

最大及び最大下作業中の呼吸循環機能 におよぼす自転車エルゴメーターと トレッドミル歩行の影響

中京大学体育学部運動生理学研究室

福永哲夫・湯浅景元
朝比奈一男・藤松博
宮側敏明・小林培男
岩見恒典

The effect of bicycle ergometer and treadmill walking on
cardiopulmonary functions during maximal and submaximal exercise.

Oxygen uptake and integrated EMG from 4 leg muscles were measured
in 7 male subjects, age 22—33 years, during submaximal and maximal
treadmill and bicycle exercise.

Oxygen uptake were 0.42 l/min higher during maximal uphill treadmill
walking than during maximal bicycle exercise.

This difference was statistically significant ($P < 0.001$).

Maximal heart rate was 193 and 197 beats/min for the bicycle and
treadmill, respectively. At a given submaximal oxygen uptake, heart
rate was about the same for the two types of exercise.

The increase of the integrated EMG on bicycle was semilinear, with a
relatively greater increase at the heavier work load than treadmill walking.

作業負荷が増加するに従って摂取する酸素の
量が増す。最大酸素摂取量 (maximal oxygen
uptake) あるいは maximal aerobic power
とは、海拔 0m で大気を吸気中の身体作業中
にその個人がとり入れる最も高い酸素摂取量と
して定義されている (Åstrand²⁾)。

作業負荷のかけ方としてはトレッドミルを用
いた走及び歩、自転車エルゴメーター、ステッ
プテストそれに最近ではラダミールという方法も
考案されている。いずれにしても、最大酸素摂

取量の測定のためにはその運動にできるだけ多
くの筋の参加が必要であり、酸素摂取が作業強
度に必要なエネルギーに対応できなくなるよう
な強い作業の負荷でなければならない。

ここで最大酸素摂取量は、作業の様式が異な
った時に異なった値を示すかどうかという疑問
がでてくる。この問題について多くの研究がこ
れまでに成されてきた。Taylor たち¹⁸⁾ はトレ
ッドミル走を行なう場合、上り勾配をつけた場
合の方が水平のときに比較して最大酸素摂取量

は高い事を報告している。また、これまでに多くの研究者たちは自転車エルゴメーターでは上り勾配のトレッドミル走よりもいくらか低い $\dot{V}O_2 \text{ max}$ しか出ない事が報告されている。(Åstrand,¹⁾ Chase et al,⁷⁾ Gary et al,⁸⁾ Glassford et al.,⁹⁾ Hermansen and Saltin,¹⁰⁾)

本研究においては、トレッドミルで歩行を行ない上り勾配の角度を漸増的に増す方法 (Balke)⁶⁾ で $\dot{V}O_2 \text{ max}$ を測定し、自転車エルゴメーター (モナーク製) で測定した $\dot{V}O_2 \text{ max}$ とを比較した。同時に下肢の筋電図をとりその積分値を測定することによって、運動中の酸素摂取量と筋電図積分値との関係を求め、自転車エルゴメーターとトレッドミル歩行との差異を筋電図の方面から比較検討しようとするものである。

研究方法

被検者は年齢22才から33才までの健康な成人男子7名である。被検者の身長は $170.6 \pm 6.03 \text{ cm}$, 体重 $63.1 \pm 6.34 \text{ kg}$, 体表面積 $1.754 \pm 0.12 \text{ m}^2$ (平均値±標準偏差) であり、いずれも2~3年前まではスポーツ選手として活躍していた者である (表1)。

Table 1. Ages and physical characteristics of subjects.

Subj.	Age (yrs)	Body Height (cm)	Body Weight (kg)	Body Surface Area (m ²)
FUN	33.5	166.6	67.0	1.766
ICH	22.3	171.0	64.0	1.765
KOB	25.0	172.5	64.0	1.789
MAT	22.8	171.0	61.0	1.730
MIY	25.5	183.0	72.5	1.995
TSU	22.5	162.0	50.0	1.528
YUA	28.2	168.0	63.0	1.730
Mean.	25.7	170.6	63.1	1.754
±S. D.	3.74	6.03	6.34	0.12

被検者は実験開始前30分間仰臥位で安静にし、5分間椅座位で $\dot{V}O_2$ 及び心拍数の測定を

行なった。トレッドミル歩行及び自転車エルゴメーター運動は次のようにして行なった。

トレッドミル歩行: スピードは 100 m/min で初めの4分間は勾配0% (水平) で行ないその後4分間に5%ずつ傾斜を上げていき exhaustion まで行なった。酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), 心拍数 (HR), 呼吸数 (f), 血圧 (BP) そして筋電図積分値 (Integrated EMG) は各斜度の3分~4分の1分間測定し, exhaustion 前3分ぐらいから連続的に測定した。

自転車エルゴメーター: 1分間60回転のペダル回転数で, 初めの2分間は2kpの強度から行ない2分毎に0.25kpずつ強度を増す負荷漸増法を用い, exhaustion (60回/minの速度につけなくなった時) まで実施した。酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), 心拍数 (HR), 呼吸数 (f), 筋電図積分値 (Integrated EMG), 血圧 (BP) はそれぞれの強度での1分から2分までの1分間測定し, exhaustion 前約3分ぐらいから連続的に測定した。

同一被検者について, 上述の方法で自転車エルゴメーター及びトレッドミル歩行を測定日を変えて実施した。

呼気ガスはダグラスバッグ法で採集し, 酸素及び炭酸ガス濃度の分析はショランダー微量ガス分析器にて分析した。

筋電図は表面電極法により, 大腿直筋, 大腿二頭筋, 前脛骨筋, 腓腹筋より導出した。

血圧はリパロッチ型血圧計を用いて, 聴診器を肘部橈骨動脈上にバンソコウで固定して $\dot{V}O_2$ 及びEMG記録時に同時に測定した。

研究結果

表2及び図1は, 各被検者について, 最大心拍数 (HRmax), 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \text{ max}$), 最大換気量 ($\dot{V}E \text{ max}$), 体重あたり最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \text{ max/kg wt.}$), 最大呼吸数 (f max), 最大酸素摂取量測定時の酸素摂取率 (O_2R), 最大酸素脈 ($O_2P \text{ max}$) 及び最大1回換気量 (VTmax) についてトレッドミルと自転車エルゴメーターを比較したものである。この表及び

Table. 2. Comparison of bicycle exercise to treadmill walking according to maximal values for HR, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2/kg$, f , O_2R , O_2P , and V_T .

Subj.	H R max (beats/min)			$\dot{V}O_2$ max (l/min)			$\dot{V}E$ max (l/min)			$\dot{V}O_2/kg$ max (ml/min)			f max (breath/min)			O_2R			O_2P max			V_T (l/f)		
	B	T	B/T	B	T	B/T	B	T	B/T	B	T	B/T	B	T	B/T	B	T	B/T	B	T	B/T	B	T	B/T
FUN	182	190	0.95	3.00	3.16	0.95	166.0	159.4	1.04	44.8	47.9	0.94	58	54	1.07	27.8	24.4	1.14	16.7	16.6	1.01	2.88	2.93	0.98
ICH	192	196	0.98	3.61	4.24	0.85	174.2	174.4	1.00	55.2	66.3	0.83	76	80	0.95	26.8	30.0	0.89	18.8	21.6	0.87	2.42	2.18	1.11
KOB	184	182	1.01	3.39	3.67	0.92	178.2	180.5	0.99	52.2	57.3	0.91	88	66	1.33	24.3	25.1	0.97	19.6	21.1	0.98	3.41	2.74	1.24
MAT	202	200	1.01	3.43	3.96	0.87	172.6	163.6	1.06	56.2	64.4	0.87	66	52	1.27	25.6	29.9	0.86	17.8	19.8	0.90	2.83	3.38	0.84
MIY	216	230	0.94	3.22	3.53	0.91	140.0	159.2	0.88	44.4	45.9	0.97	72	64	1.13	28.2	27.5	1.03	15.0	15.5	0.97	2.09	2.74	0.76
TSU	188	200	0.94	2.36	3.06	0.77	120.5	144.7	0.83	46.0	61.2	0.75	61	—	—	25.4	26.3	0.97	12.8	15.3	0.84	2.00	—	—
YUA	187	184	1.02	3.13	3.44	0.91	172.7	166.6	1.04	48.9	55.5	0.88	104	66	1.58	22.4	25.2	0.89	18.2	18.3	0.99	2.86	2.74	1.04
M	193	197	0.98	3.16	3.58	0.88	160.6	164.1	0.98	46.7	56.9	0.88	75	64	1.22	25.8	26.9	0.96	17.0	18.2	0.94	2.64	2.79	1.00
±SD	11.7	14.9	0.03	0.38	0.39	0.06	20.2	10.7	0.08	4.6	7.2	0.07	15.1	9.2	0.20	1.9	2.1	0.09	2.2	2.3	0.06	0.5	0.4	0.16
Significant	n. s.			**			n. s.			**			n. s.			n. s.			*			n. s.		

*P<0.05 **P<0.01

図にみられるように、トレッドミルと自転車エルゴメーターとの間に統計的に有意な差がみられたのは、 $\dot{V}O_2$ max, $\dot{V}O_2$ max/weight, および酸素脈であった。 $\dot{V}O_2$ max 及び $\dot{V}O_2$ max/weight はトレッドミル歩行の値を100%とし

たときいずれも88%であった。酸素脈は自転車エルゴメーターが6%低くこれは5%水準で有意であった。他のいずれの項目においても両運動様式の間には有意な差はみられなかった。

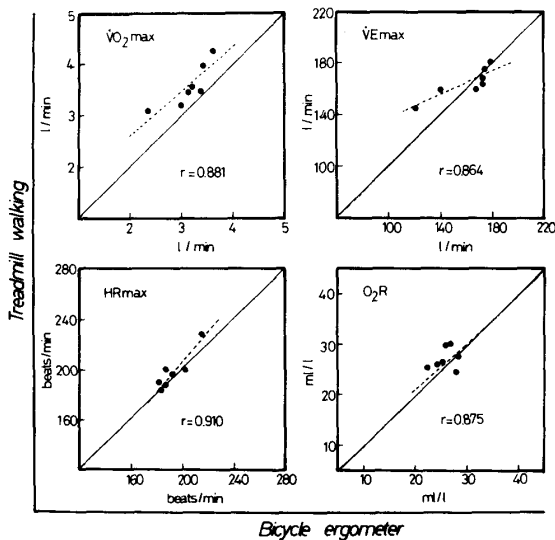


Fig. 1 Maximal values for oxygen uptake, heart rate, ventilation and oxygen removal during maximal bicycle exercise compared with corresponding values during maximal treadmill walking.

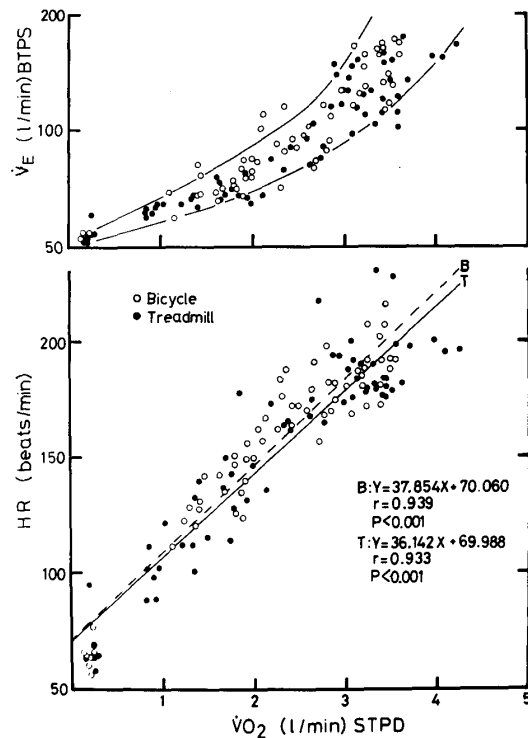


Fig. 2 Heart rate and ventilation in relation to oxygen uptake during bicycle exercise and treadmill walking.

図2は酸素摂取量と心拍数および換気量との関係を自転車エルゴメーターとトレッドミル歩行とについてみたものである。酸素摂取量の増加にともなって心拍数は増加する傾向がみられた。両者の相関係数をみると自転車エルゴメーターでは $r=0.939$ 、トレッドミル歩行では $r=0.933$ といずれも0.1%水準で有意で、非常に高い相関を示した。又、その回帰直線は自転車エルゴメーターでは、 $\hat{Y}=37.854X+70.060$ 、トレッドミル歩行では $\hat{Y}=36.142X+69.988$ と両者ともほとんど同じ回帰直線を示した。

換気量と酸素摂取量との関係は、自転車エルゴメーター、トレッドミル歩行ともに酸素摂取量の増加にともなって換気量も直線的に増加するが酸素摂取量がおよそ3 l/min以上では換気量の増加がそれまでに比較して、より大きくなる傾向がみられた。

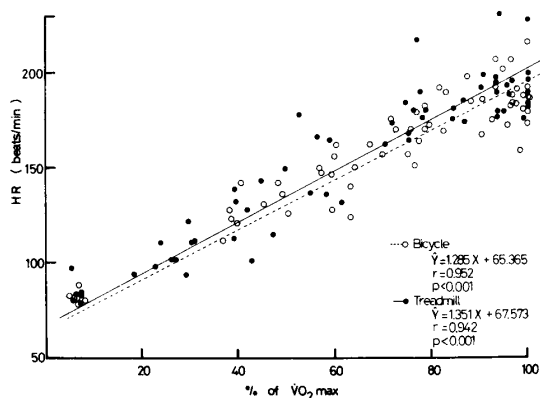


Fig. 3 Relationship between heart rate and % of maximal oxygen uptake during bicycle exercise and treadmill walking.

図3は最大酸素摂取量に対する酸素摂取量の比率と心拍数との関係をみたものである。図2の場合と同じように自転車エルゴメーター、トレッドミル歩行ともに非常に高い相関を示し、回帰直線もほぼ同じであった。すなわち最大酸素摂取量の50%の酸素摂取量ではトレッドミル、自転車エルゴメーターともに心拍数は、ほぼ120~130 (beats/min) を示した。

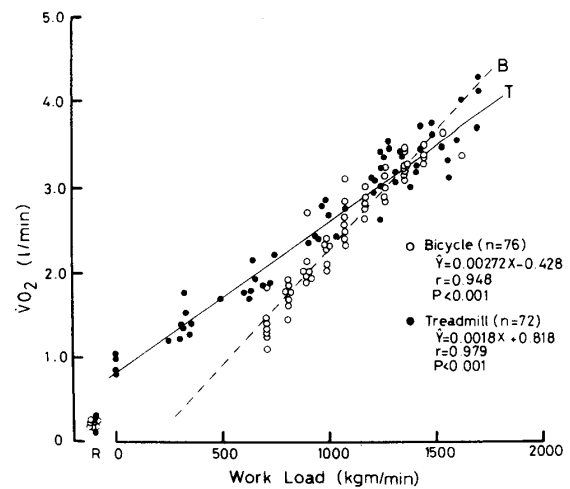


Fig. 4 Relationship between oxygen uptake and work load during bicycle exercise and treadmill walking.

図4は1分間あたりの仕事量と酸素摂取量との関係を示したものである。トレッドミル歩行における仕事量は、垂直方向への移動距離と体重とから次式のようにして算出した。

$$\text{仕事量 (kgm/min)} = \text{体重 (kg)} \times 100\text{m/min} \times \sin\alpha$$

(α :トレッドミルの傾斜角度(%))
を度に変換したもの)

従ってトレッドミルの角度(斜度)が0%のときは仕事量は“0”と算出される。このようにして求めた仕事量と酸素摂取量の間には直線関係がみられた(相関係数 $r=0.979$ $p<0.001$)。このことはトレッドミルの斜度が増していった時でも歩行の効率は変わらない事を示している。ここでトレッドミル斜度0%のときに仕事量は“0”と算出されるが、実際には1分間100mの速度で歩行しているわけで、当然仕事はしているわけである。この水平方向への歩行中の仕事量を次のようにして算出した。

仕事量と酸素摂取量との回帰直線($\hat{Y}=0.0018X+0.818$)から、斜度0% (仕事量0 kgm/min)のときの酸素摂取量は0.818 l/minである。そのうち安静時の酸素摂取量は0.23 l/minであるので、実際に歩行に要した酸素摂取量は $0.818-0.23=0.588$ (l/min)となる。ここで1 kgm/minの仕事をするのに

要する酸素の量は回帰直線の勾配から0.0018 l/min であるので、0.588 l/min の酸素量は仕事量に換算すると

$$\frac{0.588}{0.0018} = 326.6 \text{kgm/min}$$

となる。従ってトレッドミルの斜度 0% で歩行中の仕事量は 326.6kgm/min ということになる。

る。自転車エルゴメーター、トレッドミル歩行ともに仕事量が増すに従って筋電図積分値が増加する傾向を示した。トレッドミルにおいては4つの筋がほぼ同じような増加の傾向を示したが、自転車エルゴメーターにおいては各筋の増加量の差が大きく、MATをのぞくいずれの被検者においても腓腹筋（GC）の筋電図積分値の増加はほとんどみられなかった。

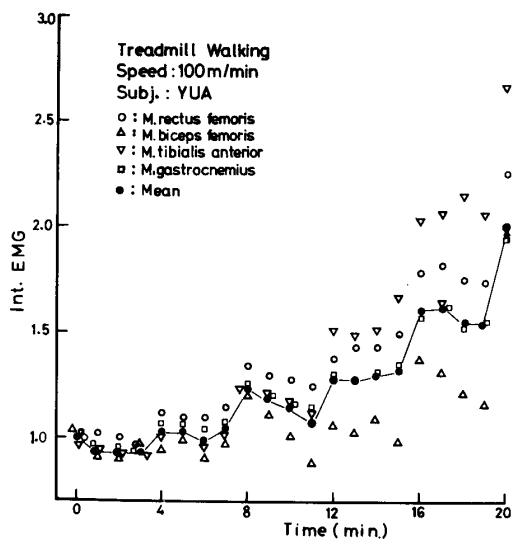


Fig. 5 Time course of Integrated EMG during treadmill walking.

図5は被検者 YUA について20分間のトレッドミル歩行中の筋電図の変化を1分間毎に連続記録したものである。たて軸は0%斜度で歩行開始1分後の積分値を1として増加量で表わしたものである。大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋ともにトレッドミルの角度が上昇するにつれて、放電の積分値が増加する傾向がみられた。又、各斜度において1分間毎の4回の積分値はほぼ同じ値を示した。全体的な傾向をみると、斜度の増加にともなって筋電図積分値の増加量は大きくなる傾向がみられた。

図6, 7は自転車エルゴメーター、トレッドミル歩行について仕事量と筋電図積分値との関係をみたものである。たて軸は4つの筋の積分値を運動開始後1分間の値を1として増加量で表わし、4つの筋の平均で表わしたものであ

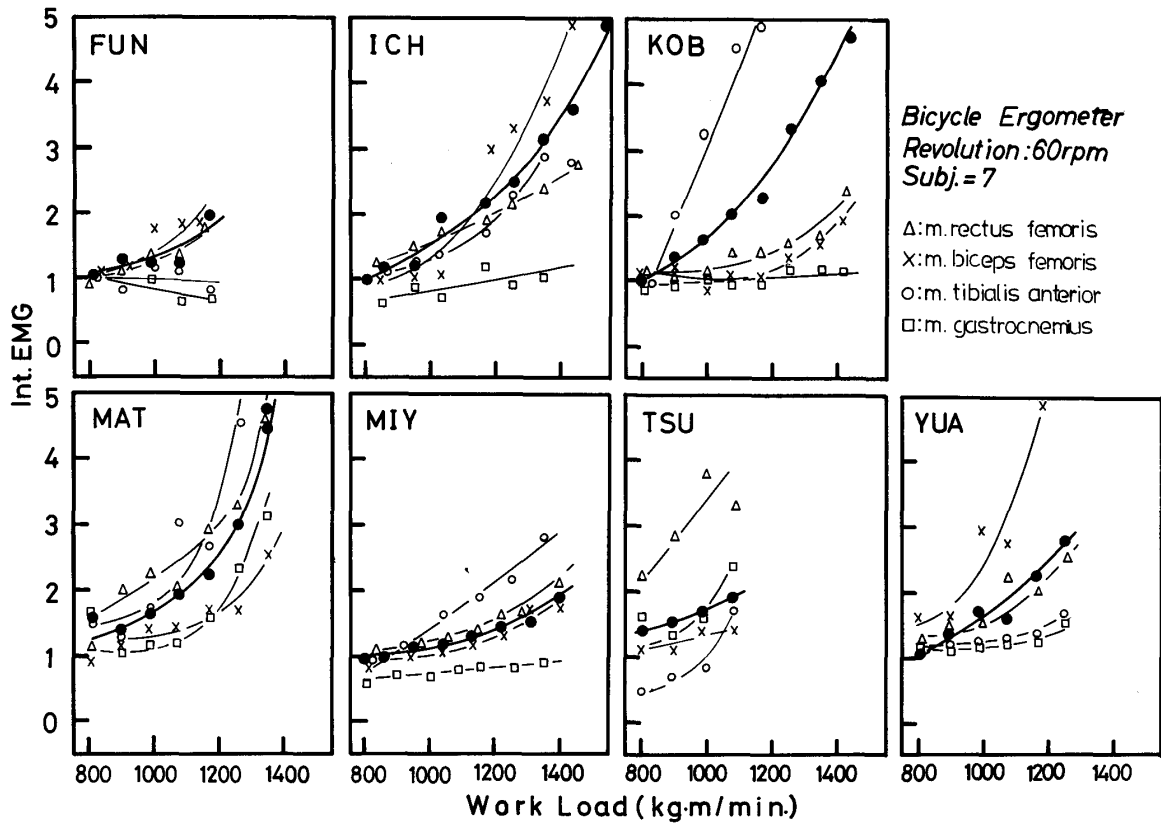


Fig. 6 Individual Integrated EMG related to work load during bicycle exercise.

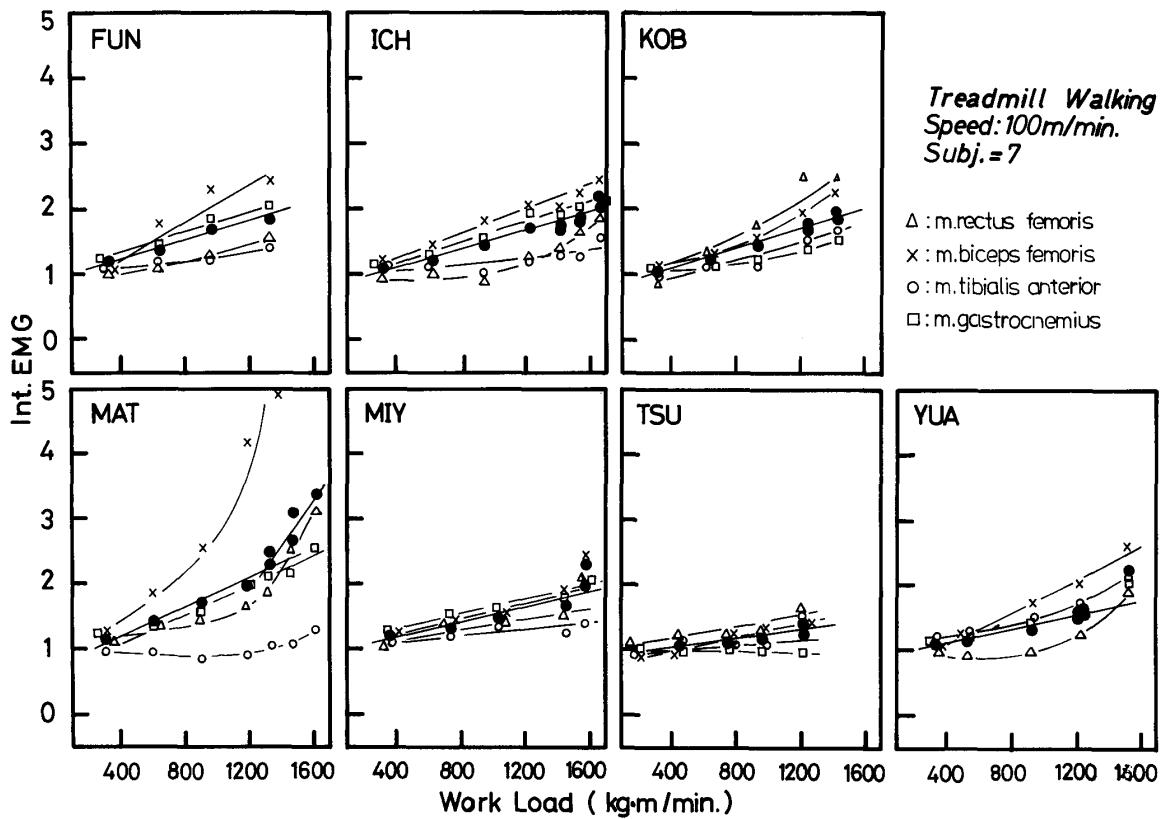


Fig. 7 Individual Integrated EMG related to work load during treadmill walking.

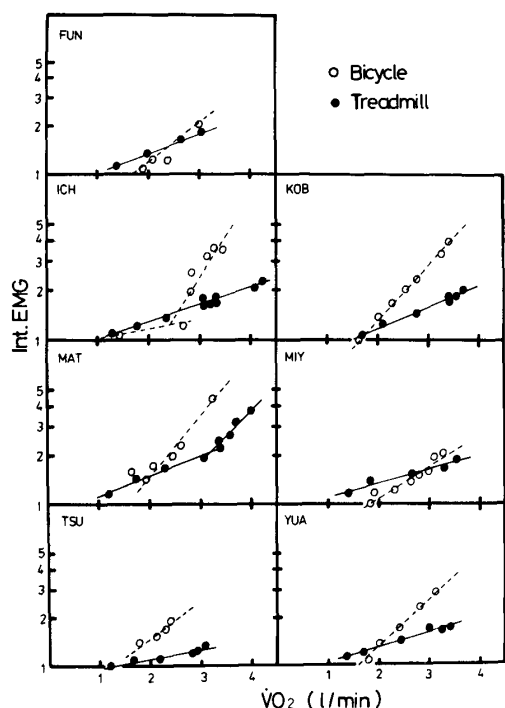


Fig. 8 Individual Integrated EMG compared with oxygen uptake during bicycle exercise and treadmill walking.

図8は酸素摂取量と筋電図積分値の増加量との関係を見たものである。筋電図積分値は対数軸で表わした。この図からみられたように酸素摂取量と筋電図積分値は、ほぼ直線関係を示した。この関係は個人によって、かなり異なった様子を示したが、自転車エルゴメーターの方がトレッドミル歩行よりも、同じ $\dot{V}O_2$ のときのEMG増加が高い傾向がみられた。

論 議

トレッドミル歩行と自転車エルゴメーターでの $\dot{V}O_{2max}$ を比較した結果、いずれの被検者においてもトレッドミルの方が自転車エルゴメーターよりも高い値を示した。トレッドミルが $3.58 \pm 0.39 \text{ l/min}$ であり自転車エルゴメーターは $3.16 \pm 0.38 \text{ l/min}$ で自転車エルゴメーターでの $\dot{V}O_{2max}$ はトレッドミル歩行の $88 \pm 0.06\%$ であった。また、 O_2P においては、5%水準で自転車エルゴメーターがトレッドミルより低い

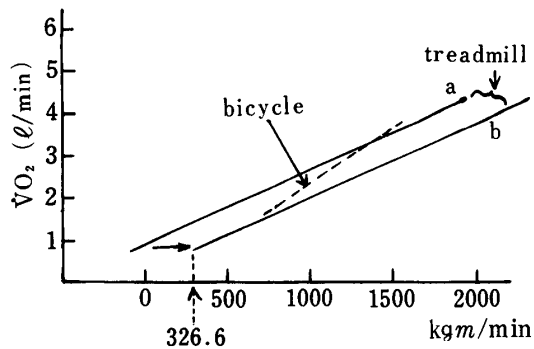
値を示した。他のいずれの項目においても自転車エルゴメーターとトレッドミルとの間に有意な差異はみられなかった。

Hermansen¹⁰⁾ たちは自転車エルゴメーターよりトレッドミル走の方が $\dot{V}O_{2max}$ は 0.26 l/min (6%)高い値を示し、最大心拍数および動静脈酸素較差は両作業方式の間に有意な差異がなく、一回拍出量はトレッドミル走が有意に高い値を示したと報告している。彼等は、最大下及び最大作業中の動静脈酸素較差に両作業方式との間に有意な差異がみられないことから作業中の血流量の分布と酸素運搬系に差異がないことを示していると報告している。本研究結果はこれまでに多くの研究者が報告している自転車エルゴメーターでの $\dot{V}O_{2max}$ はトレッドミルでの $\dot{V}O_{2max}$ よりも有意に低い値を示すという結果と同じくするものである。

最大下作業中の酸素摂取量と心拍数との関係はトレッドミル歩行及び自転車エルゴメーターとも高い相関を示し、回帰直線の間には差異はみられなかった。Hermansen¹⁰⁾ は酸素摂取量と心拍数との間に有意な相関を認め、トレッドミル走と自転車エルゴメーターとの間の回帰直線に有意な差異がなかったことを報告している。本研究においてもこの報告と全く同じ結果を示した。

作業強度 (kgm/min) と酸素摂取量との関係を見るとトレッドミル歩行および自転車エルゴメーターともに0.9以上の高い相関がみられた。トレッドミル歩行の斜度 (%) のときの仕事量を 326.6 kgm/min として図4を次のようにみることが出来る。

これは同じ仕事量であれば自転車エルゴメーターの方がトレッドミル歩行よりも酸素摂取量が多いことを示している。この回帰直線の勾配は機械的効率を表わしている、つまり自転車エルゴメーターの方が機械的効率が低いということになる。



a : Treadmill 歩行の仕事量を垂直方向への移動距離と体重とから求めた場合の $\dot{V}O_2$ と仕事量との回帰直線 $\hat{Y}=0.0018X+0.818$

b : Treadmill の水平歩行時の仕事量を求めて a の回帰直線を移動した場合の回帰直線 $\hat{Y}=0.0018X+0.23$

ここで仕事量と筋電図積分値の増加量との関係を見ると、自転車エルゴメーターの方が仕事量の増加にともなう筋電図積分値の増加がトレッドミル歩行よりかなり大きい傾向がみられた。また、 $\dot{V}O_2$ と筋電図積分値増加量との関係を見ると、ここでも同じ $\dot{V}O_2$ においては自転車エルゴメーターの方がトレッドミルより高い値を示した。Hermansen¹⁰⁾ やHols たち¹²⁾ は自転車エルゴメーターでの $\dot{V}O_2 \max$ がトレッドミル走に比べて低い原因として、自転車エルゴメーターでの最大作業中に局所的筋疲労が制限因子となり、それ故に呼吸、循環機能が最大に働き始める前にこの事が作業制限因子となるのであろうと報告している。本研究において、作業強度が増すに従って筋電図積分値増加量はトレッドミル歩行に比較して、自転車エルゴメーターの方が大きい傾向がみられ、さらに自転車エルゴメーターでは各筋群の筋電図積分値増加量に非常に差が大きく、腓腹筋などは、ほとんど増加がみられず、また作業後の被検者の感想でも腓腹筋はほとんど疲労がないことを述べている。従って、自転車エルゴメーターではトレッドミル歩行に比較して、より局所的な筋が重点的に活動し、その為に同じ仕事量の作業をする場合の酸素摂取量が高くなり（すなわち

作業効率が低い)、局所的筋の疲労が制限因子となり、Hermansen たち¹⁰⁾ の報告のように、呼吸、循環機能を十分に動員する以前に作業を続けることができなくなるものと考えられる。

結 論

健康な成人男子 (22才—33才) 7名についてトレッドミル歩行と自転車エルゴメーターの2つの作業様式にて最大及び最大下作業を行なった結果、次の事が明らかとなった。

1) 最大酸素摂取量はトレッドミル歩行では 3.58l/min (56.9ml/kgmin) であり、自転車エルゴメーターでは 3.16l/min (46.7ml/kgmin) であり、トレッドミル歩行に比較して自転車エルゴメーターの $\dot{V}O_2 \max$ は88%であった ($P<0.001$)。酸素脈 ($\dot{V}O_2/\text{HR}$) については自転車エルゴメーター (17.0l/beat) がトレッドミル (18.2l/beat) の94%であり、これは5%水準で有意であった。HRmax, VE max, f max, O₂R, V_Tにトレッドミルと自転車エルゴメーターとの間の有意差はみられなかった。

2) 最大下作業中の心拍数と酸素摂取量の間には高い相関関係がみられ (自転車エルゴメーター $r=0.939$ $P<0.001$, トレッドミル $r=0.933$ $P<0.001$) のいずれの作業方式においても $\dot{V}O_2$ の増加に比例して心拍数は直線的に増加する傾向がみられた。また心拍数と最大酸素摂取量に対する酸素摂取量との比率においても同じ結果であった。

3) トレッドミル、自転車エルゴメーターのいずれにおいても仕事が増すに従って酸素摂取量は増加する傾向がみられた。

4) トレッドミル水平歩行中の仕事量を算出した結果 326.6kgm/min となった。

5) 筋電図積分値の増加は仕事量 (kgm/min) および $\dot{V}O_2$ (l/min) の増加にともなう増加する傾向を示し、その増加傾向は自転車エルゴメーターの方がトレッドミルに比べて、大きい事がみられた。

引用文献

- 1) Åstrand, P.O., and B. Saltin. : Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J. Appl. Physiol.* 16:977—981, 1961,
- 2) Åstrand, P.O., and Rodahl, K.: *Textbook of work physiology.* 1970.
- 3) Bigland, B., and O.C.J. Lippold. : The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscle. *J. Physiol., London* 123:214—224, 1954.
- 4) Bigland, B., and O.C.J. Lippold.: Motor unit activity in voluntary contraction of human muscle. *J. Physiol., London* 125:322-335, 1954.
- 5) Bigland, B., and J.J. Woods.: Integrated EMG and oxygen uptake during dynamic contraction of human muscle. *J. Appl. Physiol.* 36(4):475—479, 1974.
- 6) Balke, B.: Correlation of static and physical endurance. 1. A test of physical performance based on the cardiovascular and respiratory responses to gradually increased work. *USAF School of Aviation Medicine. Report 1:1—14,* 1952.
- 7) Chase, G.A., C. Grave, and L.B. Bowell. : Independence of changes in functional and performance capacities attending prolonged bed rest. *Aerospace Med.* 37:1232—1238, 1966.
- 8) Gary, S. et al. : Specificity of cardio-respiratory adaptation to bicycle and treadmill training. *J. Appl. Physiol.* 36(6):753—756, 1974.
- 9) Glassford, R. G., G.H.Y. Baycroft, A. W. Sedgwick, and R.B.J. Macnab. : Comparison of maximal oxygen uptake values determined by predicted and actual methods. *J. Appl. Physiol.* 20:509—513, 1965.
- 10) Hermansen, L., and B. Saltin. Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.* 26:31—37, 1969.
- 11) Henriksson, J., and F. Petersen. Integrated electromyography of quadriceps femoris muscle at different exercise intensities. *J. Appl. Physiol.* 36(2):218—220, 1974.
- 12) Hols, M., R.A. Binkhorst, A. Smeekeskuy, and A.C. Vissers. : Measurements of forces exerted on pedal and crank during work on a bicycle ergometer at different loads. *Int. Z. Angew. Physiol.* 26:33—42, 1968.
- 13) Ikai, M., et al. Aerobic capacity of Japanese people. : *Res. Phys. Ed.* 14:137—142. 1970.
- 14) 猪飼道夫編, 身体運動の生理学, 杏林書院, 1973.
- 15) Karpovich, V. ; *Physiology of muscular activity.* 猪飼道夫, 石河利寛訳, ベースボールマガジン社, 1971.
- 16) Lippold, O.C.J. : The relation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension. *J. Physiol. Rondon* 117:492—499. 1952.
- 17) Miyamura, M. and Y. Honda. : Oxygen intake and cardiac output during maximal treadmill and bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.* 32(2):185—188, 1972.
- 18) Taylor, H.L., E. Buskirk, and A. Henschel. : Maximal oxygen intake as an objective measure of cardiorespiratory performance. *J. Appl. Physiol.* 8:73, 1955.