

昭和58年度 日本体育協会スポーツ科学研究報告

No. IX 脚の伸展パワーに関する研究 (第3報)
—連続ジャンプの効率について—

財団法人 日本体育協会

スポーツ科学委員会

昭和58年度 日本体育協会スポーツ科学研究報告

No. IX 脚の伸展パワーに関する研究 (第3報)

—連続ジャンプの効率について—

報告者 (財)日本体育協会スポーツ科学研究所

金子 敬二 黒田 善雄 塚越 克己
雨宮 輝也 伊藤 静夫 金子 美智子

I 目 的

縄跳びのような連続ジャンプを行なう時、脚の活動筋や腱に弾性エネルギーが一時的に貯えられ、続く筋の短縮時に再利用されると考えられている。弾性エネルギーの再利用は運動の効率を高める働きをしており、また、運動の効率も、運動のテンポや反動動作の有無によって大きく変わってくる。

小島⁴⁾は直立位からの膝関節屈伸反復運動を行なわせ、テンポと運動の機械的効率を検討しており、テンポが速くなるに従って機械的効率が高くなることを報告している。

しかし、運動のテンポと効率の関係を調べた研究は、運動のテンポが毎分100回以下のものが多く、100回以上の速いテンポについて検討された例は少ない。

そこで、本研究では、両足による連続ジャンプを対象に毎分100回以上のテンポと機械的効率の関係を検討すると同時に、正の仕事に占める弾性エネルギーの再利用の割合を検討した。

II 方 法

被験者は成人男子4名である。被験者の年齢、身長、体重を表1に示した。

図1は実験の概要を示したものである。

実験に用いた運動は、両足による連続ジャンプである。図に示したように、被験者には両手を腰

部で後手に組ませ、かつ上体を直立させた姿勢でジャンプを行なわせ、運動中になるべく両腕や上体の反動動作が入らないように指示した。

連続ジャンプのテンポは、毎分100回、120回、138回、160回、184回、200回の6条件とし、テンポの設定にはメトロノームを用いた。1条件における連続ジャンプ運動時間は3分間で、各被験者が実施する6条件の試行順はランダムに設定した。

また、それぞれの被験者について身長プラス7cmの位置に細い棒を横に設置して、跳び上がった際に頭頂が棒に軽くふれるように指示し、ジャンプの高さを一定に保つようにした。

連続ジャンプにおける仕事量、エネルギー消費量及び効率等の算出は次のように行なった。

1. 仕事量の算出

被験者は垂直方向に感度をもつフォースプレート上で連続ジャンプを行なった。運動中の地面反力を500分の1秒間隔で、マイクロコンピュータにデジタル記録した。

記録された地面反力を積分処理することにより

表1 被験者の身体特性

被験者	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
T・T	22	176.6	67.4
S・B	20	175.5	58.9
K・T	20	173.9	67.7
A・S	21	171.4	64.1

身体重心の速度，変位を算出した。

図2に示したように着地した瞬間の重心位置を基準にとり，重心が最下点に至るまでの重心垂直変位を h_1 ，重心基準位置から足先がフォースプレートを離れるまでの重心垂直変位を h_2 ，足先がフォースプレートを離れた瞬間から重心が空中

で最高点に達するまでの重心垂直変位を h_3 とすると，ジャンプ1回における重心の総垂直変位 h_4 は，

$$h_4 = h_1 + h_2 + h_3$$

となる。ここで h_3 は足先がフォースプレートを離れる瞬間の重心の垂直速度 v から，

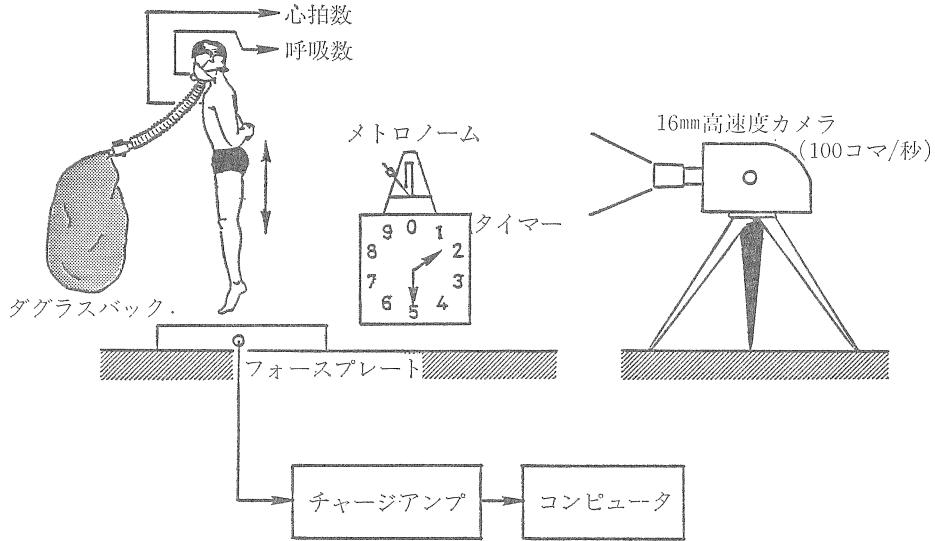


図1 実験の概要

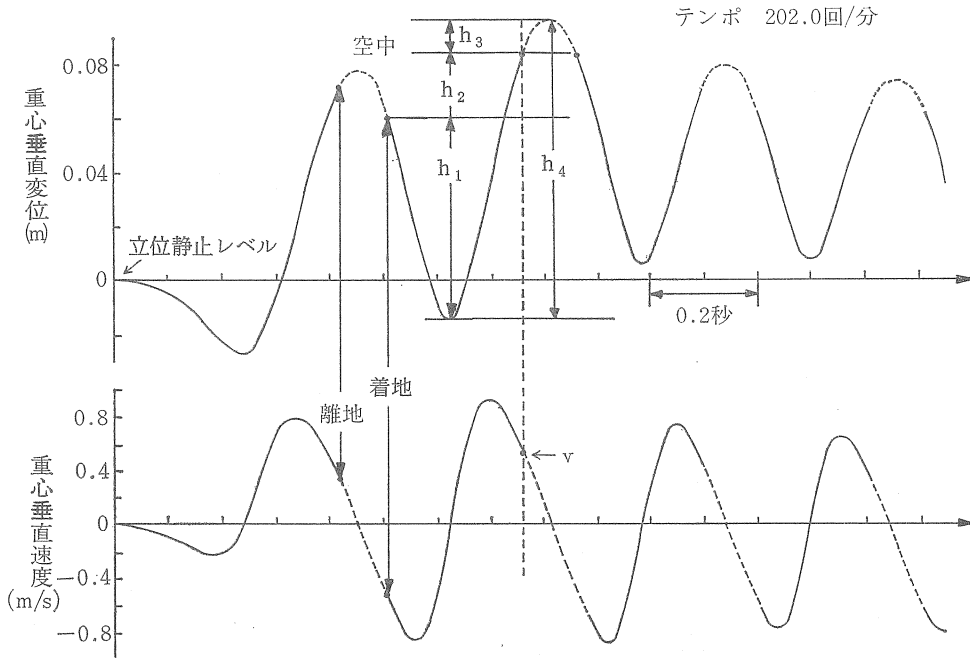


図2 ジャンプ中の重心垂直変位と速度

$$h_3 = \frac{v^2}{2g} \quad g: \text{重力加速度}$$

と求まる。従って、被験者の体質量を m 、連続ジャンプのテンポを R (回/分)とすると、単位時間当たり(1分間当たり)に重心が行なった仕事量 \dot{W} は、

$$\dot{W} = mgh_4 \times R$$

と算出される。

本研究では、重心垂直変位 h_1, h_2, h_3, h_4 を 20~30回のジャンプにおけるそれぞれの値の平均値を用いて代表した。

また、重心変位算出にあたっては、被験者の測方 22mより 16mm 高速度カメラで被験者のジャンプ動作を撮影し、映画分析法にて重心変位を求めてフォースプレートから求められた値を較正した。

2. エネルギー需要量の算出

被験者は運動を 3分間行なった後、すみやかに椅座位にて安静を 20分間とった。運動中は 3分間、運動後の安静(回復期)では 5分間隔で呼気ガスをダグラスバックに採集した後、呼気ガス質量分析機にて呼気ガスの O_2, CO_2 濃度を分析し、酸素摂取量、呼吸商等を求めた。

また、運動中および回復期の呼気ガス採集・分析のたびに、酸素摂取量と呼吸商からエネルギー消費量のジュール(J)単位への等価換算を行なった。

本研究では回復期15~20分間のエネルギー消費が安静時のエネルギー消費と等しくなるとし、この時期のエネルギー消費を安静時エネルギー消費量として用いた(図3)。そして、運動時および回復期のエネルギー消費量の総合計より、安静時エネルギー消費量を差し引くことで連続ジャンプのエネルギー需要量 \dot{E}_{TOT} を求めた。

3. 正の仕事(Positive work), 負の仕事(negative work)のエネルギー需要量および正の仕事に利用された弾性エネルギーの算出

連続ジャンプでは、着地後重心は下降するが、この時に脚は落下のエネルギーを吸収する。やがて重心は最下点に達し、今度は方向を変え上昇を始める。

この着地期前半において脚の筋群は落下のエネルギー吸収と同時に運動の方向を変換するためにエネルギーを消費する。この局面では、身体重心

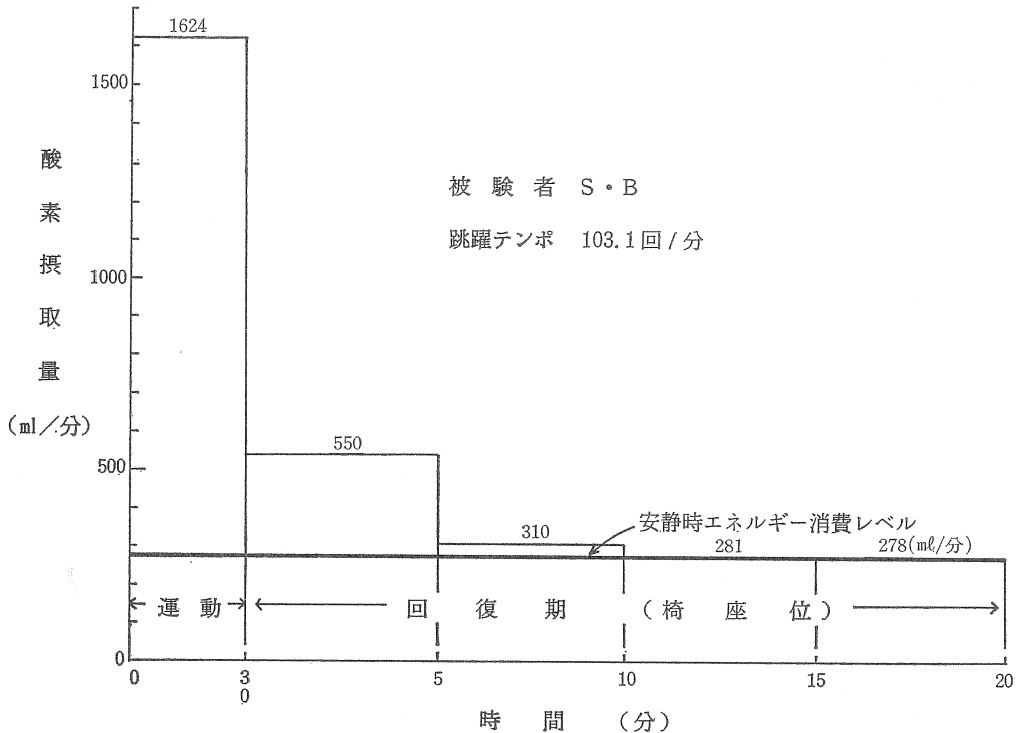


図3 運動時および回復期における酸素摂取量の時間的变化

の移動方向と力の作用方向が反対であるので、身体は負の仕事をすることになる。Margaria⁶⁾は歩・走の負の局面 (negative phase) における機械的効率を -1.2 としている。また、身体重心が力の作用方向と同じ方向に移動する場合 (positive phase) の機械的効率を 0.25 としている。

本研究では、Margaria の効率値を用いて計算を進めた。

正の仕事におけるエネルギー需要量を \dot{E}_P 、負の仕事におけるエネルギー需要量を \dot{E}_N 、総エネルギー需要量を \dot{E}_{TOT} とし、跳躍 1 回における正の仕事量と負の仕事量が等しく方向が反対であると考え

$$\dot{E}_N = -\dot{W}/-1.2$$

となり、従って \dot{E}_P は

$$\begin{aligned} \dot{E}_P &= \dot{E}_{TOT} - \dot{E}_N \\ &= \dot{E}_{TOT} - (-\dot{W}/-1.2) \end{aligned}$$

と求まる。また、正の仕事の機械的効率 \dot{W}/\dot{E}_P は、

$$\dot{W}/\dot{E}_P = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_{TOT} - (-\dot{W}/-1.2)}$$

と求め、正の仕事に利用された弾性エネルギー量 \dot{W}_e は次式を用いて求めた。

$$\dot{W}_e = \dot{W} - \dot{E}_P \times 0.25$$

III 結 果

図 4 は、跳躍テンポと重心垂直変位 h_1 , h_2 , h_3 , h_4 の関係を示したものである。

重心垂直変位 h_4 は、跳躍テンポ毎分約 100 回では被験者 4 人の平均で約 21 cm の値を示しているが、跳躍テンポが上がるに従って 2 次曲線的に減少し、跳躍テンポ毎分約 200 回では、平均で約 7 cm にまでに減少している。減少量は約 14 cm であった。

h_4 の変化を h_1 , h_2 , h_3 に分けてみると、 h_2 , h_3 は跳躍テンポが上がるに従ってわずかに減少する傾向を示しているが、その減少量は非常に小さく、跳躍テンポ毎分約 100 回と 200 回で、その差は 1 ~ 2 cm 程度である。一方 h_1 の変化をみると、 h_1 は h_4 と同様に 2 次曲線的な変化を示しており、跳躍テンポの変化に伴う h_1 の変動の幅も大きい。

従って、本研究では、跳躍テンポの変化に伴う重心垂直変位 h_4 の変化は、主に着地前半の身体の沈み込みの大きさによって調節されているといえる。

図 5 は、重心垂直変位 h_4 に跳躍テンポを掛け合わせ、1 分間当りの重心総移動距離 H を求めたものである。

1 分間当りの重心総移動距離と跳躍テンポの関係を見ると、被験者全体では跳躍テンポが上がるに従って、1 分間当りの重心総移動距離は減少する傾向にある。しかしながら、被験者個々についてみると、被験者 S・B では跳躍テンポ毎分約 100 回から 184 回に至るまで重心総移動距離はほとんど変化せず横バイ状態にあり、必ずしも一定していない。

重心垂直変位 h_4 では跳躍テンポが上がるに従って 2 次曲線的な変化を示したが、重心変位を 1 分間当りの総移動距離に換算すると、跳躍テンポと重心総移動距離の関係は重心垂直変位のようになだらかな曲線にならないだけでなく、被験者によってまちまちの変化を示す。

表 2 は、テンポ、仕事量 (\dot{W})、エネルギー需要量 (\dot{E}_{TOT})、正の仕事におけるエネルギー需要量 (\dot{E}_P)、体重 1 kg・重心垂直変位 1 cm 当りのエネルギー需要量 ($\dot{E}_{TOT}/w/H$)、粗効率 (\dot{W}/\dot{E}_{TOT})、正の仕事の効率 (\dot{W}/\dot{E}_P)、正の仕事に占める弾性エネルギー量の割合 (\dot{W}_e/\dot{W}) を全被験者について示したものである。

表 2 より、テンポとエネルギー需要量 \dot{E}_{TOT} の関係をグラフに表わしたものが図 6 である。エネルギー需要量は、テンポが上がるに従って 2 次曲線的に減少し、跳躍テンポ毎分 180 ~ 200 回付近で最小値をとる変化を示している。

図 7 は体重 1 kg・重心垂直変位 1 cm 当りのエネルギー需要量 $\dot{E}_{TOT}/w/H$ と跳躍テンポの関係をグラフに表わしたものである。

$\dot{E}_{TOT}/w/H$ は、各被験者とも毎分 100 回のテンポで最も高い値を示しているが、テンポが毎分 120 回を越えると、テンポが変化しても $\dot{E}_{TOT}/w/H$ はほとんど一定の値を示す傾向にある。各跳躍テンポについて $\dot{E}_{TOT}/w/H$ の平均を求めると、毎

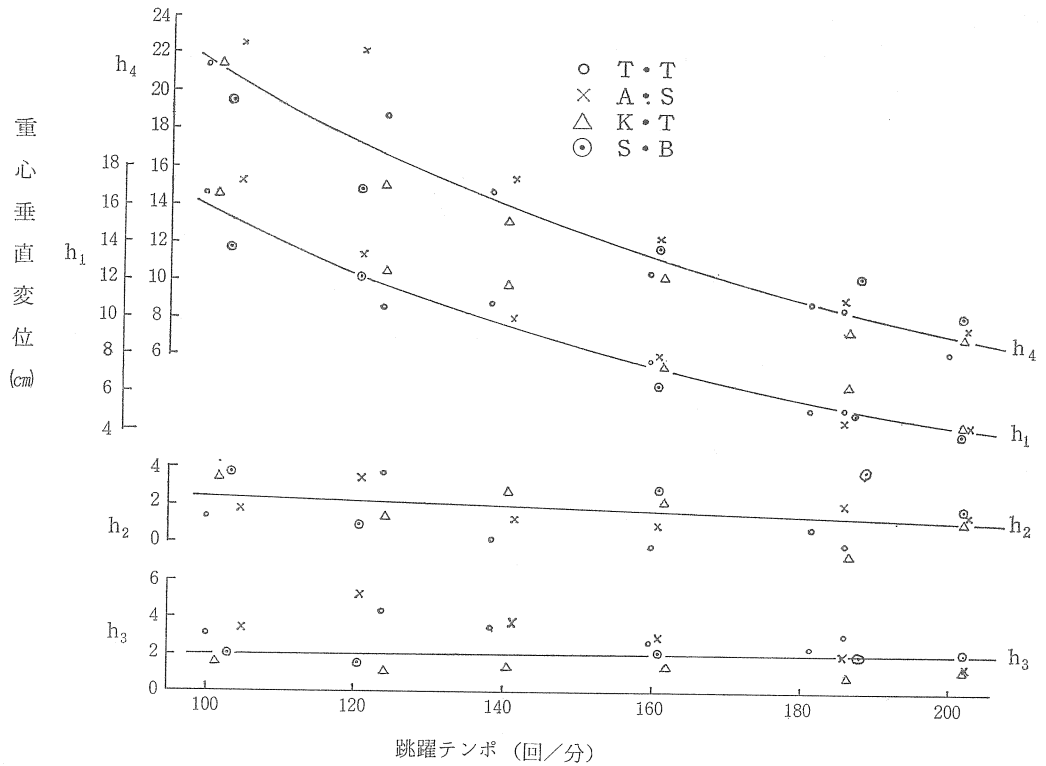


図4 跳躍テンポと重心垂直変位の関係

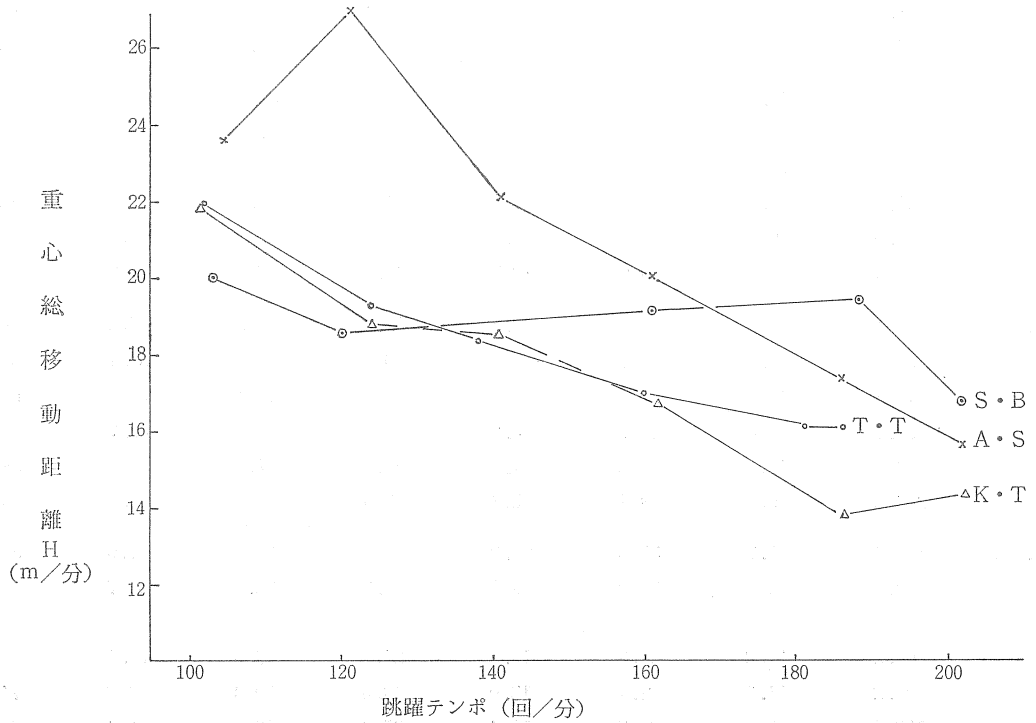


図5 跳躍テンポと重心総移動距離Hの関係

分100回で 30.7 J/kg/cm, 120回で 25.3 J/kg/cm, 138回で24.1 J/kg/cm, 160回で22.0 J/kg/cm, 184回で25.1 J/kg/cm, 200回で24.3 J/kg/cmであり, 毎分120回以上のテンポで $\dot{E}_{TOT}/w/H$ がほぼ一定の値をとることが示される。毎分 120 回以上のテンポにおける $\dot{E}_{TOT}/w/H$ の全平均と標準偏差は 24.2 ± 3.2 (n=19) J/kg/cm であった。

図8は機械的効率 \dot{W}/\dot{E}_{TOT} と跳躍テンポの関係を示したものである。

体重 1 kg・重心垂直変位 1 cm 当りのエネルギー需要量がテンポ毎分 100 回で最も大きく, 毎分 120 回以上で一定の値になるので, 機械的効率は毎分 100 回で最も低く, 毎分 120 回以上のテンポ

で一定の値を示すことになる。

各跳躍テンポにおける \dot{W}/\dot{E}_{TOT} の平均を求めると, 毎分100回で 32.5%, 120回で 41.7%, 138回で 42.2%, 160回で 45.3%, 184回で 39.7%, 200回で41.0%で, 毎分120回以上のテンポにおける \dot{W}/\dot{E}_{TOT} の全平均と標準偏差は $41.9 \pm 5.3\%$ (n=19) であった。

正の仕事の機械的効率 \dot{W}/\dot{E}_P 及び正の仕事に占める弾性エネルギー利用の割合 \dot{W}_e/\dot{W} の跳躍テンポに対する変化は, \dot{W}/\dot{E}_{TOT} と同じパターンを示す。そこで, 跳躍テンポを毎回100回と120回以上の2群に分けてみると, 毎分 100 回では平均 43.6% (35.6~51.1%, n=4), 毎分120回以上

表2 仕事量, エネルギー需要量, 効率および弾性エネルギー利用率の一覧表

	テンポ (回/分)	\dot{W} (K J/分)	\dot{E}_{TOT} (K J/分)	\dot{E}_P (K J/分)	$\dot{E}_{TOT}/w/H$ (J/kg/cm)	\dot{W}/\dot{E}_{TOT} (%)	\dot{W}/\dot{E}_P (%)	\dot{W}_e/\dot{W} (%)
T. T	102.3	14.6	53.0	40.9	35.9	27.5	35.6	29.9
	124.1	15.5	36.7	23.7	28.3	42.3	65.3	61.7
	138.3	13.5	32.7	21.5	26.4	41.3	63.0	60.3
	160.0	11.2	30.0	20.7	26.2	37.4	54.3	53.9
	181.3	10.7	32.1	23.2	29.3	33.2	45.9	45.9
	186.0	10.7	28.2	19.3	25.6	37.9	55.4	54.9
K. T	101.7	14.6	40.8	28.6	27.5	35.8	51.1	51.0
	123.9	12.4	29.4	19.0	23.2	42.3	65.2	61.7
	140.6	12.3	29.3	19.0	23.3	42.0	64.6	61.3
	161.7	11.1	23.7	14.5	21.0	46.6	76.1	67.2
	186.0	9.1	23.2	15.6	24.8	39.4	58.7	57.4
	202.0	9.5	20.6	12.7	21.2	46.2	75.2	66.7
A. S	104.4	14.8	43.7	31.3	28.8	33.9	47.2	47.1
	121.1	17.0	35.1	20.9	20.3	48.6	81.7	69.4
	141.4	14.0	32.2	20.5	22.7	43.4	68.1	63.3
	161.1	12.6	24.7	14.2	19.3	51.0	88.7	71.8
	186.1	11.0	29.2	20.1	26.3	37.5	54.5	54.1
	202.3	9.9	23.9	15.7	23.9	41.3	62.9	60.3
S. B	103.1	11.7	38.6	28.9	32.6	30.3	40.5	38.3
	120.3	10.8	32.0	23.0	29.3	33.6	46.7	46.5
	161.2	11.2	24.3	15.0	21.5	46.0	74.6	66.5
	188.2	11.3	22.4	13.0	19.6	50.3	86.7	71.2
	202.0	9.7	27.5	19.4	27.9	35.4	50.1	50.1

の全平均と標準偏差では $65.1 \pm 12.4\%$ ($n=19$)であった。

\dot{W}_0/\dot{W} は、毎分100回で41.6%(29.9~51.0%, $n=4$), 毎分120回以上の全平均と標準偏差で $60.2 \pm 7.6\%$ であった。

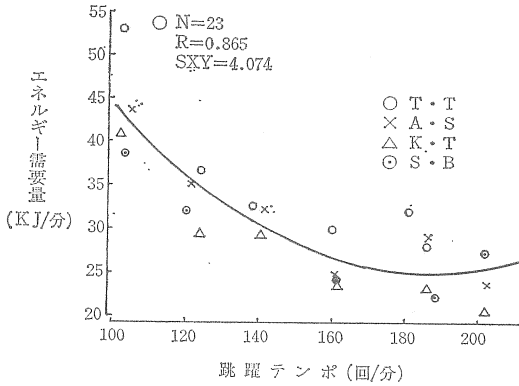


図6 跳躍テンポとエネルギー需要量の関係

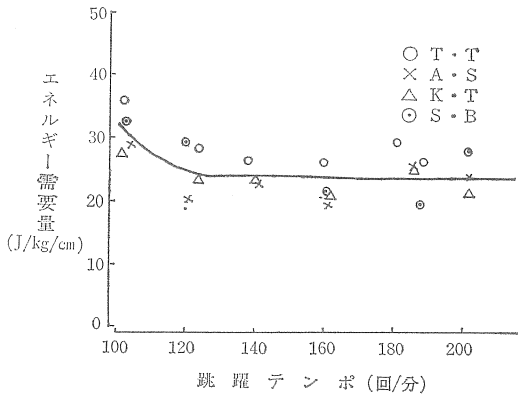


図7 跳躍テンポと体重1kg・重心垂直変位1cm当りのエネルギー需要量の関係

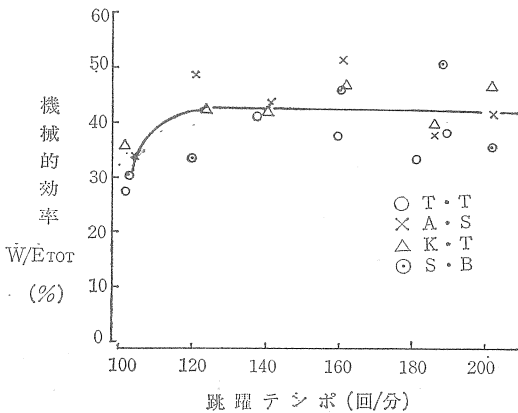


図8 跳躍テンポと機械的効率の関係

IV 考 察

周期的な反復運動を行なう時、反動動作を用いた方が、用いない場合より運動の機械的効率が高くなることが指摘されている。さらに、反動動作を用いた運動でも、運動の速度が高くなると機械的効率が高くなることが報告されている。

小島は⁴⁾、2名の被験者を対象に反動動作を伴った下肢屈伸反復運動を行なわせ、反復速度(テンポ)と運動の機械的効率の関係を検討している。反復速度(テンポ)は毎分44, 60, 76回の3種類で、機械的効率はそれぞれと19.2と23.8%, 24.4と28.3%, 26.2と31.6%とテンポとともに上昇している。

一方、本研究における連続ジャンプの機械的効率 \dot{W}/\dot{E}_{TOT} をみると、跳躍テンポ毎分120~200回では効率は一定の値を示す傾向にあった。効率は毎分120回以上の全平均で41.9%であり、毎分100回では32.5%とやや低かった。

本研究結果と小島の報告⁴⁾ からテンポと機械的効率の関係をみると、毎分44回から120回までのテンポでは、テンポが上がるに従って機械的効率が高くなるが、毎分120回のテンポを越えると機械的効率は一定の値をとることが推測される。本研究の運動と小島が用いた運動は、まったく同じでないので直接比較はできないにしても、下肢の屈伸反復運動という点でかなり類似しており、しかも毎分100回以下のゆっくりしたテンポでは、かなり運動動作が似てくるのではないと思われる。

このように考えると、ジャンプも含めた下肢の屈伸運動のテンポと機械的効率の間には、毎分120回のテンポを境に先に述べたような関係が存在する可能性が十分に考えられる。

縄跳び運動では、最も跳びやすく長続きのするテンポが存在することが経験的に知られている。1975年から1978年までの連続縄跳びの世界記録の変遷³⁾ をみても、テンポは毎分140~150回の範囲にあり、経験的な感覚と一致する。本研究においても、効率が最も高くなるテンポが現われることが予測されたが、本結果からはそのような傾向は観察されなかった。人が最も跳びやすいと感じるテンポと効率が高いということは別のことである

といえる。

正の仕事の効率 \dot{W}/\dot{E}_P は、毎分120回以上のテンポで平均で65.1%である。Ito et al²⁾ は種々のスピードのランニングの正の仕事の効率を求め、55%という本研究と近い値を報告している。その理由としては、ランニングも重心を上下させながら前に進む運動であり、着地期ではジャンプ運動と似た運動をしていることが考えられる。

また正の仕事に利用された弾性エネルギーの割合 \dot{W}_e/\dot{W} は 毎分120回以上のテンポで、平均で60.2%である。

Ito et al²⁾ はランニングにおける弾性エネルギーの利用について平均61%の値を示している。また小島⁵⁾ は膝関節屈伸運動を用いて61~72%、平均66%の弾性エネルギー利用率を示している。一方、Bosco, et al¹⁾ は脚の屈伸の小さい、すばやい跳躍運動と屈伸の大きいゆっくりした跳躍では、弾性エネルギーの利用率が異なり、屈伸のすばやい跳躍で正の仕事の50%、ゆっくりした跳躍では30%であると報告している。本研究における \dot{W}_e/\dot{W} の値は、これらの報告と一致するものである。

V ま と め

両足による連続ジャンプのテンポと機械的効率の関係を検討した。跳躍テンポは毎分100回、120回、138回、160回、184回、200回の6種類で、メトロノームに合わせて行なった。運動時間は3分間で、運動終了後、椅座位安静を20分間とった。

被験者は成人男子4名である。被験者はフォースプレート上でジャンプを行なった。運動中の仕事量は、地面反力より求めた重心垂直変位に体重を掛けることにより算出した。重心変位の較正のため、16mm 高速度カメラ(100コマ/秒)により映画撮影も合わせて行なった。

また、運動中および運動後安静時の呼気ガスを連続的に分析することにより、エネルギー需要量を算出した。

実験結果をまとめると以下の通りである。

(1) ジャンプ1回当りの重心垂直変位 h_4 は跳躍テンポが上がるに従って減少し約21cmから7cmまで変化した。

(2) エネルギー需要量 \dot{E}_{TOT} は跳躍テンポが上

がるに従って2次曲線的に減少し、テンポ毎分約180~200回で最小値をとる変化を示した。

(3) 体重1kg・重心変位1cm当りのエネルギー需要量 $\dot{E}_{TOT}/W/H$ は、跳躍テンポ毎分100回で最も大きな値をとり、跳躍テンポ毎分120回以上では、一定の値を示した。 $\dot{E}_{TOT}/W/H$ は毎分100回で30.7 J/kg/cm、毎分120回以上で24.2±3.2 J/kg/cmであった。

(4) 機械的効率 \dot{W}/\dot{E}_{TOT} 、正の仕事の機械的効率 \dot{W}/\dot{E}_P 、正の仕事に占める弾性エネルギー利用の割合 \dot{W}_e/\dot{W} は、毎分100回のテンポで最も低く、毎分120回以上のテンポではテンポが上がっても、ほぼ一定の値を示した。

(5) \dot{W}/\dot{E}_{TOT} は毎分100回で32.5%、120回以上のテンポで41.9±5.3%であった。

(6) \dot{W}/\dot{E}_P は毎分100回で43.6%、120回以上のテンポで65.1±12.4%であった。

(7) \dot{W}_e/\dot{W} は毎分100回で41.6%、120回以上のテンポで60.2±7.6%であった。

(8) 連続ジャンプを含めた下肢の屈伸反復運動では、毎分120回以下のゆっくりしたテンポでは、テンポが上がるに従って機械的効率も高くなるが、毎分120回以上ではほぼ一定の値をとると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Bosco, C. et al.: Neuromuscular function and mechanical efficiency of human leg extensor muscles during jumping exercises. *Acta Physiol. Scand.*, **114**: 543—550, 1982.
- 2) Ito, A., P. V. Komi, B. Sjødin, C. Bosco, and J. Karlsson: Mechanical efficiency of positive work in running at different speeds. *Medicine and science in sports and exercise* **15** No. 4: 299—308, 1983.
- 3) Foster, C. et al.: World-record rope skipping performance. *The physician and Sportsmedicine* **8** No. 2: 66—70, 1980.
- 4) 小島武次: 下肢屈伸運動の機械的効率. 東京大学教養学部体育学紀要第12号: 41—43, 1978.
- 5) 小島武次, 琉子友男, 近藤正勝: 反動動作を伴った下肢屈伸運動における弾性エネルギーの役割. *J. J. Sports Sci.* **2** No. 2: 152—156, 1983.
- 6) Margaria, R.,: 身体運動のエネルギー(金子公宥訳), ベースボール・マガジン: 98—102, 1978.

