

持久性運動制限因子としてみた
呼吸筋の酸素消費量

所属学科目-----体力学

著者-----玉木伸和

論文指導教員---石河利寛

合格年月日：50年3月10日

論文審査委員

青木純一郎

山本武彦

千葉裕典

目次

緒言	1
関連文献の考証	5
1、 <u>安静時および過換気時の呼吸筋の酸素消費量</u>	5
2、 <u>運動時の呼吸筋の酸素消費量</u>	8
研究方法	14
1、 <u>実験方法</u>	14
(1) 被験者	14
(2) 運動負荷	14
a、運動Ⅰ	14
b、運動Ⅱ	15
(3) 測定項目と方法	15
a、酸素摂取量： $\dot{V}O_2$	15
b、最大酸素摂取量： $\dot{V}O_{2\max}$	16
c、換気量： $\dot{V}_E$	16
d、呼吸筋の酸素消費量	16
e、肺粘性抵抗	18
f、スパイロメトリー	19

g、心拍数	20
h、呼吸数	20
2、 <u>実験手順</u>	20
(1) 運動Ⅰ	20
(2) 運動Ⅱ	21
(3) スパイロメトリー	22
3、 <u>実験条件</u>	22
研究結果 — — — — —	23
1、 <u>最大酸素摂取量</u>	23
2、 <u>運動中の呼吸筋の酸素消費量</u>	23
3、 <u>肺粘性抵抗</u>	24
4、 <u>スパイロメトリー</u>	25
5、 <u>心拍数</u>	25
考察 — — — — —	26
要約 — — — — —	33
引用文献 — — — — —	36
Summary — — — — —	41
付表	
付図	

緒言

呼吸の仕事は、換気量の増加に伴って指数関数的に増加することが知られている²⁷⁾³⁵⁾。これは、呼吸器に存在する種々の抵抗に打ち勝って換気するために呼吸筋自身が酸素を必要とするからである。健康人の場合、安静時の換気に要する酸素量は換気1ℓあたり0.25-1mlであり⁴⁾⁵⁾¹⁰⁾¹⁴⁾¹⁷⁾²⁵⁾⁴⁰⁾、これは安静時全酸素摂取量の1-3%に相当する。換気量が50ℓ/minまで増加しても呼吸筋の酸素消費量に顕著な増加は見られない(換気1ℓあたり1-2ml)⁵⁾⁶⁾¹⁷⁾が、それ以上に換気量が増加した場合、呼吸筋の酸素消費量は急激に増加してくることが知られている⁶⁾⁷⁾¹⁸⁾²⁹⁾³⁶⁾。McKerrowとOtis(1956)²⁹⁾は、200-270ℓ/minの最大随意換気量では1ℓの換気量に要する酸素量が3-8mlであると報告している。また、MillahnとEckermann(1961)³⁶⁾は、150ℓ/minの随意換気量の時に呼吸筋が4-5ℓ/minもの酸素を消費することを報告している。換気量が大きくなればなるほ

ど有効な仕事のために利用できる全酸素量の割合が小さくなるが、運動時全酸素摂取量の⁴²⁾20%が呼吸筋に消費されるならば、換気量は作業能力を制限すると思われる。²⁾しかし、一般人に比較して持続的トレーニングを積んだ鍛練者は、運動時の一定酸素摂取量に要する呼吸の機械的仕事量が少ないことが知られている。³⁵⁾また、持続的トレーニングによって呼吸筋の強化が進み、換気量が同じでも経済的な効率のよい呼吸運動を営むようになるといわれている。¹⁾このことから、鍛練者は一般人よりも一定運動強度で換気に要する酸素量が少ないであろうことが推察される。

従来、運動時における呼吸筋の酸素消費量についての研究は少なく、以下のような結果が得られている。Nielsen (1936)⁴⁰⁾は1名の成人男子を用いて30と60 l/minの運動換気量時の呼吸筋の酸素消費量から、116 l/minの運動時最大換気量のために全酸素摂取量の9%が呼吸筋に消費されると概算した。Michaelisと

Müller (1942)³²⁾ は女性1人の運動中の呼吸筋の酸素消費量が、30-50 l/minの換気量では換気1 lあたり3 mlであると報告している。

Shephard (1966)⁴⁷⁾ は10名の男子に最大酸素摂取量の80%のトレッドミル走を負荷し、89 l/min以上の換気量では換気1 lあたり約4.4 mlの酸素を呼吸筋が消費すると報告している。

LevisonとCherniack (1968)²⁴⁾ は一般人と慢性閉塞性肺疾患患者に運動を負荷して呼吸筋の酸素消費量を測定したところ、一般人が70 l/minの換気量時に全酸素摂取量の10-15%を呼吸筋に消費するのに対し、患者は30 l/minの換気量でも35-40%に達するため運動能力が制限されると報告している。しかし、これらのほとんどは非鍛練者を対象とした研究であり、鍛練者が運動時にどの程度の呼吸筋の酸素消費量であるかは未だ明らかにされていない。

そこで本研究は、持久性能が最も優れていると思われる陸上競技長距離走者と一般人の運動時の呼吸筋の酸素消費量を比較し、呼

吸筋の酸素消費量が持久性能にどの程度影響するものを検討した。

関連文献の考証

呼吸筋の酸素消費量は以下の考え方に基づいて判定される。

体全体の酸素摂取量を安静時および随意的過換気、外的死腔の付加あるいは CO_2 混合気の吸入によって換気量を種々に増加して判定する。すなわち、酸素摂取量を増加させる他の理由が存在しないならば、換気量の増加に伴う酸素摂取量の増加は呼吸筋の代謝亢進によるものである。

1. 安静時および過換気時の呼吸筋の酸素消費量

Liljestrand (1918)²⁵⁾ は、250 - 2300 ml の外的死腔を付加して換気量を増加させ、安静時の呼吸筋の酸素消費量が換気1 l あたり 0.5 ml であり、安静時全酸素摂取量の 1 - 3 % に相当すると報告している。Nielsen (1936)⁴⁰⁾ は、約 10 % CO_2 混合気吸入によって換気量を増加させ、換気1 l あたり約 0.5 ml の酸素 (安静時全酸素摂取量の 1.3 %) を安静時に呼吸筋

が消費すると報告している。Cournandら(1954)¹⁷⁾は、随意的過換気と CO_2 混合気吸入によって換気量を増加し、 25 l/min の換気量まで呼吸筋の酸素消費量が換気 1 l あたり 1 ml であると報告している。また、Campbellら(1957)¹⁰⁾は、外的死腔の付加によって換気量を増加し、 40 l/min の換気量まで呼吸筋の酸素消費量が換気 1 l あたり 0.25 ml であると報告している。このように、安静時の呼吸筋の酸素消費量は換気 1 l あたり $0.25 - 1 \text{ ml}$ ^{4) 5) 10) 17)}、すなわち安静時全酸素摂取量の $1 - 3\%$ ⁴²⁾であるといわれている。

換気量が増加してくると呼吸筋の酸素消費量も増加するが、その値は報告者によってかなりの差異が見られる。Cournandら(1954)¹⁷⁾は、 50 l/min の余剰換気では換気 1 l あたり 2 ml そして 80 l/min では 3 ml であると述べ、この割合で呼吸筋の酸素消費量が増加すれば 150 l/min の換気量では約 1 l/min の酸素が呼吸筋に消費されるだろうと報告している。McKerrow

と Otis (1956)²⁹⁾ は、20 - 30秒間にわたる随意的過換気によって換気量を200 - 270 l/minまで増加し、その時の呼吸筋の酸素消費量が0.71 - 2.13 l/minの範囲であったと報告している。Bader ら (1959)⁴⁾ は、1 - 5% CO₂ 混合気吸入によって換気量を増加し、20 l/minの換気量時に呼吸筋の酸素消費量が換気1 lあたり1.7 - 2.8 mlであると報告している。

Campbell ら (1957)¹⁰⁾ は、外的死腔の付加によって換気量を増加し、80 l/minの換気量時に呼吸筋は換気1 lあたり0.6 mlの酸素しか消費しないと報告している。また、Millahn と Eckermann (1961)³⁶⁾ は、随意的過換気によって150 l/minまで換気量を増加した時、呼吸筋が4 - 5 l/minの酸素を消費すると報告している。

Murray (1959)³⁷⁾ は、随意的過換気、外的死腔の付加およびCO₂混合気吸入によって呼吸筋の酸素消費量を判定したが、3方法で得られた呼吸筋の酸素消費量に差がないと報告し

ている。しかし、換気量の増加にともなう呼吸筋の酸素消費量値の報告者間に見られる差異は、換気量を増加させる方法の違いによるものと思われる⁴²⁾⁴³⁾。すなわち、随意的過換気²⁵⁾は、呼吸筋が呼気時に不自然な「active」な運動をするため、 CO_2 によって呼吸中枢を刺激する方法よりも換気1あたり呼吸筋が消費する酸素量が多くなるためと思われる。

2. 運動時の呼吸筋の酸素消費量

Nielsen (1936)⁴⁰⁾ は1名の男子に自転車エルゴメーターで223および446 kgm/minの負荷を与え、約10% CO_2 混合気吸入によって換気量を60 l/minまで増加させて呼吸筋の酸素消費量を測定した。30および60 l/minの換気量で得られた呼吸筋の酸素消費量を他の実験で得た運動中の最大換気量 (116 l/min) まで直線で外挿し、呼吸筋が406 ml/minの酸素すなわち最大酸素摂取量の9%を消費すると概算した。しかし、Otis (1954)⁴²⁾ は、換気量と酸素摂取量の関係が直線ではなく傾斜が増すものである

ため、Nielsen (1936)⁴⁰⁾ の値は過少評価されたものであると述べ、彼自身が導き出した高い換気量のための呼吸の機械的仕事量算出式：

$$\dot{W} = 2 (b\dot{V}^2 + c\dot{V}^3)$$

ここで、

$\dot{W}$: 仕事量

b, c : 非弾性抵抗に関する定数

$\dot{V}$: 換気量

に Otis ら (1950)⁴¹⁾ の定数を代入し、呼吸の機械的効率を 5% と仮定して、116 l/min の運動時最大換気量のために呼吸筋が 1100 ml/min の酸素を消費すると報告している。Michaelis と Müller (1942)³²⁾ は、女性 1 名に自転車エルゴメーターで 300、480 および 720 kgm/min の運動を負荷し、2、3、4 および 5% CO₂ 混合気吸入によって換気量を増加させ、30-50 l/min の換気量時に呼吸筋の酸素消費量は換気 1 l あたり 3 ml であり、肺胞 CO₂ 張力の上昇にともなって一定の換気量では呼吸筋の酸素消費量が減少することを報告している。

Shephard (1966)⁴⁷⁾ は、10名の一般成人男子に最大酸素摂取量の80%のトレッドミル走を負荷し、呼吸数を毎分50と100回に規定して $\%CO_2$ 混合気吸入および随意的過換気によって換気量を増加させて呼吸筋の酸素消費量を測定した。気道抵抗が肺胞 CO_2 張力の変化に影響されるので真の呼吸筋の酸素消費量は、 CO_2 吸入法と随意的過換気法の間にあると考え両者の平均値で示している。すなわち、89-130 l/minの換気量の時、呼吸筋の酸素消費量は呼吸数が毎分50回の場合に換気1 lあたり4.4 mlそして100回の場合に4.3 mlと呼吸数に関係なく、全酸素摂取量の約20%が呼吸筋に消費されると報告している。LevisonとCherniack (1968)²⁴⁾ は、11名の一般人(内1名は女性)に自転車エルゴメーターで150、300、450および600 kgm/minの運動を、そして17名の男子慢性閉塞性肺疾患患者に150および300 kgm/minの運動を負荷し、3-5%の CO_2 混合気吸入によって換気量を増加して呼

吸筋の酸素消費量を測定した。一般人の場合、呼吸筋が換気1ℓあたり消費する酸素量は、低い運動水準で3.1 mlそして高い運動水準で4.2 mlであった。一方、患者の場合、低い運動水準においてさえ呼吸筋の酸素消費量は換気1ℓあたり9.3 mlと高いものであった。そして、呼吸筋の酸素消費量が全酸素摂取量に占める割合を求めたところ、一般人では70 ℓ/minの換気量時に10-15%程度であるが、患者では30 ℓ/minの換気量時でさえ35-40%に達することをみた。それゆえ、患者の運動能力は呼吸筋の酸素消費量によって制限されると報告している。RodeとShephard (1971)⁴⁶⁾は、喫煙習慣が運動時の呼吸筋の酸素消費量に及ぼす影響を見るために、習慣的紙巻きタバコ喫煙者である6名の成人男子に最大酸素摂取量の80%のトレッドミル走を負荷した。換気量は随意的過換気および外的死腔の付加の二方法で増加され、両者の平均値が呼吸筋の酸素消費量として用いられた。普通の生活をし

て測定前 1 時間の内に 2 本以上の紙巻きタバコを喫煙しての「喫煙走」時に換気量は 100 - 130 l/min であり、換気 1 l あたり 8.8 ml の酸素が呼吸筋に消費されるが、1 日の禁煙の後の「非喫煙走」時には換気量が 95 - 130 l/min となり 5.6 ml の酸素が呼吸筋に消費された。呼吸筋の酸素消費量が「非喫煙走」時に「喫煙走」時より 13 - 79 % 少ないことから、紙巻きタバコの喫煙は酸素運搬機構を変化させるものであると報告している。

このように、運動時の呼吸筋の酸素消費量について報告されているが、そのほとんどが一般人を対象としたものであり、鍛練者に関しては Milic-Emili ら (1962)³⁵⁾ が報告しているに過ぎない。彼らは、最大運動時に鍛練者が全酸素摂取量の 2.4 % を呼吸筋に消費すると述べている。しかし、これは呼吸の機械的効率を 20 % と概算し、呼吸の機械的仕事量からの推定である。呼吸の機械的効率は、1 - 25 %^{9) 11) 13) 18) 21) 23) 27) 33)} と幅広い値が報告されているた

め、彼らの得た呼吸筋の酸素消費量は多少過少評価されたものと思われる。したがって、鍛練者が運動時での換気のためにどの程度の酸素を消費するかは未だ明らかでない。

研究方法

1. 実験方法

(1) 被験者

被験者は、鍛練者群として本学陸上競技部長距離ブロックに所属する男子学生10名、そして非鍛練者群として本学体育学部および同大学院体育学研究科に在籍し、日常規則的な持続的トレーニングを行なっていない健康な男子学生10名であった。彼らの身体特性は表1に示した。

(2) 運動負荷

自転車エルゴメーター (Monark社製) によって、2種類の運動負荷が全被験者に与えられた。

a. 運動I

運動Iは最大運動であった。すなわち、メトロノームによってペダリング頻度を毎分50回に保ち、300、600および900 kgm/minの3段階のsubmaximalな負荷を各6分間ずつ継続的に与え、18分以後は1分毎に150 kgm/min

ずつ負荷を漸増し exhaustion に至らしめるものであった。exhaustion の判定は、被験者がメトロノームのテンポに合わせて運動を遂行できなくなることによった。運動 I において吸気は室内気であったが、十分に換気を行なったためその組成は外気と同一であった。

6、運動 II

運動 II は、運動 I で用いた submaximal な 3 段階の負荷 (300 、 600 および 900 kgm/min) と同一のものであった。しかし、呼吸筋の酸素消費量を測定するために約 8% CO_2 混合気が吸気として用いられ、換気量が増加させられた。

(3) 測定項目と方法

a、酸素摂取量: $\dot{V}_{\text{O}_2}$

酸素摂取量はダグラスバッグ法によって測定された。すなわち、被験者がマウスピース、呼吸流量計の気流抵抗管 (日本光電社製: 運動 I のみで使用) 、T 字型 J バルブ (市河思誠堂製) および蛇管を通して呼出した呼気が

ダグラスバッグに採集された。採集した呼気を直ちに1回転10ℓの湿式実験用精密ガスメーター（品川製作所製）によって計量し、その1部をサンプルとしてあらかじめ労研式大型呼気ガス分析器（柴田化学機械工業製）で校正した O_2 分析器（Beckmann社製、OM-11）と医用 CO_2 分析器（Beckmann社製、LB-1）によって分析し、1分間あたりの酸素摂取量（STPD）^{注1)}を算出した。

6. ~~最大~~酸素摂取量： $\dot{V}O_{2max}$

運動Iで得られた酸素摂取量のうち、最も大きな値を示したものを各被験者の最大酸素摂取量とした。

7. 換気量： $\dot{V}_E$

湿式ガスメーターによって計量された呼気をBTPS^{注2)}に換算し、1分間値で示した。

8. 呼吸筋の酸素消費量

呼吸筋の酸素消費量は、Liljestrand(1918)²⁵⁾の考え方に基つき、 CO_2 混合気吸入によって換気量を増加させて測定した。すなわち、運

注1) STPD = Standard temperature and pressure, dry.

注2) BTPS = Body temperature and pressure saturated with water vapor.

動Ⅰでは室内気呼吸によって3段階の各々の酸素摂取量と換気量を求める。次に、運動Ⅱで約2% CO_2 混合気吸入（一方が蛇管を通して被験者の吸気側へ、一方が室内気に、そして残りの一方が60% CO_2 と40% N_2 を含む150 lのダグラスバッグにそれぞれ結びつけられた三方コックの内径を変えて、約2% CO_2 混合気を被験者が吸入できるようにした。混合気は市河忠誠堂製の13.5 lのアイカベネダクト型レスピロメーター内に採集され、OM-11とLB-1によってその組成が分析された。）によって、3段階の各々の増加した酸素摂取量と換気量を求め、次式から呼吸の酸素価 $V_{E\text{cost}}$ を算出した。

$$V_{E\text{cost}} = \frac{\dot{V}_{O_2}(CO_2) - \dot{V}_{O_2}(\text{air})}{\dot{V}_E(CO_2) - \dot{V}_E(\text{air})} \text{ ml/l}$$

ここで、 $\dot{V}_{O_2}(CO_2)$ と $\dot{V}_E(CO_2)$ は CO_2 混合気吸入時の酸素摂取量と換気量であり $\dot{V}_{O_2}(\text{air})$ と $\dot{V}_E(\text{air})$ は室内気呼吸時の酸素摂取量と換気量である。呼吸筋の酸素消費量は、各換気量に呼吸の酸

素価を乗じることによって算出された。これらの各換気量における全酸素摂取量からその呼吸筋の酸素消費量（呼吸成分：R）を引き算して、非呼吸成分（NR）が求められた。たとえば、40-50 l/minの換気量の時の $V_{E\text{cost}}$ が4 ml/lであり $\dot{V}_{O_2}$ が800-1000 ml/minならば、40と50 l/minでのRはそれぞれ160と200 ml/minとなり、NRはそれぞれ640と800 ml/minとなる。

e、肺粘性抵抗

肺粘性抵抗は、気流阻止法⁽¹⁶⁾³¹⁾³⁹⁾によって測定された。気流速度は、呼吸流量計（日本光電社製：MFP-1）の気流抵抗管（Fleisch型）から取り出した圧差を差圧計に導き、ひずみ圧力計用前置増幅器（日本光電社製：RP-3）および主増幅器（日本光電社製：多用途監視記録装置RM-150型に内蔵）を経てインク書きオシログラフ（日本光電社製：WI-180TR）上に記録した。気流速度は、13.5 lのアイカベネゲクト型レスピロメーターによって

校正した。口腔内圧は、マウスピースの近くから呼吸圧を取り出し圧力計、ひずみ圧力計用前置増幅器、および主増幅器を経てインク書きオシログラフ上に記録した。圧の校正は水柱マノメーターによって行なった。気流速度と口腔内圧の同時記録中、マウスピースと気流抵抗管の間にある shutter を任意に約 0.1 秒間閉じ、気流阻止直前の気流速度と阻止時の胸腔内圧を得、次式によって肺粘性抵抗を求めた。

$$\text{肺粘性抵抗} = \frac{\text{胸腔内圧}}{\text{気流速度}} \text{ cmH}_2\text{O/l/sec}$$

抵抗値は、呼吸および吸気時共に最低 3 回以上の気流阻止によって得られた値の平均値を用いた。

チ、スパイロメトリー

13.5 l のアिकाベネデフト型レスピロメーターによる 3 回のスパイロメトリーから肺活量 (VC)、1 秒率 (FEV_{1.0}) および最大随意換気量 (MVV) を求めた。3 回の測定値の最

大値が用いられた。

g. 心拍数

心拍数は、胸部導出心電図のR棘の数を30秒毎に数え、2倍して1分間値とした。

h. 呼吸数

呼吸数は、すべての運動中メトロノームによって毎分50回に統一し、1回呼吸量の増加のみで換気量を増加させた。これは、呼吸筋の酸素消費量が呼吸数に影響されず⁴⁰⁾、そして毎分50回の呼吸数が40-130 l/minの換気量にわたって自発的に選ばれた呼吸数の呼吸の機械的仕事量と同じである³⁴⁾という報告に基づいて選ばれた。

え. 実験手順

(1) 運動I

被験者は、食後少なくとも8時間経過した後、実験室へ来て、30分以上の椅座位安静をとった。次に、自転車エルゴメーター上で安静状態を保ち、運動前値(安静値)の測定を受けた。すなわち、酸素摂取量と換気量を測

定するための採気が5分間なされ、その採気中の3分30秒－4分30秒の1分間に心電図の記録がなされた。次に、肺粘性抵抗の測定がなされた。その後、メトロノームによってペダリング頻度および呼吸数を毎分50回に保ちながら運動が開始された。運動中の採気は、3分30秒－4分30秒、4分30秒－5分30秒、9分30秒－10分30秒、10分30秒－11分30秒、15分30秒－16分30秒および16分30秒－17分30秒の各1分間、および18分以後は1分間ごとにexhaustionまで連続して行なった。肺粘性抵抗の測定は、運動中5分30秒－6分、11分30秒－12分および17分30秒－18分の各30秒間になされた。

(2) 運動Ⅱ

被験者は、食後少なくとも2時間経過した後、実験室へ来て、30分以上の椅座位安静をとった。次に、自転車エルゴメーター上で安静状態を保ちながら約2% CO_2 混合気を10－15分間吸入した。その後、運動Ⅰと同様に運

動が開始された。CO₂混合気吸入中の採気は、運動中3分30秒-4分30秒、4分30秒-5分30秒、9分30秒-10分30秒、10分30秒-11分30秒、15分30秒-16分30秒および16分30秒-17分30秒の各1分間なされた。

なお、運動IとIIにおいて心電図が運動中連続記録された。

(3) スパイロメトリー

被験者は、運動IとIIの場合と同一条件で実験室へ来て、10-30分間椅座位安静をとった後、椅座位のまま3回のスパイロメトリーを受けた。各施行間の時間は、被験者の呼吸終末水準が一定するまで充分にとられた。

3. 実験条件

実験は、昭和49年9月12日から11月13日にわたって実施した。その期間の室温は $22.4 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度は $68 \pm 8.3\%$ そして気圧は $757 \pm 2.1 \text{ mmHg}$ であった。

研究結果

1. 最大酸素摂取量

最大酸素摂取量は、鍛練者が 52.6 ± 2.79 $\text{ml/kg} \cdot \text{min}$ として非鍛練者が 41.2 ± 4.87 $\text{ml/kg} \cdot \text{min}$ であった。その差は統計的に1%水準で有意であった。

2. 運動中の呼吸筋の酸素消費量

運動IとIIの300、600および900 kgm/min の各負荷において2回ずつ採気したが、各酸素摂取量と換気量の2回の測定値間に統計的な有意差が見られなかった ($P > 0.05$) ので、それぞれの値を平均して各負荷の値とした。

鍛練者と非鍛練者での運動中の室内気および CO_2 混合気呼吸時の換気量と酸素摂取量の関係、計算された呼吸の酸素価そして全酸素摂取量の呼吸成分(R)と非呼吸成分(NR)への分割を表2に示した。また、運動中の換気量に対する全酸素摂取量の呼吸成分(R)と非呼吸成分(NR)への分割を図1(鍛練者)および図2(非鍛練者)に示した。

鍛練者の呼吸の酸素価は、低い換気量水準で換気1ℓあたり3.6 ml そして高い換気量水準で4.4 ml であった。一方、非鍛練者のそれは、それぞれ4.7 ml および5.5 ml であった。すべての換気量水準において、鍛練者の呼吸の酸素価は非鍛練者のそれよりも小さな値を示した ($P < 0.05$)。

図3に示したように、物理的に同一な運動強度において鍛練者と非鍛練者の非呼吸成分の間に統計的な差が見られなかった。呼吸成分が全酸素摂取量に占める割合は、900 kgm/min の運動時、鍛練者が17% であり非鍛練者が23% であった。

3. 肺粘性抵抗

安静時および運動時の肺粘性抵抗を表3および図4に示した。また、運動時(600 kgm/min) に得られた口腔内圧と気流速度の代表的な記録を図5に示した。

安静時および運動時の肺粘性抵抗は、鍛練者と非鍛練者の間で統計的な差が見られな

った。

900 kgm/minの運動時の肺粘性抵抗は、鍛練者と非鍛練者共に安静値よりも統計的に有意な増加を示した ($p < 0.05$)。

4、スパイロメトリー

スパイロメトリーによって得られた結果を表4に示した。

鍛練者は非鍛練者よりも統計的に有意に大きな ($p < 0.05$) 最大随意換気量 (体表面積1 m²あたり: BSA) を示した。

5、心拍数

室内気およびCO₂混合気呼吸による運動中の心拍数には統計的に差がなかった ($p > 0.05$) が、いずれの運動負荷においても鍛練者の心拍数は非鍛練者よりも低い値 ($p < 0.05$) を示した (表5)。

考察

本研究で用いた被験者のうち非鍛練者の5名が習慣的紙巻きタバコの喫煙者であった。Nadel と Comroe (1961)³⁸⁾ および Pelzer と Thomson (1966)⁴⁵⁾ は、紙巻きタバコの習慣的喫煙の結果として気道が狭窄するため、喫煙者の気道抵抗が非喫煙者のそれより高くなると報告している。また、Rode と Shephard (1971)⁴⁶⁾ は、紙巻きタバコの習慣的喫煙が酸素運搬機構に多大の影響を及ぼし、特にその影響が激運動時において著しいことを報告している。しかし、本研究の場合、非鍛練喫煙者と非鍛練非喫煙者の肺粘性抵抗に統計的な有意差が見られず ($p > 0.05$ 、表6)、また呼吸の酸素価にも差が見られなかった ($p > 0.05$ 、表7)。したがって、本研究での鍛練者と非鍛練者の間に見られる呼吸の酸素価の有意な差 ($p < 0.05$) は、喫煙習慣の有無によるものではないと考えられる。

安静状態でスパイロメトリーを実施した

結果、鍛練者は非鍛練者よりも有意に大きい最大随意換気量（体表面積1㎡あたり）を示したが、肺活量には差が見られなかった。朝比奈と中川（1969）¹⁾は、最大随意換気量の著明な発達は、反復される強い胸郭運動によってもたらされる呼吸筋の発達によるもので、胸郭の発達による一回換気量の増大と共に呼吸筋の持久能力も大幅に改善されるためであると述べている。本結果からも同様のことが推察される。

本研究で得られた安静時における呼気時と吸気時の肺粘性抵抗は、鍛練者がそれぞれ2.04と1.92 cmH₂O/l/secであり、非鍛練者がそれぞれ2.04と1.87 cmH₂O/l/secであり、他の研究者の報告値^{3) 12) 16) 19) 22) 30) 31)}とよく一致している（表8）。鍛練者と非鍛練者の安静時肺粘性抵抗値に差が見られなかったが、両群共に呼気時の肺粘性抵抗値が吸気時よりも6-8%高い値を示した。これは、呼気時に気道が狭窄^{20) 48)}を起こすためと考えられる。

運動時について見ると、肺粘性抵抗は換気量の増加にともなって増加するが、換気量が40 l/minになる程度の運動では肺粘性抵抗値に安静値からの有意な増加は見られなかった。McIlroyら(1954)²⁸⁾およびChiangら(1965)¹⁵⁾は、換気量が20-40 l/minになるような運動時では肺粘性抵抗値の安静値からの増加がほとんど見られないと報告しており、本研究の結果と一致した。しかし、70-80 l/minの換気量を要する運動時(900 kgm/min)の肺粘性抵抗値は、鍛練者と非鍛練者の両群共に安静値よりも有意な増加を示した($p < 0.05$)。これは、運動による気道の拡張よりもむしろ大きな換気量のために気流速度が増加し、これが肺粘性抵抗を増加させたものと考えられる。

上述した運動時の肺粘性抵抗は、鍛練者と非鍛練者の間に有意差が見られなかったが、運動時の同一換気量に対する呼吸の酸素価は鍛練者の方が有意に小さかった。これは、非鍛練者に比べて鍛練者の方が運動中の呼吸運

動が経済的に行なわれていることを示唆している。

絶対的運動強度が同一の場合、鍛練者は非鍛練者よりも有意に低い ($p < 0.05$) 心拍数で運動を遂行した (表5)。これに対して酸素摂取量には差が見られなかった (表8)。これは、鍛練者の酸素脈が大きく、したがって呼吸循環系機能の効率がよいことを示している⁸⁾。

本研究において、同一換気量に対する呼吸の酸素価は非鍛練者よりも鍛練者の方が有意に小さかったが、これは鍛練者の呼吸の機械的効率がよいことを示すものである。Milic-Emiliら (1962)³⁾ は、鍛練者と非鍛練者を用いて、種々の運動強度での呼吸の機械的仕事量を測定したが、同一換気量では両群間に有意差がないことを報告した。本研究の場合、300および600 kgm/minの運動時に鍛練者と非鍛練者の換気量はほぼ同じであった (表8) が、呼吸の酸素価には有意な差が見られた。また、

900 kgm/minの運動時では、鍛練者は非鍛練者よりも換気量と呼吸の酸素価が共に有意に小さかった。すなわち、絶対的運動強度が同一の場合、鍛練者は非鍛練者よりも呼吸の機械的効率がよく、また高い運動強度における運動の効率が優れている。このことは、運動中、呼吸筋以外の筋に用いられる酸素量 (NR) が鍛練者と非鍛練者で差がないのに対し、運動強度の増加にともなう呼吸筋の酸素消費量の増加の程度が、非鍛練者でより大きい(図3)ことからもうかがえる。呼吸筋の酸素消費量は換気量の増加にともない指数関数的増加を示し⁶⁾⁷⁾¹⁸⁾²⁹⁾³⁶⁾、critical point²⁶⁾⁴²⁾⁴⁷⁾に達することが知られている。これは、呼吸筋以外の筋に利用できる全酸素摂取量の割合が、換気量の増加にともなって減少することを意味している。本研究において、運動時の呼吸筋の酸素消費量が全酸素摂取量に占める割合は、高い換気量水準(900 kgm/minの運動時)で鍛練者が17%そして非鍛練者が23%であった。した

がって、激しい運動時の場合、非鍛練者の方が鍛練者よりも呼吸運動により大きな負担がかかることが示唆される。持久性能と呼吸筋の運動との関係について Asmussen (1965)²⁾ は、呼吸筋が体の酸素運搬容量の20%をも消費すると、激運動での運動の機械的効率低下するため、換気量は作業能力を制限する因子の一つであると述べている。また、Ouellet ら (1969)⁴⁾ は、酸素摂取量の level off 時に呼吸筋の酸素消費量(概算値)が急激に増加することから、持久性能を制限するものは呼吸筋の酸素消費量であると報告しており、本研究の非鍛練者の場合も同様のことが推察される。

以上まとめると、絶対的運動強度が同一の場合、鍛練者と非鍛練者の肺粘性抵抗には有意差が見られなかったが、呼吸の酸素価および呼吸筋の酸素消費量は鍛練者の方が有意に小さかった。したがって、鍛練者の運動時の呼吸の機械的効率は非鍛練者よりもよいもの

である。また、非鍛練者の運動時の呼吸筋の酸素消費量が全酸素摂取量の20%以上であることから、非鍛練者の持久性能は呼吸筋の酸素消費量によって相当影響される。

要約

本研究の目的は、呼吸筋の酸素消費量が持久性能かに影響する因子となりうるかどうかを明らかにすることであった。

被験者として、男子陸上競技長距離選手10名（鍛練者）と一般男子学生10名（非鍛練者）を用い、自転車エルゴメーターによる運動を2回行なわせた。1回目は室内気を吸入しながら300、600および900 kgm/minの3段階のsubmaximalな運動を各6分間ずつ連続的行なわせ、それ以後exhaustionまで1分毎に負荷を漸増するものであった。2回目は、換気量を増加させ呼吸筋の酸素消費量を求めるために、約2% CO_2 混合気を吸入させながら1回目の3段階のsubmaximalな運動を行なわせた。

酸素摂取量と換気量は、1回目および2回目の運動期間中ダグラスバッグ法によって測定された。呼吸の酸素価は、 CO_2 混合気吸入によって増加した酸素摂取量と換気量の比か

ら求められ、呼吸筋の酸素消費量が算出された。肺粘性抵抗は、1回目の3段階の submaximal な運動時に気流阻止法によって測定された。また、安静時の肺活量、1秒率および最大随意換気量がスパイロメトリーによって測定された。

鍛練者の最大酸素摂取量および最大随意換気量（体表面積1㎡あたり）は、非鍛練者のそれらより有意に大きかった（ $P < 0.05$ ）。

肺粘性抵抗は運動強度の増加にともなって大きくなるが、鍛練者と非鍛練者の間に有意差は見られなかった。

運動中の鍛練者の呼吸の酸素価は、低い換気量時に換気1ℓあたり3.6 ml そして高い換気量時に4.4 ml であった。一方、非鍛練者はそれぞれ4.7 ml および5.5 ml であり、鍛練者は非鍛練者よりも呼吸の酸素価が有意に小さかった（ $P < 0.05$ ）。呼吸筋の酸素消費量と全酸素摂取量に対するその割合は、900 kgm/min の運動負荷時に鍛練者が340 ml/min と17%で

あり、非鍛練者が 500 ml/min と 23% であった。

運動中の鍛練者と非鍛練者の肺粘性抵抗には有意差がなく、運動時の同一換気量に対する呼吸の酸素価は鍛練者の方が有意に小さいことから、鍛練者の運動時の呼吸の機械的効率是非鍛練者よりも優れていることが示唆された。

呼吸筋の酸素消費量が持久性能に及ぼす影響は、鍛練者よりも非鍛練者の方がより大きい。

引用文献

- 1) 朝比奈一男、中川功哉:運動生理学. 現代保健体育学大系7, 第1版. 44-50,大修館:東京(1969)
- 2) Asmussen, E.: Muscular exercise. In Fenn, W.O. and H. Rahn ed. Handbook of Physiology. Sec. 3, Respiration. Vol. 2, 1st ed. 939-978, Am. Physiol. Soc.: Washington (1965)
- 3) Attinger, E.O., R.G. Monroe and M.S. Segal: The mechanics of breathing in different body positions. J. Clin. Invest., 35 904-911 (1956)
- 4) Bader, R.A., M.E. Bader and D.J. Rose: The oxygen cost of breathing in dyspnoeic subjects as studied in normal pregnant women. Clin. Sci., 18 223-235 (1959)
- 5) Bartlett, R.G., Jr. and H. Specht: Energy cost of breathing determined with a simplified technique. J. Appl. Physiol., 11 84-86 (1957)
- 6) Bartlett, R.G., Jr., H.F. Brubach and H. Specht: Oxygen cost of forced breathing in the submerged resting subject. J. Appl. Physiol., 11 377-382 (1957)
- 7) Bartlett, R.G., Jr., H.F. Brubach and H. Specht: Oxygen cost of breathing. J. Appl. Physiol., 12 413-424 (1958)
- 8) Brouha, L.: Training. In Johnson, W.R. and E.R. Buskirk ed. Science and Medicine of Exercise and Sports, 2nd ed. 276-283, Harper and Row: New York (1974)
- 9) Cain, M.C.C. and A.B. Otis: Some physiological effects resulting from added resistance to respiration. J. Aviation Med., 20 149-160 (1949)
- 10) Campbell, E.J.M., E.K. Westlake and R.M. Cherniack: Simple methods of estimating oxygen consumption and efficiency of the muscles of breathing. J. Appl. Physiol., 11 303-308 (1957)
- 11) Campbell, E.J.M., E.K. Westlake and R.M. Cherniack: The oxygen consumption and efficiency of the respiratory muscles of young male subjects. Clin. Sci., 18 55-65 (1959)

- 12) Cherniack, R.M.: The physical properties of the lung in chronic obstructive pulmonary emphysema. J.Clin.Invest., 35 394-404 (1956)
- 13) Cherniack, R.M.: The oxygen consumption and efficiency of the respiratory muscles in health and emphysema. J.Clin.Invest., 38 494-499 (1959)
- 14) Cherniack, R.M. and C.A.Guenter: The efficiency of the respiratory muscles in obesity. Can.J.Biochem.Physiol., 39 1215-1222 (1961)
- 15) Chiang, S.T., N.H.Steigbigel and H.A.Lyons: Pulmonary compliance and nonelastic resistance during treadmill exercise. J.Appl.Physiol., 20 1194-1198 (1965)
- 16) Clements, J.A., J.T.Sharp, R.P.Johnson and J.O.Elam: Estimation of pulmonary resistance by repetitive interruption of airflow. J.Clin.Invest., 38 1262-1270 (1959)
- 17) Cournand, A., D.W.Richards, Jr., R.A.Bader, M.E.Bader and A.P.Fishman: The oxygen cost of breathing. Trans.Assoc.Am. Physicians, 67 162-173 (1954)
- 18) Eckermann, P. und H.P.Millahn: Der Sauerstoffverbrauch der Atmungsmuskulatur bei Frauen: Zugleich eine Betrachtung über den Wirkungsgrad der Atmungsmuskulatur. Int.Z.angew.Physiol., 19 168-172 (1962)
- 19) Ehrner, L.: Lung compliance and respiratory resistance, determined from time-marked esophageal pressure-tidal volume curves and their relation to some other tests of lung function: A clinical and pathophysiological study of 148 cases with various chest diseases. Acta Med.Scand., Suppl. 353 1-220 (1960)
- 20) Ferris, B.G., Jr., J.Mead and L.H.Opie: Partitioning of respiratory flow resistance in man. J.Appl.Physiol., 19 653-658 (1964)
- 21) Fritts, H.W., Jr., J.Filler, A.P.Fishman and A.Cournand: The efficiency of ventilation during voluntary hyperpnea:

- Studies in normal subjects and in dyspneic patients with either chronic pulmonary emphysema or obesity. J.Clin. Invest., 38 1339-1348 (1959)
- 22) Hedstrand, U.: Mechanical work of breathing in normal subjects analysed with a computer technique. Scand.J.clin.Lab.Invest., 24 83-89 (1969)
- 23) Hoeschen, R.J., L.H.A. Gold, T.E. Guddy and R.M. Cherniack: Oxygen cost and efficiency of respiratory system in hypoxia and in congestive heart failure. Circulation Res., 11 825-831 (1962)
- 24) Levison, H. and R.M. Cherniack: Ventilatory cost of exercise in chronic obstructive pulmonary disease. J.Appl. Physiol., 25 21-27 (1968)
- 25) Liljestrand, G.: Untersuchungen über die Atmungsarbeit. Scand. Arch. Physiol., 35 199-293 (1918)
- 26) Margaria, R., G. Milic-Emili, J.M. Petit and G. Cavagna: Mechanical work of breathing during muscular exercise. J. Appl. Physiol., 15 354-358 (1960)
- 27) McGregor, M. and M.R. Becklake: The relationship of oxygen cost of breathing to respiratory mechanical work and respiratory force. J.Clin. Invest., 40 971-980 (1961)
- 28) McIlroy, M.B., R. Marshall and R.V. Christie: The work of breathing in normal subjects. Clin. Sci., 13 127-136 (1954)
- 29) McKerrow, C.B. and A.B. Otis: Oxygen cost of hyperventilation. J.Appl. Physiol., 9 375-379 (1956)
- 30) Mead, J. and J.L. Whittenberger: Physical properties of human lungs measured during spontaneous respiration. J.Appl. Physiol., 5 779-796 (1953)
- 31) Mead, J. and J.L. Whittenberger: Evaluation of airway interruption technique as a method for measuring pulmonary air-flow resistance. J.Appl. Physiol., 6 408-416 (1954)
- 32) Michaelis, H. und E.A. Müller: Die Bedeutung des alveolaren CO₂-Druckes für die Bestimmung des auf die Atmung entfallenden Energieverbrauches. Arbeitsphysiol., 12 85-91 (1942)

- 33) Milic-Emili, G. and J.M. Petit: Mechanical efficiency of breathing. J. Appl. Physiol., 15 359-362 (1960)
- 34) Milic-Emili, G., J.M. Petit and R. Deroanne: The effects of respiratory rate on the mechanical work of breathing during muscular exercise. Int. Z. angew. Physiol., 18 330-340 (1960)
- 35) Milic-Emili, G., J.M. Petit and R. Deroanne: Mechanical work of breathing during exercise in trained and untrained subjects. J. Appl. Physiol., 17 43-46 (1962)
- 36) Millahn, H.P. und P. Eckermann: Der Sauerstoffverbrauch der Atmungsmuskulatur bei hohen Ventilationen. Int. Z. angew. Physiol., 19 120-125 (1961)
- 37) Murray, J.F.: Oxygen cost of voluntary hyperventilation. J. Appl. Physiol., 14 187-190 (1959)
- 38) Nadel, J.A. and J.H. Comroe, Jr.: Acute effects of inhalation of cigarette smoke on airway conductance. J. Appl. Physiol., 16 713-716 (1961)
- 39) Neergaard, K.V. und K. Wirz: Die Messung der Strömungswiderstände in den Atemwegen des Menschen, insbesondere bei Asthma und Emphysem. Z. Klin. Med., 105 51-82 (1927)
- 40) Nielsen, M.: Die Respirationsarbeit bei Körperruhe und bei Muskelarbeit. Skand. Arch. Physiol., 74 299-316 (1936)
- 41) Otis, A.B., W.O. Fenn and H. Rahn: Mechanics of breathing in man. J. Appl. Physiol., 2 592-607 (1950)
- 42) Otis, A.B.: The work of breathing. Physiol. Rev., 34 449-458 (1954)
- 43) Otis, A.B.: The work of breathing. In Fenn, W.O. and H. Rahn ed. Handbook of Physiology. Sec. 3, Respiration. Vol. 1, 1st ed. 463-476, Am. Physiol. Soc.: Washington, D.C. (1964)
- 44) Ouellet, Y., S.C. Poh and M.R. Becklake: Circulatory factors limiting maximal aerobic exercise capacity. J. Appl. Physiol., 27 874-880 (1969)
- 45) Pelzer, A.-M. and M.L. Thomson: Effect of age, sex, stature,

and smoking habits on human airway conductance. J. Appl. Physiol., 21 469-476 (1966)

46) Rode, A. and R.J. Shephard: The influence of cigarette smoking upon the oxygen cost of breathing in near-maximal exercise. Med. Sci. in Sports, 3 51-55 (1971)

47) Shephard, R.J.: The oxygen cost of breathing during vigorous exercise. Quart. J. Exper. Physiol., 51 336-350 (1966)

48) 外村舜治、一之沢昭夫、山村一、藤本淳: 換気力学(4) 肺抵抗, 呼吸と循環
12 743-751 (1964)

Oxygen consumption of the respiratory muscles as a factor influencing the aerobic work capacity

Nobukazu TAMAKI

The purpose of the present study was to elucidate whether oxygen consumption of the respiratory muscles might influence the oxygen supply to the working muscles.

Ten male long distance runners (trained) and 10 sedentary male students (untrained) were served as the subjects. They were exercised twice on a Monark bicycle ergometer. In the first exercise, the work load was stepwisely increased every 6 minutes (300, 600 and 900 kgm/min), and then it was further increased every one minute by 150 kgm/min to exhaustion at which the subjects could not maintain to exercise at the 50 rpm of pedalling rate. The work load of second exercise was equal to the three submaximal stages of the first exercise, but throughout the exercise periods the subjects were breathing about 2% CO₂ in air in order to increase pulmonary ventilation.

Oxygen intake and pulmonary ventilation were determined by the Douglas bag method both in the first and second exercises. Oxygen cost of breathing (in ml per unit ventilation) was given by the following equation:

$$\text{Oxygen cost of breathing} = \frac{\dot{V}_{O_2}(\text{CO}_2) - \dot{V}_{O_2}(\text{air})}{\dot{V}_E(\text{CO}_2) - \dot{V}_E(\text{air})}$$

where $\dot{V}_{O_2}(\text{air})$ and $\dot{V}_E(\text{air})$ means oxygen intake and pulmonary ventilation while breathing room air, and $\dot{V}_{O_2}(\text{CO}_2)$ and $\dot{V}_E(\text{CO}_2)$ means oxygen intake and pulmonary ventilation while breathing 2% CO₂ in air. Oxygen consumption of the respiratory muscles over the range of pulmonary ventilation studied was then calculated from multiplying each level of pulmonary ventilation by oxygen cost of breathing. Pulmonary resistance was measured with the airway interruption method in the three submaximal stages of the first exercise. Vital capacity, maximal voluntary ventilation and forced expiratory volume were measured at rest by the spirometry.

Maximal oxygen intake of trained subjects was significantly greater than that of untrained ($p < 0.01$).

Oxygen cost of breathing of trained subjects during exercise was 3.6 ml/l at lower pulmonary ventilation (about 45 l/min) and 4.4ml/l at higher pulmonary ventilation (75 l/min), while in untrained the values were 4.7 ml/l (45 l/min) and 5.5 ml/l (85 l/min), respectively. The difference of trained and untrained subjects was significant through pulmonary ventilation studied ($p < 0.05$). Oxygen consumption of the respiratory muscles and its rate to the total oxygen intake in trained subjects at higher pulmonary ventilation were 340ml/min and 17%, while in untrained they were 500ml/min and 23%, respectively.

Though pulmonary resistance was increased with the work load, its values were similar for the trained and untrained subjects.

Trained subjects had a significantly greater maximal voluntary ventilation per unit body surface area ($p < 0.05$).

From the present study it was concluded that the respiratory movements of trained subjects were more economical than untrained, and that oxygen consumption of the respiratory muscles affects more the aerobic work capacity in untrained subjects than trained.

Table 1. Physical characteristics of subjects.

Subjects	n	Age yr	Weight kg	Stature cm
Trained	10	20.3 ± 1.6	55.6 ± 4.6	168.0 ± 3.3
Untrained	10	23.1 ± 2.4	62.8 ± 4.3	168.1 ± 4.8

Table 2. Pulmonary ventilation and oxygen intake while breathing room air and 2% CO₂ in air; the calculated oxygen cost of breathing($\dot{V}_E$ cost); the subdivision of the oxygen intake as its respiratory(R) and nonrespiratory(NR) components during exercise.

$\dot{V}_E$ 1/min		$\dot{V}_{O_2}$ ml/min	$\dot{V}_E$ cost		$\dot{V}_{O_2}$ ml/min		
air	CO ₂	air	CO ₂	ml/l	Total	R	NR
Trained							
43.0		803					
	48.0		821	3.6	981	173	808
57.1		1310					
	62.0		1330	4.1	1487	254	1233
73.2		1881					
	78.6		1905	4.4	2050	346	1704
81.4		2147					
Untrained							
43.3		836					
	48.4		860	4.7	1000	228	772
59.9		1389					
	64.2		1411	5.1	1511	327	1184
83.6		2018					
	90.1		2054	5.5	2156	496	1660
98.3		2335					

Total: $\dot{V}_{O_2}$ during exercise at equivalent ventilation to that while breathing CO₂ in air.

Table 3. Pulmonary resistance($\text{cmH}_2\text{O/l/sec}$) at rest and during exercise.

Subjects		At rest	Exercise kgm/min		
			300	600	900
Trained	expiration	2.04±0.41	2.15±0.32	2.40±0.26	2.86±0.52
	inspiration	1.92±0.41	2.04±0.40	2.22±0.38	2.58±0.57
Untrained	expiration	2.04±0.53	2.28±0.36	2.52±0.38	2.79±0.40
	inspiration	1.87±0.41	2.21±0.37	2.43±0.32	2.61±0.34

Table 4. The values of ventilatory function(BTPS).

Subjects	VC ml	VC/BSA ml/m ²	MVV l/min	MVV/BSA l/m ² /min	FEV _{1.0} %
Trained	4787 ±557.9	2918 ±254.3	180 ±27.9	109.6 ±16.0	90.4 ±4.9
Untrained	4992 ±475.3	2889 ±218.1	157 ±20.9	91.0 ±11.0	87.4 ±6.3
P	—	—	—	*	—

* p 0.05

Table 5. The comparison of heart rate (beats/min) between trained and untrained subjects while breathing room air and CO₂ mixture during exercise.

Subjects	Work load kgm/min					
	300		600		900	
	air	CO ₂	air	CO ₂	air	CO ₂
Trained	84.8	85.9	110.5	108.9	138.3	134.1
	±7.2	±6.2	±11.5	±6.7	±12.6	±11.4
Untrained	94.3	92.1	126.4	122.4	160.7	157.8
	±8.5	±4.6	±15.9	±11.9	±9.9	±17.5
P	*	*	*	*	**	**

* p<0.05 ** p<0.01

Table 6. Pulmonary resistance in untrained smokers and nonsmokers during exercise.

Work load kgm/min	Pulmonary resistance cmH ₂ O/l/sec			
	Smokers		Nonsmokers	
	exp	insp	exp	insp
300	2.31±0.36	2.28±0.35	2.25±0.40	2.15±0.41
600	2.66±0.36	2.51±0.33	2.37±0.38	2.35±0.34
900	2.89±0.44	2.71±0.30	2.70±0.39	2.50±0.39

Table 7. Oxygen consumption of the respiratory muscles in untrained smokers and nonsmokers during exercise.

Work load kgm/min	V _E cost ml/l	
	Smokers	Nonsmokers
300	4.9±0.7	5.3±1.2
600	4.7±0.8	5.4±1.2
900	5.0±1.1	5.8±1.3

Table 8. Pulmonary resistance of normal subjects.

Author	n	Method	Pulmonary resistance	
			cmH ₂ O/l/sec	
Mead & Whittenberger (1953)	7	E		2.02
Mead & Whittenberger (1954)	6	I		2.60
Cherniack (1956)	7	E		1.94
Attinger, et al. (1956)	9	E	exp	2.81
			insp	1.98
Clements, et al. (1959)	12	I		1.94
Ehrner (1960)	15	E		2.14
Hedstrand (1962)	11	E	exp	2.11
			insp	1.74
Present study: Trained	10	I	exp	2.04
			insp	1.92
Untrained	10	I	exp	2.04
			insp	1.87

E=esophageal pressure method; I=interrupter method;
exp=expiration; insp=inspiration

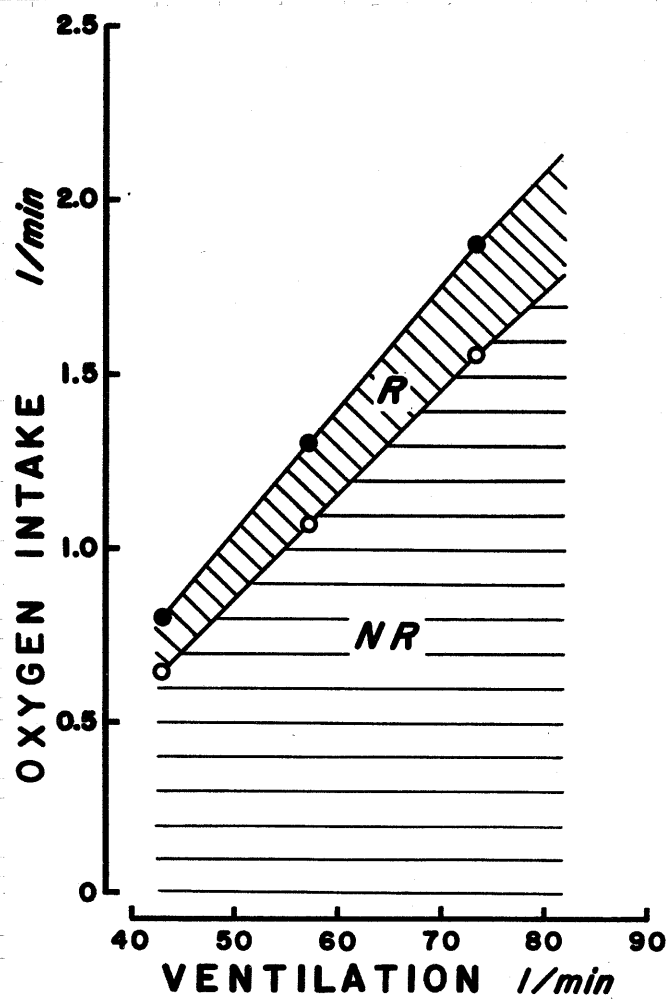


Fig.1. Pulmonary ventilation and oxygen intake while breathing room air and CO₂ mixture; the subdivision of the oxygen intake as its respiratory(R) and nonrespiratory(NR) components in trained subjects.

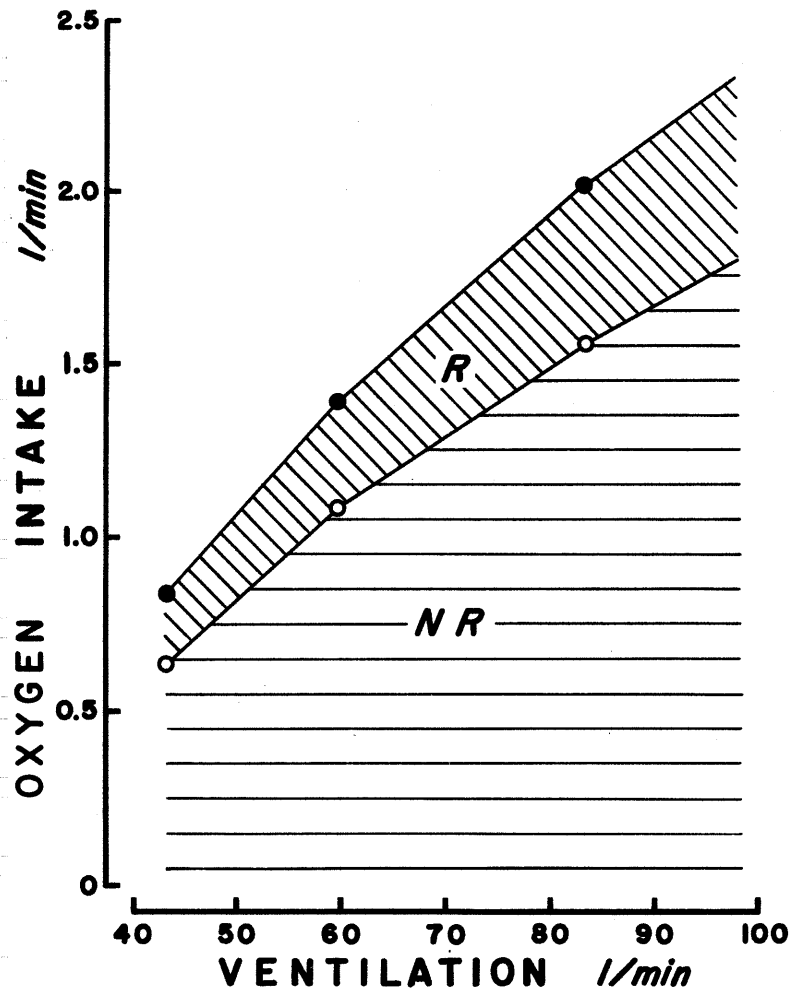


Fig.2. Pulmonary ventilation and oxygen intake while breathing room air and CO_2 mixture; the subdivision of the oxygen intake as its respiratory(R) and nonrespiratory(NR) components in untrained subjects.

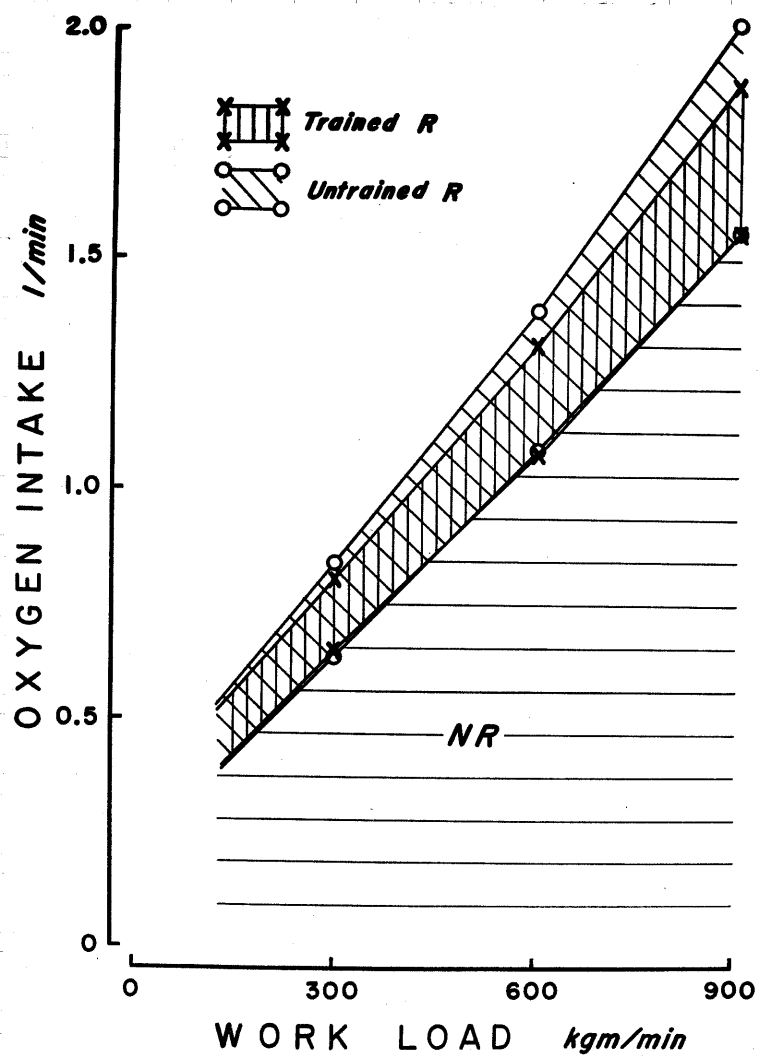


Fig.3. Work load and the respiratory(R) and nonrespiratory(NR) components of total oxygen intake.

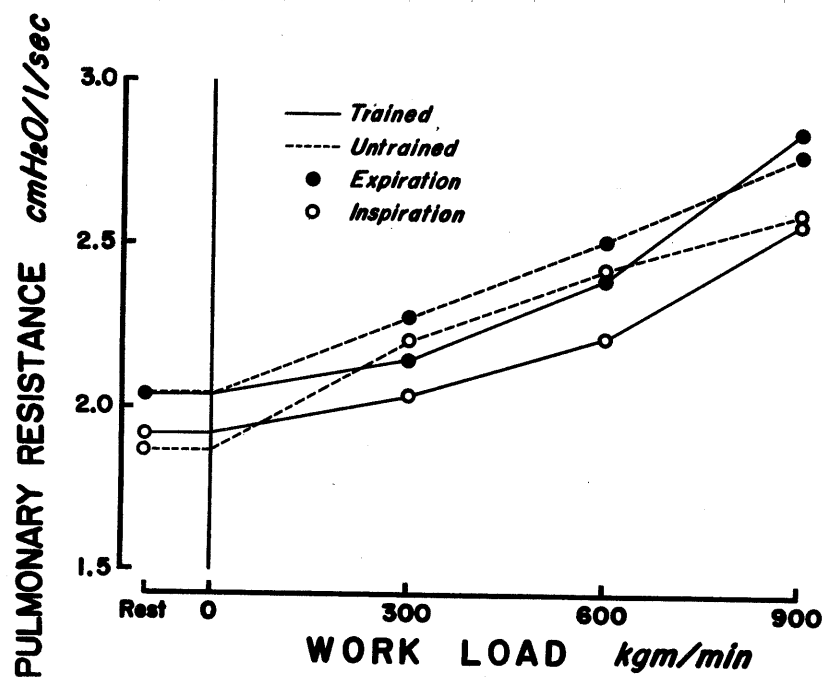


Fig.4. Pulmonary resistance at rest and during exercise.

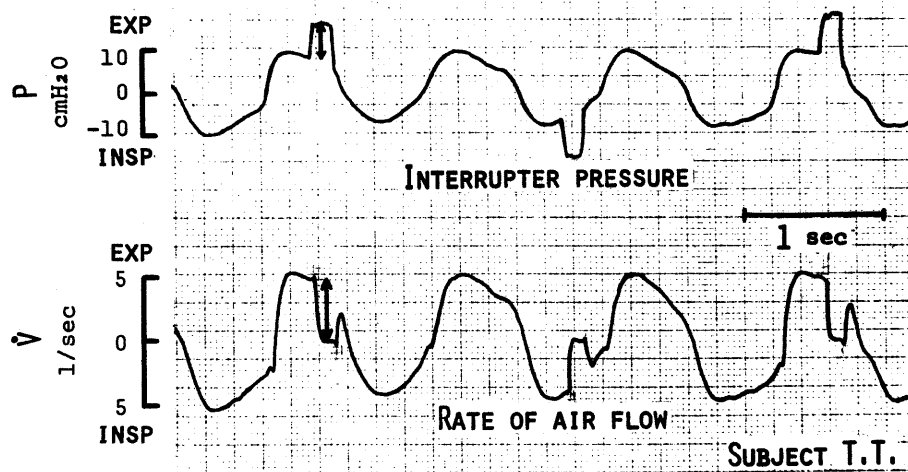


Fig. 5. Typical tracings of interrupter pressure and rate of air flow during exercise.
 $\updownarrow$: point of measurement.