下肢屈伸運動の機械的効率

小　島　武　次*

The Mechanical Efficiency of the Exercise Consisting of Repetitive Half Knee Bendings

by

TAKEJI KOJIMA*

Abstract

In the exercise consisting of repetitive half knee bendings using rebound on both feet without a weight or with the weight of 10 kg or 20 kg at frequency of 44/min, 60/min and 76/min, the mechanical works performed and oxygen consumptions at steady state were measured.

The higher the frequnncy of the exercise, the higher become the mechanical efficiency of the exercise. The mechanical efficiency was higher with the weight than without the weight.

These results suggested that not only the series elastic components of the muscles but also the contractile components of the muscles contributed to the increment of the mechanical efficiency of the exercise.

緒　言

活動筋の直列弾性要素に一時的に貯えられた機械的エネルギーが，それに続く短縮において利用される可能性について，すでに多くの研究がなされている。Cavagna ら[2]は，筋の1回収縮における仕事量の多少の面からその利用の可能性を検討している。彼らによれば，筋の強制伸長後の短縮における仕事量 (W′) は，等尺性筋収縮後の短縮における仕事量 (W) よりも大きく，さらに，その比 (W′/W) については速度が大きくなるにつれて大きくなった。そして彼らはこれを，筋弾性エネルギー利用度が増したためとしている。

一方，反復動作における筋の直列弾性要素のエネルギーの利用の可能性について機械的効率の面からみた研究が Thys ら[5]や Asmussen ら[1]によってなされており，いずれの場合も反動動作を用いた運動の方が機械的効率が高かった。しかしこれらの研究に用いられた動作速度は，同じ動作ではそれぞれ一定であった。本研究の目的は，反動を用いた下肢の反復屈伸運動において動作速度を変化させ，その際の機械的効率を求め，筋の弾性要素エネルギー利用の可能性についてみようとすることである。

方　法

被検者は健康な成人男子2名である。実験に用いた運動は直立位からの膝関節の反復屈伸運動である。その運動は身体重心を約 10 cm から 13 cm 上下させるものであり，テンポは1分間に44回，60回，76回の3種類である。また被検者は，図1

* 東京大学教養学部体育研究室 (Department of Physical Education, College of General Education, University of Tokyo)

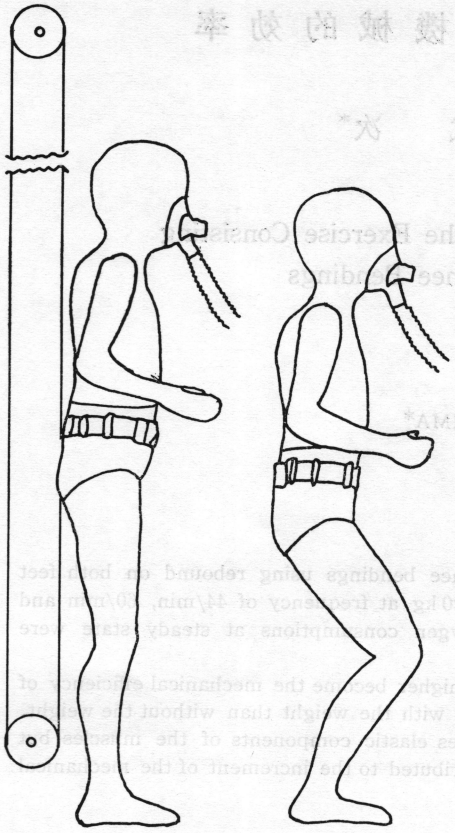


図　1

のように 0 kg, 10 kg, 20 kg のおもりを負荷として腰に取り付け，各テンポについてメトロノームに合わせて運動を行なった。その運動の仕事量の算出についてはまず図1に示すように，腰の上下動を垂直方向のヒモの動きとしてとらえ，ポテンシオメーターを用いてそれを記録した。次に同時に行なった映画撮影から松井[4]の方法により直立している時と脚を屈曲している時の身体重心の位置を求めた。そして腰の移動距離と身体重心の移動距離の比を求め，それにより得られた係数を，ポテンシオメーターを用いて測定された腰の移動距離に乗じ，さらにその値に体重を乗ずることにより運動の仕事量を求めた。一方，エネルギー消費量は運動開始後5分から7分の呼気ガスを1分毎にダグラスバッグ法で採気し，その分析を三栄測器製瞬時ガス分析器（1H01 型）で行なうことにより求めた。

結　果

表1に被検者の年齢，身長，体重を示す。

運動のテンポと機械的効率の関係を表2に示す。これを横軸にテンポ，縦軸に機械的効率をとり，プロットしたものが図2である。

被検者 T.K. については3回の平均，右の図被検者 H.Y. については2回の平均をそれぞれプロットした。図から判るように，両者とも負荷の有無にかかわらず，テンポが増すにつれ機械的効率が高くなっている。

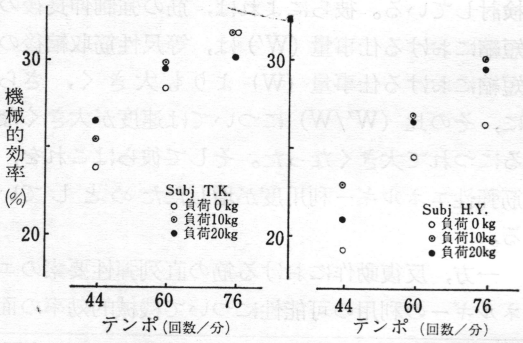
負荷をかけた場合をみてみると，左の図の被検者 T.K. の場合，機械的効率は負荷 10 kg では負荷ゼロに対し，テンポ44・60で約1.5％増し，テ

表　1

	年　齢	身　長	体　重
T.K.	28　才	168 cm	74.0 kg
H.Y.	30　才	172 cm	60.0 kg

表2　テンポ及び負荷の変化に伴なう機械的効率（％）

被検者	テンポ	負荷 0 kg	負荷10 kg	負荷20 kg
H.Y.	44回/分	19.2	22.9	21.0
	60	24.4	26.7	26.4
	76	26.2	29.9	29.3
T.K.	44回/分	23.8	25.4	26.4
	60	28.3	29.8	29.4
	76	31.6	31.6	30.1



下肢屈伸運動におけるテンポ及び負荷の変化に伴なう機械的効率の変化

図　2

ンポ 76 では高くならなかった。負荷 20 kg では負荷ゼロに対しテンポ 44 で 2.5%，テンポ 60 で 1%，テンポ76で −1.5% の変化がみられた。次に，右の図被検者 H.Y. の場合，負荷 10 kg では，負荷ゼロに対しテンポ44で 3.5%，テンポ60で 2.5%，テンポ76で 3.5% の増加がみられた。負荷 20 kg では負荷ゼロに対しテンポ 44・60 で約 2%，テンポ 76で約 3% の増加がみられた。

考　　察

下肢屈伸運動の機械的効率は運動のテンポが速くなるにつれて大きくなった。また同一テンポの運動では一般に無負荷のときよりも負荷がかけられた時の方が効率が高かった。

Hill[3] は等張性収縮における筋収縮の効率は，収縮時の筋の張力によって変化すると報告している。そのことから，本実験におけるテンポの増加に伴う機械的効率の増大の要因としては，単に直列弾性要素系のエネルギー利用の増大だけでなく，運動速度が増大し，そのため筋の張力が増し，その結果筋の収縮要素の効率が増大したことも考えられる。

この点を明らかにするため，各テンポ毎に負荷をかけて運動した場合，一般に無負荷のときよりも負荷をかけたときの方が効率が高かった。この理由としては，各テンポで無負荷のときよりも負荷をかけたときの方が筋の発揮する力が大きく，そのため筋の収縮要素の効率が増したことが考えられる。

この結果から，同一負荷においてもテンポが速くなれば筋の収縮要素の効率が増大し，そのため，運動の効率が高くなることも充分考えられる。

この研究においては，下肢屈伸運はメトロノームで規定しただけであり，筋の伸張や収縮の速度がテンポに完全に比例しているとは限らない。また，同一テンポでも収縮速度が異なることが考えられ，このことが機械的効率の差異に影響を及ぼしていることも考えられる。

本研究では，どの程度筋直列弾性要素のエネルギーが利用されたかは明らかにされなかった。今後，動作分析などを用い，より確かにしていきたいと考えている。

結　　論

1. 下肢屈伸運動の機械的効率は，テンポがはやくなると高くなった。

2. 各テンポにおいても，負荷を与えると無負荷のときよりも機械的効率が高くなった。

以上のことから，テンポ間の機械的効率の増大には，必ずしも弾性要素の利用増大だけではなく，筋の収縮要素の効率の増大が寄与していることも考えられる。

おわりに

この研究は山本博男氏（金沢大学教育学部）と共同で行なわれた。

なお，この論文の要旨は第28回日本体育学会で発表された。

文　　献

1) Asmussen, E. and F. Bonde-Petersen: Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise. Acta Physiol. Scand. 92: 537–545, 1974.
2) Cavagna, G.A., B. Dusman and R. Margaria: Positive work done by a previously stretched muscle. J. Appl. Physiol. 24: 21–32, 1968.
3) Hill, A.V.: The ratio of mechanical power developed to total power expended during muscular shortning. Proc. Roy. Soc. B, 159: 319–324, 1964.
4) 松井秀治：運動と身体の重心，体育科学社，1958.
5) Thys, H., G.A. Cavagna and R. Margaria: The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude. Pfluger Arch. 354: 281–286, 1975.