

## ステップマシンによる運動量の評価

### On evaluation of exercise load using Step-Machine

○佐藤豊, 佐川貢一, 石原正, 猪岡光

○ Yutaka Sato, Koichi Sagawa,  
Tadashi Ishihara, Hikaru Inooka

東北大学工学部

Faculty of Engineering, Tohoku University

キーワード : 運動負荷 (exercise load), ステップマシン (step-machine),  
酸素消費量 (oxygen consumption), メッツ (Mets), 相関係数 (correlation)

連絡先 : 〒 980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学工学部 航空工学科 猪岡研究室  
佐藤豊, Tel.: (022)217-7021, Fax.: (022)217-7019, E-mail: ysato@control.is.tohoku.ac.jp

## 1. 緒言

病院における寝たきりの患者にとって、運動不足は大きな問題となっている。適度な運動はリハビリテーションとなるばかりでなく病気の二次予防ともなるが、過度の運動は逆効果であり、適切な運動量を守る必要がある。しかし、既存の運動量測定の方法では特別な装置を必要とし、かつマンパワーを必要とし実用的ではない。

本稿では、臥位状態での運動管理を行うことを目的とし、小型の油圧式足踏み歩行付加器具(以下ステップマシン)を提案する。以下の議論では、まずその実験の概略について説明を行う。その後、ステップマシンから得られた力学的尺度での仕事と代謝量から見た生理的尺度での運動の比較を行い、その相関について考察を行う。

## 2. 実験装置

### 2.1 ステップマシン

Fig.1 に本実験に用いたステップマシンの概略を示す。ステップマシン(トキコ)は、両足を乗せる2つのステップ、踏力センサ(共和電業:LP-200)、ポテンシオメータ、負荷装置からなる装置である。負荷装置として油圧式のダンパ(トキコ)を一方のステップに取り付けており、その伸縮によって負荷としている。負荷は3段階に調整可能である。

### 2.2 実験概略

ステップマシンは本来、立位状態でステップを踏むことにより運動負荷を加える装置であるが、本研究では寝たきりの患者を対象とすることを考え、Fig.1 に示したステップマシンを90度傾けて用いることにより、臥位状態での運動負荷についての考察を行う。実験装置全体の概略についてFig.2に示す。被験者はステップマシンを周期的に踏み込

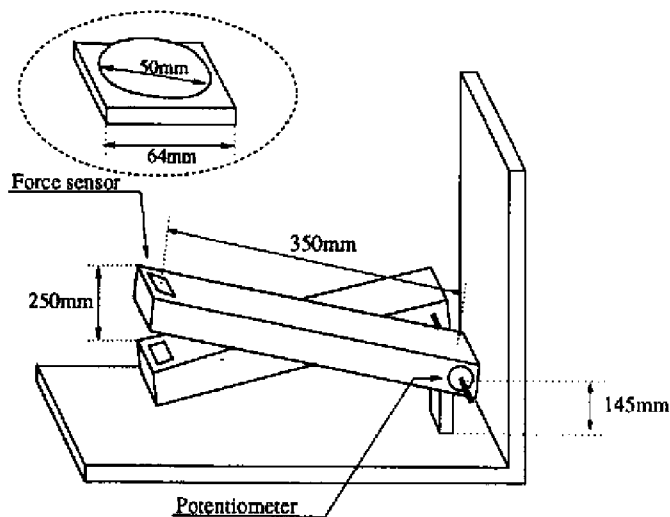


Fig. 1 ステップマシンの概略

む運動を行う。ステップマシンのステップ部分には踏力センサが固定されており、運動時の踏力を計測する。踏力はステップを踏み込む場合のみの値を計測し、それ以外の場合については無視している。踏力センサの出力はアンプ(共和電業:DPM-600)により増幅される。また、ステップの支点にはポテンショメータが装着されており、ペダルの踏み込み量を計測する。これらのデータは、30 Hzのローパスフィルタを通しサンプリング周期 10 ms で計測され、コンピュータに記録する。また、運動量の定量的評価を行うため、呼気ガス分析装置(東機質:MEDGraphicsKK)を用い運動中の酸素消費量を、パルスオキシメータ(帝人:PULSOX-SP)を用いて血液中の酸素飽和度と心拍数の変化を計測する。これらのデータは10秒毎に計測を行い、実験終了後に必要なデータ毎に処理を行う。

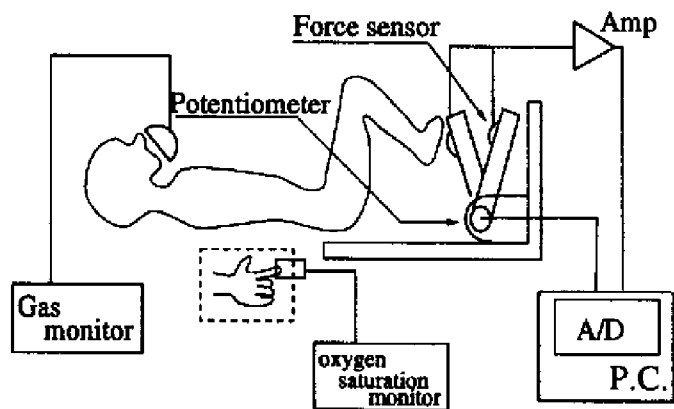


Fig. 2 実験の概略

### 3. 実験方法

#### 3.1 予備実験

20代の男性3名の被験者を対象として、様々な運動条件での仕事量の個人差を調査する実験を行った。各被験者は、臥位状態でSoftとHardの2種類の負荷について、1分間に40回と80回の踏み込みを各4分間行った。その際、ステップマシンによる仕事の測定を行っているが、酸素消費量や心拍数等の測定は行っていない。

#### 3.2 本実験

被験者は、20代の男性4名と50代の男性1名の計5名である。実験はFig.2の様な臥位状態で行い、比較として立位による実験も行っている。実験は以下のような手順で行った。

- 1) 運動を行う前に1分間の安静時間を設け、安静時の酸素消費量を計測する。
- 2) メトロノームのリズムに従い、一定のペースでステップの踏み込みを行う。
- 3) メトロノームのペースを上げ、2)と同様にステップの踏み込みを行う。

一つのペースについて2分から4分程度の運動を行い、そのペースを階段状に速くした(漸増式足踏み歩行負荷試験)。踏み込むペースは1分あたり40回から120回まで、数段階に分けて増加させ、被験者が運動不可能になるまで行った。

### 4. 運動の評価指標

#### 4.1 酸素消費量

酸素の消費量は、エネルギー代謝量を示す尺度となる。酸素1lにつき、20kJ程度である。

## 4.2 Mets

Metsとは酸素消費量を用いた運動強度の単位で、運動時の酸素消費量が安静時の酸素消費量の何倍であるか示したものである。

$$\text{Mets} = \frac{\text{運動時酸素消費量}}{\text{安静時酸素消費量}} \quad (1)$$

## 4.3 装置に対する仕事

ステップマシンの両足部にはそれぞれ踏力センサが取り付けられている。また、ステップの支点にはポテンショメータが取り付けられており、ステップの角度の計測が可能である。以上の情報を基に、被験者がステップマシンに対して行った仕事を導出することが可能である。

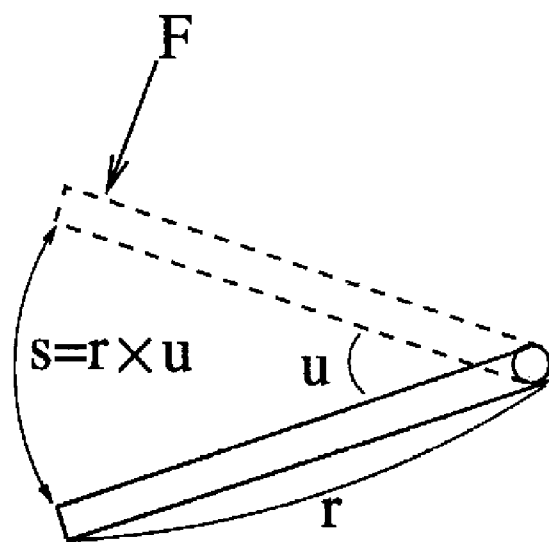


Fig. 3 仕事の算出

実際には力は常に変化しているため、仕事  $E$  を求めるため以下の様な積分を用いている。

$$E = \int F dS = \int F \frac{dS}{dt} dt = \int F v dt \quad (2)$$

ここで、 $F$  は力、 $S$  は移動距離、 $t$  は時間、 $v$  は速度である。

微小時間の台形近似により、(2) をサンプリング周期  $\Delta t$  で離散化すると、

$$\Delta E = \frac{1}{2} \{F(t)v(t) + F(t + \Delta t)v(t + \Delta t)\} \Delta t \quad (3)$$

と、近似できる。これらの計算により、被験者がステップマシンに対して行った仕事の量を導出することが可能である。

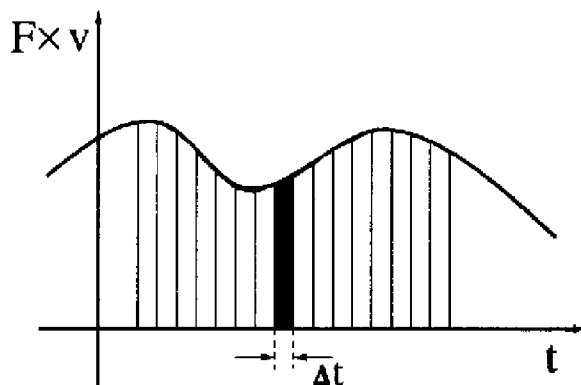


Fig. 4 仕事を求めるグラフ

## 5. 結果

### 5.1 予備実験結果

実際に計測された値の例を Fig.5, Fig.6 に示す。Fig.5 は左右の足の踏力の変化、Fig.6 は左右のステップの角度についての变化である。角度は、最も踏み込んだ場合の角度を基準とし、そこからの相対角とした。計算処理を施したグラフを Fig.7, Fig.8, Fig.9 に示す。Fig.7 は踏力とステップ角から式 (2)(3) の処理を施し、10 秒毎に算出した仕事率の一例である。

本実験における踏力の測定は、二つのセンサを用い左右の足についてそれぞれ計測を行なっているが、負荷装置であるダンバが一つであるために右足と左足の踏力について Fig.5 にみれるように 1, 2 割程度の差が現れ、算出される仕事率も Fig.7 に見れるように左右に差がある。これはダンバの伸縮の特性の違いである。したがって、以下の考察では左右の足の仕事の和を仕事として議論する。

Fig.8 は時間に対する総仕事の変化である。各条件においてほぼ直線的に総仕事が増加していることから、ステップマシンに対して行われる仕事は、ベース、負荷によって決定され、それらの値が変わらない限り仕事率には大きな変化が見られない

ことが解る。しかし、Fig.9 に見れるように仕事率には個人差があり、ペースと負荷を決定することによって仕事を管理することができるとは限らないことが予想される。

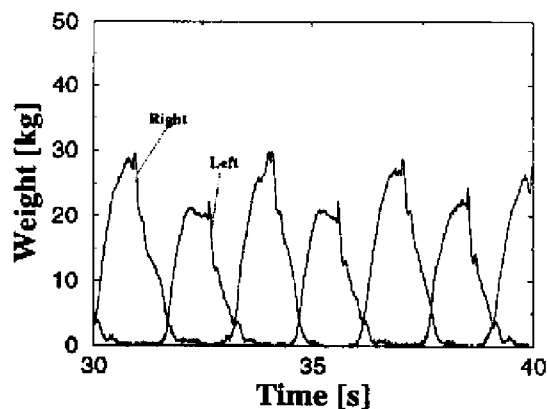


Fig. 5 時間と踏力

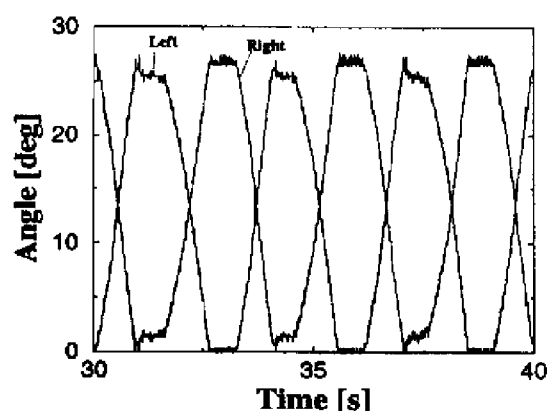


Fig. 6 時間とステップの角度

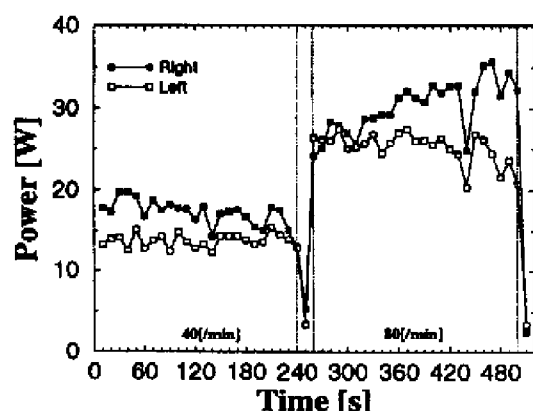


Fig. 7 時間と仕事率

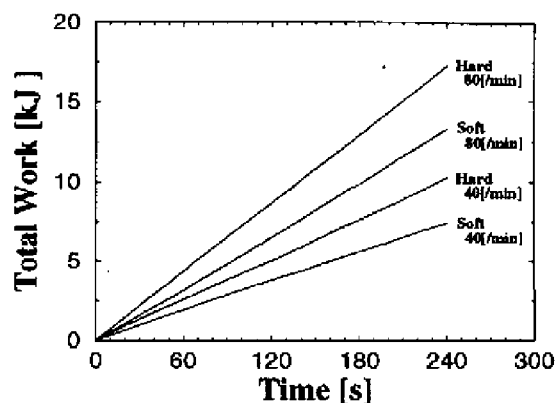


Fig. 8 負荷、ペースに対する総仕事の差

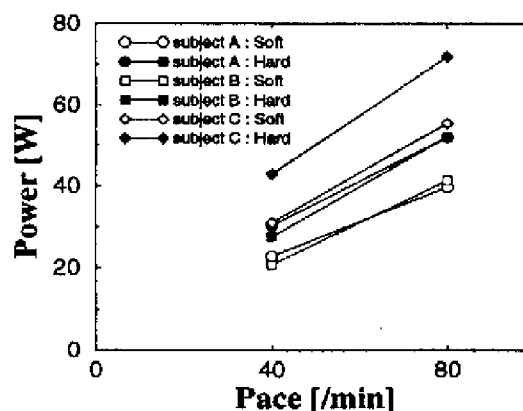


Fig. 9 各個人の仕事率

## 5.2 本実験結果

Fig.10 に時間と Mets について、Fig.11 に時間と心拍数についてのデータの一例を示す。Mets は運動のペースの上昇にしたがって徐々に増加し、1, 2 分程度で安定する様である。

運動のペースと仕事率の関係についてのグラフを Fig.12 に示す。このグラフは、複数の被験者各人について、各ペース毎にその平均を計算しプロットしたものである。黒で示したものが臥位状態で負荷が Hard の場合、白が臥位状態で負荷が Soft の場合、星印が立位で負荷が Hard である。以下のグラフも同様の処理を施した。前述の通り、同じペースで運動をしても実際に仕事として計測される量には明らかな差が生じ、立位の場合にはそれが顕著に現れている。原因としては踏み込む力の違い、負荷装置の連続使用による抵抗の減少等が考えられる。このことは、運動のペースを指示してもその運

動量に違いが生じる可能性を示すものである。一般に、ダンパの抵抗はその移動速度に比例する。そのため、ペースは同じでも足を速く動かした場合、大きな仕事が算出されると予想される。また、本装置に用いられたダンパは使用温度 20 度を基準として設計されており、連続使用による温度上昇によって 2・3 割程度の性能低下、つまり負荷の軽減が確かめられている。実際、実験後のダンパは非常に高い温度となっていた。以上の理由により、負荷の大きさと運動のペースのみで仕事を決定することの正確さには、疑問が残る。

次に、実際に行なわれた仕事が、被験者に対してどの程度の負担を与えたかを表す基準として Mets を導入し、考察を行う。Fig.13 に仕事率と Mets の関係をグラフ化したものを示す。この図も Fig.12 と同様、各被験者、各ペース毎に平均をプロットしている。図からも解る通り、仕事率と Mets には直線的な相関がある。しかし、Mets は安静時の酸素消費量を基準としているため、個人間の差があり、計測された仕事とは正確には合致しない可能性がある。そこで Mets の代わりに酸素消費量を運動の強度として用い、Mets を用いた場合との比較を行った。ここで用いた酸素消費量とは、運動時の消費量から安静時の消費量を引いたもので、運動によって実質的に消費された量である。その結果を Fig.14 に示す。仕事率と Mets のグラフの相関係数が 0.737 であるのに対し、仕事率と酸素消費量では 0.839 であり、Mets を用いた場合以上に良い相関を示している。

一般に、個人に対し適度な負荷を与える場合、体力の個人差のために、仕事量だけを指示するのは不完全である。そのため Mets の管理が必要となるが、その計測には本装置は十分であるとは言えない。しかし、消費エネルギーの測定については十分な結果が得られており、各個人に対して最適な運動を指示するには、適度な運動の Mets から個人毎

に適度な酸素消費量を算出し、その酸素消費量となるような仕事率で運動を行う、という方法が有効であると思われる。

## 6. 結言

本論文では、ステップマシンを用いた運動管理システムについて提案した。本装置は、消費エネルギーの計測に有効であり、その計測から間接的に Mets を算出する方法が最も有効であることが解った。

しかし、本装置の踏力測定は片足につきセンサ 1 つで行っているため、誤差が大きく正確さに欠ける。これからはその点に改良を加え研究を続けて行く必要がある。

## 参考文献

- 1) 鎌田弘之, 上嶋健治, 橋本浩哉, 小林昇, 平盛勝彦:在宅モニターシステムと油圧式足踏み歩行負荷器具を用いた心筋梗塞症後の準監視型在宅運動療法, J Cardiol,29,23/28(1996)
- 2) 猪飼道夫:身体運動の心理学,290/293, 杏林書院(1973)

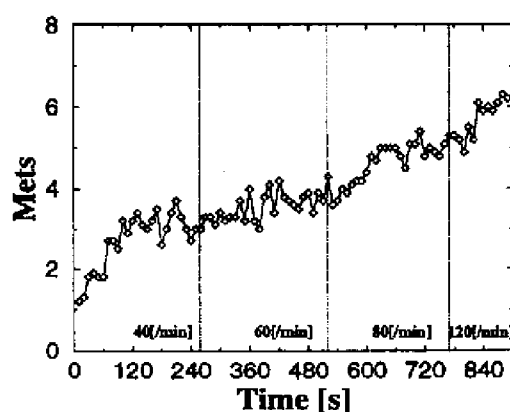


Fig. 10 時間と Mets

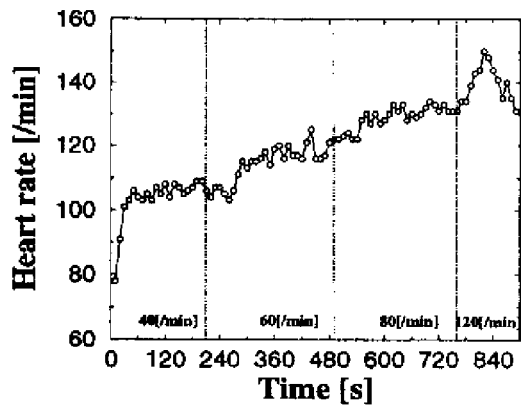


Fig. 11 時間と心拍数

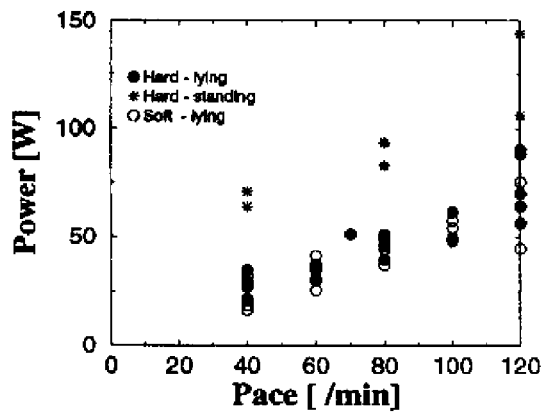


Fig. 12 ペースと仕事率

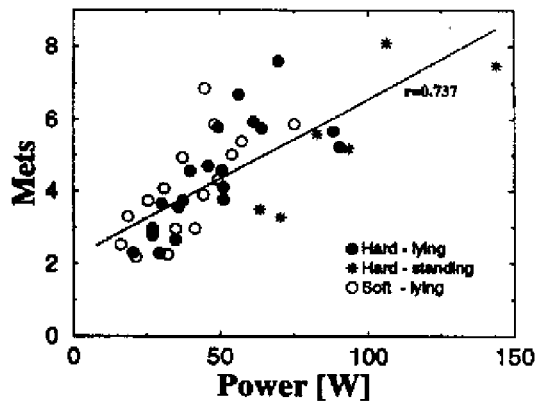


Fig. 13 仕事率と Mets

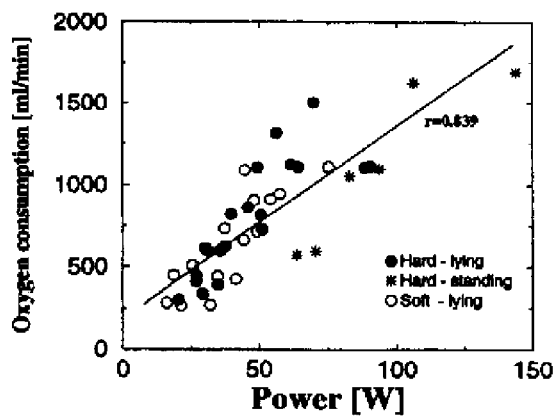


Fig. 14 仕事率と消費エネルギー