

## 走運動におけるエネルギー出力および機械的 効率におよぼす加重負荷の影響

松尾 彰文\*、福永 哲夫\*、平田 敏彦\*

\* 東京大学教養学部

\*\* 岡山県立短期大学

### The effect of additional weights on energy output and mechanical efficiency in running

Akifumi Matsuo\* , Tetsuo Fukunaga\* ,  
and Toshihiko Hirata\*\*

\* Department of Sports Sciences, College of Arts  
and Sciences, University of Tokyo

\*\* Okayama Prefectural Junior College

#### Abstract

The purpose of this study is to observe the effect of additional weights on the external work and energy consumption. Six male long distance runners were requested to run with and without additional weights of 5 and 10 kg. Additional weights of 5 and 10 kg which were attached to runners body by using specially designed jacket were equivalent to 9 % and 18 % of subject's body mass, respectively. The external work ( $W_{ext}$ ) during running on the experimental running track with five various speeds from slow ( $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) to sprint ( $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) was calculated from the ground reaction force and running velocity. The energy consumption was estimated from the oxygen uptake while running on a treadmill at various steady-state speeds ranging from  $2.5\text{--}3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Both the external work per distance of run ( $W_{ext}$ ) and energy consumption per distance of run (EC) per total body mass (body mass + excess mass) indicated approximately the constant values of  $1.26 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $3.80 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, independent of running velocity. There were no effect of additional weight on  $W_{ext}$  and EC per total body mass. The ratio of  $W_{ext}$  to EC,  $W_{ext}/EC$ , was no effected by the additional weight, and indicated the approximately constant values range from 27 to 44 % in each subject.

*Key words: additional weights, external work, energy consumption, running, mechanical efficiency.*

走運動中、身体重心は進行方向の加速と減速、上昇と下降を繰り返す<sup>1,2,3)</sup>。この時の身体がなした外的仕事は、身体重心を進行方向に加速させたものと上昇させたものの合計として測定されてきている。走運動中の体重当たりの外的仕事は速度に比例してほぼ一定の割合で増大し、その傾向には性年齢による顕著な差がないと報告されている<sup>27)</sup>。

身体に重量を負荷しての歩・走運動を行うことは荷物の運搬などの他にトレーニングの手段としてよく見られる。身体に重量を負荷した走運動中のエネルギー消費量は重量に比例して増大するが体重あたりの値でみると顕著な差が見られないことが報告されている<sup>6,7,22)</sup>が、身体重心の動きや外的仕事量からみた加重重量の影響は明らかにされていない。

本研究では、外部から身体に与えた重量がエネルギー消費量、外的仕事量および身体重心の動きへ与える影響を明らかにしようとした。

## 方法

被検者は大学生長距離ランナー6名であった。被検者の身体的特性は表1に示した。身体に負荷した重量は各被検者とも、5kgと10kgであった。各重量の身体への装着は鉛板を固定したジャケットを着用することによりおこなった。

走行中の外的仕事は地面反力と走速度から算出した。地面反力の測定にはKISTLER社製圧力盤を用いた。走速度は圧力盤の前後3mの区間に設置した光電管で測定した通過時間から算出した。歩数は圧力盤付近の走路上に取りつけた加速度により記録した接地時の衝撃波と圧力盤に接地したときの衝撃波までの時間から算出した。なお、歩幅は走速度を歩数で除することにより求めた。圧力盤と光電管及び加速度計から得られた電気信号はデータレコーダーで磁気テープに記録した。外的仕事はミニコンピューターを用いて算出した。

被検者は各負荷(0kg, 5kg, 10kg)ともにそれぞれ5種類の走速度で圧力盤上を通過した。予め、被検者には圧力盤の前後で加速したり減速したりしないように指示した。測定に先だって、

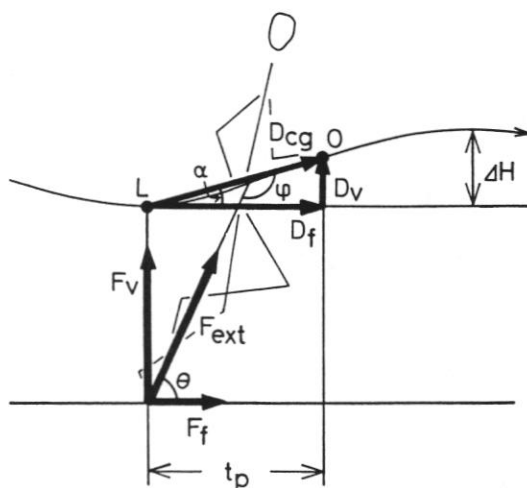


Fig.1. Selected mechanical parameters used to calculate the movement characteristics of the center of mass.

このための練習を十分に行なった。なお、圧力盤の前後3mの区間で走速度が10%以上異なった場合には再度測定をおこなった。

図1に、接地中、身体を推進させるために作用した力と身体重心の軌跡を模式的に示した。

走運動中、身体を推進させるための外的仕事は、

$$W_{\text{ext}} = F_{\text{ext}} \cdot D_{\text{cg}} \cdot \cos \phi \quad \dots \dots \dots 1)$$

と表わされる<sup>1)</sup>。ここで  $F_{\text{ext}}$  は、地面反力、 $D_{\text{cg}}$  は身体重心の移動距離、 $\phi$  は地面反力のベクトルが身体重心の移動方向となす角度である。1)式は、 $F_{\text{ext}}$  と  $D_{\text{cg}}$  を前進方向 ( $F_f$ ,  $D_f$ ) と垂直方向の成分 ( $F_v$ ,  $D_v$ ) に分けると、

$$W_{\text{ext}} = F_f \cdot D_f + F_v \cdot D_v \quad \dots \dots \dots 2)$$

となる<sup>1)</sup>。ここで、 $F_f$  と  $D_f$  の積は身体を前進方向に加速するための仕事 ( $W_f$ ) であり、前進方向の運動エネルギーの増加量に等しい。また、 $F_v \cdot D_v$  は、身体を持ち上げるための仕事 ( $W_v$ ) であり、位置エネルギーの増加量に等しい。本研究ではCavagna, G. A.<sup>3)</sup>の方法に従って、次のようにして外的仕事を求めた。 $W_f$  は、

$$W_f = \frac{1}{2} V_f \int F_f dt \quad \dots \dots \dots 3)$$

として算出した。ここで、 $V_f$  は光電管の信号から求めた圧力盤上を通過したときの平均走速度である。一方、 $W_v$  は次式より算出した。

$$W_v = \frac{1}{2} \int (F_v - TM g) dt)^2 + TM \int g (F_v - TM g) dt^2 \dots\dots\dots 4)$$

ここで、TM は身体の総質量、g は重力加速度である。

身体を推進させるために作用した平均の力 (F<sub>ext</sub>) は、

$$F_{ext} = \sqrt{F_f^2 + F_v^2} \dots\dots\dots 5)$$

と算出した。ここで F<sub>f</sub> は、身体を前進方向に加速するために作用した平均の力である。

走運動中の身体重心の動きは地面反力から推定することが可能である<sup>5)</sup>。

本研究では地面反力から接地中の身体重心の移動を下記の方法で推定した。接地中、身体を前進方向に加速するときの移動距離 (D<sub>f</sub>) は、

$$D_f = \frac{1}{2} (V_{f1} + V_{f2}) \cdot t_p \dots\dots\dots 6)$$

として算出した。ここで t<sub>p</sub> は、身体を推進させるための力の作用時間である。身体重心の垂直方向における移動距離 (D<sub>v</sub>) は、

$$D_v = t_p \int (F_v - TM g) dt^2 \dots\dots\dots 7)$$

として算出した。又、ある一定の速度を維持するためのパワー (P<sub>ext</sub>) は、

$$P_{ext} = W_{ext} \cdot S_f \dots\dots\dots 8)$$

として算出した。ここで、S<sub>f</sub> は1秒間あたりの歩数である。走行距離当たりの仕事量 (MWC)は、

$$MWC = W_{ext} S_1 \dots\dots\dots 9)$$

として求めた。ここで、S<sub>1</sub> は歩幅である。

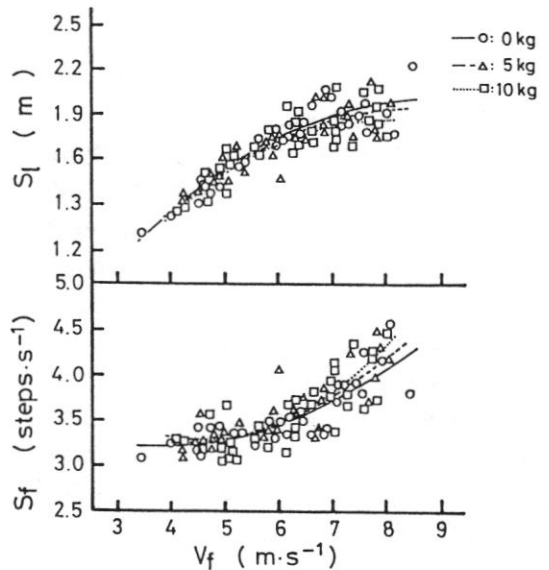
酸素摂取量 (V̇O<sub>2</sub>) の測定はトレッドミル (傾斜0%) を用いて、2.50, 2.83, 3.17, 3.50 m・s<sup>-1</sup> の4種の走速度で実施された。被検者は各負荷 (0 kg, 5 kg, 10 kg) とともに4分間の走運動を実施した。走運動中の呼気量、呼気ガス中の酸素及び二酸化炭素濃度の測定と V̇O<sub>2</sub> 算出は、O<sub>2</sub> SCREEN (JEAGER 社製) を用いて30秒ごとに実施された。心拍数 (HR) はカーディオスーパー (三栄社製) を用いて記録した ECG により算出された。運動開始後、ほぼ steady-state に達したと思われる2分から4分までの値を平均して各速度における測定値とした。なお、最大酸素摂取量 (V̇O<sub>2</sub> max) は、無負荷 (0 kg) で、速度漸

増法により求めた。本研究では走運動中の消費エネルギーを運動中の V̇O<sub>2</sub> から安静時の値を差し引いて求めた。移動距離当たりの消費エネルギー (EC) は消費エネルギーを走速度で除することで求められた。

**結果**

被検者の身体に負荷した重量は、5 kg では体重の約 8%, 10 kg では約 17% に相当した。

走速度 (V<sub>f</sub>) と歩数 (S<sub>f</sub>) 及び歩幅 (S<sub>1</sub>) の関係についてみたものが図 2 である。走速度が遅いところ (3-5 m・s<sup>-1</sup>) では走速度の増加にともない歩数よりも歩幅の増加が顕著であるが、さらに速いところ (5-8 m・s<sup>-1</sup>) では逆に歩幅よりも歩数の増加が顕著になる傾向がみられた。負荷重量の影響についてみると比較的遅い速度 (7 m・s<sup>-1</sup> 以下) では速度-歩数及び速度-歩幅関係は各重量ともほぼ同様の傾向を示し、負荷重量による明確な差異はみられなかった。一方、最大速度付近では重量に比例して歩幅は減少し歩数が増大する傾向がみられたが、有意ではなかった。



**Fig.2.** The relationship between running velocity and step frequency and step length with or without additional weight of 5, or 10 kg.

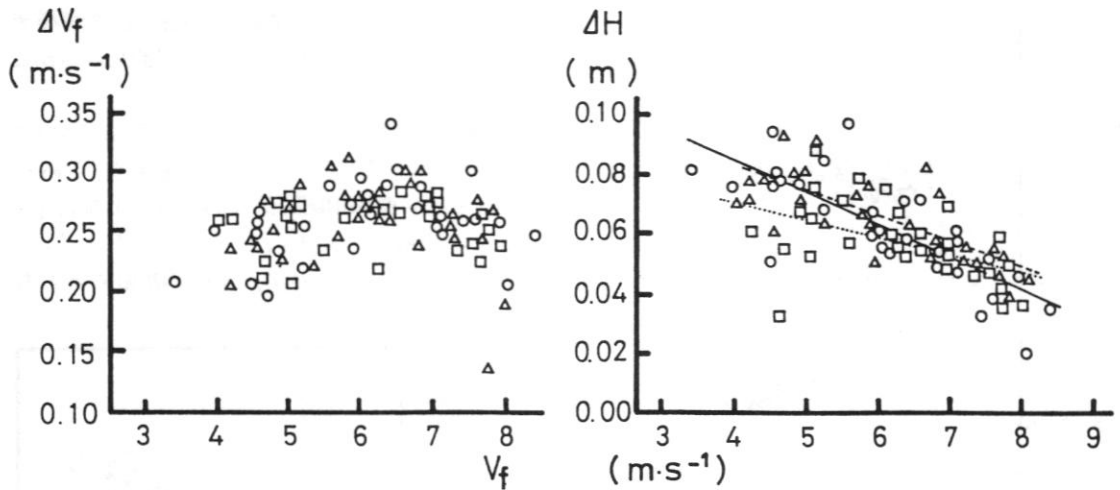


Fig.3. Forward velocity changes ( $\Delta V_f$ ) and vertical displacement of the center of mass ( $\Delta H$ ) in one step cycle as a function of running velocity ( $V_f$ ). Symbol same as fig. 2.

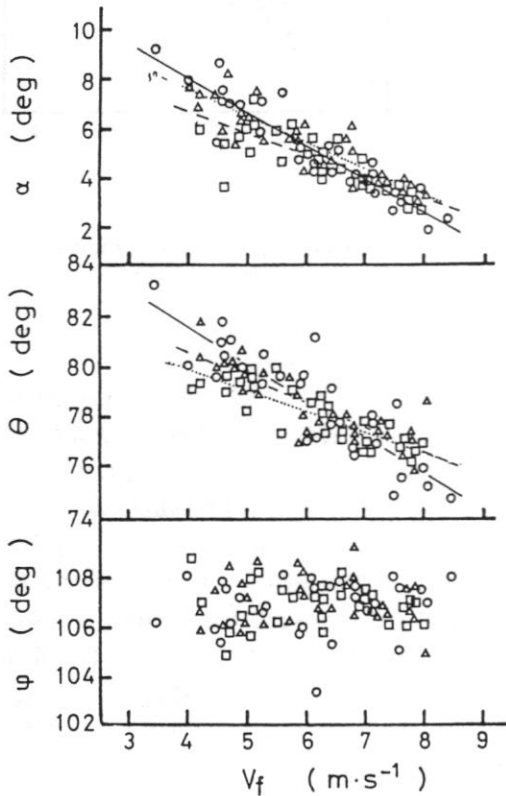


Fig.4. The angle of vector of the ground reaction force and the displacement of the center of mass as a function of running velocity ( $V_f$ ). Symbol same as fig. 2.

接地中の前進方向の走速度の変化 ( $dV_f$ ) および1歩内の重心の上昇高 ( $dH$ ) と  $V_f$  の関係について示したのが図3である。 $dV_f$  は  $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  では最大値 (約  $0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) を示し、それよりも遅くとも速くとも低い値を示す傾向がみられた。 $dH$  は各重量とも走速度の増大にともない  $0.08\text{ m}$  ( $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) から  $0.04\text{ m}$  ( $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) まで減少する傾向がみられた ( $0\text{ kg}; r = -0.785, p < 0.001, 5\text{ kg}; r = -0.752, p < 0.001, 10\text{ kg}; r = -0.500, p < 0.01$ )。走速度に対する  $dH$  の減少傾向に負荷重量による明らかな差異はみられなかった。

図4は、走速度と身体重心の変化のベクトルと水平面のなす角度 ( $\alpha$ )、地面反力の変化のベクトルのなす角度 ( $\theta$ ) および身体重心の移動方向と地面反力のベクトルの方向との角度 ( $\phi$ ) の関係についてみたものである。 $\alpha$  は各負荷重量とも  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  で  $8\text{ deg}$  であるが、 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  では約  $3\text{ deg}$  に減少する傾向がみられ ( $0\text{ kg}; r = -0.951, p < 0.001, 5\text{ kg}; r = 0.946, p < 0.001, 10\text{ kg}; r = 0.825, p < 0.001$ )、 $\theta$  は  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  で

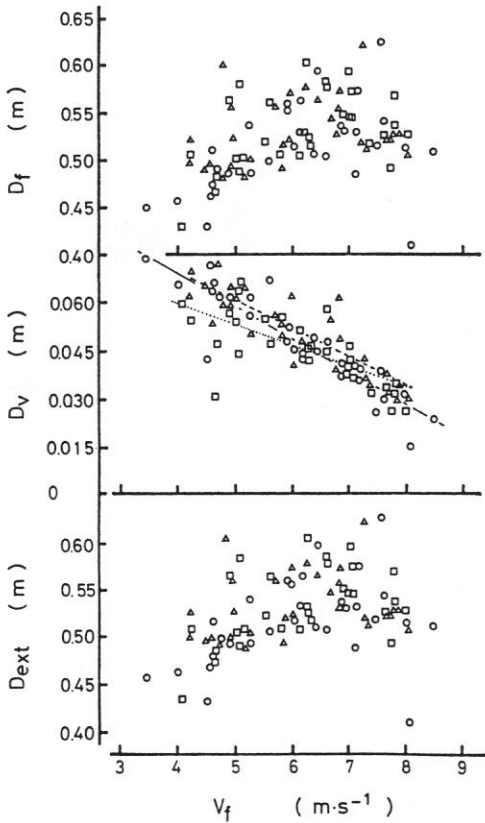


Fig.5. The displacement of the center of mass and the vertical and forward component of it, as a function of running velocity ( $V_f$ ). Symbol same as fig. 2.

82 deg から  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  では約 76 deg まで減少する傾向がみられた。一方、 $\theta$  は  $V_f$  に対してほぼ 107 deg を示す傾向がみられたが、統計的に有意な変化はみられなかった。 $\alpha$ 、 $\theta$  および  $\phi$  ともに負荷重量の増加による明らかな影響はみられなかった。

図 5 は、接地中の身体重心の変化の前進方向の成分 ( $D_f$ )、垂直方向の成分 ( $D_v$ ) 及び身体重心の変位のベクトル ( $D_{cg}$ ) を走速度に対してプロットしたものである。 $D_f$  および  $D_{cg}$  は、両者とも各負荷重量において、 $V_f$  との間には有意な相関関係はみられなかった。一方、各負荷とも  $D_v$  は  $V_f$  との間には 0.1% 水準で有意な相関関係 (0 kg;  $r=0.916$ , 5 kg;  $r=0.920$ , 10 kg;  $r=0.908$ ) があり、 $V_f$  に比例して  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  で約

0.06 m から  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  で約 0.03 m まで減少する傾向を示した。また、各負荷重量間に明らかな差異はみられなかった。

走速度と外的パワー ( $P_{ext}$ ) の関係についてみたのが図 6 である。各負荷重量とも、 $P_{ext}$  は  $V_f$  と高い直線相関関係 (0 kg;  $r=0.980$ ,  $p < 0.001$ , 5 kg;  $r=0.990$ ,  $p < 0.001$ , 10 kg;  $r=0.986$ ,  $p < 0.001$ ) があり、 $V_f$  の増加にともな

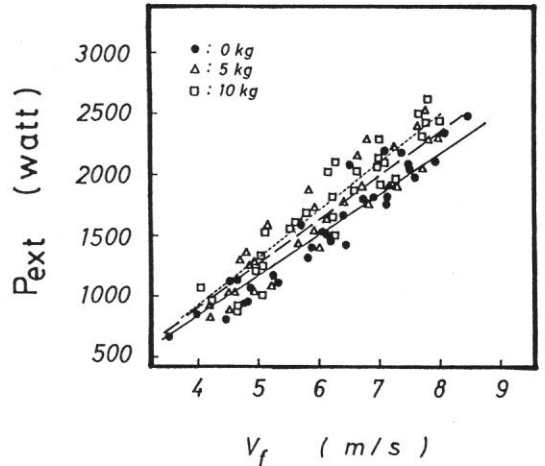


Fig.6. The relationship between running velocity and external power.

い直線的に増大する傾向を示した。

図 7 は、トレッドミル走の速度 ( $V_{ftm}$ ) と HR、 $\dot{V}E$  および  $\dot{V}O_2$  を負荷ごとの平均値と標準偏差値でみたものである。HR、 $\dot{V}E$  および  $\dot{V}O_2$  とも  $V_{ftm}$  の増大にともない高い値を示す傾向がみられた。HR についてみると  $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  において各重量で統計的に有意な差がみられたが、他には顕著な差はみられなかった。 $\dot{V}E$  についてみた場合、各速度で統計的には有意ではないが負荷重量の増加にともない高い値を示す傾向がみられた。一方、 $\dot{V}O_2$  についてみると各速度で負荷重量にともない有意に高い値を示した。

移動距離あたりの消費エネルギー (EC) とトレッドミル走の速度の関係について各負荷ごとに平均値と標準偏差でみたのが図 8 である。各速度とも負荷重量に比例して有意に高い値を示す傾向がみられたが、 $2.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  における 0

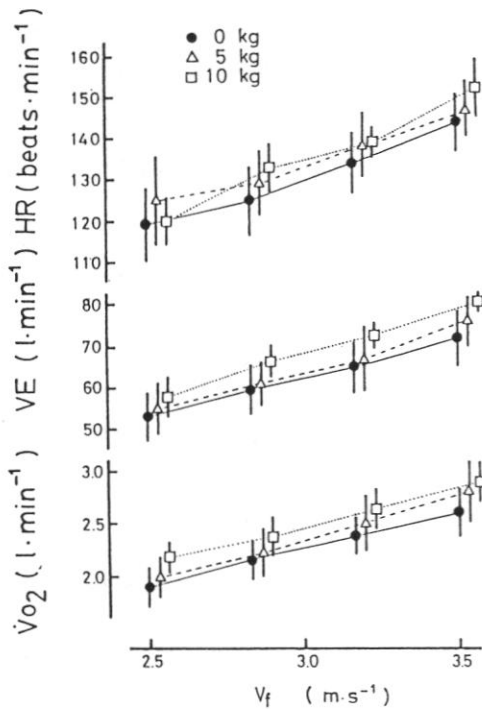


Fig.7. Mean and SD values for heart rate, expiratory gas volume, oxygen uptake for running with or without additional weight of 5, or 10 kg at different running speeds.

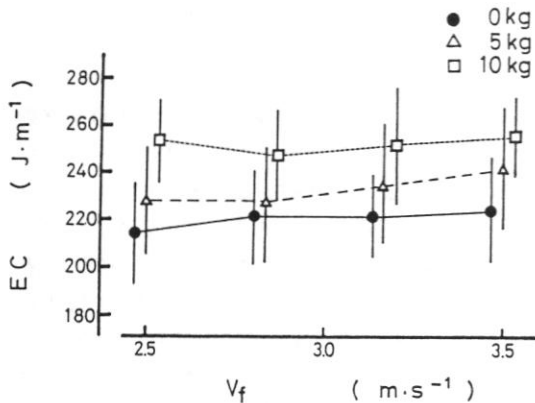


Fig.8. Mean and SD values for energy consumption per distance (EC) for each additional weight condition at different running speeds.

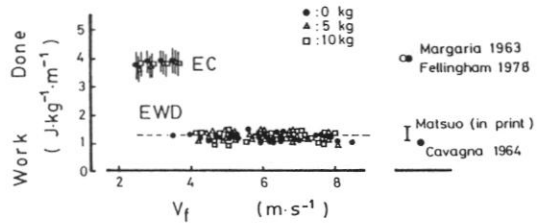


Fig.9. Mean and SD values for energy consumption and external mechanical work at different running velocity.

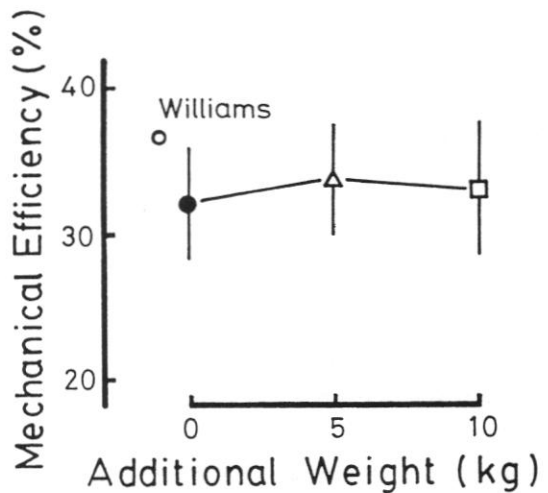


Fig.10. Mean and SD values for mechanical efficiency at various additional weights. Symbol same as fig. 2.

kg と 5 kg, 5 kg と 10 kg の間には統計的な有意な差はみられなかった。各負荷重量とも  $V_f \cdot t_m$  に対してそれぞれではほぼ同水準の値を示し、各速度間で有意な差はみられなかった。図9は走速度を総体重あたり走行距離あたりの消費エネルギー ( $EC/TM$ ) と外的仕事 ( $MWC/TM$ ) の関係について示したものである。 $EC/TM$  は  $V_f$  に対して、各負荷重量ともに  $3.5-4.0 J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$  の値を示した。 $MWC/TM$  は、ほぼ  $1.26 J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$  の値を示し、両者とも負荷重量及び  $V_f$  とは無関係にほぼ一定の値を示した。図10は距離あたりの外的仕事と消費エネルギーの比率 ( $MWC/EC$ ) を負荷重量ごとの平均値と標準偏差でみたものである。 $MWC/TM$  は各負

荷重量ともほぼ 33-34%の値を示し、各負荷重量間に統計的に有意な差はみられなかった。

### 論 議

走速度の増加に対して歩数は指数関数的に増加する傾向を示し、特に約  $6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上の速い速度での増加傾向は顕著であった。一方、歩幅は  $6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  あたりまでは顕著な増加傾向を示すが、それ以上の速度で比較的ゆるやかな増加傾向を示した。このような歩速度と歩数および歩幅の関係は従来から報告されている傾向とはほぼ一致した<sup>9, 17, 18, 19, 25)</sup>。Robertson<sup>34)</sup>たちは歩行時の重量を身体に負荷することにより歩数は増大し歩幅は減少することを報告している。本研究では  $7\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下の比較的遅い速度では負荷重量の増加による歩幅および歩数に明らかな差異は認められなかった。一方、最大速度近く ( $7-8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) では負荷重量に比例して歩数は増加し歩幅は減少する傾向がみられたが、無意味な差ではなかった。走運動中の運動エネルギーが走速度の 2 乗に比例し速度が大きいほど接地時の衝撃力も増大する<sup>26)</sup>ことが報告されている。負荷重量の力学的影響は速度の 2 乗に比例して増大するため、比較的速い速度で歩数と歩幅への影響が顕著になったものと考えられる。

接地中の身体重心の移動のベクトル、移動距離に負荷重量による顕著な差異がみられなかった。身体重心の動きが体肢および体幹の動きにより左右されることから、本研究の結果は負荷重量による走動作への影響がほとんどないことを示すものである。

接地中の外的パワー ( $P_{\text{ext}}$ ) と走速度 ( $V_f$ ) は有意な直線関係がみられた。松尾と福永<sup>26)</sup>は長距離および短距離選手における外的パワーと走速度は直線関係があることを報告している。本研究結果はこの報告とはほぼ一致した。

移動距離あたりの外的仕事 (MWC) は走速度とは無関係にほぼ一定の値を示した。Cavagna たち<sup>1, 3, 4)</sup>は移動距離あたりの外的仕事が走速度とは関係なくほぼ一定の値 ( $1.0-1.2\text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) を示すことを報告している。Matsuo, A. たち<sup>28)</sup>は女子の長距離選手の場合 MWC は

走速度とは無関係に  $1.2-1.5\text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$  の範囲で各被検者でほぼ一定の値を示し、3000 m 走の記録と正の相関があることを報告している。本研究結果は  $1.2-1.3\text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  で走速度とは無関係に一定の値を示し従来の研究結果とはほぼ一致した。

本研究では加重負荷による MWC への影響は明らかではなかった。MWC は、1 式と、9 式から、

$$\begin{aligned} \text{MWC} &= F_{\text{ext}} D_{\text{cg}} \cos \phi / S_1 \\ &= m \cdot A_{\text{ext}} \cdot D_{\text{cg}} \cdot \cos \phi / S_1 \quad \dots 10) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $A_{\text{ext}}$  は身体重心の加速度である。また、10 式は、

$$\begin{aligned} \text{MWC} &= (W_f + W_v) / S_1 \\ &= m(A_f D_f + A_v D_v) / S_1 \quad \dots 11) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $A_f$  と  $A_v$  は、前進方向と垂直方向の加速度である。加重負荷による  $S_1$ ,  $D_f$ ,  $D_v$ , および MWC への影響が顕著でなかったことと 11 式から、 $A_f$  と  $A_v$  についても負荷重量の影響はないものと考えられる。また、この式は MWC が走者の身体質量に依存していることを示すものである。したがって、負荷重量により走動作に変化が生じ、 $S_1$ ,  $D_f$ ,  $D_v$ ,  $A_f$  と  $A_v$  といったような指標に影響がおよぼさないかぎりには MWC は身体質量に比例するものと考えられる。一方、外的パワー ( $P_{\text{ext}}$ ) は、

$$P_{\text{ext}} = \text{MWC} \cdot D / t \quad \dots \dots \dots 12)$$

と書ける。ここで、 $D$  は移動距離、 $t$  は  $D$  を移動するの要した時間である。この 12 式は、 $P_{\text{ext}}$  が走速度と身体質量に比例することを示している。このことは、走運動中の体重あたりの外的パワー ( $P_{\text{ext}}$ ) は走速度に依存するが身体質量に依存しないことを示すものであり、従来の報告と<sup>1, 3, 4, 14, 26)</sup>とはほぼ一致する。さらに、本研究の結果、体重の 17% 程度の負荷重量までの外的パワーは速度と身体重量に比例することが明らかとなった。

移動距離あたりの消費エネルギー (EC) について Margaria たち<sup>24)</sup>は  $4.2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (走速度;  $2.8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} - 5.6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), Fellingham, G. W. たち<sup>10)</sup>は、 $3.8\text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  (走速度;  $2.2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} - 4.0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 両者とも速度と

は無関係にほぼ一定の値を示すことを報告している。本研究においてもECは走速度とは無関係に $3.6-4.6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ で各被検者ごとにほぼ一定の値であり、従来の報告とほぼ一致する。

Cureton, K. J.ら<sup>6)</sup>は体重の12%程度の加重負荷がおよぼす酸素摂取量や長距離走のパフォーマンスへの影響について報告した。彼らの報告によると、走速度が $2.7-5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ では、加重負荷を含めた総体重あたりの $\dot{V}O_2$ は加重負荷の影響を受けないが、長距離走のパフォーマンスは減少する。Keren, G.たち<sup>22)</sup>は10kgの負荷重量では総体重あたりの $\dot{V}O_2$ における差異は無視できると述べている。本研究においても従来の報告と同様に総体重あたりの $\dot{V}O_2$ には負荷重量の影響はみられなかった。比較的遅い走速度( $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下)では負荷重量による身体重心の動きや歩数および歩幅への影響はみられなかったことから、負荷重量によるエネルギー消費量の増大は走運動中の脚力が負荷重量に比例して増大によるものであり参加筋群が漸増的に増大によるものではないと推察される。

本研究では消費エネルギーはトレッドミル走で、外的仕事はグランド走で、それぞれ別々に測定された。そこで、両方の測定値を比較する場合、トレッドミル走とグランド走での差異について検討する必要がある。消費エネルギーからみたトレッドミル走とグランド走の差異についてはMcMikenたち<sup>29)</sup>の報告がある。彼らは比較的遅い速度( $3-4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )ではトレッドミル走とグランド走で酸素摂取量に於ける差異はないが、最大酸素摂取量ではグランド走が大きな値を示すことを報告している。一方、走動作についての比較では、Dal Monteたち<sup>8)</sup>やScheham<sup>20)</sup>は長距離走ではトレッドミル走とグランド走で明らかな差異は認められなかったと報告している。以上のことから長距離走程度の比較的遅い走速度( $2-4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )ではトレッドミル走とグラウンド走での $\dot{V}O_2$ および走動作に明らかな差異はないものと考えられ、グラウンド走での外的仕事量とトレッドミル走でのエネルギー消費量を比較することは可能であると考えられる。

機械的効率 (mechanical efficiency) は消費エ

ネルギーが機械的仕事に変換された比率を示すものである。本研究で求めた機械的効率は身体が外部に作用した力による仕事(外的仕事)と消費エネルギーとの比率をみたものである。

走運動中の機械的効率については体肢の動きを含めた場合、Fenn, W. O.<sup>11), 12)</sup>は22%, Cavanaugh, G. A.とKaneko, M.<sup>4)</sup>は40%以上およびWilliamsとCavanagh, P.<sup>35)</sup>は37%になると報告している。これらの報告は主に筋収縮によって行なわれた機械的仕事を評価しようとしているため体肢を動かすための仕事も含めている。しかしながら、筋の活動による体肢の加速と体肢間に生じている力学エネルギーの移行による体肢の加速を正確に分離することは现阶段では困難である。そこで、本研究では身体の外界に対して作用した力の反作用で行なわれた仕事すなわち、身体重心を動かすための仕事(外的仕事)とエネルギー消費量から機械的効率を求めた結果26から41%, 平均33%であった。WilliamsとCavanagh<sup>35)</sup>は身体重心の動きからだけの効率は37%と報告している。本研究の結果は彼らの値とほぼ一致した。

GesserとBrooks<sup>15)</sup>は自転車エルゴメーターで回転速度や負荷重量により機械的効率が異なることを報告している。すなわち、同じ回転数であれば負荷が大きいほど効率が高くなり、同一負荷であれば回転数が速いほど効率は低くなる。本研究の走運動においては外的な負荷を与えても効率には変化が認められなかった。これは本研究での負荷は体重の18%に過ぎなかったために効率、特に消費エネルギーに顕著な差が生じなかったものと考えられる。これは同一走速度における負荷重量による走動作および歩数への影響がみられなかったことから、走運動時の筋の収縮速度に顕著な差がみられなかったことによるものと考えられる。

GivoniとGoldman<sup>16)</sup>は歩行運動中60-70kgの負荷を身体に与えた場合には消費エネルギー量は予測値よりも実測値が高くなると報告している。このことは、負荷重量が大きくなると消費エネルギーは身体総重量に対し漸増的に大きくなることを示している。しかし、外的仕



事は重い負荷に対してどのような値を示すのかはいまのところでは予測できない。今後この点を明らかにすればトレーニングに用いる際の至適負荷重量、あるいは肥満者の運動処方上の基礎的資料を提供することができると考えられる。

### 要 約

長距離ランナーに5kgおよび10kgの重量を負荷として加え、走運動中の外的仕事と消費エネルギーを測定した。加えた負荷重量は5kgで体重の8%, 10kgでは17%に相当した。本研究の結果、次の事が明らかになった。

1. 負荷重量による歩幅歩数への影響は5-6 m・s<sup>-1</sup>では顕著ではなかった。最高速度附近では負荷重量に比例して歩数が増大し歩幅は減少する傾向がみられた。
2. 接地中の身体重心の移動距離地面反力のベクトルには負荷重量による顕著な影響はみられなかった。
3. 負荷重量を含めた総体重あたり移動距離あたりの外的仕事量は走速度および負荷重量とは無関係に1.2-1.4 J・m<sup>-1</sup>・kg<sup>-1</sup>の範囲内において各被検者ではば一定の値を示す傾向がみられた。
4. 総体重あたり移動距離あたりの消費エネルギーは走速度および負荷重量と無関係に3.0-4.6 J・m<sup>-1</sup>・kg<sup>-1</sup>の範囲内で各被検者ごとにば一定の値を示した。
5. 外的仕事と消費エネルギーから求めた機械的効率は平均では33% (27%-40%)であった。各負荷重量間の機械的効率は有意な差は認められず、負荷重量による機械的効率への影響はみられなかった。

### 文 献

- 1) Cavagna, G. A., F. P. Saibene and R. Margaria. Mechanical work in running. *J. Appl. Physiol.* 39 (1); 174-179, 1975.
- 2) Cavagna, G. A. Force platform as ergometer. *J. Appl. Physiol.* 39 (1); 174-179, 1975.
- 3) Cavagna, G. A., H. Thys and A. Zamboni. The source of external work in level walking and running. *J. Physiol.* 262; 639-657, 1976.
- 4) Cavagna, G. A. and M. Kaneko. Mechanical

work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268: 467-481, 1977.

- 5) Cavanagh, P. R. and M. A. LaFortune. Ground reaction force in distance running. *J. Biomechanics* 13: 397-406, 1980.
- 6) Cureton, K. J., P. B. Sparling, B. W. Evans, S. M. Johnso, U. D. Kong, and J. W. Purvis. Effect of experimental alteration in excess weight on aerobic capacity and distance running performance. *Med. Sci. Sports.* 10 (3), 194-199, 1978.
- 7) Cureton, K. J. and P. P. Sparling. Distance running performance and metabolic response to running in men and women with excess weight experimental equated. *Med. Sci. Sports Exercise* 12 (4); 288-294, 1980.
- 8) Dal Monte, A., S. Fucci, and A. Manoni. The treadmill as a training and simulator instrument in middle- and long-distance running. *J. Sports Med.* 14, 67-72, 1978.
- 9) Dillman, C. J. Kinematic analysis of running. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 3; 193-218, 1975.
- 10) Fellingham, G. W., E. S. Roundy, A. G. Fisher and G. R. Bryce. Caloric cost of walking and running. *Med. Sci. Sports.* 10 (2), 132-136, 1978.
- 11) Fenn, W. O. Frictional and Kinetic factors in the work of sprint running. *Am. J. Physiol.* 92, 583-611, 1930.
- 12) Fenn, W. O. Work against gravity and work due to velocity changes in running. *Am. J. Physiol.* 93, 433-462, 1930.
- 13) Fukunaga, T., A. Matsuo, and M. Ichikawa. Mechanical energy output and joint movements in sprint running. *Ergonomics* 24 (10): 765-772, 1981.
- 14) Fukunaga, T., A. Matsuo, K. Yuasa, H. Fujimatsu, and K. Asahina. Effect of running velocity on external mechanical power output. *23 (2), 123-136, 1982.*
- 15) Gaesser, G. A. and G. A. Brooks. Muscular efficiency during steady-rate exercise: effect of speed and work rate. *J. Appl. Physiol* 38 (6); 1132-1139, 1975.
- 16) Givoni, B. and R. F. Goldman. Predicting metabolic energy cost. *J. Appl. Physiol* 30 (3); 429-433, 1971.
- 17) Hogberg, P. Length of stride, stride frequency "flight" period and maximum distance between the feet during running with different speeds. *Arbeitsphysiologie.* 14, 431-436, 1952.
- 18) 星川 保, 宮下充正, 松井秀治: 歩および走における

- る歩幅と歩数の研究, 体育学研究, 16 (3), 157-162, 1971.
- 19) Ikai, M. Biomechanics of sprinting with respect to the speed curve Biomechanics I, 1st Int. Seminar Zurich 282-290, 1967.
  - 20) Ingen Scheman, G. J. VAN Some fundamental aspects of the biomechanics of overground versus treadmill locomotion. Med. Sci. Sports Exercise. 12 (4), 257-261, 1980.
  - 21) Ito, A. Mechanical efficiency of positive work in running at different speeds Med. Sci. Sports Exerc. 15 (4): 299-308, 1983.
  - 22) Keren, G., Y. Epstein, A. Magazanik and E. Sohav, The energy cost of walking and running with and without a backpack load. Eur. J. Appl. Physiol. 46, 317-324, 1981.
  - 23) Luhtanen, P., and P. V. Komi. Mechanical energy states during running. Eur. Appl. Physiol. 38: 41-48, 1978.
  - 24) Margaria, R., P. Cerretetti, P. Aghemo, and G. Sassi. Energy cost of running J. Appl. Physiol 18 (2), 367-370, 1963.
  - 25) 松井秀治, 走運動におけるピッチと歩巾について, 体育の科学, 16 (10); 582-185, 1966.
  - 26) 松尾彰文, 福永哲夫, 走運動の外的エネルギー出力からみた短・長距離選手の特徴, 東京大学教養学部体育研究室体育学紀要, 15; 47-57, 1981.
  - 27) Matsuo, A. and T. Fukunaga, The effect of age and sex on external mechanical energy in running. In H. Matsui and K. Kobayashi (Eds.), Biomechanics VIII-B (pp. 676-680). Champaign; Human Kinetics Publishers. 1981.
  - 28) Matsuo, A., T. Fukunaga, and T. Asami, Relation between external work and running performance in athletes. In D. A. Winter et al (Eds.), Biomechanics IX-B (pp. 319-324), Champaign; Human Kinetics Publishers. 1985.
  - 29) McCmiken, d. F., and J. T. Daniels Aerobic requirements and maximum aerobic power in treadmill and track running. Med. Sci. Sports 8 (1), 14-17, 1976.
  - 30) Nelson, R. C. Biomechanical comparison of male and female distance runners. Annals N. Y. Academy of Sci. 301, 1977.
  - 31) Nelson, R. C. Biomechanics of overground versus treadmill running. Med. Sci. Sports 4 (4): 233-240, 1972.
  - 32) Pierrynowski, M. R., D. A. Winter, and R. W. Norman, Metabolic measures to ascertain the optimal load to be carried by man. Ergonomics 24 (5), 393-396, 1981.
  - 33) Pierrynowski, M. R., R. W. Norman and D. A. Winter, Mechanical energy analysis of the human during load carriage on a treadmill. Ergonomics 24 (1), 1-14, 1981.
  - 34) Robertson, R. J., C. J. Caspersen, T. G. Allison, G. S. Skinar, R. A. Abbott, and K. F. Metz, Differentiated perceptions of exertion and energy cost of young women while carrying loads. Eur. J. Appl. Physiol. 49, 69-78, 1982.
  - 35) Williams, K. R. and P. R. Cavanagh A model for the calculation of mechanical power during distance running. J. Biomechanics 16 (2): 115-128, 1983.