

# 中高年女性の換気およびガス交換kinetics と有氣的作業能との関係

秋田 浩一・江口 淳一

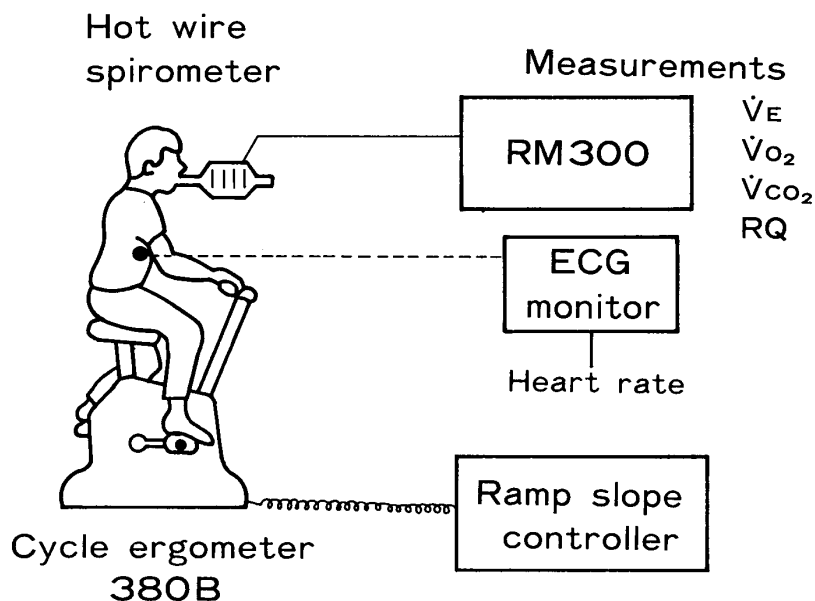
## 目 的

一定負荷運動初期の換気とガス交換kineticsとの関連を検討することは、活動筋組織による酸素利用と肺でのガス交換能を反映すると考えられ数々の報告がなされて来た。<sup>7) 15)</sup>しかし、日頃特に運動を行っていない中高年女性について検討した報告は少ない。

そこで本研究では、中高年女性の換気およびガス交換kineticsおよび、それらと $\dot{V}O_2\max$ (最大酸素摂取量)、VT (Ventilatory threshold) などの有氣的作業能力との関連を検討することを目的とした。

## 対象および方法

対象は、日頃習慣的な運動を行っていない41歳から63歳までの中高年女性13名 (M群) と本学女子大学生4名 (Y群) とした。被検者には、実験に先立ち本研究の主旨と概略についてよく説明をし承諾書を提出させた。また、血圧、心電図、スパイロメトリー呼吸器能検査等の医学的な検診を受けさせ異常のなかった者が実験に参加した。



運動負荷は、電気制動型自転車エルゴメーター（Siemens社製 Cycle Ergometer 380 B）を用い、テレメーター心電計（フクダ電子社製 Sunny Scope MIC-680）の監視下で行った。安静時および運動中の呼器ガス分析は、breath-by-breath方式のレスピロモニター、ミナト医科学社製RM-300により連続的に行い、測定値は5秒毎の平均値として算出した（Fig.1）。

Fig.2は、運動負荷のプロトコルを示したものである。被検者はエルゴメーター上で4分間の座位安静をとった後、毎分50回転のペダリング頻度で、0W—2分間、40W—4分間の一定負荷運動を行った。さらにこの一定負荷運動に続き20W/minの割合でのramp負荷運動を自覚的  
最大負荷まで行った。

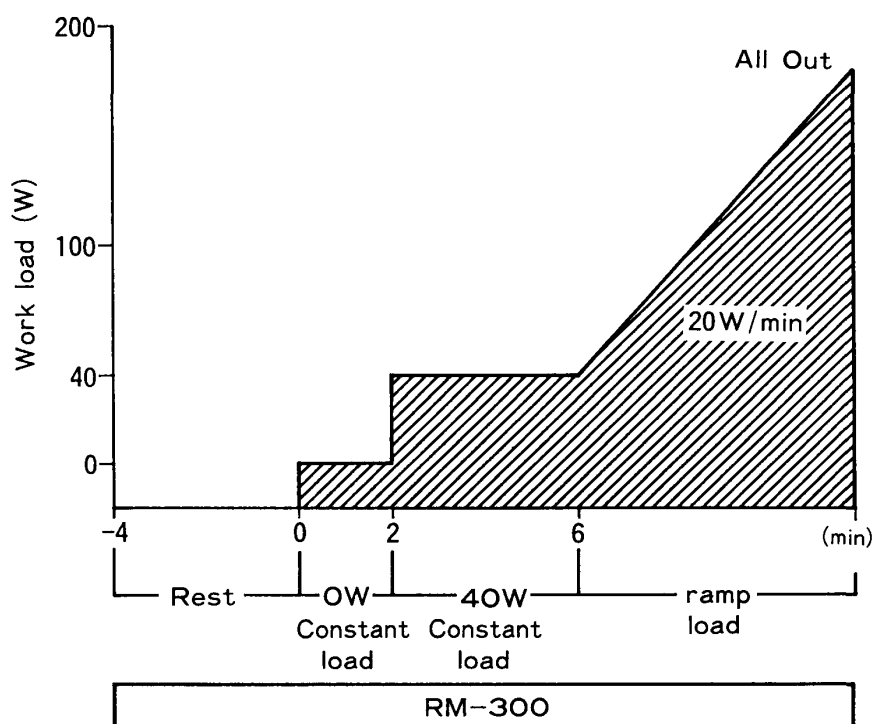


Fig.2 Exercise Protocol

運動負荷に対する換気およびガス交換kineticsは、運動開始より定常状態に到る $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の増加反応をWhippら<sup>14)</sup>に従って単一指数関数としてとらえ、その時定数で表わした。すなわち、次の一般式を用いて時定数を算出した。

$$\Delta Y_{(t)} = \Delta Y_{(ss)} (1 - e^{-t/\tau Y})$$

ここでYは $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ に相当し、 $\Delta Y_{(t)}$ 、 $\Delta Y_{(ss)}$ 、 $\tau Y$ はそれぞれYのt時間における運動前値よりの増加量、Yの定常状態の値、Yの時定数などを示す。そこで我々は、 $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の5秒毎の実測値をマイコンを用いて一般式にシュミレートさせ、それぞれの時定数を算出した。時定数を決める場合の基点の取り方によって時定数は変るが<sup>15)</sup>、本研究では、40W一定負荷運動開始時をその基点としている。これは、Linnarson<sup>7)</sup>のMean Response Time (MRT)に相当するもので、Time delayは0としている。Fig.3は $\dot{V}O_2$  kineticsの時定数算出

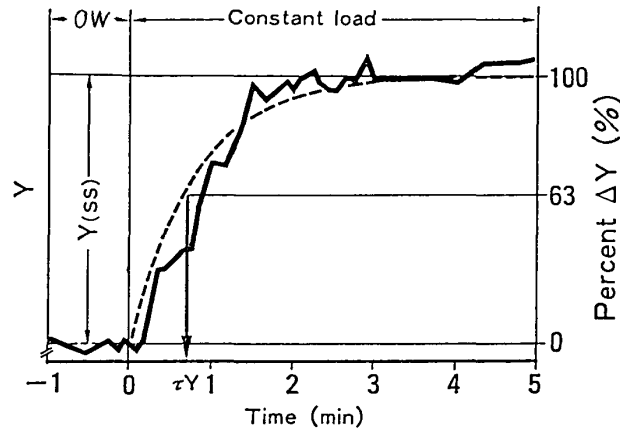


Fig.3 Time course of  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  and  $\dot{V}E$  following the onset of exercise.

- Y:  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  and  $\dot{V}E$ .
- $Y_{(ss)}$ : the steady state increase in Y.
- $\tau Y$ : the time constant of the response.
- .....: best-fit monoexponential curve for data.

の一例を示したもので、横軸に時間を取り、縦軸に安静時よりの $\dot{V}O_2$ の増加量 $[\Delta\dot{V}O_{2(t)}]$ をとると、その定常状態の値を100%として63%に達する時間を求めてこれを $\dot{V}O_2$ の時定数 $\tau\dot{V}O_2$ としている。

一方、ramp負荷により求められたVTの決定は、 $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ が増加を始める直前の点、 $\dot{V}O_{2max}$ は、最大運動時の $\dot{V}O_2$ とした。

## 結 果

Table 1は、被検者の体格および呼吸器能検査の結果、さらにVT、 $\dot{V}O_{2max}$ の値を、平均値で示したものである。中高年女性の $\dot{V}O_{2max}$ は、 $36.1 \pm 3.3 \text{ ml/kg/min}$ 、VTは、 $21.8 \pm 2.4 \text{ ml/kg/min}$ であり、女子大学生ではそれぞれ $37.9 \pm 4.1 \text{ ml/kg/min}$ 、 $24.8 \pm 2.3 \text{ ml/kg/min}$ であった。

Table 1 Anthropometric and pulmonary function data of subjects.

	Young	Middle
n	4	13
Age (yrs)	$19.5 \pm 1.7$	$50.9 \pm 7.5$
weight (kg)	$49.9 \pm 3.3$	$51.7 \pm 8.1$
height (cm)	$155.0 \pm 4.8$	$153.5 \pm 4.3$
VC (ML)	$2778.0 \pm 387.5$	$2778.0 \pm 385.4$
%VC (%)	$90.1 \pm 9.9$	$108.5 \pm 11.1$
FEV1.0 (ml)	$2615.0 \pm 433.0$	$2286.0 \pm 360.0$
FEV1.0% (%)	$92.4 \pm 4.0$	$82.8 \pm 6.0$
MVV (l/min)	$83.8 \pm 9.0$	$87.6 \pm 17.0$
MVV% (%)	$92.2 \pm 8.8$	$125.2 \pm 14.7$
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	$37.9 \pm 4.1$	$36.1 \pm 3.3$
AT (ml/kg/min)	$24.8 \pm 2.3$	$21.8 \pm 2.4$

(mean  $\pm$  S.D)

Table 2 The values of  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$  at the Rest, 0W, and 40W constant load.

		REST			0W			40W		
		$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	$\dot{V}CO_2$ (ml/min)	$\dot{V}E$ (l/min)	$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	$\dot{V}CO_2$ (ml/min)	$\dot{V}E$ (l/min)	$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	$\dot{V}CO_2$ (ml/min)	$\dot{V}E$ (l/min)
Young	mean	4.29	178.5	10.2	7.81	325.5	16.0	14.38	643.5	24.2
	S.D	0.42	18.0	0.7	1.13	54.4	1.4	1.99	78.1	4.0
Middle	mean	5.19	227.0	11.3	10.52	462.8	18.5	16.99	806.4	25.4
	S.D	0.78	31.1	1.9	2.23	78.6	3.2	3.37	169.7	6.0

Table 2は両群の安静時、0W定常運動時、40W定常運動時の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}E$ の値を平均値で示したものである。それぞれの値ともに中高年女性の方が女子大学生に比べて低値を示しているが、いずれも有意な差ではなかった。また、中高年女性、女子大学生の40W定常運動時の $\dot{V}O_2$ は、それぞれ $16.99 \pm 3.37$ ml/kg/min、 $14.38 \pm 1.99$ ml/kg/minであり、いずれもTable 2で示されたVTの値よりも低値を示した。

Fig.4は、換気およびガス交換kineticsの指標を両群で比較したものである。 $\tau \dot{V}O_2$ は女子大学生で $42.76 \pm 11.36$ 秒、中高年女性で $53.60 \pm 9.86$ 秒であり、中高年女性の方がやや遅延する傾向にあったが有意な差は認められなかった。また、 $\tau \dot{V}CO_2$ は女子大学生で $68.23 \pm 13.46$ 秒、中高年女性が $67.63 \pm 13.87$ 秒、 $\tau \dot{V}E$ がそれぞれ $58.35 \pm 5.65$ 秒、 $64.35 \pm 15.99$ 秒と $\tau \dot{V}CO_2$ 、 $\tau \dot{V}E$ ともに両群間に有意な差は認められなかった。

Fig.5は、換気の増加反応に対応する $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の増加速度を $\tau \dot{V}O_2 / \tau \dot{V}E$ 、 $\tau \dot{V}CO_2 / \tau \dot{V}E$ として示したものである。 $\tau \dot{V}O_2 / \tau \dot{V}E$ は、女子大学生で $0.75 \pm 0.21$ 、中高年女性で $0.85 \pm 0.11$ 、

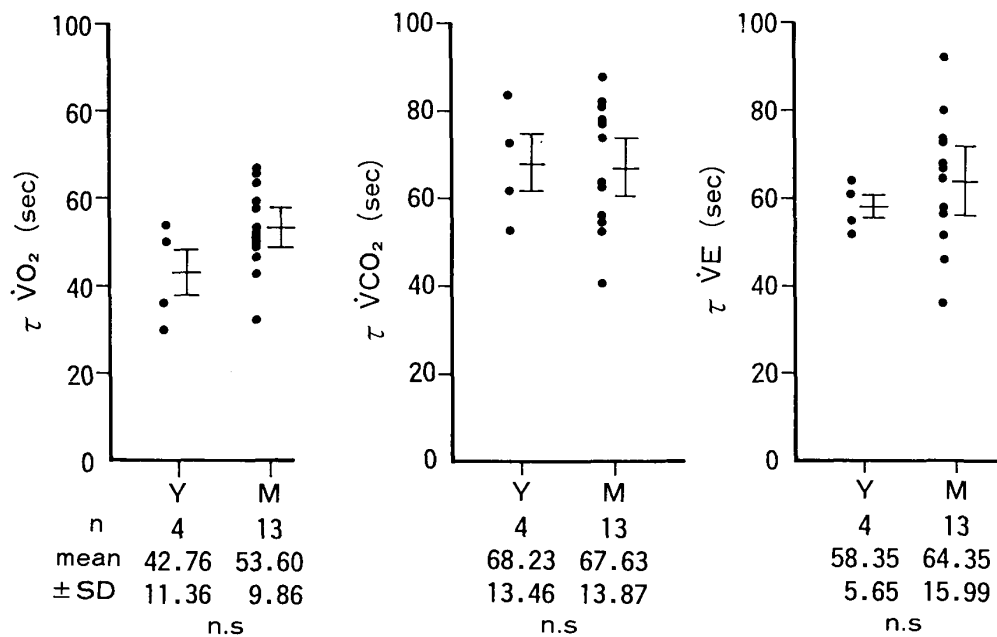


Fig.4 Comparison of  $\tau \dot{V}O_2$ ,  $\tau \dot{V}CO_2$  and  $\tau \dot{V}E$  between two groups.

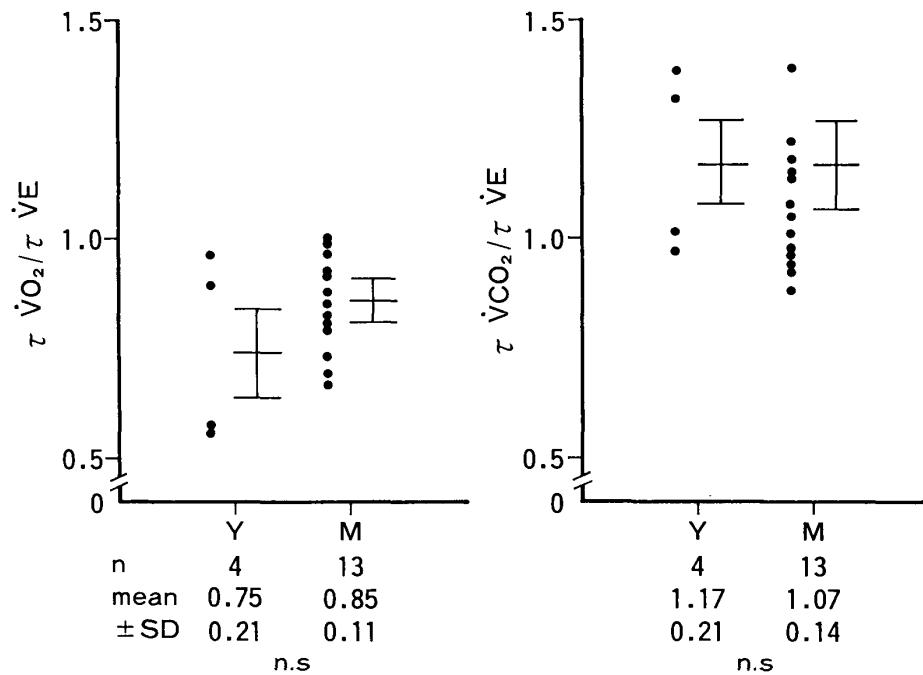


Fig.5 Comparison of  $\tau \dot{V}O_2 / \tau \dot{V}E$  and  $\tau \dot{V}CO_2 / \tau \dot{V}E$  between two groups.

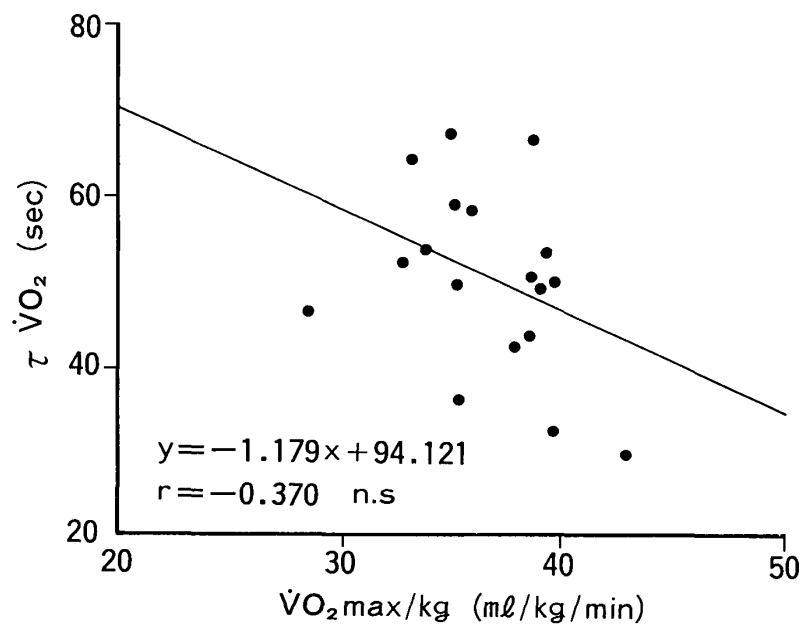


Fig.6 The relationship between  $\tau \dot{V}O_2$  and  $\dot{V}O_2 \text{max/kg}$ .

$\tau \dot{V}CO_2 / \tau \dot{V}E$ は、女子大学生 $1.17 \pm 0.21$ 、中高年女性で $1.07 \pm 0.14$ で両群間に有意差を認めなかった。また、両群ともに $\tau \dot{V}O_2$ に比べ、 $\tau \dot{V}CO_2$ 、 $\tau \dot{V}E$ が遅延する傾向にあった。

Fig.6は、 $\tau \dot{V}O_2$ と体重当りの値で示す $\dot{V}O_2 \text{max}$ との関係を示したものである。図に示されるごとく

$$y = -1.179x + 94.121 \quad (x : \dot{V}O_2 / \text{kg}, y : \tau \dot{V}O_2) \quad r = -0.37$$

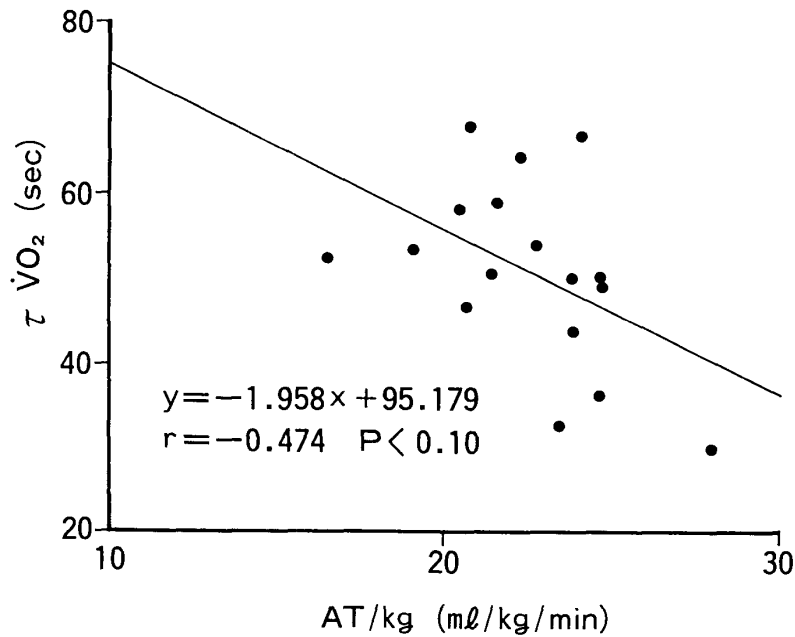


Fig.7 The relationship between  $\tau\dot{V}O_2$  and AT/kg.

と負の相関関係を示すものの有為な相関は認められなかった。

同様に  $\tau\dot{V}O_2$  と体重当りの  $\dot{V}O_2$  で示す VT との関係を示したものが Fig.7 である。得られた相関回帰式は

$$y = -1.958x + 95.179 \quad (x : VT/kg, y : \tau\dot{V}O_2) \quad r = -0.474$$

と 10% 以下の危険率で弱い相関が認められた。

## 考 察

通常運動によって活動筋の代謝亢進が起り、酸素消費量 ( $\dot{V}O_2$ ) が増加し、それに伴い炭酸ガス産生も増加する。このガス交換の程度は当然運動負荷量の増加に伴い増加し、筋組織の需要に応じた酸素の供給が必要となる。運動の初期には先ず体内ストアー (oxymyoglobin や、oxy-hemoglobin など) により供給される。しかしこれは非常に短時間で消費されてしまうので、運動開始後直ちに肺からの供給が必要となる。肺での換気増加によってガス交換を増加させ筋組織のガス交換に一致すると定常状態に達する。この運動開始から定常状態に到るまでの換気とガス交換の増加反応は、kinetics と呼ばれ 3 相に区分される<sup>7) 11) 14)</sup>。第 1 相は、運動開始後約 15 秒間の<sup>10)</sup> 変化で Wasserman は cardiodynamic hyperpnea または、cardiodynamic gas exchange と呼び<sup>12)</sup> 肺血流量の増加によるとしている。これに続く第 2 相は、定常状態に到るまでの部分で指数関数的増加反応を示す。第 3 相は定常状態の部分である。

この換気及びガス交換 kinetics の時定数を算出するためには、運動負荷が AT 以下であることが必要だといわれている<sup>11) 14)</sup>。前述のごとく  $\dot{V}O_2$  kinetics は、AT 以下の運動強度において単一の指

数関数パターンとなる。一方、AT以上の強度においては代謝性アシドーシスのため、rapid componentとslower componentからなる2相の指数パターンとなることが報告されている<sup>1,3)</sup>。本研究の40W一定負荷時に得られた $\dot{V}O_2$ 値は、ramp負荷により得られた両群のVTよりも低値を示した(Table 2)。この結果は、本研究で用いた40Wの負荷強度が、換気およびガス交換kineticsを単一の指数関数として解析したことの妥当性を示す結果であると言えよう。

中高年女性の $\tau\dot{V}O_2$ は、 $53.60 \pm 9.86$ 秒と女子大学生の $42.76 \pm 11.36$ 秒に比べ有意差は認められなかったものの遅延する傾向にあった。先行研究では健常人の $\tau\dot{V}O_2$ は、AT以下の負荷強度においてほぼ45秒であることが報告されている<sup>4) 7) 13)</sup>。中高年女性の $\tau\dot{V}O_2$ は、これらの報告よりも遅延が認められた。須田<sup>9)</sup>、千田<sup>3)</sup>は、慢性閉塞性肺疾患を有するような患者の場合には $\tau\dot{V}O_2$ 健常人よりも遅延することを報告した。そしてその理由として、活動筋の酸素需要に対する肺での換気増加反応でのアンバランスをあげている。本研究に参加した中高年女性は、医学的検診の結果、身体的に異常が認められた例はなかったものの、老化による全身持久性の低下、また、家事を中心とした断片的でしかも短時間低強度の労作を続けることによる日常の活動量の減少、そのことに伴う体力の低下など、さげられずに現れる現象があると考えられる。つまり、 $\dot{V}O_2$  kineticsがAT以下の運動強度における有酸素作業能の良い指標となるならば、中高年女性に認められた $\tau\dot{V}O_2$ の遅延は、老化、運動不足による身体の運動に対する適応能の減少と考えることができよう。

そこで、この有酸素的作業能力と $\dot{V}O_2$  kineticsとの関係を明らかにしようと試みたのがFig.6、Fig.7である。最大酸素摂取量( $\dot{V}O_{2max}$ )と $\tau\dot{V}O_2$ の間には有意な相関は認められなかったものの(Fig.6)、 $\tau\dot{V}O_2$ とVentilatory Thresholdの間には負の相関関係がある可能性が示された(Fig.7)。前述のごとく $\dot{V}O_2$  kineticsはAT以下の運動強度における有酸素的作業能力の指標となることが報告され<sup>2) 6) 13)</sup>、VT等の無氣的作業閾値は、有氣的に運動することのできる最大レベルで、 $\dot{V}O_{2max}$ にかわる有氣的作業能力のよい指標であることが報告されている<sup>11)</sup>。本研究で得られた負の相関はVTの高いものものほど $\tau\dot{V}O_2$ の短縮が見られることを示し、つまり、有氣的作業能力の高いものほど、運動開始初期の身体の酸素需要に対する適応能が高いという可能性を示唆する結果といえよう。しかし、この点については、症例数を増し、日頃の活動状況を加味したさらなる検討が必要であると思われる。

Fig.5に示されるごとく、両群ともに $\dot{V}O_2$  kineticsに対して $\dot{V}CO_2$  kineticsおよび $\dot{V}E$  kineticsは遅延する傾向にあった。 $\dot{V}O_2$ は運動開始後指数関数的に増加して定常状態に達する<sup>5) 8)</sup>。 $\dot{V}CO_2$ も指数関数的に増加するが、産生された $CO_2$ は一部組織に蓄積するため、 $\dot{V}CO_2$  kineticsは、 $\dot{V}O_2$  kineticsより遅延する。 $\dot{V}E$ も化学受容体を介して、指数関数的に増加するが換気反応は主に $CO_2$ で調節されているため、 $\dot{V}E$  kineticsは、 $\dot{V}CO_2$  kineticsに近い動態をとるといって従来の報告と一致する結果であった<sup>1) 14)</sup>。

## 総 括

中高年女性と女子学生に定量負荷を行い、換気およびガス交換kineticsを測定し比較検討するとともに、有氣的作業能力との関係を検討した。

1) 換気およびガス交換kineticsは両群で有意な差を認めなかったが、中高年女性の方が遅延する傾向にあった。

2)  $\tau\dot{V}CO_2$ とVT/kgの間には、負の相関が認められる可能性が示唆された。

3) 両群の $\tau\dot{V}CO_2$ 、 $\tau\dot{V}E$ は、 $\tau\dot{V}O_2$ に比べ遅延する傾向にあった。

尚、本論文の要旨の一部は、第43回日本体力医学会において報告した。

## 文 献

- 1) Broman, S. & Wigertz, O. : Transient dynamics of ventilation and heart rate with step changes in work load from different load levels. *Acta Physiol. Scand.*, 81 : 54, 1971.
- 2) Cerretelli, P., Pendergast, D., Pagamelli, W. C, and Rennie, D. W. : Effects of specific muscle training on  $\dot{V}O_2$  on-response and early blood lactate. *J. Appl. Physiol.*, 47 : 761, 1979.
- 3) 千田 守：慢性閉塞性肺疾患患者の運動中の低酸素血症と換気およびガス交換kineticsについて。お茶の水医学雑誌、34 : 149, 1986
- 4) Diamond, L. B., Casaburi, R., Wasserman, K. and Whipp, B. J. : Kinetics of exchange and ventilation in transitions from rest or prior exercise. *J. Appl. Physiol.*, 43 : 704, 1977
- 5) Henry, F. M. : Aerobic oxygen consumption and alactic debt in muscular work. *J. Appl. Physiol.*, 3 : 427, 1951
- 6) Hickson, R. C., Bomze, H. A. and Holloszy, J. O. : Faster adjustment of  $O_2$  uptake to the energy requirement of exercise in the trained state. *J. Appl. Physiol.*, 44 : 877, 1978
- 7) Linnarsson, D. : Dynamics of pulmonary gas exchange and heart rate changes at start and end of exercise. *Acta Physiol. Scand. (Suppl.)*, 415 : 1, 1974
- 8) Margaria, R., Mangili, F. and Cerretelli, P. : The kinetics of the oxygen consumption at the onset of muscular exercise in man. *Ergonomics*, 8 : 49, 1965
- 9) 須田吉広、竹内直文、吉田敬義、市岡正彦、東條尚子、巻口宏平、筒井秀人、千田 守、宮里逸郎、谷合 哲：慢性閉塞性肺疾患(COPD)の運動初期における動脈血ガス諸量の変動と換気およびガス交換kinetics。日胸疾会誌、25 (8) : 864, 1967.
- 10) Wasserman, K., Whipp, B. J. and Castagna, J : Cardiodynamic hyperpnea : Hyperpnea secondary to cardiac output increase, *J. Appl. Physiol.*, 36 : 457, 1974.



- 11) Wasserman, K., Whipp, B. J. and Davis, J. A. : Respiratory Physiology of exercise : Metabolism, gas change and ventilatory control. In : Respiratory Physiology III, edited by J. G. Widdicome, Baltimore, M. D., Univ. Park, 1981, vol. 23, p.149 (Int. Rev. Physiol, Ser.).
- 12) Wasserman, K. : Couping of external to internal respiration. Am. Rev. Respir. Dis., 129 : suppl. S21, 1984.
- 13) Whipp, B. J. and Wasserman, K. : Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. J. Appl. Physiol., 23 : 351, 1972
- 14) Whipp, B. J. and Ward, S. A. : Ventilatory control dynamics during muscular exercise in man. Int. J. sports Medecine, 1 : 146, 1980
- 15) Whipp, B. J., Ward, S. A., Lamarra, N., Davis, J. A. and Wasserman, K. : Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. J. Appl. Physiol. Respirat, Environ, Exercise Physical., 56 : 1506, 1982.