有酸素的作業能の一因子としての肺拡散容量

山 地 啓 司* 猪 飼 道 夫**

(昭和46年10月25日受付)

Pulmonary Diffusing Capacity as a Factor of Aerobic Work Capacity

Keiji Yamaji and Michio Ikai

(School of Education, University of Tokyo)

一般成人10名(23~29歳), 中・長距離選手6名(20~25歳)について, Filley の steady state method でCO 及び O₂ 肺拡散容量(DLCO 及び DLO₂)を, Douglas bag method で酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を測定した. さらに, 一般成人18名, 中・長距離選手15名について, 同じ測定法で最大 O₂ 肺拡散容量(max DLO₂)及び最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)を測定した.

その結果, 両グループとも酸素摂取量($\dot{V}O_2$)の増加にともなって CO 及び O₂ 肺拡散容量(DLCO 及び DLO₂)が比例して増加することを認めた. また, 中・長距離選手は一般成人よりも同一量の酸素を摂取する時, CO及び O₂ 肺拡散容量(DLCO 及び DLO₂)が高いことが認められた. さらに, 最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)と最大 O₂ 肺拡散容量(max DLO₂)との間には相関係数が $r=0.817$ となり, 最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)が大きい者は最大 O₂ 肺拡散容量も大きいことが明らかとなった.

Although it is a well known fact that the pulmonary diffusing capacity is a key factor of aerobic work capacity, the available data are not sufficient for further discussion on basic training of endurance. The authors had conducted a series of measurement of pulmonary diffusing capacity for O₂ together with that of oxygen intake during the work. The work was given to the subjects on a bicycle ergometer with the load of progressively increasing up to nearly the maximal level. The subjects were chosen from ordinary healthy males and trained middle and long distance runners. To determine the pulmonary diffusing capacity, Filley's steady state method was used. And for oxygen intake, Douglas bag method was adopted using Scholander's apparatus. The results were as follows:

(1) The pulmonary diffusing capacity for oxygen at rest was observed to be 22.3 and 32.4 ml/min/mmHg in ordinary and trained subjects respectively.

(2) The pulmonary diffusing capacity for O₂ was increased together with the oxygen intake during the work. The regression lines were presented as follows:

$$\hat{Y}=8.83X+22.07\cdots\cdots\text{for ordinary subjects}$$

$$\hat{Y}=8.32X+32.36\cdots\cdots\text{for trained subjects}$$

where $\hat{Y}$ showed diffusing capacity and X showed oxygen intake.

(3) A close relationship was found between the maximum oxygen intake and the maximum diffusing capacity for oxygen with a correlation coefficient of $r=0.817$.

(4) Based on these results, it is supposed that the pulmonary diffusing capacity will be increased during the work as one of the contributing factors of aerobic work capacity.

(Yamaji, K., and Ikai, M.,: Pulmonary Diffusing Capacity as a Factor of Aerobic Work Capacity, *Research Journal of Physical Education*, Vol. 17, No.1, May, 1972, pp. 7~16)

* 東京大学 ** 1972年1月3日逝去

緒 論

全身持久性を規定する因子について、これまで多くの研究者によって呼吸・循環機能の面から追求されてきた。Andersen (1961)¹⁾ はヒトの作業能 (Physical working capacity) を示す適切な指標は最大酸素摂取量 (Maximal oxygen intake: $\max \dot{V}O_2$) であると述べている。最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) は呼吸循環機能を総括的にみたものである。これに関与する因子として、Holmgren (1967)¹²⁾ は(1)肺換気量 (Ventilation: $\dot{V}_E$) (2) O_2 肺拡散容量 (Oxygen diffusing capacity: D_{LO_2}) (3)心拍出量 (Cardiac output: $\dot{Q}$) (4)組織拡散容量 (Tissue diffusing capacity: D_T)などを挙げている。これらの因子の中でも、呼吸系と循環系の二つの機能が関与している O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) が重要な因子と考えられている。

O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) は Bohr (1909)⁵⁾ によって公式化され、Krogh (1915)¹⁶⁾ によって初めて実際に測定された。その後、Forster (1954)⁸⁾ が一回呼吸法 (Single breath method), Filley (1954)⁷⁾ が定常法 (Steady state method) を発表するに至って、測定が容易となった。Holmgren (1964, 1965)¹⁰⁾ は定常法で CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) を測定し、心拍数は 120/min (40% of $\max \dot{V}O_2$) まで直線的に上昇するが、その後、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の増加にもかかわらず一定であることを報告している。また、Magel (1969)²⁰⁾, Johnson (1965)¹³⁾ は CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) が最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) にさきだち定常状態 (steady state) になることを認めている。しかし、Linderholm (1959)¹⁹⁾, Pirnay (1969)²⁵⁾, Shepard (1958)²⁹⁾ らは定常法で、Bannister (1960)³⁾, Cotes (1960)⁶⁾, Newman (1962)²³⁾ らは一回呼吸法で酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) が直線関係であることを明らかにしている。

このように、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の因子である CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) は酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の増加とともに増加するが、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) が一定以上になると、それ以上増加しないという報告と、どこまでも酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と一定の関係を

保ちつつ増加するという報告に区別される。さらに、最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) とその時の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) の関係についての報告は諸外国ではほとんど見あたらず、わずか我国において草野¹⁷⁾の例をみるだけである。

本研究は日本人の一般成人と中・長距離選手について、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) の関係をみたものである。また、両グループについて、 O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) に関与する肺胞 O_2 分圧 (P_{AO_2})、肺胞毛細管血の O_2 分圧 ($P_{\bar{c}O_2}$) が酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の増加とともにどのように関係していくか、さらに一般成人、中長距離選手の最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) と最大肺拡散容量 ($\max D_{LO_2}$) の関係を明らかにすることによって、全身持久性の中に O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) がどのように関与しているかを探究するものとした。

方 法

最大下作業における被検者は健康な日本人の一般成人男子10名 (23~29歳) とメキシコ・オリンピック選手を含む日本人の中長距離選手6名 (20~25歳) である。両グループの身体的特性は表1に示してある。最大作業における被検者は一般成人男子18名 (19~29歳)、中・長距離選手15名 (18~25歳) である。運動負荷はモナーク社製自転車エルゴメーターを用いた。最大下作業は各々被検者について、一定負荷法でまず、0.5kp の負荷で5分間行い、日を改め次に1.0kp の負荷で5分間行なった。このように負荷を実験ごとに0.5kp ずつ増加させ、5分間続けられなくなる負荷まで増加させた。5分間続けられる最大の作業を最大下作業の最大と呼んだ。さらに、最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) を求めるために、改めて最大作業を行なった。それは4~7分で all-out になるように最初の負荷を定め、1分ごとの漸増負荷法で行なった。なお、すべての自転車の作業における回転数はメトロノームに合わせ 60rpm とした。また、作業にさきだち、2.0kp で3分間ウォーミング・アップを行ない、3分間の休息後作業を行なった。

吸気としてあらかじめ、ダグラスバッグの中へ

表 1 被検者の身体的特性

	Subj.	Age	Height (cm)	Weight (kg)	Surface area (m ²)
Non-athletes	K. W.	24	169.1	59.0	1.67
	H. T.	27	171.7	72.0	1.86
	K. K.	23	158.3	56.0	1.60
	T. F.	28	168.2	66.0	1.77
	K. I.	27	168.3	57.0	1.65
	S. T.	28	163.7	66.0	1.74
	K. U.	25	172.0	62.0	1.75
	Y. S.	26	163.5	67.0	1.74
	K. N.	24	170.2	64.0	1.74
	T. Y.	29	160.0	59.5	1.64
	mean S. D.	26.1 3.14	166.5 11.56	62.85 15.99	1.68 0.38
Athletes	J. N.	25	169.5	58.1	1.67
	J. T.	23	179.0	65.4	1.84
	A. M.	20	167.2	58.0	1.68
	M. A.	22	172.0	62.0	1.75
	S. S.	21	164.3	58.5	1.65
	M. L.	21	172.9	61.2	1.74
	mean S. D.	22 1.79	170.8 5.72	60.53 3.01	1.72 0.01

外気と0.05%の一酸化炭素(CO)の混合ガスを作り、最大下作業では採気15秒前からマウスピースを通し吸わせ、運動開始後4分目と5分目の1分間ダグラスバッグ法で採気を行なった。最大作業では all-out 約1分15秒前からCO混合ガスの吸気を開始し、15秒後から all-out まで採気を行なった。吸気および呼気のCO濃度はBeckman CO Analyzerを用い、CO₂、O₂濃度はScholanderガス分析器で分析を行なった。さらに、ガスメーターで換気量を測り、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)および一酸化炭素摂取量($\dot{V}CO$)を算出した。肺胞C O₂分圧(PACO₂)はLB-1 CO₂ Analyzerを用い、end-tidal法で求め、Bohrの呼吸死腔式から肺胞CO分圧(PACO)を算出した。平均肺毛細管血CO分圧($\bar{P}cCO$)を零とみなし、次の式に代入して、肺拡散容量(DLCO)を求めた。

$$DLCO = \dot{V}CO / (PACO - \bar{P}cCO)$$

肺胞O₂分圧(PAO₂)は呼気ガスの酸素濃度と気圧の積から求められた。一酸化炭素(CO)と酸素(O₂)の溶解度と分子量の比によって酸素肺拡散

容量(DLO₂)を算出した。肺胞毛細管血O₂分圧($\bar{P}cO_2$)はすでに算出された酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、O₂肺拡散容量(DLO₂)、肺胞O₂分圧(PAO₂)をBohrの公式に代入して求めた。

なお、安静値は15分間椅子に座った後、5分間採気し、CO肺拡散容量(DLCO)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を測定した。

結 果

(1) 最大下作業について

健康な一般成人男子10名と中・長距離選手6名について、最大下作業時の酸素摂取量($\dot{V}O_2$)とCOおよびO₂肺拡散容量(DLCO及びDLO₂)の関係を調べた(図1, 図2)。安静時のCO肺拡散容量(DLCO)は一般成人が18.4ml/min/mmHg(DLO₂:22.3)、中・長距離選手26.7ml/min/mmHg(DLO₂:32.4)となり、両グループの間に5%水準で有意差を認めないが、最大下作業における最大作業時のCO肺拡散容量(DLCO)では一般成人33.9ml/min/mmHg(DLO₂:41.8)、中・長距離選手

図1 一般成人と中・長距離選手の酸素摂取量($\dot{V}_{O_2}$)とCO肺拡散容量(D_{LCO})との関係

48.5ml/min/mmHg (D_{LO_2} : 59.7) となり, 両グループの間に1%水準で有意差を認めた. 両グループのCOおよび O_2 肺拡散容量(D_{LCO} 及び D_{LO_2})は酸素摂取量($\dot{V}_{O_2}$)の増加につれ, 比例して増加することを認めた. その回帰直線は一般成人では, 次のようになる.

図2 一般成人と中・長距離選手の酸素摂取量($\dot{V}_{O_2}$)と O_2 肺拡散容量(D_{LO_2})との関係

$$\hat{Y} = 8.83X + 17.94 \quad (D_{LO_2}: \hat{Y} = 8.83X + 22.07),$$

また, 中・長距離選手では

$$\hat{Y} = 8.32X + 26.31 \quad (D_{LO_2}: \hat{Y} = 8.32X + 32.36)$$

(図1, 図2)であった. そして, 両グループの回帰直線の間には1%水準で有意差を認めた. その結果, 安静時から最大作業時まで同一量の酸素を摂取するとき, 中・長距離選手は一般成人よりもCOおよび O_2 肺拡散容量(D_{LCO} 及び D_{LO_2})が大きいことが明らかとなった.

本測定ではCO肺拡散容量(D_{LCO})で測定されたが, 実際には酸素が肺胞膜より血液中に拡散す

表2 一般成人の作業強度と肺拡散容量 (D_{LO_2} : ml/min/mmHg)

Subj	Rest	Work Rate (kpm/min)							
		180	360	540	720	900	1080	1260	1440
K. W.	20.1	30.9	38.5	44.8	33.0	47.1	42.5	47.2	
H. T.	13.5	31.7	35.4	30.3	40.9	30.7	41.4		
K. K.	16.7	25.0	35.9	33.9	32.6	37.9	48.4	39.8	
T. F.	33.9	26.1	29.5	35.1	35.0	37.8	51.0	52.9	53.7
K. I.	22.3	29.3	36.0	34.9	47.8	46.2	46.2	48.1	48.0
S. T.	26.7	35.1	28.1	27.0	34.6	33.4	43.4		
K. U.	13.1	30.8	30.6	32.9	40.9	35.5	34.4	35.5	38.0
Y. S.	20.5	39.9	33.8	37.0	38.9	42.7	45.6	43.8	49.4
K. N.	26.1	29.7	31.7	39.6	37.2	49.0	47.9	50.0	57.4
T. Y.	30.2	24.6	32.2	28.0	26.8	36.4			
mean	22.31	30.31	33.17	34.35	36.77	39.67	44.52	45.32	49.30
S. D.	7.74	7.29	6.53	7.59	7.66	6.13	5.51	10.28	13.75

表 3 中・長距離選手の作業強度と肺拡散容量 (D_{LO_2} : ml/min/mmHg)

Subj.	Rest	Work Rate (kpm/min)								
		180	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620
J. N.	22.0	23.8	30.5	34.0	35.1	44.4	46.0	43.0	52.3	
J. T.	50.3	38.0	40.4	35.2	43.8	47.7	41.9	47.3	51.4	59.5
A. M.	27.3	38.2	45.5	43.3	51.5	44.3	51.8	63.6	57.9	66.2
M. A.	25.5	40.3	56.7	45.0	58.4	60.3	51.9	60.1	60.4	62.0
S. S.	45.5	32.1	35.1	40.0	53.5	40.0	39.5	56.4	53.2	52.0
M. L.	23.9	49.8	38.9	52.4	48.7	36.3	35.4	49.8	62.3	66.4
mean	32.41	37.03	41.18	41.65	48.50	45.50	44.41	53.36	56.41	61.22
S. D.	12.80	8.71	8.71	7.63	9.06	9.75	9.27	10.28	5.62	7.15

図 3 一般成人と中・長距離選手の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と肺泡 O_2 分圧 (PAO_2), 平均肺毛細管血 O_2 分圧 ($P\bar{c}O_2$) との関係 図 4 一般成人 (18名), 中・長距離選手 (15名) の計33名の最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) と最大 O_2 肺拡散容量 ($\max D_{LO_2}$) との関係

る。そこで, CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) を 1.23倍することによって O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) の値に換算した。図 2 は酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) との関係である。従って, 図 1 の縦軸の D_{LCO} を 1.23倍したものと同一である。また, 作業強度と O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) との関係を表 2, 表 3 に示した。

酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と肺泡 O_2 分圧 (PAO_2), 平均肺毛細管血 O_2 分圧 ($P\bar{c}O_2$) との関係を示したのが図 3 である。安静時の肺泡 O_2 分圧 (PAO_2)

は一般成人 104.4 mmHg, 中・長距離選手 103.1 mmHg であった。一般成人では酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) が約 2.0 l/min まで, 肺泡の O_2 分圧 (PAO_2) は約 110 mmHg であり, 以後, 過呼吸になるに従って肺泡の O_2 分圧 (PAO_2) は高くなり, 最高 120.2 mmHg まで増加した。一方, 中・長距離選手では約 2.5 l/min まで安静時よりわずかに低下し, 以後, 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の増加とともに上昇し, 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) が 3.5 l/min の時 114.0 mmHg まで高くなった。

表4 一般成人, 中・長距離選手の最大酸素摂取量($\max \dot{V}O_2$: l/min) と最大酸素肺拡散容量($\max D_{LO_2}$: ml/min/mmHg)

	Subj.	$\max \dot{V}O_2$ l/min	$\max D_{LO_2}$ ml/min/mmHg
Non-athletes	T. H.	2.71	41.4
	K. U.	3.26	47.0
	T. F.	3.19	69.5
	S. S.	2.78	61.0
	K. N.	3.19	57.2
	T. S.	2.55	48.0
	Y. M.	1.80	31.5
	T. Y.	1.83	36.4
	K. Y.	2.32	37.6
	T. A.	2.57	35.5
	K. I.	2.68	36.5
	S. S.	2.51	40.5
	H. T.	2.50	41.5
	S. T.	2.58	43.6
	B. N.	2.97	45.8
	K. K.	2.88	49.5
	K. W.	2.89	51.5
	Y. S.	3.16	49.0
	mean	2.69	45.7
	S. D.	0.42	9.73
Middle and long distance runners	A. K.	2.42	45.0
	K. H.	2.70	35.0
	H. Y.	2.73	40.8
	T. Y.	2.67	54.5
	J. N.	3.10	49.0
	I. T.	3.10	52.5
	M. A.	2.96	62.0
	S. S.	3.13	57.0
	J. T.	3.26	59.5
	Y. K.	3.50	53.8
	Y. A.	3.48	62.5
	A. M.	3.50	65.8
	Y. T.	3.40	76.0
	Y. I.	3.70	86.0
	S. S.	3.79	93.6
	mean	3.16	59.5
	S. D.	0.41	15.98

また, 平均肺胞毛細管血 O_2 分圧($P\dot{C}O_2$) は一般成人, 中・長距離選手の区別なく約 2.0~2.5l/min まで直線的に低下し, 約 60mmHg まで低下した。その後, 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の増加にもかかわらず

分散は大きくなるがほぼ 60mmHg を保っていることが認められた。

(2) 最大作業について

一般成人男子 18 名 (19~29 歳), 中・長距離選手 15 名 (18~25 歳) について, 最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) と最大 O_2 肺拡散容量 ($\max D_{LO_2}$) との関係を調べた (表 4)。その結果, 相関係数 $r=0.817$ ($p<0.001$) で有意な相関があることが明らかとなった。

一般成人, 中・長距離選手の最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) の平均値はそれぞれ 2.69, 3.16l/min となり, 最大 O_2 肺拡散容量 ($\max D_{LO_2}$) の平均値はそれぞれ 45.7, 59.5ml/min/mmHg であった。また, 全体を通じて最大 O_2 肺拡散容量 ($\max D_{LO_2}$) の最高値は長距離選手 S. S. の 93.6ml/min/mmHg であり, 最大酸素摂取量 ($\max \dot{V}O_2$) は 3.79l/min であった。

考 察

CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) の測定には single breath method (一回呼吸法) と steady state method (定常法) の二種類が主に使用されている。両者の根本的な差異は前者が一定時間の呼吸停止状態での拡散値であるのに対して, 後者は自然な呼吸状態のものである。Anderson (1968)²⁾ は single breath method と steady state method との差異の原因が (a) 一回呼吸量と呼吸数との割合 (b) 毛細管血中の CO を零とみなした場合と不適当な補正にあると報告している。Single breath method は呼吸停止前に肺容積 (TLC) に所定の CO 混合ガスを満すことによって, 肺胞を拡張し, それによって肺の有効拡散面積を増大する特長をもっている。しかし, single breath method では激しい作業後の一定時間 (約 10 秒) の呼吸停止は困難である。従って, 本測定では最大下及び最大作業においてもきわめて自然な状態で測定できる Filley (1954)⁷⁾ の steady state method を採用した。Linderholm (1957)¹⁸⁾ は肺毛細管血中の CO を零と仮定すると約 10~20% CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) が低く見積られると報告し, 補正式を考案した。しかし, この方法でも動脈血を採取しなければならず, それには非常な困難がともなう。そこで,

本測定では肺毛細管血の CO 分圧を 零とみなした。

今日、臨床的に安静時の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) の正常値を確立しつつあるが、測定方法、測定器具等の差異によって正常値にも幅があることが報告されている。Single breath method による正常人の安静時の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) の平均として、Forster (1954)⁸⁾ は 24.9 ml/min/mmHg, Marks (1957)²¹⁾ は 19.5 ml/min/mmHg を、日本人について金上、桂 (1965)¹⁵⁾ は 30.2 ml/min/mmHg という値を報告している。Steady state method では Filley (1954)⁷⁾ は 16.9 ml/min/mmHg, Bates (1955)⁴⁾ は 17.6 ml/min/mmHg, Marks (1957)²¹⁾ 19.5 ml/min/mmHg という値を報告している。一般に、single breath D_{LCO} よりも steady state D_{LCO} が低い値を示すことが認められている。本測定での一般成人男子の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) の 18.4 ml/min/mmHg (D_{LO_2} : 22.3) は後者の steady state method の値とほぼ一致した。

また、中・長距離選手の安静時の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) は 26.7 ml/min/mmHg (D_{LO_2} : 32.4) を示し、一般成人と $p < 0.05$ で有意な差を示さなかった。これは Magel (1969)²¹⁾ の水泳選手と非選手との間に $p < 0.05$ で有意差を認めた報告と異なった。しかし、Neuman (1962)²³⁾, Bannister (1960)³⁾ らの長距離選手と非選手の安静時の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) に有意差を認めなかった報告と一致した。

作業中の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) との関係について、諸外国では多くの研究者によって報告されている。Holmgren (1964)¹¹⁾, 1965)¹⁰⁾ は定常法で CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) を測定し、心拍数の 120/min (40% of max $\dot{V}O_2$) まで直線的に上昇するが、その後、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の増加にもかかわらず一定であることを報告している。しかし、多くの研究者たち、Linderholm (1959)¹⁹⁾, Bannister (1960)³⁾, Johnson (1962)¹³⁾, Shepard (1958)²⁹⁾, Pirnay (1969)²⁵⁾, Magel (1965)²⁰⁾, Newman (1962)²³⁾, Cotes (1960)⁶⁾ らは酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) が比例関係にあることを報告している。

我が国では、金上 (1962)¹⁴⁾ らがわずか臨床的見地から軽作業にともなう CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) の変動をみてきたにすぎない。本測定において、諸外国の多くの報告と同じように両グループとも、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と O_2 および CO 肺拡散容量 (D_{LO_2} および D_{LCO}) は比例関係にあることが明らかとなった (図 1, 図 2)。一般成人の相関係数は $r = 0.724$ となり、その回帰直線は $\hat{Y} = 8.83X + 17.94$ となった。また、中・長距離選手の相関係数は $r = 0.828$ となり、その回帰直線は $\hat{Y} = 8.32X + 26.31$ であった。これによると、中・長距離選手と一般成人では同一量の酸素を摂取する時、軽作業から最大作業まで前者の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) が高いことを認めた。この結果は Bannister (1960)³⁾, Mostyn (1963)²²⁾, Gee (1965)⁹⁾, Holmgren (1964,¹¹⁾ 1965)¹⁰⁾ らの報告と同じであった。

この原因に関して、Cotes (1968)⁶⁾ らは年令別の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) を測定し、その差異が身体の大きさからくる肺胞拡散面積の差異であると述べている。Bates (1955)⁴⁾, Ogilvie (1957)²⁴⁾ らは CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) が横臥位では坐位に比べて 15~20% 増加することから、肺毛細血管床の増加と肺拡散面積の拡大によるものであらうと述べている。Holmgren (1965)¹⁰⁾ は年少女子の CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) は年少男子よりも少ない。この違いは身体の大きさの差異によるよりも大きいと報告している。Magel (1969)²⁰⁾ は CO 肺拡散容量 (D_{LCO}) に肺容積 (TLC) を考慮した K_{LCO} でも水泳選手が一般成人よりも高いことから、肺拡散面積だけでなく、肺胞膜の性質、肺胞毛細管血量 (V_c) 等に原因していると推察しているが、決定的な原因は究明されていない。

Magel (1969)²⁰⁾ は水泳選手と非選手との最大 CO 肺拡散容量 (max D_{LCO}) がそれぞれ安静値の 51% および 35% 増加したことを報告している。本測定での中・長距離選手と一般成人の最大 CO 肺拡散容量 (max D_{LCO}) の増加はそれぞれ 85% および 102% であった。その結果、増加率では Magel (1969)²¹⁾ の報告よりも高いことを認めたが、一般成人は中・長距離選手よりも大きく、Magel (1969)²⁰⁾ の報告とは異なった結果となった。本

測定における両グループの CO 肺拡散容量(DLCO)の増加率の差は中・長距離選手 J. T., S. S. の安静時の CO 肺拡散容量 (DLCO) が高く, 増加率が 15~20%しか高くならなかったことに原因していると思われる。

Bannister (1960)²¹⁾, Newman (1962)²³⁾ らは安静時の CO 肺拡散容量(DLCO)に 5%水準で有意な差を認めなかったが, 最大 CO 肺拡散容量(max DLCO)では 1%水準で有意差を認めている。本測定においては 5%水準で有意差を認めた。

全身持久性の指標として最大酸素摂取量 (max $\dot{V}O_2$) が用いられているが, それと同様に CO および O_2 肺拡散容量 (DLCO および D_{LO_2}) も全身持久性の一分野である呼吸循環系の活動水準の指標として重要である。

草野¹⁷⁾は男女24名の最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)とその時の CO 肺拡散容量(DLCO)では相関係数 $r=0.82$, $p<0.001$ で有意な相関があることを認めている。しかし, 酸素摂取量($\dot{V}O_2$) と CO 肺拡散容量 (DLCO) が直線関係にならないことから, 最大酸素摂取量 (max $\dot{V}O_2$) の時かならずしも最大 CO 肺拡散容量(max DLCO)ではないと報告している。本測定では酸素摂取量($\dot{V}O_2$) と CO および O_2 肺拡散容量 (DLCO および D_{LO_2}) が直線関係にあることから, 最大酸素摂取量 (max $\dot{V}O_2$) の時 CO および O_2 肺拡散容量 (DLCO および D_{LO_2}) も最大と考えられる。そこで, 中・長距離選手15名, 一般成人18名の計33名について, 最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)と最大 O_2 肺拡散容量(max D_{LO_2})の関係をみた。その結果, 相関係数は $r=0.817$ となり, $p<0.001$ で有意な相関を認めた(図4)。すなわち, 最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)の大きい者は最大 O_2 肺拡散容量 (max D_{LO_2}) も大きいことが明らかとなった。諸外国での測定方法は single breath method が多く, all-out 直後の測定が困難なためにこの種の報告はほとんど見当たらない。

酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) が大きくなるための要因は Bohr の式

$$\dot{V}O_2 = D_{LO_2} (P_{AO_2} - P_{\bar{C}O_2})$$

から推察できる。それは(1) D_{LO_2} を大きくすることと(2) $P_{AO_2} - P_{\bar{C}O_2}$ の勾配を大きくすることであ

る。後者について, 即ち, $P_{AO_2} - P_{\bar{C}O_2}$ の勾配を大きくするためには P_{AO_2} (肺泡 O_2 分圧) を大きくし, $P_{\bar{C}O_2}$ (肺泡毛細管血 O_2 分圧) を小さくすることが必要である。肺泡における酸素分圧 (P_{AO_2}) は換気の増大によって高まり, all-out 近くでは中・長距離選手, 一般成人の区別なくほぼ同じだと考えられる(図3)。従って, $P_{\bar{C}O_2}$ を低くすることが必要となってくる。 $P_{\bar{C}O_2}$ は末梢における酸素消費量と心拍出量 ($\dot{Q}$) の大小によって決定される。図3で認められるように all-out 近くでは約 60mmHg で, 両グループの間にはほとんど差が認められない。しかし, 中・長距離選手は一般成人よりも all-out 近くでは心拍出量 ($\dot{Q}$) が大きいと考えられるので, 実際に活動筋に送られた酸素量は中・長距離選手の方が大きいものと推察される。従って, $P_{AO_2} - P_{\bar{C}O_2}$ の勾配の大小よりむしろ O_2 肺拡散容量 (D_{LO_2}) によるところの大小によって最大酸素摂取量 (max $\dot{V}O_2$) は決定されるものと思われる。

Rosenberg(1967),²⁸⁾ Reddan (1963),²⁶⁾ Reuschlein(1968)²⁷⁾ らはトレーニングによって CO 肺拡散容量 (DLCO) が増加することを報告している。Newman (1962)²³⁾ はトレーニング後の一定作業における酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) は低下するが, CO 肺拡散容量 (DLCO) は変化しなかったことを報告している。本測定における両グループの CO 肺拡散容量 (DLCO), および最大 CO および O_2 肺拡散容量 (max DLCO および max D_{LO_2}) の差異がトレーニングによるものかどうかについては明らかでない。

CO および O_2 肺拡散容量 (DLCO および D_{LO_2}) は肺レベルと血液レベルの総合された能力である。即ち, 前者では(1)肺泡換気量($\dot{V}_A$) (2)肺泡 O_2 分圧(P_{AO_2}) (3)肺泡拡散面積, (4)肺泡膜の透過性, 後者では (1) 肺泡毛細管血流量 (V_c) (2) Hb 量等が考えられる。今後, これらの因子が CO および O_2 肺拡散容量 (DLCO および D_{LO_2}) にどのような影響を与えているかを明らかにすることによって, 中・長距離選手と一般成人の差異, トレーニングによる変化がさらに究明されなければならないだろう。

要 約

一般成人(10名), 中・長距離選手(6名)について, Filley の steady state method で CO 及び O₂肺拡散容量(DLCO 及び DLO₂), 肺泡 O₂ 分圧(PA_{O2}), 肺泡毛細血管 O₂ 分圧(PcO₂)等を, Douglas bag method で酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を測定した. さらに, 一般成人(18名), 中・長距離選手(15名)の計33名について, 同じ測定法で最大 O₂ 肺拡散容量(max DLO₂)と最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)を測定した.

- (1) 安静時の O₂ 肺拡散容量(DLO₂)は一般成人が 22.3ml/min/mmHg, 中・長距離選手が 32.4 ml/min/mmHg となり, 両グループの間に 5 %水準で有意差を認めなかった.
- (2) 一般成人と中・長距離選手の O₂ 肺拡散容量(DLO₂)は酸素摂取量($\dot{V}O_2$)の増加とともに比例して増加することを認めた. その回帰直線は一般成人で

$$\hat{Y}=8.83X+22.07$$

中・長距離選手は

$$\hat{Y}=8.32X+32.36$$

であった. その結果, 安静時から最大作業時まで同一量の酸素を摂取するとき, 中・長距離選手は一般成人よりも O₂ 肺拡散容量(DLO₂)が大きいことが明らかとなった.

- (3) 最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)と最大 O₂ 肺拡散容量(max DLO₂)との間には相関係数が $r=0.817$ となり, 最大酸素摂取量(max $\dot{V}O_2$)が大きい者は最大 O₂ 肺拡散容量(max DLO₂)も大きいことが明らかとなった.
- (4) これらの結果, 運動によって O₂ 肺拡散容量(DLO₂)が有酸素的作業能力の寄与因子の一つとして増加するものと思われる.

本研究は文部省科学研究費特定研究「生物圏の動態」の一部として行われたものである.

引用文献

- 1) Andersen, K. L.: Physiological working capacity. Health and Fitness in the World. p. 365-367. The Athletic institute. 1961.
- 2) Anderson, T. W., and R. J. Shephard: The effects of hyperventilation and exercise upon the pulmonary diffusing capacity. Respiration, 25 : 465-484, 1968.
- 3) Bannister, R. G., J. E. Cotes, R. S. Jones and F. Meade: Pulmonary diffusing capacity on exercise in athletes and non-athletic subjects. J. Physiol., 152 : 66-67, 1960.
- 4) Bates, D. V., N. G. Boucot and A. E. Dormer: The pulmonary diffusing capacity in normal subjects J. Physiol., 129 : 237-252, 1955.
- 5) Bohr, C.: Über die spezifische Tätigkeit der Lungen bei der respiratorischen Gasaufnahme und ihr Verhalten zu der durch die Alveolarwand stattfinden der Gasdiffusion. Scand. Arch. Physiol., 22 : 221-280, 1909.
- 6) Cotes, J. E., D. P. Snidal and R. H. Shephard: Effect of negative intr-alveolar pressure on pulmonary diffusing capacity. J. Appl. Physiol., 15: 372-376, 1960.
- 7) 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.
- 8) Forster, R. E., F. J. W. Roughton, L. Candar, E. A. Briscoe and F. Kreuzer: Apparent pulmonary diffusing capacity for CO at varying alveolar O₂ tensions. J. Appl. Physiol., 11 : 227-289, 1954.
- 9) Gee, J. B. L., L. G. Bentireoglio and E. Mostyn: Diffusion as a limiting factor in oxygen transport across the lung. p. 1-15. Proc. Int. Symp. Cardiovasc. Respir. Effects Hypoxia, ed. by Hatcher, Basel, Switzerland. 1965.
- 10) 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.
- 11) Holmgren, A.: On the reproducibility of steady state DLCO measurements during exercise. Scand. J. Clin. Lab. Invest., 16 : 56-66, 1964.
- 12) Holmgren, A.: Cardiorespiratory determinants of cardiovascular fitness. Canad. Med. Ass. J., 96:697-702, 1967.
- 13) Johnson, Jr. R. L., H. F. Taylor and W. H.

- Lawson, Jr.** : Maximal diffusing capacity of the lung for carbon monoxide. *J. Clin. Invest.*, **44** : 349-355, 1965.
- 14) 金上晴夫, 馬場健児, 桂敏樹, 白石晃一郎, 尾形和夫, 田中元直, 柳原寿男: 運動負荷中の一酸化炭素肺拡散能力測定の臨床的意義について, 肺と心, 9 : 140-153, 1962.
- 15) 金上晴夫, 桂敏樹, 白石晃一郎, 馬場健治, 青沼賢治: Single breath method による健康者の一酸化炭素肺拡散能力の測定について, 呼吸と循環 8:387-391, 1965.
- 16) **Krogh, M.** : Diffusion of gases through the lungs of man. *J. Physiol.*, **49** : 271-300, 1915.
- 17) 草野勝彦: 肺拡散容量からみた全身持久性の研究. 東京大学教育学研究科体育学専攻課程修士論文 (1969)
- 18) **Linderholm, H.** : On the significance of CO tension in pulmonary capillary blood for determination of pulmonary diffusing capacity with the steady state CO method. *Acta Med. Scand.*, **156** : 413-427, 1957.
- 19) **Linderholm, H.** : Diffusing capacity of the lungs as a limiting factor for physical working capacity. *Acta Med. Scand.*, **163** : 61-84, 1959.
- 20) **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*, **11**:131-139, 1969.
- 21) **Marks, A., D. W. Cugell, J.B. Cadigan, and E. A. Gaensler** : Clinical determination of the diffusion capacity of the lungs; comparison of methods in normal subjects and patients with alveolar-capillary blood syndrome. *Am. J. Med.*, **22** : 51-73, 1957.
- 22) **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.
- 23) **Newman, F., B. F. Smalley and M. L. Thomson** : Effect of exercise, body and lung size on CO diffusion in athletes and non-athletes. *J. Appl. Physiol.*, **17** : 649-655, 1962.
- 24) **Ogilvie, C. M., R. E. Forster, W. S. Blake-more and J. W. Morton** : A standardized breath holding technique for the clinical measurement of the diffusing capacity of the lung for carbon monoxide. *J. Clin. Invest.*, **36** : 1-17, 1957.
- 25) **Pirnay, F., A. Fassotte, J. Gazon, R. Deroanne et J. M. Petit** : Diffusion pulmonaire au cours de l'exercice musculaire. *Int. Z. angew. Physiol.*, **28** : 31-37, 1969.
- 26) **Reddan, W., F. Bongiorno, J. Burpee, P. Reuschlein, J. B. L. Gee and J. Rankin** : Pulmonary function in endurance athletes. *Fed. Proc.*, **22** : 396, 1963.
- 27) **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.
- 28) **Rosenberg, E.** : Effect of physical training on the pulmonary diffusing capacity measured at rest. *Int. Z. angew. Physiol.*, **24**:246-253, 1967.
- 29) **Shepard, R. H., E. Varnauskas, H. B. Martin, H. A. White, S. Permutt, J. E. Cotes and R. L. Riley**: Relationship between cardiac output and apparent diffusing capacity in the lungs of normal men during treadmill exercise. *J. Appl. Physiol.* **12**:205-210, 1958.