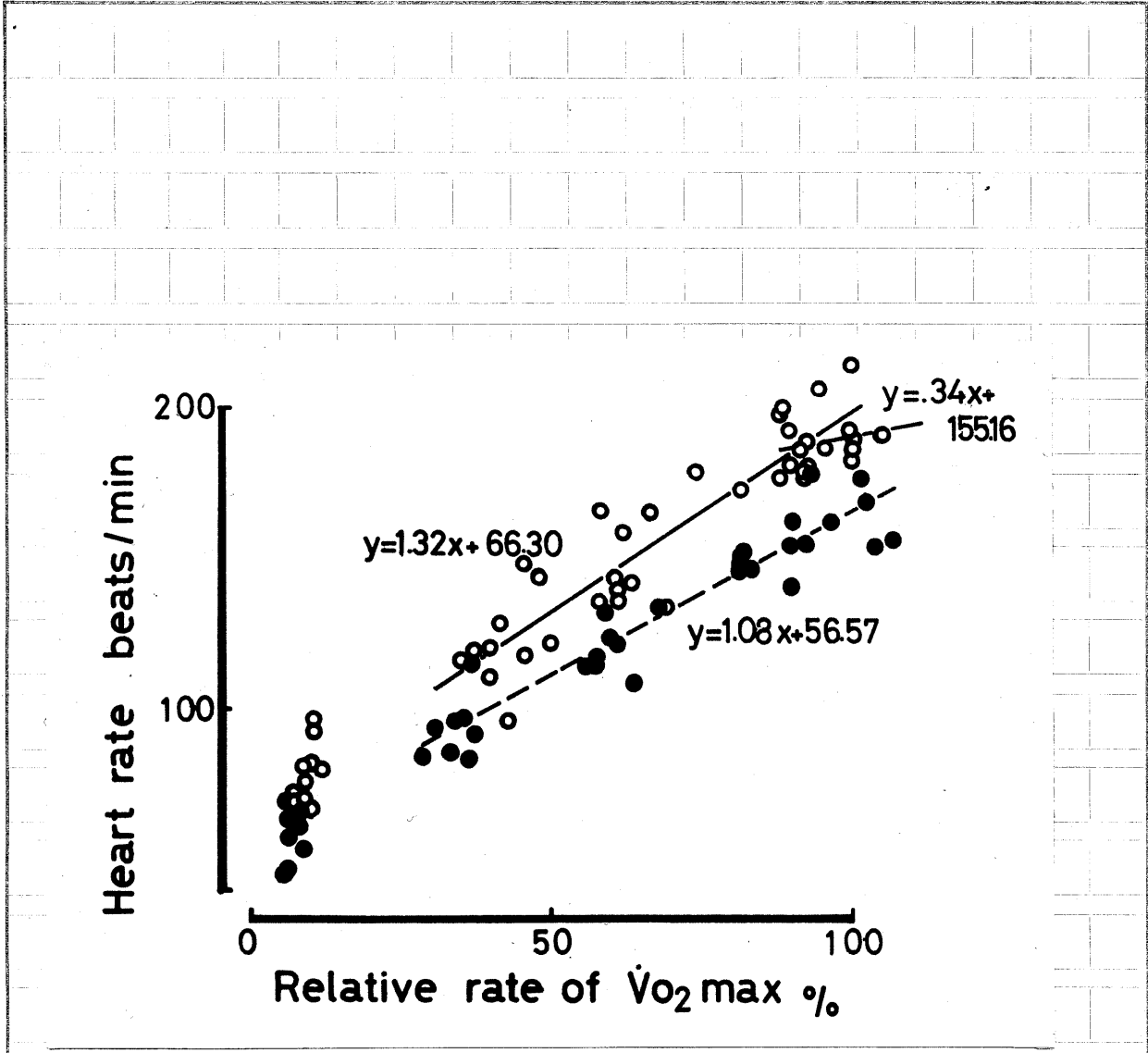


Fig 3. Heart rate in relation to relative rate of $\dot{V}O_2$ max.

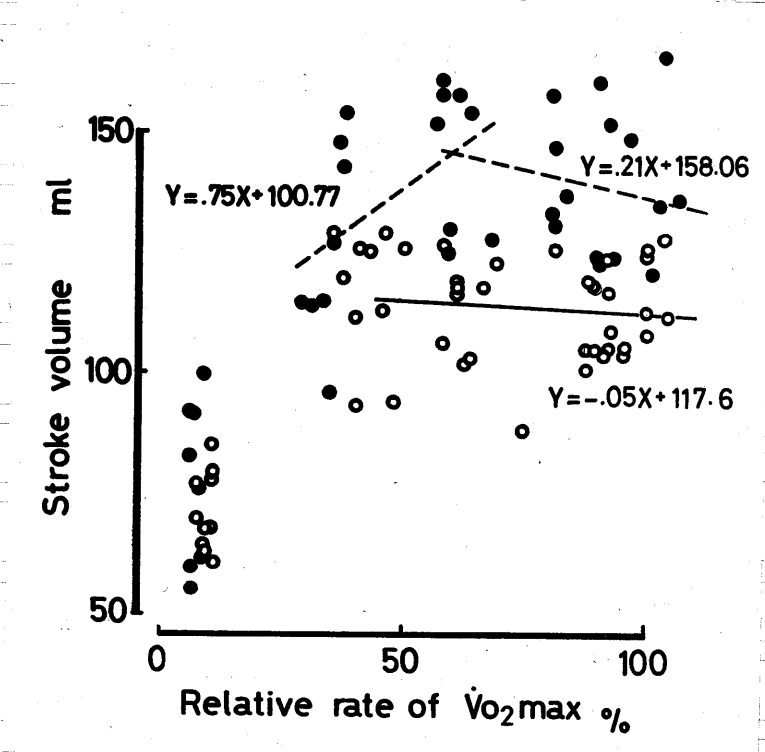


Fig 4. Stroke volum in relation to relative rate of $\dot{V}o_2$ max.

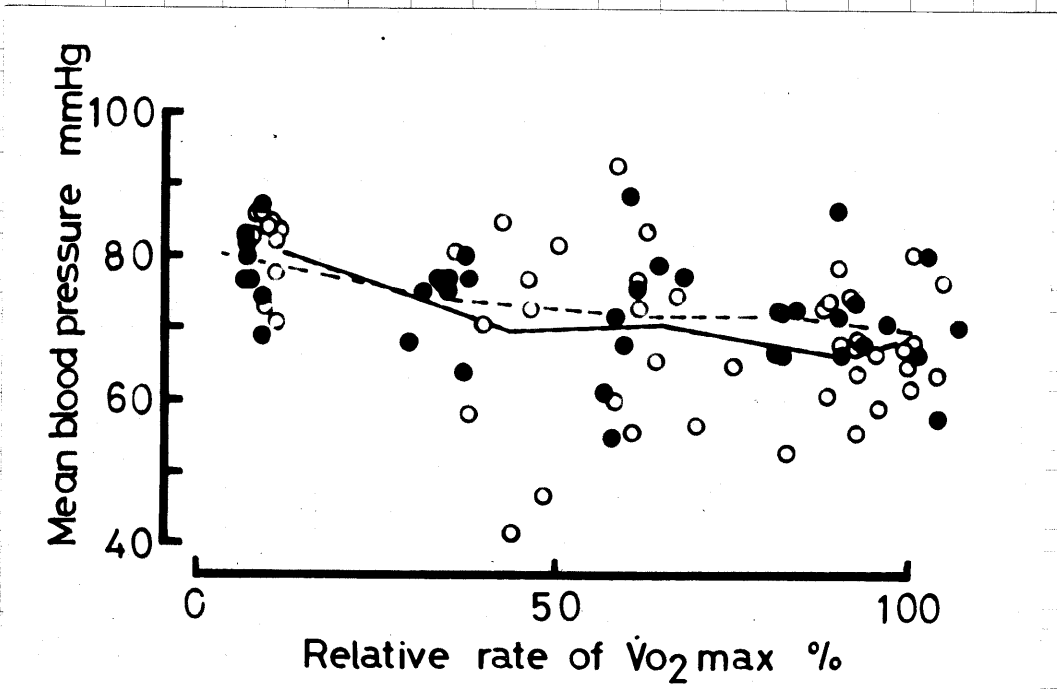


Fig 5. Mean blood pressure in relation to relative rate of $\dot{V}O_2$ max.

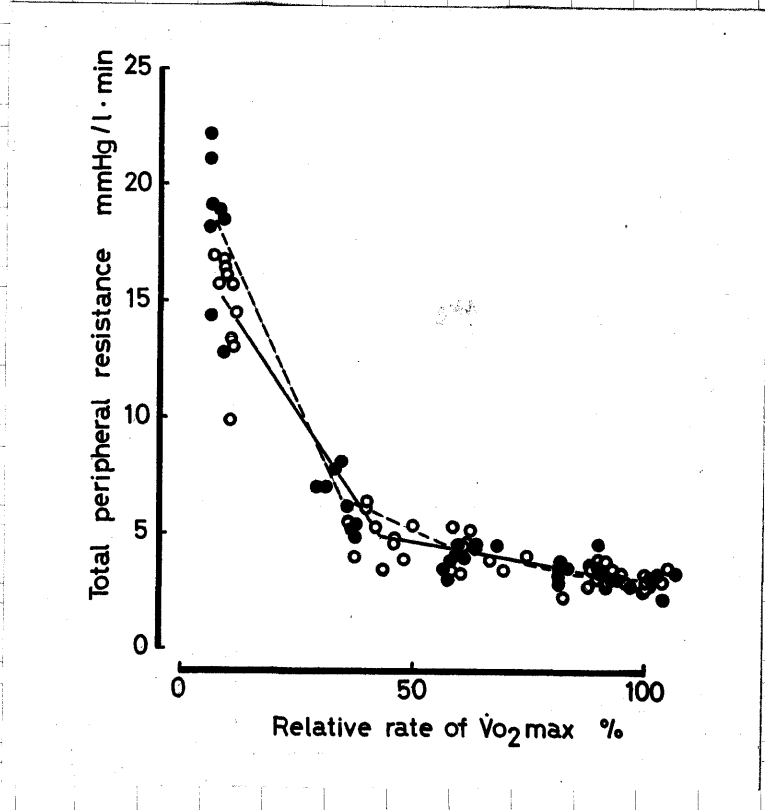


Fig 6. Total peripheral resistance in relation to relative rate of Vo₂ max.

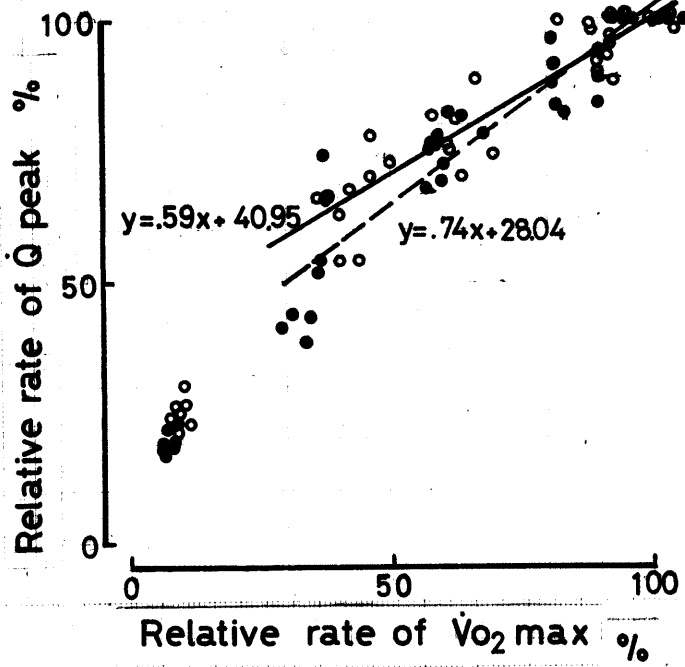


Fig 7. Relative rate of Q peak in relation to relative rate of Vo₂ max.

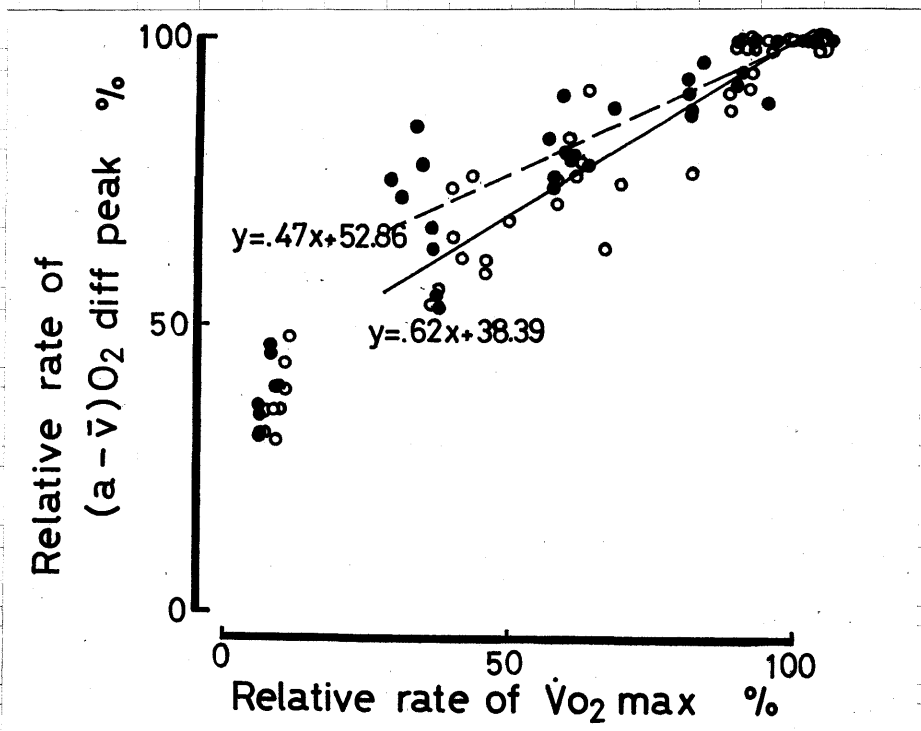


Fig 8. Relative rate of (a-v)o₂ difference peak in relation to relative rate of $\dot{V}O_2$ max.

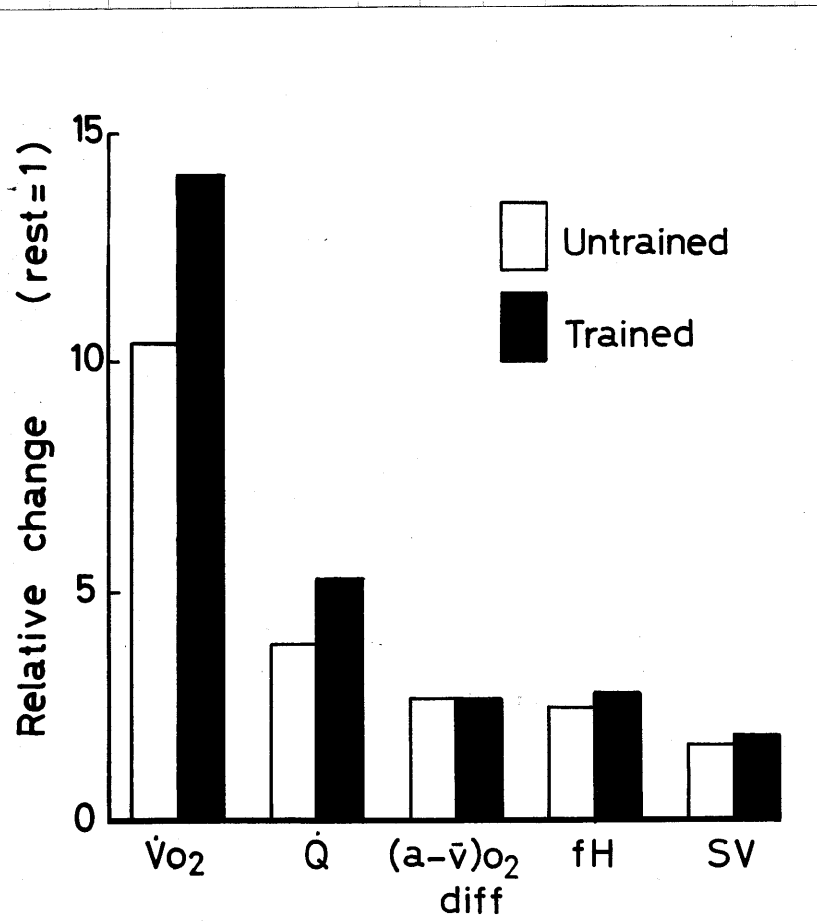


Fig 9. Relative changes of $\dot{V}o_2$, \dot{Q} , $(a-\bar{v})o_2$ diff, fH and SV from each resting value.

大柳

70-ジ 行

o ii

11

exhaustion

点E入子。

文献番号.

59

40).

J. Biol. Chem., 242

点E入子。

44)

Acta physiol. scand., 65

点E入子。

o 61

78)

.....

P.-O. Åstrand

点E入子

62

80)

... in Sports, $\frac{1}{12}$

点E入子。

m