

水泳選手の炭酸ガス一換気量応答曲線について

大桑哲男 藤墳規明 宇津野年一 宮村実晴* 松井秀治*

保健体育教室

(1978年9月9日受理)

Ventilatory response to carbon dioxide in sprint swimmers

Tetsuo OKUWA, Noriaki FUJITSUKA, Toshikazu UTSUNO,
Miharu MIYAMURA* and Hideji MATSUI*

Department of health and physical education

(Received September 9, 1978)

This experiment was designed to obtain further information concerning the difference between swimmers and untrained subjects with respect to ventilatory response to carbon dioxide.

Subjects were 17 male swimmers (sprint), aged 18.9 ± 1.2 (SD) years, and 10 untrained male students, aged 19.9 ± 1.2 (SD) years, respectively.

The ventilatory response curve was determined by the rebreathing method described by Read. This determination was conducted twice for each subject on separate days. It was found that the mean slope ($\Delta \dot{V}_E / \Delta P_{ACO_2}$) of the first and second measurements were 1.85 ± 1.07 and 1.81 ± 1.14 l/min·mmHg. The correlation coefficient between both values was 0.898 ($P < 0.001$). Accordingly, the mean value of duplicate measurements was taken as the slope of ventilatory response to CO_2 of each subject. In this study, the average slopes of the ventilatory response curve to CO_2 were 2.03 ± 1.40 (SD) l/min·mmHg for the untrained subjects and 1.71 ± 0.75 (SD) l/min·mmHg for the sprint swimmers, respectively, with difference being statistically not significant.

はじめに

身体活動を行うことによって、呼吸器系の機能は、変化することがこれまでに数多く報告されている。Lallyら⁸⁾ (1974) は、diver と一般人についてトレッドミル (treadmill) 歩行における呼吸量を測定し、diver における呼吸量は、一般人のそれと比べ約20%低く、diver の呼吸パターンは、一回換気量が大きく、呼吸数が少なかったと述べている。また、Song¹⁴⁾ら (1963) は、海女の肺活量や最大換気量は、一般人のそれらよりも大きかったと報告している。

一方、水泳はストロークによって呼吸が抑制される¹⁾ため、止息を伴う身体活動であることが推測されるが、Goffら⁶⁾ (1957) は、水泳選手の水泳中の終末呼気炭酸ガス濃度 (end-tidal CO_2) を測定し、一般人と比べ水泳選手の end-tidal CO_2 は、有意に高いことを観察している。

さらに、Schaefer¹³⁾ (1965) や Song¹⁴⁾ (1963) によって、diver は non-diver に比べ CO_2 に対する感受性は低いことが報告されている。これらの報告は、息こらえをくり返すことによって、肺機能が向上したり、 CO_2 に対する感受性が低下することを示唆するものである。しかし、Rebuck と Read¹¹⁾ (1971) によって報告された2名の水泳選手 (Sprint) の CO_2 の感受性は、一般人のそれと比べかなり高いものである。

そこで、本研究では、水泳選手と一般人の炭酸ガス一換気量応答曲線 (\dot{V}_E - P_{ACO_2} response curve) を測定し、スプリント水泳選手の CO_2 に対する感受性について検討しようとした。

方 法

被検者は、健康な一般男子 (対照群) 10名と水泳選手

* 名古屋大学

(sprint) 17名である。各被検者の年齢、身長、体重と水泳選手の種目、ベスト記録および競技歴を表1に示した。

なお、水泳選手の競技歴は、平均 5.6 ± 2.7 年(2年~11年)であり、100mの記録が各々自由型 $59''3 \sim 82''0$ 、平泳ぎ $75''1 \sim 90''0$ 、背泳 $66''3 \sim 71''0$ 、バタフライ $62''2 \sim 65''0$ の範囲にある水準の水泳選手である。また、水泳選手12名の体重当りの最大酸素摂取量は、平均 48.5 ± 2.1 ml/min·kg であり、この値は、同年代の一般人とほぼ同じ値である。

各被検者の炭酸ガス-換気量応答曲線は、Read¹⁰⁾ (1967)の方法にならない、再呼吸法によって日をかえて2回測定した。すなわち、被検者を30分間座位姿勢にて安静にさせた後、自転車エルゴメーターのサドルの上に腰を掛けさせ、被検者にノーズグリップを装着するとともに、マウスピースにて普通の呼吸を行わせた。検者の合図により被検者に大きく呼吸を行わせ、呼吸が終了する時点で三方活栓を回し、あらかじめ再呼吸用バッグに入れておいた6lの混合ガス(CO₂約7%、O₂約93%)を4分間、再呼吸させた。再呼吸中のCO₂濃度は、ガスサンプルを被検者の口から約10cm離れた場所(三方活栓の側面)から吸引ポンプで吸引し、赤外線CO₂分析装置(capnograph, Godart社製)で分析し、記録器(渡辺測器社製)に連続記録した(図1)。なお、このCO₂分析装置の較正は、Scholander微量ガス分析器で分析した既知濃度のCO₂とO₂の較正ガスを用いて行った。

一方、再呼吸中の換気量は、bag-in-boxの原理にもとづいて、レスピロメーターを用いて記録した。かくして得られた4分間の再呼吸中のCO₂濃度と換気量の記録から、30秒毎の肺胞CO₂分圧(alveolar CO₂ pressure; $P_{ACO_2} = CO_2$ 濃度(%) × (測定時の大気圧 - 47.0mmHg))と毎分換気量(minute ventilation; \dot{V}_E BTPS = 約30秒間の記録から1分間値に換算した)を求め、最小自乗法によりCO₂の感受性の指標となるCO₂換気量応答曲線の

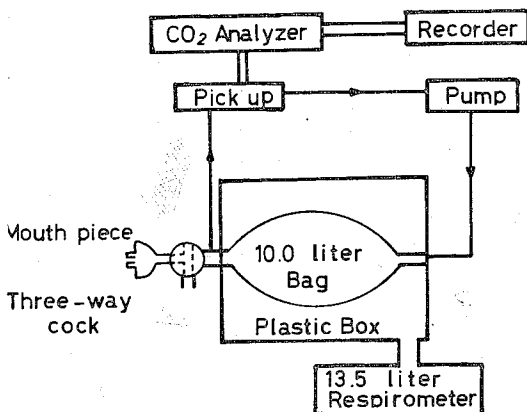


Fig. 1 Diagram of experimental set-up.

Table 1 physical characteristics of subjects. (swimmers)

No.	Subj.	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Record (100m) (sec.)	Events	Training period (years)
1.	T.S.	22	180.0	63.0	65''0	Bu	2
2.	K.T.	21	180.0	77.0	63''0	Fr	8
3.	M.I.	20	179.0	68.0	77''6	Br	6
4.	Y.S.	20	178.5	76.0	66''0	Fr	4
5.	M.I.	20	177.0	70.0	82''0	Fr	5
6.	T.N.	16	174.5	63.5	59''9	Fr	4
7.	K.T.	15	172.5	58.5	66''3	Ba	3
8.	Y.I.	16	172.5	63.0	62''2	Bu	4
9.	M.S.	20	172.0	58.5	73''0	Fr	4
10.	I.S.	21	171.0	56.5	90''0	Br	2
11.	Y.S.	18	171.0	63.0	71''0	Ba	10
12.	Y.H.	20	170.0	73.0	70''0	Ba	11
13.	T.Y.	18	169.0	60.0	64''0	Fr	5
14.	A.T.	18	168.7	64.0	62''3	Bu	5
15.	S.M.	18	168.0	57.0	65''3	Me	10
16.	M.T.	18	168.0	56.0	71''5	Br	6
17.	S.K.	20	168.0	96.0	62''3	Fr	6
	Mean	18.9	172.9	64.4			5.6
	±S.D.	1.9	4.4	6.6			2.7

※ Fr: Freestyle Br: Breast Bu: Butterfly
Ba: Backstroke Me: Medley

(controls)

No.	Subj.	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
1.	K.M.	19	177.0	58.0
2.	T.M.	21	176.0	63.0
3.	T.S.	22	175.5	62.0
4.	M.O.	19	173.0	69.0
5.	A.Y.	19	171.0	59.0
6.	I.I.	19	170.6	57.5
7.	T.K.	21	169.5	57.0
8.	T.B.	20	165.5	60.0
9.	M.F.	20	165.0	57.5
10.	T.H.	19	160.0	52.5
	Mean	19.9	170.3	59.6
	±S.D.	1.2	5.5	4.4

傾斜 ($\Delta \dot{V}_E / \Delta P_{ACO_2}$) を算出した。

最大酸素摂取量 (maximum oxygen uptake; $\dot{V}_{O_{2max}}$) は、自転車エルゴメーター (monark社製) による負荷漸増法にて運動時間11分間~14分間で求めた。

すなわち、運動中の呼気ガスを Douglas bag に採集し、湿式ガスメーターを用いて、毎分換気量を測定した。呼気ガス中のCO₂およびO₂濃度は、各々赤外線CO₂分析装置、瞬時O₂分析装置 (Morgan社製) を用いて分析

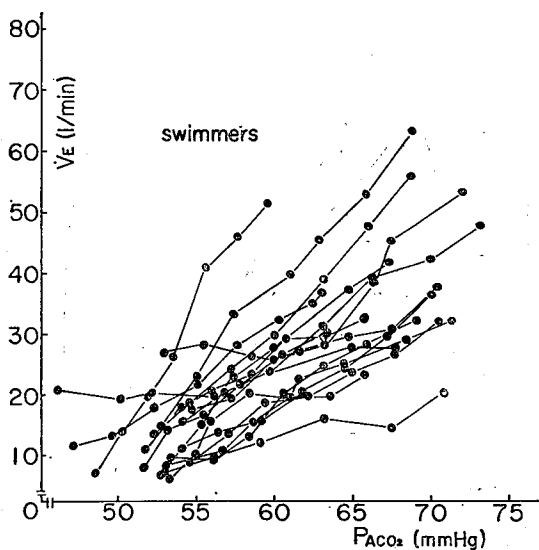
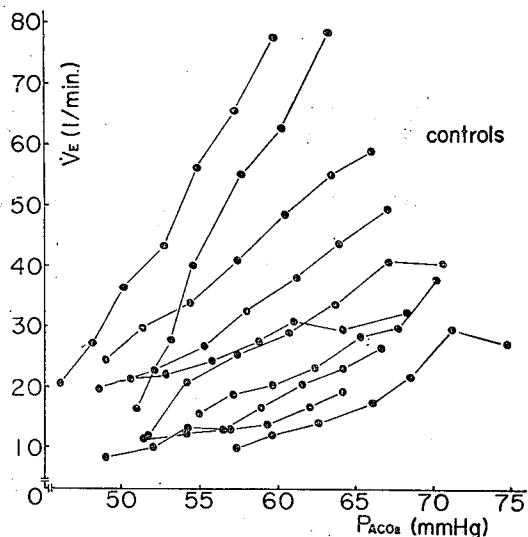


Fig. 2 Ventilatory response curves of the sprint swimmers (lower) and untrained subjects (upper).

した。上記の装置の較正は、先に述べた方法で行った。

結果と考察

炭酸ガス-換気量応答曲線を求める方法は、定常法 (steady-state method) と再呼吸法 (rebreathing method) に大別される。一般に steady-state 法がより信頼できる方法といわれているが、再呼吸法は、①非常に短時間に測定できる。②被検者に苦痛を与えない。③Read¹⁰⁾ (1967) と Clark¹¹⁾ (1968) によって、安静時では、両測定法で行われた結果は同じであることが確かめられていることから、本研究では、再呼吸法を用いて炭酸ガス-換気量応答曲線を測定した。

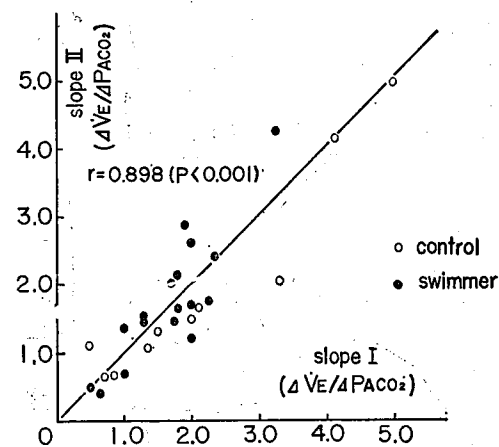
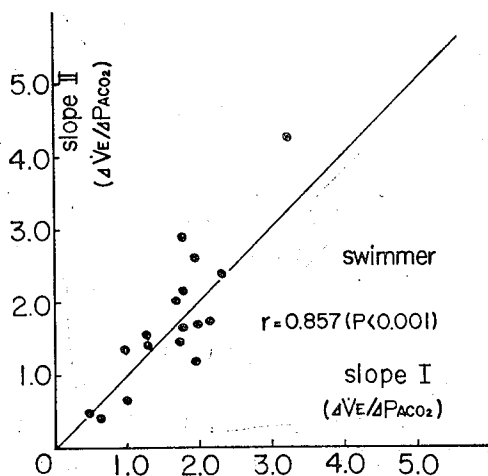
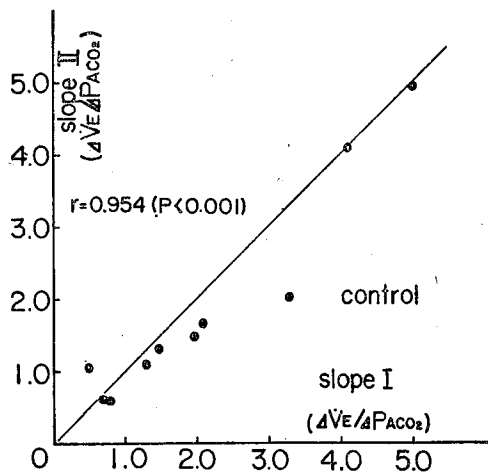


Fig. 3 Comparison of the first and second determination of the slope ($\Delta\dot{V}_E/\Delta P_{ACO_2}$) of the ventilatory response to CO_2 .

図2は、各被検者の炭酸ガス-換気量応答曲線を示したものである。CO₂に対する感受性は、この応答曲線の直線部分についてCO₂分圧(横軸)に対する換気量(縦軸)の比、すなわち、直線の傾き(slope= $\Delta\dot{V}_E/\Delta P_{ACO_2}$)で表わすことができる。

Christian と Lambertsen⁹⁾(1960)によれば、ヒトの炭酸ガス-換気量応答曲線は4つのタイプに分類することができるが、図2で示したように、各被検者の応答曲線の位置や形はかなり個人差が認められる。しかし、一般人と水泳選手を比較すると、水泳選手の方が、パラツキは小さいことがわかる(図2)。一般に肺胞CO₂分圧が増大すると共に、換気量も増加しているが、両者の関係はすべて直線関係とみなし、各被検者のCO₂に対する感受性を求めた。

図3は、各被検者の1回目と2回目の炭酸ガス-換気量応答曲線の傾斜($\Delta\dot{V}_E/\Delta P_{ACO_2}$)を比較したものである。1回目で得られた傾斜と2回目のそれとは密接な関係が認められた。すなわち、対照群での相関係数(r)は0.954 ($P < 0.001$)、水泳選手群では $r = 0.857$ ($P < 0.001$)、全体としては $r = 0.898$ ($P < 0.001$)であった(図3)。また、全被検者の1回目と2回目の傾斜の平均値は、 1.85 ± 1.07 (SD) と 1.81 ± 1.14 (SD) となり、両者の間に有意な差が認められなかった。したがって、本研究では1回目と2回目の傾斜の平均値を各被検者の傾斜とした。

表2は、本研究で得られた水泳選手の炭酸ガス-換気量応答曲線の平均傾斜を種目別に示したものである。表2で示したように、CO₂に対する感受性は、背泳が最も高く、次にバタフライ、平泳ぎ、自由型の順であった。先に述べたように、水泳は、陸上における一般的な運動とは異なり、ストロークによって呼吸が抑制されるため、止息を伴う身体活動であるといえるであろう。したがって、水泳選手は、diverや海女と同様に常に過剰なCO₂に抗しているものと考えられる。

黒川と浅見⁷⁾(1975)は、25mを最大スピードで泳いだ時の呼吸について報告しているが、その呼吸数を1分間

値に換算すると、自由型では35.9回/分、平泳ぎでは23.9回/分、背泳が39回/分であった。

以上の結果から、背泳選手の炭酸ガス-換気量応答曲線の傾斜の一番高かった原因として、水泳中の息こらえ時間が関係しているように思われる。しかしながら、これに関しては、種目によりスピードが異なり、被検者の例数も少ないことから、今後の研究を待たねばならないであろう。

表3は、本実験および、これまで報告された一般人とスポーツ選手の安静時の炭酸ガス-換気量応答曲線の結果をまとめたものである^{2,6,9,11)}。Miyamuraら⁹⁾(1976)は、

Table 2 Mean slopes of classified swimming events.

Swimming events	Mean slope
freestyle	1.35 ± 0.54 ($n=7$)
breast	1.73 ± 0.23 ($n=3$)
butterfly	1.85 ± 0.43 ($n=3$)
backstroke	2.21 ± 1.61 ($n=3$)

炭酸ガス-換気量応答曲線の傾斜において、マラソン選手と一般人、また、Byrne-Quinnら²⁾(1971)は、クロスカントリースキー選手と一般人との間に有意な差を認めている。Schaefer¹²⁾(1958)によれば、CO₂に対する感受性の高い者と低い者の差は、CO₂に対するadrenal sympathetic responseの差によるものであるとしている。Miyamuraら⁹⁾(1976)は、マラソン選手の傾斜の低い理由として、呼吸中枢からのoutput、あるいは、呼吸中枢へのinput signalの減少をあげている。また、Byrne-Quinn²⁾(1971)は、長期間トレーニングによる末梢化学受容器の機能低下によって傾斜が低くなったものであらうと述べている。

しかしながら、本実験における対照群と水泳選手の炭酸ガス-換気量応答曲線の傾斜は、2.03 と 1.71 l/min · mmHgであり、水泳選手の傾斜は、対照群のそれよりも

Table 3 Mean slopes ($\Delta\dot{V}_E/\Delta P_{ACO_2}$) of ventilatory response curve to CO₂.

	Control	Sportsman
Byrne-Quinn et al. (1971)	2.02 ($n=10$)	0.94* (cross-country skier, athlete, swimmer, $n=13$)
Godfrey et al. (1971)	2.05 ($n=7$)	2.36 (athlete, $n=7$)
Rebuck & Read (1971)		6.52 (sprint swimmer, $n=2$)
Miyamura & Honda (1976)	1.86 ($n=14$)	1.12* (marathon runner, $n=10$)
present study (1978)	2.03 ($n=10$)	1.71 (sprint swimmer, $n=17$)

* significant differences at 1.0-0.1% levels.

低かったが、両者の間に統計的に有意な差は認められなかった。また、Godfreyら⁵⁾(1971)も athletes と一般人について報告しているが、統計的に有意な差がないとしている。

これらの違いについては、トレーニングの頻度や期間の差によるものと思われるが、本実験では、水泳の長距離選手の測定を行わなかったため、この原因については明らかではない。なお Rebeck と Read¹¹⁾(1971)が水泳選手 (sprint) 2名の炭酸ガス-換気量応答曲線の平均傾斜は $6.52(4.86, 8.17) \text{ l/min}\cdot\text{mmHg}$ であったと報告していること、と本実験のスプリント水泳選手の傾斜の平均値は $1.71 \text{ l/min}\cdot\text{mmHg}$ であることを考え合わせると、CO₂に対する遺伝的な要因も合わせて考慮しなければならないと思われる。

まとめ

Schaefer や Song らは、diver は non-diver に比べて CO₂ に対する感受性は低いと報告しているが、Rebeck と Read は、diver と同様、息こらえを反復している水泳選手について異なった報告、すなわち、炭酸ガス-換気量応答曲線の傾斜は非常に高いことを報告している。そこで、本研究では、一般人と水泳選手について、炭酸ガス-換気量応答曲線から両者を比較検討しようとした。

被検者は、対照群10名(平均年齢 19.9 ± 1.2 歳)、水泳選手17名(18.9 ± 1.9 歳)であった。炭酸ガス-換気量応答曲線は Read の方法によって求めた。すなわち、再呼吸用 bag に 6l の混合ガス(CO₂ 約7%, O₂ 約93%)を入れ、被検者に4分間再呼吸させた。各被検者について、日をかえて2回測定した結果、それらの平均傾斜は、 1.85 ± 1.07 (1回目)、 1.81 ± 1.14 (2回目)であり、両者の相関係数(r)は 0.898 ($P < 0.001$)であった。そこで、各被検者の炭酸ガス-換気量応答曲線の傾斜は、2回の測定値の平均値とした。

対照群の傾斜は $2.03 \pm 1.40 \text{ l/min}\cdot\text{mmHg}$ 、水泳選手のそれは、 $1.71 \pm 0.75 \text{ l/min}\cdot\text{mmHg}$ であり、水泳選手の方が、低い値を示した。しかし、この差は統計的に有意なものではなかった。

References

- 1 Åstrand, P.O., K.Rodahl: Textbook of work physiology. McGraw-Hill Book Co., 1970.
- 2 Byrne-Quinn, E., Weil, J.W., Sodal, I.E., Filley,

- G.F., and Grover, R.F.: Ventilatory control in the athletes. *J. Appl. Physiol.*, 30(1):91-98, 1971.
- 3 Christian, J., and Lambertsen, M.D.: Carbon dioxide and respiration in acid-base homeostasis. *Anesthesiol.*, 21:642-651, 1960.
- 4 Clark, T.J.H.: The ventilatory response to CO₂ in chronic airways obstruction measured by a rebrathing method. *Clin. Sci.*, 34:559-568, 1968.
- 5 Godfrey, S., Edwards, R.H.T., Copland, G.M. and Gross, D.L.: Chemosensitivity in normal subjects, athletes and patients with chronic airways obstruction. *J. Appl. Physiol.*, 30(2):193-199, 1971.
- 6 Goff, L.G. and Bertlett, JR.: Elevated end-tidal CO₂ in trained underwater swimmers. *J. Appl. Physiol.*, 10(2):203-206, 1957.
- 7 黒川隆志, 浅見高明: 水泳における呼吸調整について. 第26回日本体育学会大会号, pp. 500, 1975.
- 8 Lally, D.A., Zechman, F.W. and Tracy, R.A.: Ventilatory responses to exercise in divers and non-divers. *Resp. Physiol.*, 20: 117-129, 1974.
- 9 Miyamura, M., Yamashina, T. and Honda, Y.: Ventilatory response to CO₂ rebreathing at rest and during exercise in untrained subjects and athletes. *Jap. J. Physiol.*, 26, 245-254, 1976.
- 10 Read, D.J.C.: A clinical method for assessing the ventilatory response to carbon dioxide. *Aust. Ann. Med.*, 16:20-32, 1967.
- 11 Rebeck, A.S. and Read, J.: Patterns of ventilatory response to carbon dioxide during recovery from severe asthma. *Clin. Sci.*, 41:13-21, 1971.
- 12 Schaefer, K.E.: Respiratory pattern and respiratory response to CO₂. *J. Appl. Physiol.*, 13(1): 1-14, 1958.
- 13 Schaefer, K.E.: Adaptation to breath-hold diving. In: Physiology of breathhold diving and ama of Japan, edited by H. Rahn and T. Yokoyama. Washington, D.C. National Research Council Publication, NO. 1341:237-252, 1965.
- 14 Song, S.H., Kang, B.S. and Hong, S.K.: Lung volumes and ventilatory responses to high CO₂ and low O₂ in the ama. *J. Appl. Physiol.*, 18(3): 466-470, 1963.