

炭酸ガス—換気応答の季節変動

Seasonal Variations of Ventilatory Response to Carbon dioxide at Rest

蛭田 秀一* 石田 浩司* 宮村 實晴*

Suichi HIRUTA*, Koji ISHIDA*, Miharuru MIYAMURA*

In order to examine the seasonal variation of CO₂ sensitivity, the slope (S) of the ventilatory response to CO₂ was determined in 10 healthy males throughout a year. It was found that the average value of logarithm S was significantly ($p < 0.05$) higher in the September than in the annual average, though average magnitude of S was not significantly different. In addition, the average value of ventilation ($\dot{V}_{E(60)}$) corresponding of P_ACO₂ 60mmHg was significantly ($p < 0.05$) lower in January than in September. These results indicate that the timing of the start and/or finish of training is an important factor in the effect of physical training on the S and $\dot{V}_{E(60)}$.

[目 的]

炭酸ガス (CO₂) は、呼吸の化学調節に関する因子のうち、最も強力な換気刺激因子の一つであり、吸気中のわずかな CO₂ 分圧の上昇に対して、換気は強力に充進される。この CO₂ に対する感受性の指標である CO₂—換気応答曲線の傾き (S) は、身体トレーニングを積んだ運動選手において低いことが従来から報告されてきた。この理由としては、身体トレーニングの影響によって、中枢からのドライブが低下したことが考えられるが、身体トレーニングによって、CO₂ 感受性が変化するかに関してはいまだに明らかにされていない。実際、身体トレーニング後の CO₂ 感受性は、トレーニング前に比較して、低下する¹⁾、変化しない²⁾、増加する⁴⁾と、異なる報告がなされている。CO₂ 感受性に対する身体トレーニングの効果に関するこれらの報告の不一致は、運動強度、運動の種類、トレーニング期間などの要因の違いによるのかもしれない。このうち、トレーニング期間に関しては、比較的長期にわたる場合は、季節変

化による影響も考慮しなくてはならないが、年間を通して、CO₂—換気応答に関する季節変動を調べた報告は見当たらない。

そこで、本研究は、季節の違いによって、CO₂—換気応答に変化がみられるかどうかを明らかにすることを目的とした。

[方 法]

被検者は、18~22才の健康な男子大学生10名であった。すべての被検者は、実験にはいる前に、実験内容についての詳細な説明を受け、実験参加へ同意した。被検者の年齢、身長、体重を表1に示した。本実験にはいる前に、被検者から呼吸に対する緊張性および行動性の要因を極力取り除くために、被検者を実験室に來させ、実験器具および手順に慣れさせた。各被検者の安静時の CO₂—換気量応答を、7月を最初として2ヵ月おきに計6回測定した。測定は午後とし、各被検者には昼食後少なくとも1時間あけてから実験室に來るように指示した。CO₂—換気量応答は、Readの

*名古屋大学総合保健体育科学センター

* Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University

再呼吸法⁶⁾を用いて測定した。測定装置及び手順は、前の報告⁵⁾と同様であった。すなわち、まず、被検者に約20分間の椅座位安静を行なわせた。その後、被検者にノーズクリップを装着し、マウスピースをくわえた状態で安静を保ち自然呼吸を5~6回行なわせた。次に検者の合図で最大呼息を行なわせ、その呼息終了と同時に三方活栓をまわし、あらかじめゴム製の再呼吸バッグ(容量10リットル用)に入れておいた6リットルの混合ガスを4分間再呼吸させた。再呼吸に用いた混合ガスの組成はCO₂約7%, O₂約93%であった。再呼吸中の一回換気量は、Bag-in-Boxの原理によって測定した。すなわち、再呼吸用のバッグは密閉したプラスチックの箱に入れてあることから、一回換気量は再呼吸によって生じるバッグの容積の変化を、プラスチックの箱の一部に取り付けたパイプとレスピロメータ(Benedict型, Fukuda, 東京, 13.5リットル)を接続することにより連続的に測定した。一方、三方活栓の近くから連続的にサンプルガスを吸引し、赤外線CO₂分析器(Capnograph, Godart, Holland)を用いてCO₂濃度を連続的に記録した。ただし、バッグ内のガスの容量が変化しないように、CO₂分析器のピックアップを通過したガスは再びバッグ内に戻すようにした。CO₂ガス分析器の較正はショランダー

微量ガス分析器により分析した3種の異なった濃度の較正ガスを用いて行った。

レスピロメータの記録から、30秒毎の毎分呼吸数(F), 毎分換気量(\dot{V}_E), 平均一回換気量(V_T)を求めた。 \dot{V}_E と V_T はBTPSに換算した。CO₂ガス濃度についても30秒毎に読取り、30秒毎の肺胞分圧(P_{ACO_2})を求めた。このようにして得られた再呼吸開始後30秒から3分30秒までの30秒毎の \dot{V}_E と P_{ACO_2} の7組の値から、Read(1967)と同様に最小自乗法により \dot{V}_E と P_{ACO_2} についての一次関係式(式(1))を求めた。

$$\dot{V}_E = S(P_{ACO_2} - B) \quad \dots\dots\dots(1)$$

式(1)において、SはCO₂-換気量応答曲線の傾斜を、BはX軸との切片をそれぞれ表している(図1左)。

また、式(1)で、 $P_{ACO_2} = 60\text{mmHg}$ のときの換気量 $\dot{V}_{E(60)}$ を算出した。すなわち、S, B, $\dot{V}_{E(60)}$ の関係は次の式で示される。

$$\dot{V}_{E(60)} = S(60 - B) \quad \dots\dots\dots(2)$$

また、Hey³⁾らの式

$$\dot{V}_E = M(V_T - K) \quad \dots\dots\dots(3)$$

のMとKを算出した。式(3)において、Mは $V_T - \dot{V}_E$ 関係直線の傾斜を、KはX軸との切片をそれぞれ表している(図1右)。

さらに、式(3)から $\dot{V}_E = \dot{V}_{E(60)}$ の時の一回換

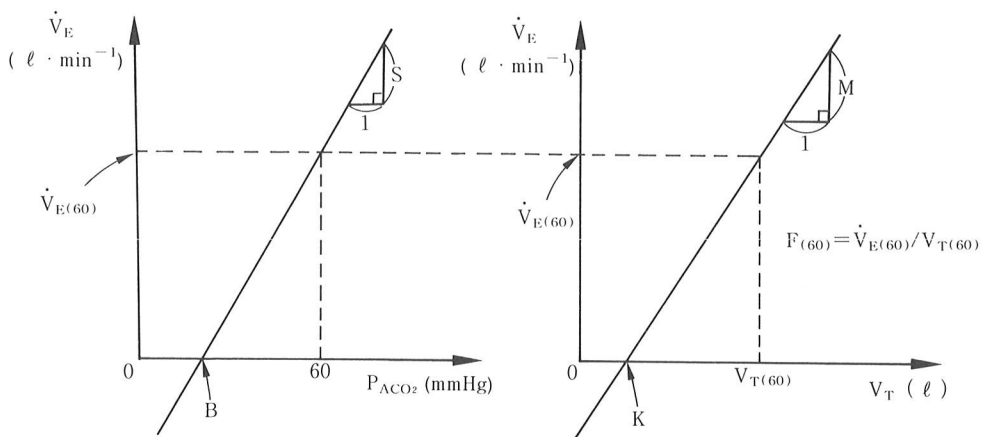


Fig. 1 Illustration of each variable

Table 1. Physical characteristics of the subjects

被 検 者	年令(才)	身長(cm)	体重(kg)
#1	18	163.0	50.0
#2	18	167.0	56.0
#3	19	168.0	53.0
#4	19	170.0	57.0
#5	19	171.0	66.0
#6	19	168.0	60.0
#7	18	160.0	48.0
#8	18	167.1	59.0
#9	18	170.5	63.0
#10	19	171.0	68.0
平均	18.5	167.6	58.0
SD	0.5	3.6	6.6

Table 2. S ($\ell \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mmHg}^{-1}$)

被検者	7 月	9 月	11 月	1 月	3 月	5 月	年平均
#1	0.98	0.96	0.77	0.57	0.73	0.72	0.79
#2	0.97	0.91	1.03	1.05	0.97	1.09	1.00
#3	1.79	1.56	1.00	0.73	0.66	1.25	1.16
#4	1.23	1.43	1.35	1.52	0.90	1.46	1.32
#5	1.27	1.33	1.44	1.17	1.48	1.23	1.32
#6	1.46	1.47	1.05	1.54	1.74	1.15	1.40
#7	2.01	2.12	1.70	1.59	1.65	1.51	1.76
#8	1.78	1.91	2.21	2.09	2.46	1.60	2.01
#9	1.69	2.17	1.83	2.74	1.93	2.50	2.14
#10	1.80	3.12	3.02	1.85	2.03	3.17	2.50
平均	1.50	1.70	1.54	1.49	1.45	1.57	1.54
(SD)	(0.37)	(0.66)	(0.68)	(0.65)	(0.62)	(0.73)	(0.54)

Table 3. B (mmHg)

被検者	7 月	9 月	11 月	1 月	3 月	5 月	年平均
#1	46.2	43.9	38.4	35.1	35.4	30.4	38.2
#2	40.4	43.0	41.5	43.4	39.7	38.4	41.1
#3	44.6	45.6	43.4	43.8	42.1	51.2	45.1
#4	40.0	39.3	38.7	41.9	34.8	42.0	39.4
#5	44.9	43.0	47.0	46.0	49.5	45.3	46.0
#6	36.3	37.0	35.3	38.0	43.8	37.5	38.0
#7	39.3	41.5	42.4	40.8	42.0	44.5	41.8
#8	47.5	46.4	47.6	50.4	50.7	42.8	47.6
#9	42.1	50.0	47.4	53.6	46.6	49.7	48.2
#10	40.7	49.0	47.8	47.6	48.0	49.3	47.1
平均	42.2	43.9	43.0	44.0	43.2	43.1	43.2
(SD)	(3.5)	(4.1)	(4.5)	(5.6)	(5.6)	(6.4)	(4.0)

Table 4. $\dot{V}_{E(60)}$ ($\ell \cdot \text{min}^{-1}$)

被検者	7 月	9 月	11 月	1 月	3 月	5 月	年平均
#1	13.6	15.4	16.7	14.3	17.9	21.3	16.5
#2	19.1	15.5	19.0	17.4	19.7	23.5	19.0
#3	27.6	22.5	16.5	11.9	11.7	11.0	16.9
#4	24.7	29.7	28.9	27.6	22.6	26.3	26.6
#5	19.1	22.6	18.7	16.4	15.6	18.1	18.4
#6	34.8	33.9	25.9	34.0	28.3	25.9	30.5
#7	41.5	39.2	29.9	30.6	29.7	23.4	32.4
#8	22.2	26.1	27.3	20.1	22.9	27.6	24.4
#9	30.3	21.6	23.1	17.5	25.8	25.7	24.0
#10	34.9	34.3	36.8	23.1	24.4	33.9	31.2
平均	26.8	26.1	24.3	21.3	21.9	23.7	24.0
(SD)	(8.7)	(8.1)	(6.7)	(7.3)	(5.7)	(6.1)	(6.1)

Table 5. M (min^{-1})

被検者	7 月	9 月	11 月	1 月	3 月	5 月	年平均
#1	14.8	19.0	24.0	17.3	22.4	21.9	19.9
#2	19.5	18.4	23.3	19.8	18.5	21.3	20.1
#3	30.5	17.6	16.4	24.6	12.5	16.0	19.6
#4	21.6	24.2	23.6	23.0	18.2	20.3	21.8
#5	15.3	16.6	16.0	15.5	15.9	14.8	15.7
#6	17.4	17.7	13.0	19.4	20.2	18.6	17.7
#7	38.9	39.3	27.1	21.2	20.4	14.6	26.9
#8	39.1	28.7	23.6	29.6	32.8	20.5	29.0
#9	18.1	31.1	27.1	44.2	24.7	23.0	28.0
#10	26.4	34.6	26.1	16.2	22.3	24.9	25.1
平均	24.2	24.7	22.0	23.1	20.8	19.6	22.4
(SD)	(9.2)	(8.2)	(5.0)	(8.5)	(5.5)	(3.5)	(4.6)

Table 6. K (ℓ)

被検者	7 月	9 月	11 月	1 月	3 月	5 月	年平均
#1	0.036	0.003	0.146	-0.130	0.041	-0.045	0.009
#2	0.061	0.206	0.204	0.109	-0.040	0.239	0.130
#3	0.446	0.203	0.123	0.270	-0.116	0.131	0.176
#4	0.086	0.294	0.218	0.262	-0.051	-0.001	0.135
#5	0.075	0.306	0.298	0.206	0.187	0.281	0.225
#6	0.076	-0.143	-0.020	-0.066	0.525	0.338	0.118
#7	0.699	0.779	0.503	0.249	0.370	-0.059	0.423
#8	0.736	0.430	0.347	0.798	0.762	0.427	0.583
#9	0.588	1.073	0.798	0.967	0.595	0.903	0.821
#10	0.540	1.232	0.587	0.193	0.607	0.447	0.601
平均	0.334	0.438	0.320	0.286	0.288	0.266	0.322
(SD)	(0.293)	(0.450)	(0.246)	(0.345)	(0.323)	(0.291)	(0.268)

気量 $V_{T(60)} (= \dot{V}_{E(60)} / M + K)$ および毎分呼吸数 $F_{(60)} (= \dot{V}_{E(60)} / V_{T(60)})$ を算出した。

各変数について、測定月毎に10人の平均値と標準偏差 (SD) を求めた。各月間の平均値の比較には対の t-test を用いた。有意水準は $p < 0.05$ とした。

[結 果]

表 2 ~ 6 は、S, B, $\dot{V}_{E(60)}$, M, K について、それぞれ、被検者別、月別の値と平均値 (SD) を示したものである。

S については、年平均値を上回った人数が最も多かった月は 9 月 (10人中 8人) で、逆に最も少なかった月は 3 月 (3人) であった。月別平均値 (±SD) については、9 月が最高値 (1.70±0.66) を、3 月が最低値 (1.45±0.62) をそれぞれ示したが、年平均値と各月平均値の間および各月平均値相互間に有意な差はみられなかった (表 2)。

B については、年平均値を上回った人数が最も多かった月は 11 月と 1 月 (6人) で、逆に最も少なかった月は 7 月 (2人) であった。月別平均値 (±SD) については、1 月が最高値 (44.0±5.6) を、7 月が最低値 (42.2±3.5) をそれぞれ示したが、年平均値と各月平均値の間および各月平均値相互間に有意な差はみられなかった (表 3)。

$\dot{V}_{E(60)}$ については、年平均値を上回った人数が最も多かった月は 7 月と 9 月 (7人) で、逆に最も少なかった月は 1 月 (2人) であった。月別平均値 (±SD) については、7 月が最高値 (26.8±8.7) を、1 月が最低値 (21.3±7.3) をそれぞれ示した。1 月 (21.3±7.3) と 3 月 (21.9±5.7) の平均値は、それぞれ、年平均値 (24.0±6.1) および 7 月 (26.8±8.7)、9 月 (26.1±8.1) のそれぞれの平均値に比較して、有意に ($p < 0.05$) 低い値を示した (表 6)。

M については、年平均値を上回った人数が最も多かった月は 9 月と 11 月 (6人) で、逆に最も少なかった月は 5 月 (3人) であった。月別平均値 (±SD) については、9 月が最高値 (24.7±8.2) を、5 月が最低値 (19.6±3.5) をそれぞれ示し

たが、年平均値と各月平均値の間および各月平均値相互間に有意な差はみられなかった (表 5)。

K については、年平均値を上回った人数が最も多かった月は 9 月 (7人) で、逆に最も少なかった月は 7 月、1 月、3 月、5 月 (4人) であった。月別平均値 (±SD) については、9 月が最高値 (0.438±0.450) を、5 月が最低値 (0.266±0.291) をそれぞれ示したが、年平均値と各月平均値の間および各月平均値相互間に有意な差はみられなかった (表 6)。

S, B, $\dot{V}_{E(60)}$ の 3 変数について、それぞれの年間変動の間の相互関係を調べるために、式(2)を次式に変形し、

$$\log (\dot{V}_{E(60)}) = \log (S) + \log (60 - B) \quad \dots\dots(5)$$

被検者毎にの $\log (\dot{V}_{E(60)})$, $\log (S)$, $\log (60 - B)$ を求めた。さらに、これら 3 変数について、被検者毎に年平均値との間の差 $\Delta \log (\dot{V}_{E(60)})$, $\Delta \log (S)$, $\Delta \log (60 - B)$ を求めた。

図 2 は、 $\Delta \log (\dot{V}_{E(60)})$, $\Delta \log (S)$, $\Delta \log (60 - B)$ についての月別の平均値を示したものである。なお、これら変数間には次の関係が成り立っている。

$$\Delta \log (\dot{V}_{E(60)}) = \Delta \log (S) + \Delta \log (60 - B) \quad \dots\dots\dots(6)$$

図 2 によれば、 $\Delta \log (\dot{V}_{E(60)})$ について、1 月の平均値は年平均値および 7 月、9 月、11 月の各月平均値に比較してそれぞれ有意に低い値を示した。また、9 月の $\Delta \log (S)$ の平均値は、年平均値に比較して、有意に高い値を示した。 $\Delta \log (\dot{V}_{E(60)})$ との間の相関係数は、 $\Delta \log (S)$ が $r = 0.82$ ($p < 0.05$)、 $\Delta \log (60 - B)$ が $r = 0.44$ (ns) であった。

図 3 は、図 2 の場合と同様に、 $\dot{V}_{E(60)}$, $V_{T(60)}$, $F_{(60)}$ の関係式 $\dot{V}_{E(60)} = V_{T(60)} \cdot F_{(60)}$ を変形し、これら 3 変数の年間変動の間の相互関係を示したものである。図 3 における 3 つの変数間には次式の関係が成り立っている。

$$\Delta \log (\dot{V}_{E(60)}) = \Delta \log (V_{T(60)}) + \Delta \log (F_{(60)}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

図 3 によれば、1 月の $\Delta \log (V_{T(60)})$ の平均値は年平均値および 9 月、11 月、5 月の各月平均

値に比較してそれぞれ有意に低い値を示した。 $\Delta \log (\dot{V}_{E(60)})$ との間の相関係数は、 $\Delta \log (V_{T(60)})$ が $r = 0.96$ ($p < 0.01$), $\Delta \log (F(60))$ が $r = 0.77$ (ns) であった。

[考 察]

本研究において、安静時の CO_2 - 換気応答に関する 5 つの変数 (S, B, $\dot{V}_{E(60)}$, M, K) のうち、有意な年間変動が認められたのは、 $\dot{V}_{E(60)}$ のみであった。すなわち、 $\dot{V}_{E(60)}$ は、7 月、9 月が高く、1 月、3 月が低く、11 月、5 月がそれらの中間であった。一方、他の 4 つの変数は、生値においては、有意な年間変動がみられなかったが、

対数変換によって、S にのみ有意な変動が認められた。すなわち、9 月に $\log (S)$ は、年平均に比較して有意に高い値を示した。また、図 2 の結果からも、 $\dot{V}_{E(60)}$ の変動には S の変動が寄与していることが示された。また、図 3 の結果から、 $\dot{V}_{E(60)}$ の変動には、呼吸数の変動よりはむしろ一回換気量の変動が関係していることが示された。このように、S, $\dot{V}_{E(60)}$, $V_{T(60)}$ の変動は、いずれも夏に高く、冬に低い傾向を示しており、 CO_2 - 換気応答が、季節の影響を受けていることが強く示唆された。

これらの CO_2 - 換気応答の変動の生理学的背景については、現時点で特定はできない。季節による環境 (例えば、温度、湿度、日照時間など)

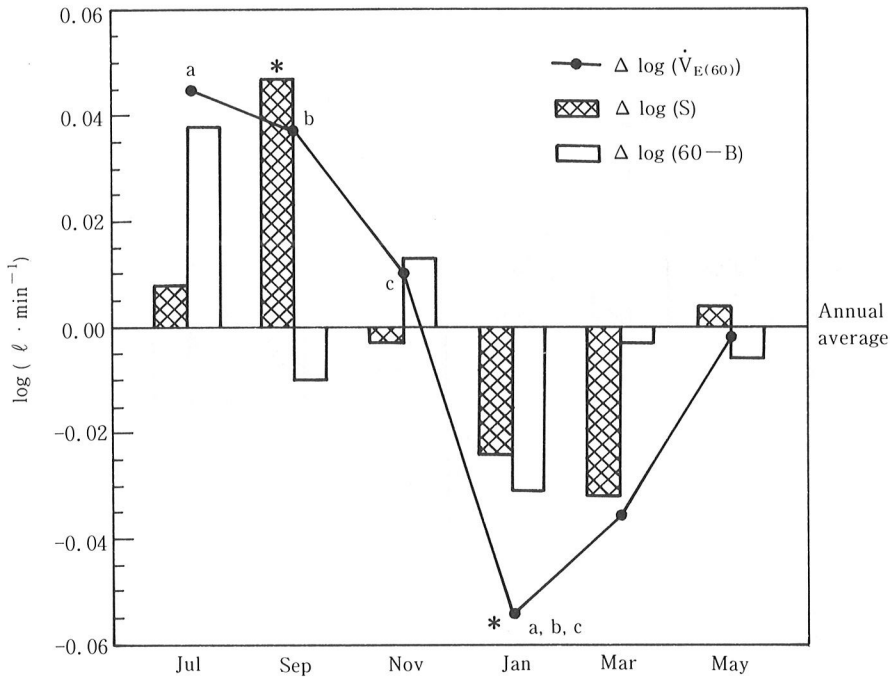


Fig. 2 Seasonal variation of the $\dot{V}_{E(60)}$, B, and S. The zero of the ordinate represents the annual average for each subject.

* The difference between monthly and annual average is significant ($p < 0.05$).
 a, b, c Variables sharing the same subscript are significantly different ($p < 0.05$).

文 献

や人間行動（身体活動量，食物など）の変化と，各被検者のホルモン濃度，体温，基礎代謝などの生理的な変化をそれぞれ調べることによって，さらに検討する必要がある。

表2～4から，S, B, $\dot{V}_{E(60)}$ について，それぞれ年平均値に対する各月の平均値の変動幅を求めると，Sで+10.4%（9月）～-5.6%（3月），Bで+1.9%（1月）～-2.3%（7月）， $\dot{V}_{E(60)}$ で+11.7%（7月）～-11.2%（1月）の範囲であった。これらの変動の存在から，数か月以上にわたる比較的長期間の身体トレーニングによるCO₂-換気応答の変化を評価する際には，測定時の季節を考慮すべきであると考えられる。

- 1) BLUM, J., KANAREK, D., CALLAHAN, B., BRASLOW, N., and KAZEMI, H. (1979) The effect of training on CO₂ ventilatory responsiveness in normal subjects. *Am. Rev. Respir. Dis. (Suppl.)*, **4**: 119.
- 2) BRADLEY, B. L., MESTAS, J., FORMAN, J., and UNGER, K. M. (1980) The effect on respiratory drive of prolonged physical conditioning program. *Am. Rev. Respir. Dis.*, **122**: 741-746.
- 3) Hey E. N., Lloyd, B. B., Cunningham, D. J. C., Jukes, M. G. M., and Bolton, D. P. G. (1966) Effects of various respiratory stimuli on the depth and frequency of breathing in man. *Respir. Physiol.*, **1**: 193-205.

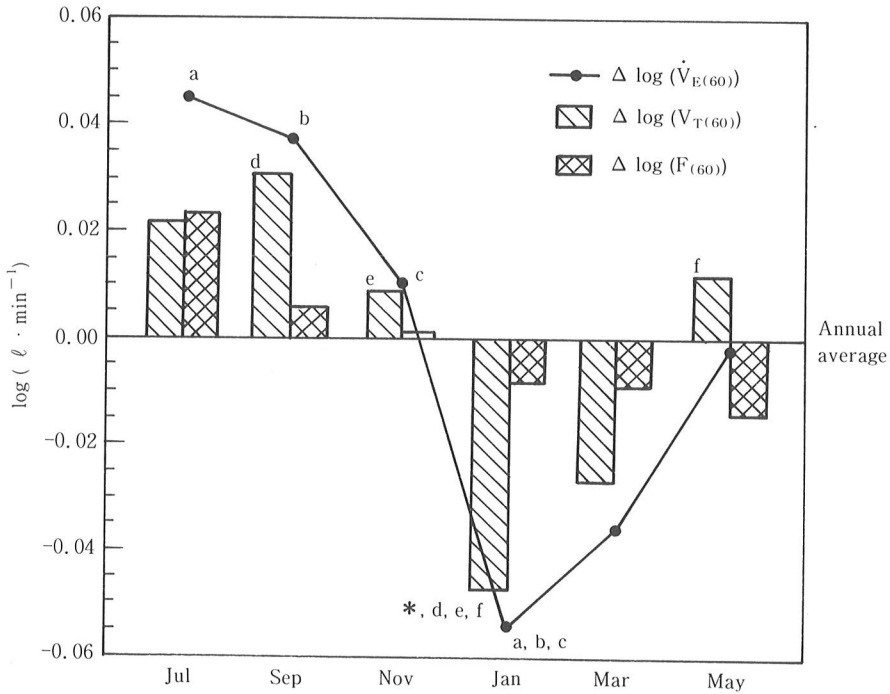


Fig. 3 Seasonal variation of the $\dot{V}_{E(60)}$, $V_{T(60)}$, and $F_{(60)}$. The zero of the ordinate represents the annual average for each subject.

* The difference between monthly and annual average is significant ($p < 0.05$).
 a, b, c, d, e, f Variables sharing the same subscript are significantly different ($p < 0.05$).

- 4) KELLEY, M. A., LAUFE, M. D., Millman, R. P., and PETERSON, D. D. (1984) Ventilatory response to hypercapnia before and after athletic training. *Respir. Physiol.*, **55** : 393—400.
- 5) MIYAMURA, M. and ISHIDA, K. (1990) Adaptive changes in hypercapnic ventilatory response during training and detraining. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **60** : 353—359.
- 6) READ, D. J. C. (1967) A clinical method for assessing the ventilatory response to carbon dioxide. *Aust. Ann. Med.*, **16** : 20—32.

(1990年12月10日受付)

