

呼気ガス中の酸素濃度と炭酸ガス濃度からの有酸素性閾値 (Aer. T) と 無酸素性閾値 (An. T) の決定法

石井喜八*・石井信子**

(昭和 61 年 6 月 2 日受付, 昭和 61 年 7 月 17 日受理)

Aerobic and Anaerobic Threshold Determined with the Time-history Curve of Oxygen and Carbon Dioxide Fractional Concentration in Expired Gas during Exercise

Kihachi ISHII and Nobuko ISHII

In the present paper, the authors dealt with a determined method of an aerobic threshold (Aer. T) and an anaerobic threshold (An. T). Although other determined method for Aer. T and An. T based on the lactate level in blood was already reported by Kinderman, W. et al. (1979), the authors could not observe (1980), in our results the general tendency as they described.

The present determining method for Aer. T and An. T was obtained by comparing the time-historical expired gas volumes with a pair of curves of oxygen fractional concentrations (F_{EO_2}) and carbon dioxide one (F_{ECO_2}) analyzed on the expired gas every fifteen second during exercise with a stepwised increase. Eight healthy male students, all aged twenty-six, served as subjects who worked on a bicycle ergometer (60 rpm) with zero load at first, gradually increasing by 0.25 KP every five minutes to exhaustion. Expired gas was collected into a douglas bag every minute through a face-mask, and measured for the last five-minute period of 30 minutes at rest and during exercise. Gas samples were analyzed into F_{EO_2} and F_{ECO_2} by means of an electric gas analyzer. Time-historical F_{EO_2} and F_{ECO_2} were plotted on a chart with a computer on-line system. The obtained results were represented by the discriminative three phases on the plots in both F_{EO_2} and F_{ECO_2} with scattering of some range assuming fluctuation in a living-body. The trend of F_{EO_2} to time-historical plots was shown, in the first phase, a liner-decline to milder work rate increased, in the phase following a leveling off to moderate exercise, and a liner-incline to severer intensity, on the other hand, the F_{ECO_2} showed the reverse in the incline and the decline. The coordinate of the Aer. T was decided on the turning point from a first phase to a second phase on a F_{EO_2} plots, and on the turning point from a second phase to a third one on a F_{ECO_2} plots for the An. T.

The results obtained with the present method were shown as follows; to the Aer. T determined, the corresponding magnitude percentages of $\dot{V}_{O_{2max}}$ showed a range of 27, 8-40, 6%, 19, 4-30, 4% of \dot{V}_{Emax} and 9, 7-30, 0% of HR, and to the An. T, showing 68, 1-89, 5% of $\dot{V}_{O_{2max}}$, 52, 3-75, 3% of \dot{V}_{Emax} and 68, 1-89, 5% of HR_{max} .

緒 言

身体作業能力 (Physical Work Capacity) の評価は、工学機械類の性能テストと同様に、身体を動かすことよって行われる。Åstrand¹⁾によるとこの測定は“理想を言えば、大筋群を活動させる作業方法で、各種の測定

条件が満されていない”としている。この作業は最大の水準が要求される。したがって、疲労困憊の状態を要求するのである。この方法は精度、時間、複雑な実験手順を必要とし、さらに、被検者の献身的努力が要求される。

* 日本体育大学身体動作学研究室, ** PL 女子短期大学体育研究室

身体作業能力に関心を持つ者は研究者にかぎらず、また、テストを受ける人々も広範囲にわたり、疲労困憊に追い込む作業の危険を避けることが要求されてきている。そこで、最大下作業を与える過程で生体の反応をとらえ、特定の現象から身体作業能力を推定することは意味あることと思われる。

1964年、Naimark⁹⁾ら、そして Wasserman と McIlroy¹⁰⁾は、リハビリテーションの立場から循環系の疾患を伴う患者について、漸増的運動負荷を課し換気量の非直線性を利用して運動強度に対するガス交換比の変換点をとらえ無酸素性代謝の閾値とした。さらに、1973年、Wasserman¹⁷⁾たちは、換気量の変換点をとらえて、Anaerobic Threshold (AT) と呼んだ。また、Skinner と McLellan¹⁵⁾は、血中乳酸濃度を手掛りに血中乳酸が安静時と同水準から逸脱する点を有酸素性代謝の上限であるので Aerobic Threshold (Aer. T) とし、さらに血中乳酸が増加を始める変換点を乳酸性無酸素過程に踏込んだとして Anaerobic Threshold (An. T) と呼ぶことを提唱している。この Aer. T は、先の Wasserman¹⁰⁾たちによって定義された AT に相当し、また、An. T は Green²⁾らが報告している AT に相当するということができる。最近わが国においてもこの AT に関する研究^{6)~14), 16), 20)~22)}が進められている。われわれも運動に対する生体応答の簡易化された指標によって、最大下作業による有酸素性能力と無酸素性能力を区分しようと試みてきた⁴⁾。

そこで、本研究では、有酸素的能力と乳酸性無酸素的能力を区分するための方法を呼気ガスのパラメーターから導き出し新たな手法を確立することを目的とした。

方 法

1. 被検者

被検者は、20歳から26歳までの健康な成人男子8名である。彼らの年齢、身長および体重は表1に示されている。これらの被検者のうち T.T. はレスリングの現役選手であり、規則的なトレーニングを積んでいるが、その他の者は、特に規則的な運動は行っていない。

2. 実験方法

被検者は、実験室に到着してから15~20分間の椅座位安静の後に、安静時および運動負荷テストを受けた。運動負荷テストは、Monark社製の自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷法による疲労困憊に至るまでのテストであった。運動負荷は運動開始から5分目までは無

Table 1. Physical characteristics of the subjects

Subjects	Age (yrs.)	Height (cm)	Weight (kg)
Y. M.	24	164.0	58.5
T. T.	25	166.0	65.0
T. A.	26	166.0	55.0
T. H.	23	175.0	73.5
H. F.	20	174.0	67.0
K. K.	21	173.0	84.0
T. I.	25	173.0	70.0
K. S.	23	166.2	62.0
Mean	23.4	169.6	66.9
S.D.	1.9	4.2	8.6

負荷とし、5分目以降は5分ごとに0.25kpずつ増加させ、疲労困憊に至らせた。ペダルの回転数は60rpmであった。この運動負荷テストの方法は、強度がこれまでの0.25kpの漸増負荷法と同一であったが、漸増間隔の時間を5分ごとに延長して、本研究の目的にあわせたので、負荷方法は若干変更されたことになる。これには呼気ガス中の酸素(F_{EO_2})および炭酸ガス濃度(F_{ECO_2})の個体内変動をできるだけ小さくしたいというねらいがあったからである。

安静時および運動中の測定項目は、HR、 \dot{V}_E そして \dot{V}_{O_2} であった。HRは胸部双極誘導による心電図の記録から求めた。 \dot{V}_E および \dot{V}_{O_2} は、ダグラスバック法によって求めた。呼気ガスの採気は、1分毎に運動中連続して行なわれた。呼気ガスの分析には、三栄測器製呼気ガス自動分析器が用いられ、サンプルガスの O_2 濃度および CO_2 濃度が測定された。

結果および考察

図1は、被検者 T.I. について運動中の F_{EO_2} および F_{ECO_2} の変化を1分ごとにプロットしたものである。上側には F_{EO_2} 、下側には F_{ECO_2} の変化を示した。 F_{EO_2} についても F_{ECO_2} についても、これまでに得られたものよりもなめらかな曲線が得られ、いずれの曲線も大きく3相に分かれることが見られる。

すなわち、 F_{EO_2} では1) 下降部分、2) フラットな部分、そして3) 上昇部分であり、 F_{ECO_2} については1) 上昇部分、2) フラットな部分、そして3) 下降部分に分けることができよう。これらは、これまで多くの人によって、理論的には指摘されているところであるが、実測値によって示されるものは若干あるとはいえ、ATの決定にはこれらを基準にはしていなかった。

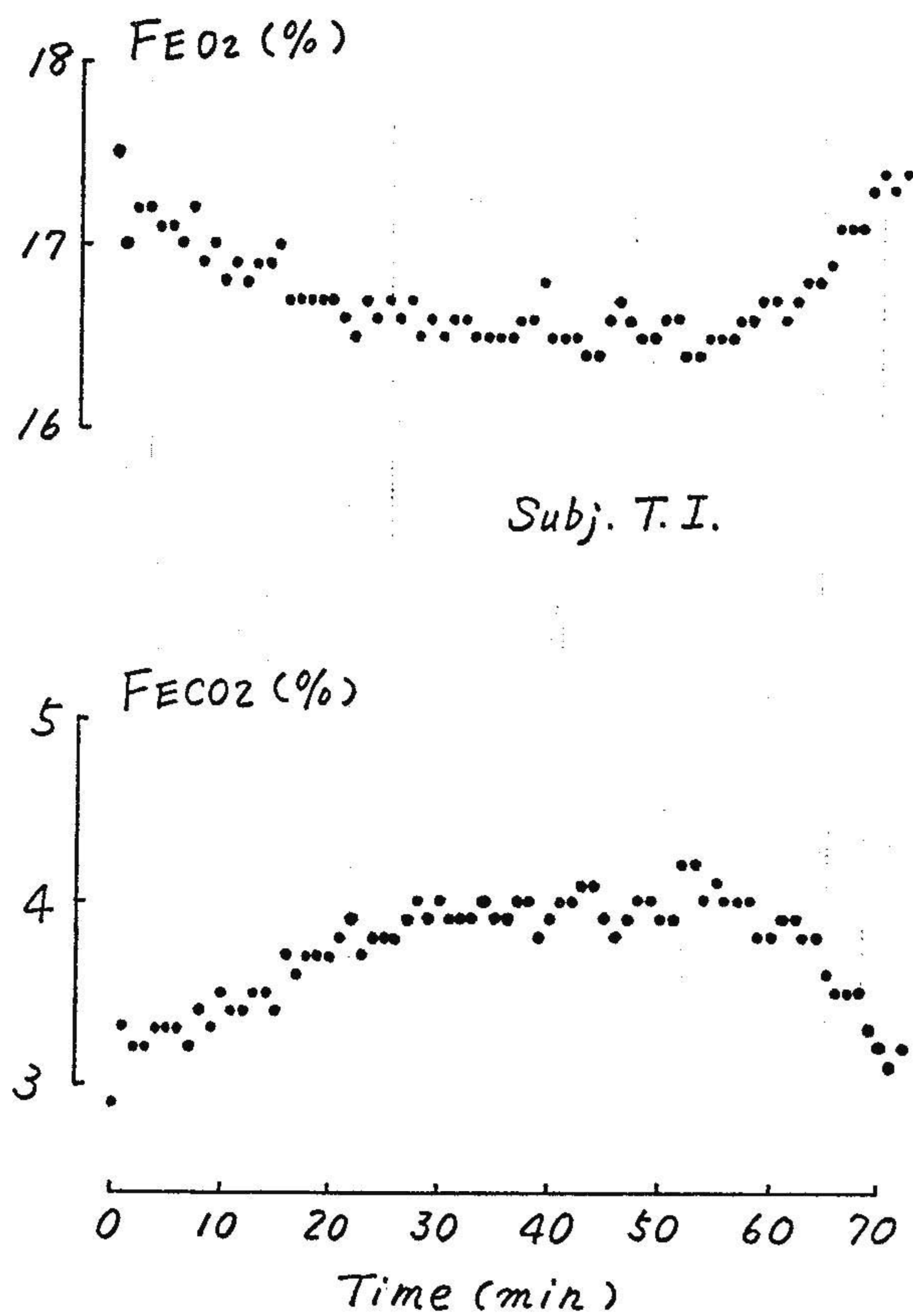


Fig. 1. Changes in F_{EO_2} and F_{ECO_2} during progressive exercise for subject T. I.

われわれは、 F_{EO_2} および F_{ECO_2} の得られた変化から、Aerobic Threshold (Aer. T) と Anaerobic Threshold (An. T) の決定を試みることにした。すなわち、運動に伴う乳酸および CO_2 の増加によって生じたと推定される代謝性アシドーシスを補償するために増加した \dot{V}_E とこれに対する O_2 消費の影響を受けて、 F_{EO_2} の低下が頭うちになる点、いかえれば有酸素性代謝の下限を Aer. T とした。一方、運動強度の増加に伴い、乳酸の蓄積がさらに著しくなることが推定されるが、これを補償するための増加によって、 F_{ECO_2} が低下しはじめる点を An. T と決定した。したがって Aer. T と An. T との間は、有酸素性代謝と無酸素性代謝の移行期であると考えたわけである。

ところが、図1に示した如く、生のグラフから Aer. T と An. T を判定しようとする場合には、かなり主観的なとらえ方になってしまいそうである。そこでより客観的な判定をするために、次のような方法を用いることを試みた。それは F_{EO_2} と F_{ECO_2} の各濃度に対応するプロットの合計数を求め、各濃度に対する頻度の変化をとらえることである。端的にいうと、縦軸のスケール上にあらわれる横軸上のプロット数の分布を求めていったのである。

被検者 T. I. について、各濃度に対するプロットの頻

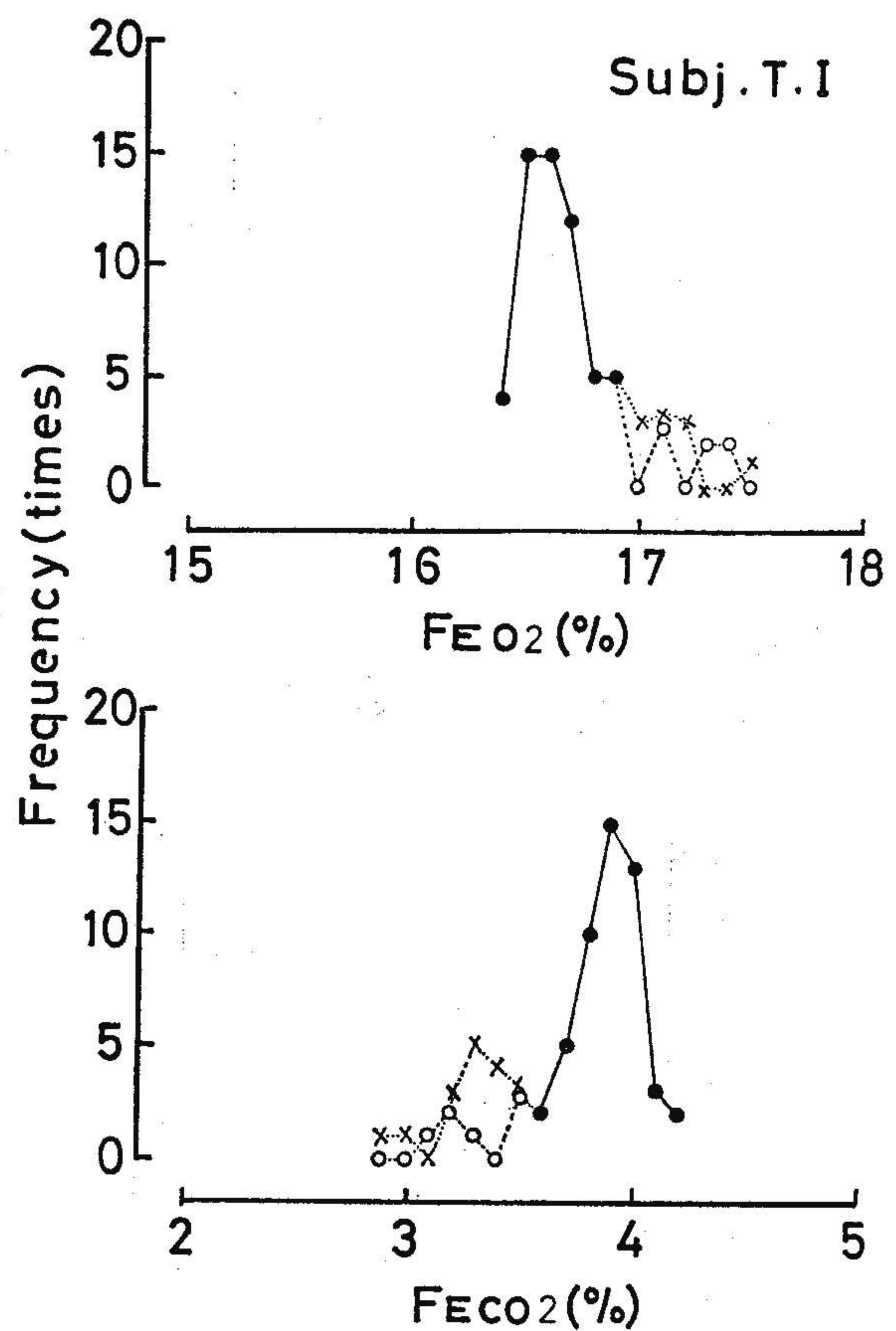


Fig. 2. Frequency curve in F_{EO_2} and F_{ECO_2} for subject T. I.

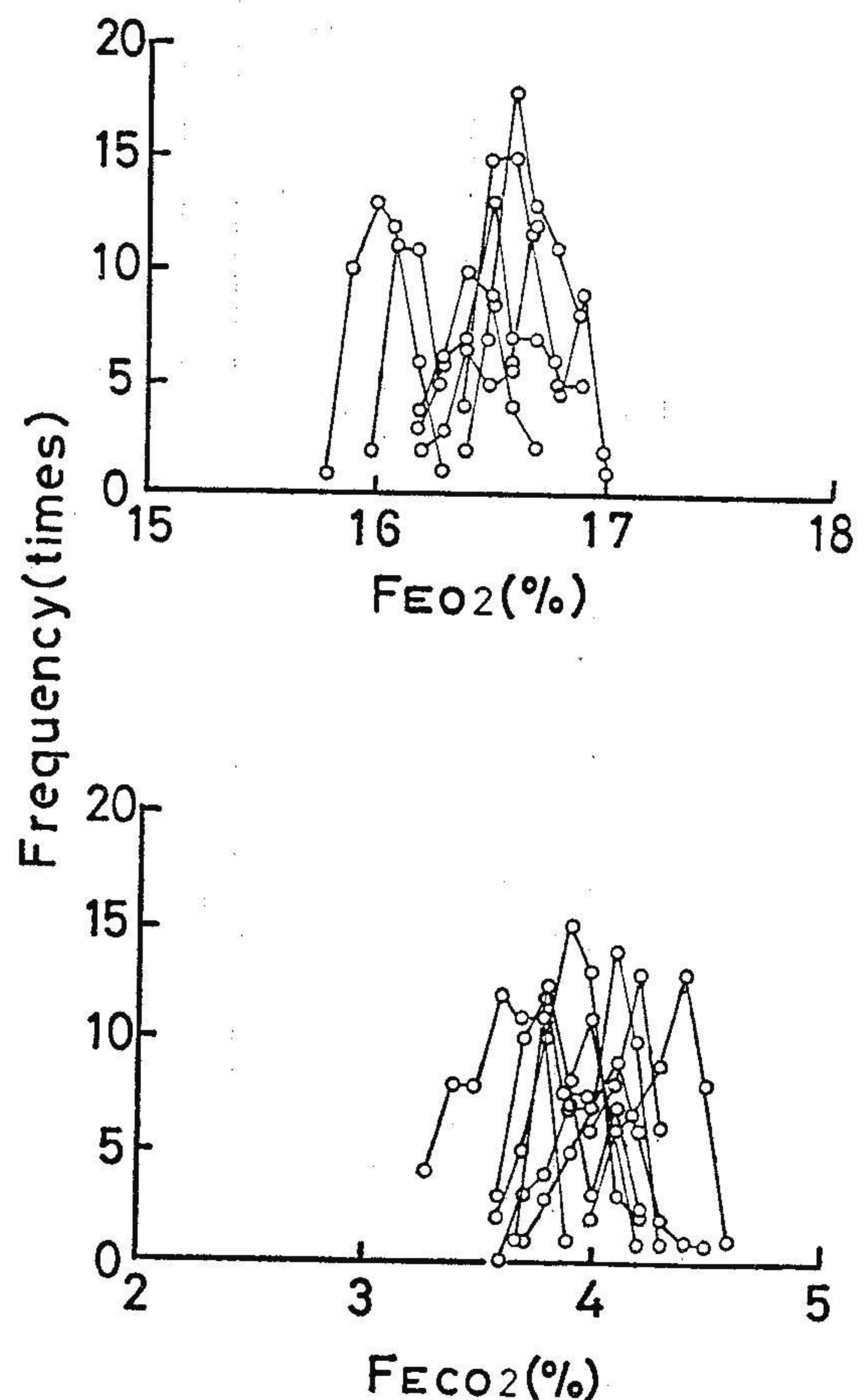


Fig. 3. Distribution curve of F_{EO_2} and F_{ECO_2} for each subjects.

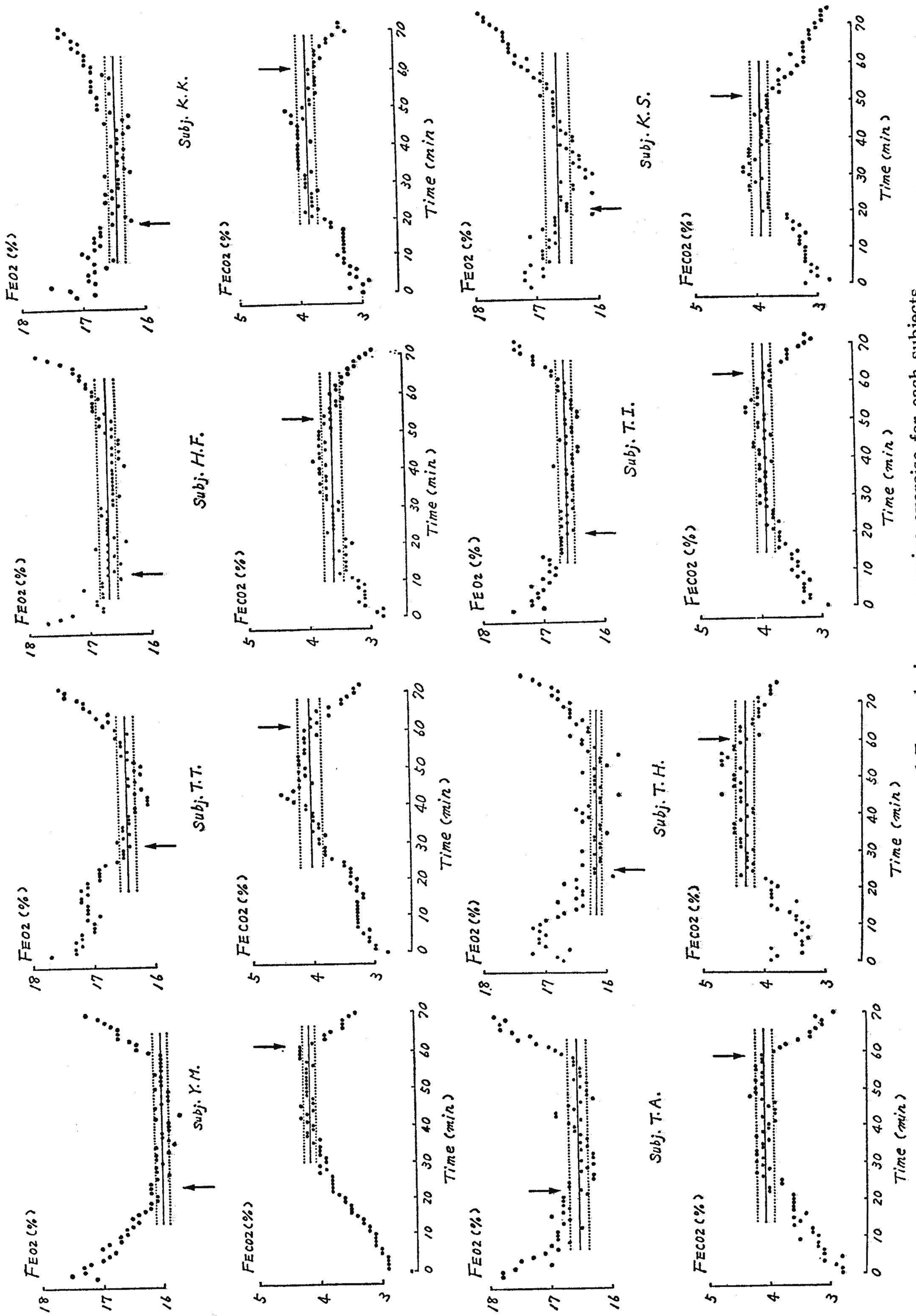


Fig. 4. Changes in FE₀₂ and FECO₂ during progressive exercise for each subjects.

度をまとめて示したものが図 2 である。図中 ×……× および ○……○ で示した部分は、図 2 における F_{EO_2} と F_{ECO_2} の下降あるいは上昇部分に相当する。これによって、フラットな部分の平均値および標準偏差が容易に求められる。

以上の方法を用いて得られた各被検者の頻度曲線をまとめて示したものが図 3 である。上側には F_{EO_2} 、下側には F_{ECO_2} を示してある。まず、 F_{EO_2} についてみると、曲線が大きく 2 つのグループに分かれ、被検者による個体間の差が認められる。また、 F_{ECO_2} については、ほぼひとつのグループにまとまっているようには見えるが、個体間の差を認めないわけにはいかない。したがって、これらの変化を 8 人の平均値でとらえることには問題があるといえよう。

そこで、各被検者ごとに平均値と標準偏差を求め、フラットな部分について生体内のバラツキを確かめてみることにした。

図 5 は、すべての被検者について、フラットな部分の平均値と標準偏差を F_{EO_2} および F_{ECO_2} の変化曲線に示したものである。それぞれ平均値は実線で、標準偏差は破線で示してある。一例をとって被検者 T. I. についてみると、 F_{EO_2} では平均値が 16.63%、標準偏差が 0.4%、そして F_{ECO_2} では平均値が 3.9%、標準偏差が 0.14% であった。また、これを 8 人についてみたところ、 F_{EO_2} の平均値は 16.03~16.69%、 F_{ECO_2} の平均値は 3.60~4.32% の値が示された。

ここで、われわれは、これらの平均値を各個体の標準値と、また、上下のバラツキは生体内瞬時変動と考えた。これによって、各被検者の Aer. T および An. T

を決定することが容易になった。そこで、これらの図から、平均値に達した F_{EO_2} を Aer. T とし、平均値がレベルダウンする時の F_{ECO_2} を An. T と決定することにした。

この方法によって決定された各被検者の Aer. T および An. T は、図 4 において矢印で示されている。両者の発現時点をみると、Aer. T は 14~30 分、平均値では 22 分、そして An. T では 51~62 分、平均値で 58 分であった。

表 2 は、 \dot{V}_{O_2} 、 F_E および HR の絶対値をまとめて示したものである。Aer. T 発現時における \dot{V}_{O_2} は 0.76~1.29 l/min、 \dot{V}_E は 16.57~27.56 l/min、そして HR では 83~116 拍/分の値が示された。一方、An. T については \dot{V}_{O_2} では 2.10~2.76 l/min、 \dot{V}_E では 49.26~60.96 l/min、そして HR では 159~183 拍/分の範囲であった。

しかしながら、これらの数値は各被検者の $\dot{V}_{O_2 \max}$ 、 $\dot{V}_{E \max}$ そして HR_{\max} の水準によって異なってくるのでこれらの値を比較するために相対値であらわしてみた。

表 3 がそれである。まず、Aer. T についてみると、 $\% \dot{V}_{O_2 \max}$ では 27.8~40.6%、 $\% \dot{V}_{E \max}$ では 19.4~30.4%、そして $\% HR_{\max}$ では 13.6~36.0% の範囲であった。一方、An. T は $\% \dot{V}_{O_2 \max}$ で 73.6~84.9%、 $\% \dot{V}_{E \max}$ では 52.3~75.3%、そして $\% HR_{\max}$ では 68.1~89.5% の値が示された。これらの結果から、両者に共通していえることは、 $\% HR_{\max}$ で個人差が大きいことと、Aer. T から An. T への移行期が個人によって異なることが推察される。また、特にレスリングの現

Table 2. Absolute \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_E and HR values corresponding to Aer. T and An. T

Subjects	\dot{V}_{O_2} (l/min)		\dot{V}_E (l/min)		HR (beats/min)	
	Aer. T	An. T	Aer. T	An. T	Aer. T	An. T
Y. M.	1.08	2.63	21.61	51.31	95	163
T. T.	1.29	2.70	27.56	60.96	116	165
T. A.	1.04	2.47	22.74	56.25	83	159
T. H.	1.16	2.49	23.96	54.25	87	155
H. F.	0.76	2.10	16.57	49.26	97	183
K. K.	1.05	2.76	22.57	64.00	90	177
T. I.	0.93	2.57	20.86	59.28	96	175
K. S.	0.97	2.31	21.10	53.00	104	183
Mean	1.04	2.50	22.10	56.03	96	170
S.D.	0.15	0.20	2.90	4.73	10	10

Table 3. Relative \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_E and HR values corresponding to Aer. T and An. T

Subjects	% $\dot{V}_{O_2 \max}$		% $\dot{V}_{E \max}$		%HR $_{\max}$	
	Aer. T	An. T	Aer. T	An. T	Aer. T	An. T
Y. M.	30.5	74.3	23.6	56.2	19.5	77.1
T. T.	40.6	84.9	30.4	67.1	36.0	85.0
T. A.	33.7	79.9	22.6	55.9	24.6	84.9
T. H.	31.8	68.2	23.7	53.6	18.8	68.1
H. F.	27.8	76.9	19.4	57.4	13.6	86.6
K. K.	30.9	81.2	26.5	75.3	19.4	89.5
T. I.	28.8	79.6	24.4	69.4	19.7	79.7
K. S.	30.9	73.6	20.8	52.3	26.6	81.8
Mean	31.9	77.3	23.9	60.9	22.3	81.6
S.D.	3.9	5.2	3.4	8.5	8.1	6.7

役選手である T. T. をみると、いずれの項目においても Aer. T, An. T との出現時の割合が高い。これは、今後の研究の興味ある課題であると考えている。これらの値を 8 人の平均値でみると、Aer. T ではおよそ 32% $\dot{V}_{O_2 \max}$, 24% $\dot{V}_{E \max}$, 21% HR $_{\max}$ であり、An. T ではおよそ 77% $\dot{V}_{O_2 \max}$, 61% $\dot{V}_{E \max}$ および 82% HR $_{\max}$ となる。

Aer. T と An. T の発現時の % $\dot{V}_{O_2 \max}$ について、Skinner と McLellan¹⁵⁾ は、Aer. T では 40~60% $\dot{V}_{O_2 \max}$, An. T では 65~90% $\dot{V}_{O_2 \max}$ であると報告している。また、Davis たち²⁾ は、われわれが Aer. T とした時点を AT としており、トレッドミルによる walk-running を行なった時に AT が約 59% $\dot{V}_{O_2 \max}$ で発現することを報告している。したがって、本実験の値は、これらの報告と比較すると Aer. T は幾分小さい。

Aer. T および An. T の定義からいえば、乳酸発生によって決定される変換点である。しかし、筆者たちにとっては非観血的な方法によって運動強度の区分を試みることが本研究の目的であった。確かに、これまでも生理的運動強度は最大酸素摂取量 ($\dot{V}_{O_2 \max}$) あるいは最大心拍数 (HR $_{\max}$) によってあらわされてきた。これらの指標は運動強度に直線性をもって変化する。運動強度に対して指数関数の関係をあらわす非直線性的変化を示す指数として、呼吸当量 ($\dot{V}_E \cdot \dot{V}_{O_2}^{-1}$) をもってあらわす人々がいる^{11), 12), 19)}。この呼吸当量は $\dot{V}_E \cdot (F_{EO_2} \cdot \dot{V}_E)^{-1}$ から算出される値である。われわれは計算の煩雑と計算誤差を避ける意味で測定値の F_{EO_2} を直接用いたわけである。

以上、本研究では、運動中の F_{EO_2} および F_{ECO_2} の個体内変動をできるだけ小さくする目的で漸増負荷の時

間、強度を選び 5 分間の負荷漸増法による自転車運動を行なわせたところ F_{EO_2} についても F_{ECO_2} についても、これまでに得られた曲線よりもなめらかな曲線が得られるようになった。そして、これらの曲線から各濃度に対応するプロット数を求め、フラットの部分を容易に平均化することが可能となった。したがって、これらの結果から Aer. T と An. T とを視覚を介しての変換点の決定と比較して、数量化による判定ができるということがわかった。

要 約

1. 本研究の目的は、 F_{EO_2} および F_{ECO_2} の変化から Aerobic Threshold (Aer. T) と Anaerobic Threshold (An. T) の決定方法を客観的にとらえることである。
2. 被検者は、20 歳から 26 歳までの健康な成人男子 8 名であった。
3. 運動負荷テストには、自転車エルゴメーター (60 rpm) による負荷漸増法が用いられた。運動の負荷は運動開始から 5 分目までは無負荷とし、5 分目以降は 5 分ごとに 0.25 kp ずつ増加され、exhaustion に至らせた。呼気ガスの採気はダグラスバック法により、安静時および運動開始から exhaustion に達するまで 1 分ごとに連続して行なわれ、呼気サンプルガスの O_2 濃度および CO_2 濃度が分析された。
4. 各被検者について得られた F_{EO_2} および F_{ECO_2} の変化曲線は、これまでに得られたものよりも変動幅が少くなめらかな曲線であった。
5. Aer. と An. T の判定方法をより客観的な方法に近づけるために、各濃度に対するプロット数の頻度をとらえ、フラットな部分の平均値と標準偏差を求めた。

この時の平均値を標準値として、上下のバラツキは生体内瞬時変動であると考えた。これらの結果から、平均値に達した F_{EO_2} を Aer. T とし、平均値がレベルダウンした時の F_{ECO_2} を An. T と決定した。

6. この判定法にしたがい Aer. T と An. T の発現時点の生体応答を \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_E および HR からとらえてみた。Aer. T についてみると、 \dot{V}_{O_2} では 0.76~1.29 l/min, \dot{V}_E では 16.57~27.56 l/min, HR では 83~116 拍/分であった。一方、An. T についてみると、 \dot{V}_{O_2} では 2.10~2.76 l/min, \dot{V}_E では 49.26~60.96 l/min として、HR では 159~183 拍/分であった。

7. これらの生体応答を相対値でとらえてみると、Aer. T では 27.8~40.6% $\dot{V}_{O_2 \max}$, 19.4~30.4% $\dot{V}_{E \max}$, そして 13.6~36.0% HR_{\max} となる。また、An. T では 73.6~84.9% $\dot{V}_{O_2 \max}$, 52.3~75.3% $\dot{V}_{E \max}$, そして 68.1~89.5% HR_{\max} であった。

以上述べたことから、 F_{EO_2} および F_{ECO_2} の変化曲線について各濃度に対応する頻度を求め、フラットな部分を平均値化することによって、Aer. T と An. T を数値化することによる決定方法を提案した。

なお、この研究の一部は昭和年度日本体育大学学内研究奨励費で行われた。

文 献

- 1) Astrand, P.-O. and K. Rodahl: Evaluation of physical work capacity on the basis of tests, Textbook of Work Physiology (Chapter 10), McGraw-Hill Book Co.: 333-365, 1977.
- 2) Davis, J. A., P. Vodak, J. H. Wilmore, J. Vodak, and P. Kurtz: Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *J. Appl. Physiol.*, **41**, 544-550, 1976.
- 3) Green, H., B. Daub, D. Painter, M. Houston and J. Thomson: Anaerobic threshold and muscle fiber type, area and oxidative enzyme activity during graded cycling. *Med. Sci. Sports*, **11**, 113-114, 1979.
- 4) 石井信子, 浅川 隆, 石井喜八: Anaerobic Threshold の再検討. 第 35 回日本体力医学会大会予稿集: 63, 1980.
- 5) 石井信子, 安 義洙, 石井喜八: 1 分間および 4 分間負荷漸増法の運動による Anaerobic Threshold の比較. 体力科学, **30**, 124, 1981.
- 6) 泉 一郎, 石河利寛: 少年および青年の無酸素性作業閾値 (An. T). 日本体育学会第 32 回大会号 293, 1981.
- 7) Kumagai, S., K. Tanaka, A. Matsuzaka, K. Hirakoba, K. Asano and Y. Matsuura: Relationships of the anaerobic threshold with the 5000 m, 10000 m and 10 mile races. 日本体育学会第 32 回大会号: 297, 1981.
- 8) 村岡 功, 石河利寛, 吉田敬義: 幼児の Anaerobic Threshold. 日本体育学会第 32 回大会号: 292, 1981.
- 9) Nagata, A., T. Moritani and M. Muro: Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. VIIIth International congress of biomechanics (Abstracts): 125, 1981.
- 10) Naimark, A., K. Wasserman and M. B. McIlroy: Continuous measurement of ventilatory exchange ration during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **19**, 644-652, 1964.
- 11) 根本 勇, 宮下充正: 無酸素性作業閾値 (AT) からみたトレーニング強度—主観的運動強度 (RPE) について—。日本体育学会第 31 回大会号: 369, 1980.
- 12) 根本 勇, 宮下充正: 無酸素性作業閾値 (AT) からみたトレーニング強度—心拍数について—。第 35 回日本体力医学会大会予稿集: 63, 1980.
- 13) 根本 勇, 宮下充正: 呼吸機能と有酸素性作業閾値 (Aerobic threshold) との関係. 体力科学, **30**, 123, 1981.
- 14) 根本 勇, 宮下充正: トレーニング閾値としての有酸素性作業閾値—主観的運動強度 (RPE) について—。日本体育学会第 32 回大会: 294, 1981.
- 15) Skinner, J. S. and T. H. McLellan: The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport* **51**, 234-248, 1980.
- 16) Tanaka, K., Y. Matsuura, S. Kumagai, A. Matsuzaka, K. Hirakoba and K. Asano: Concurrent validity of the gas exchange anaerobic threshold determination. 日本体育学会第 32 回大会号: 296, 1981.
- 17) Wasserman, K. and M. B. McIlroy: Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am. J. Cardiol.*, **14**, 844-852, 1964.
- 18) Wasserman, K., A. L. Van Kessel, and G. G. Burton: Interaction of physiological mechanisms during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **22**, 71~85, 1967.
- 19) Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal and W. L. Beaver: Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Appl. Physiol.* **35**, 236-243, 1973.
- 20) 吉田敬義, 永田 晟, 室 増男: 動脈血乳酸濃度からみた Anaerobic Threshold. 日本体育学会第 31 回大会号: 388, 1980.
- 21) 吉田敬義, 須田吉広, 竹内直文, 永田 晟, 室 増男: 漸増負荷運動中の Acid base balance と Anaerobic Threshold について. 第 35 回日本体力医

学会大会予稿集：63, 1980.

- 22) 吉田敬義, 永田 晟, 室 増男: 動脈血乳酸濃度を
基にしたトレーニング (AT-trainng) が呼吸循環機

能および Anaerobic Threshold におよぼす影響.
日本体育学会第 32 回大会号: 295, 1981.