

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

松尾 彰文 福永 哲夫

Characteristics of sprinters and long distance runners with reference

to mechanical energy output in running

by

Akifumi Matsuo, Tetsuo Fukunaga

Abstract

The character of sprinter and long distance runner on mechanical external work and average power during foot contact, were measured by means of force plate made by KISTLER. The both negative and positive external work and average power was calculated from the reaction force on the plate form, exerted by the contact foot. The measured range of running velocity was 3.1 ± 0.6 to 9.2 ± 0.4 m/sec on sprinter and from 3.1 ± 0.6 to 7.3 ± 0.3 m/sec on long distance runner. As the same running velocity, the step frequency of long distance runner were indicated higher value than sprinter, while the step length of sprinter were indicated higher value than long distance runner. Both positive and negative external work in one step increased with running velocity, and reached maximum value (positive; 3.0 joule/kg, negative; 2.4 joule/kg) at about 7 - 8 m/sec. The air resistance was calculated from the distance between positive and negative work at maximum running velocity. The value of air resistance was indicated 0.28 H.P. (9.2 m/sec) on sprinter, 0.14 H.P. (7.3 m/sec) on long distance runner. These values were identical with the report of Hill, A. V. (1928). In negative external work and negative average power, long distance runner indicated lower value than sprinter. It was considered that long distance runner were better absorbed the impulse when the leg was flexed at the moment of the foot contact, and it was also suggested that the long distance runner were not better utilized the elastic energy of the muscle than sprinter.

走運動時に身体のもつ力学エネルギーは、身体重心についてみた外的エネルギー (E_{ext})、と内的エネルギー (E_{int}) に分けられる (Fenn, W.O., 1930, Cavagna, G. A. ら, 1964)。外的エネルギーは身体重心の前後方向のエネルギー (E_f)、垂直方向のエネルギー (E_v)、横方向のエネルギー (E_e) に分けられる。また、内的エネルギー (E_{int}) は、身体重心移動に直接関係のない体肢および体幹のもつ運動エネルギーと回転エネルギーである (Fenn, W. O., 1930, Cavagna, G. A. 1964)。

一定速度の走運動中の力学エネルギーは、Fenn, W. O., (1930), Cavagna, G.A. ら (1964, 1976), Fukunaga, T. ら, (1980) たちにより、フォースプレートや、フィルムから測定された。その結果、走運動中の力学エネルギーは、接地期前半では接地時の衝撃により減少し、後半は脚の押しにより増加する。このようにして一步ごとのエネルギーは、平均するとほぼ一定の値が保されている。接地時の衝撃によりエネルギーが減少する期間を負の相 (negative phase), 増加する期間を正の相 (positive phase) とすると、各相におけるエネルギーの変化量をそれぞれ負の仕事 (negative work) および正の仕事 (positive work) とすることができる (Cavagna, G. A. ら 1964)。負の仕事には、接地時の衝撃、地面と接地脚の間で生じる摩擦、空気抵抗などが考えられる。Cavagna らの報告によると、単位時間あたりの正の仕事は、走速度に対し漸増的に増加するとされている。従って、空気抵抗や摩擦等による影響が小さければ、負の仕事も正の仕事と同じように増加する傾向を示すと考えられる。Cavagna ら (1971) によると、走速度の速いときには、負の相で身体の直列弾性要素が受動的に伸ばされることでエネルギーが蓄積されこの一部が正の相で利用されるとしている。このような弾性要素によるエネルギーは、走速度が 7~8 m/sec 以上のときに生じ、それが、performance にも影響すると論じている。

そこで本研究では、走速度と正および負の外的仕事、平均パワーの関係から、短距離選手 (Sprinter; SPR) と長距離選手 (Long Distance Runner; LDR) の特性を明らかにしようとするものである。

実験方法

1). 被検者

被検者として、陸上競技短距離選手 10 名、長距離選手 8 名を選んだ。被検者の年齢、身長、体重、最高記録 (短距離選手は 100m, 長距離選手は 5000 m) は、表 1 に示した。

2). 実験装置

図 1 は、本実験の測定風景である。図 2 は本実験で用いた装置の模式図である。本実験で用いた装置は、フォースプレート、光電管、加速度計およびデータレコーダーであり、長さ 80m, 巾 1.2 m の全天候型舗装の走路の端から 50m の地点に設置した。



Fig.1. Application of the measurement.

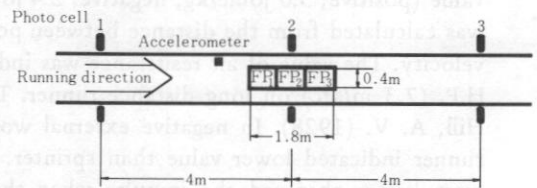


Fig.2. Schematic illustration of experimental apparatus. The reaction force against contact foot was measured using three force platforms made by KISTLER.

接地脚の地面反力は、キスラー製フォースプレートを 3 台使い、図 2 に示したように設置した。フォースプレートは、走路にコンクリートでしっかりと固定した台に取り付けた。キスラー製フォースプレートは、作用した力を横、前後および垂直方向の 3 つに分けて測定できる。また、横方向

Table 1. Physical characteristics of subjects.

Subject	Age (yrs)	Height (m)	Weight (kg)	Best performance
Sprinter				(100m)
1 IWA	19	1.72	65.2	10" 7
2 ITO	19	1.75	70.0	10" 7
3 KOS	19	1.70	65.2	10" 8
4 YAM	19	1.78	73.6	10" 5
5 AMA	21	1.75	67.6	10" 6
6 KEI	23	1.70	62.2	11" 7
7 IBU	21	1.71	64.9	11" 4
8 ASA	20	1.76	63.5	11" 4
9 YAN	22	1.73	61.7	11" 0
10 TSU	20	1.79	73.2	11" 4
Mean	20.3	1.739	66.71	11" 02
S. D.	1.4	0.031	4.06	0" 40
Long distance runner				(5000m)
1 MUR	22	1.65	54.8	15' 33"
2 FUK	21	1.74	56.8	15' 08"
3 AKI	21	1.73	59.7	16' 27"
4 NAK	21	1.74	60.8	17' 29"
5 SAK	23	1.74	58.3	14' 40"
6 SHI	22	1.64	56.1	16' 25"
7 EGA	22	1.68	52.5	15' 59"
8 KOB	21	1.65	53.8	16' 44"
Mean	21.6	1.693	56.60	16' 03"
S. D.	0.7	0.040	2.7	51"

と前後方向は $\pm 10\text{KN}$ 、垂直方向は $-10 \sim +20\text{KN}$ の範囲の力を測定でき、固有振動は 1kHz 以上である。このプレートは身体が作用した力を測定するためには十分な性能をもっている。

前後方向の平均速度 (V_f) はフォースプレートの前後 4m ごとに光電管を 3 組設置し、被検者の通過する時間を測定して求めた。

歩数、歩巾は走路上に設置した加速度計を用いて、プレートに接地する 1 歩もしくは 2 歩前の接地時の衝撃を記録することから求めた。

力、光電管、加速度計の電気信号は、データレコーダーに記録した後に実験室で再生した。

被検者が走行中の風速は、風向風速計を用いて測定し、ほぼ無風時の走行についてのみ分析を行った。

3). 実験手順

被検者は、図 2 に示した走路を、遅い速度から始め、最大速度まで異なる走速度で通過した。被検者には、測定装置の設置してある区間では、できるだけ一定速度で、自然な動きで走るように指示した。なお、最大速度で通過するときは、測定装置から 30m 離れた地点から出発し、ほぼ最高速度に達してから、フォースプレート上を通過するようにした。

4). 外的仕事およびパワーの計算

データレコーダーに記録されている力の電気信号は、A-D コンバーターにより、 1msec ごとに各成分 (横方向、前後方向、垂直方向の力) をデジタル化してミニコンピューターによって分析した。

図3は、被検者(YAN)が9.39, 8.13および4.88 m/secで走ったときの実験記録である。上から横方向の力 (F_l)、垂直方向の力 (F_v) および前後方向の力 (F_f) である。各力曲線に、接地直後、大きな動揺がみられる。本研究で用いているフォースプレートの固有振動は1 KHzであり、各力曲線にみられる振動は100 Hzにも満たないことから、このような振動も実際に身体に作用しているものとして分析を行なった。地面反力は、身体重心に作用した力と地面と接地脚の摩擦抵抗を無視し、地面反力がすべて身体重心に作用しているものとして分析を行なった。

力を時間で積分した力積は、運動量に等しい。運動量は、速度と質量の積であるから、 i 時点における前後方向の速度 (V_{fi}) は、

$$V_{fi} = V_{fi-1} + \frac{1}{m} \int_{i-1}^i F_f dt$$

となる。ここで m は身体質量、 F_f は前後方向の力である。力は、 $i-1$ と i の間では、1次関数であるとして計算した。 V_{f0} は、光電管を用いて計測したフォースプレートを通過する前の走速度とした。垂直方向の速度 (V_{vi}) は、

$$V_{vi} = V_{vi-1} + \frac{1}{m} \int_{i-1}^i (F_v - m \cdot g) dt$$

となる。ここで、 g は重力加速度 (9.81 m/sec²) である。垂直方向の重心移動は単振動を繰り返しているものと仮定し、垂直方向の速度は、負の最大値と正の最大値が等しくなるように算出した。

前後方向のエネルギー (E_{fi}) は、

$$E_{fi} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{fi}^2$$

となる。また、垂直方向のエネルギー (E_{vi}) は、垂直方向の運動エネルギー ($E_{kvi} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{vi}^2$) と位置エネルギーを加えたものになる。

$$E_{vi} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{vi}^2 + m \cdot g \cdot h_i$$

ここで、 h_i は、重心の垂直移動距離である。垂直移動距離は、

$$h_i = h_{i-1} + \int_{i-1}^i V_{vi} dt$$

となる。

外的エネルギー E_{ext} は、各成分のエネルギーの和、すなわち、

$$E_{exti} = E_{fi} + E_{vi} + E_{ei}$$

となる。なお、本研究では、 E_l が、他の成分の1/100にも満たないことから、これを除外した。

図4は、上述の方法で計算した、エネルギー曲線の模式図である。各成分とも、接地期の前半に減少し、後半には増加する傾向がみられた。エネルギーが最小になる時点は、各成分ごとに異なる。各成分の減少する期間を負相(negative phase)、増加する期間を正相(positive phase)とし、それぞれの期間中のエネルギー変化量を、負仕事(negative Work, nW)および正仕事(positive work, pW)

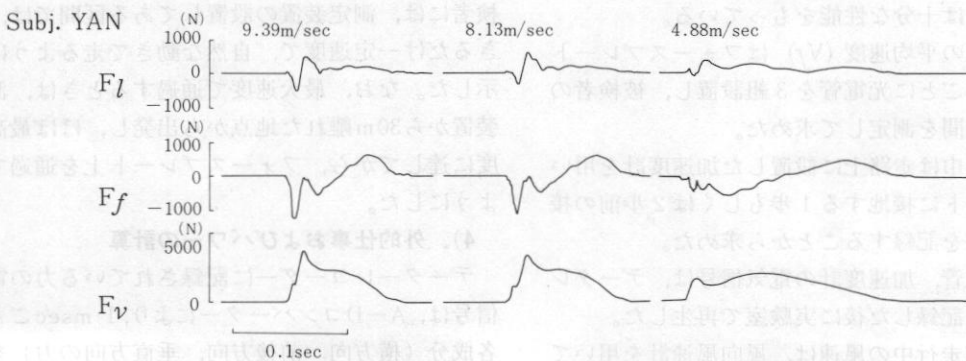


Fig.3. Experimental records were obtained from the subject YAN running at 9.39, 8.13, and 4.88 m/sec. F_l presents the lateral force, F_f forward force, F_v vertical force.

とした。また、負仕事、正仕事を各期間の時間で除して、平均パワー($nP_f, pP_f, nP_v, pP_v, nP_{ext}, pP_{ext}$)を計算した。

速度に対する各成分の変化は、Cavagnaら(1964, 1975), Luhtanen, P.ら(1978), Fukunaga, T.ら(1980)の報告によると曲線的な変化がみられた。本研究では、速度に対する各成分は、曲線的に変化するとして、各被検者ごとに、2次多項式($Y = a + bx + cx^2$)にあてはめて回帰方程式を計算した。各被検者群の回帰方程式は、被検者ごとに計算した2次多項式のそれぞれの係数ごとに平均値を出して求めた。

結 果

遅い速度から最大速度まで異なる速度でフォースプレート上を通過した結果、短距離選手では、各被検者の最高速度が8.7~9.8 m/sec, 平均9.2±0.4 m/sec, 最低速度が2.3~4.3 m/sec, 平均3.5±0.6 m/sec, 長距離選手では6.7~7.7 m/sec, 平均7.3±0.3 m/sec, 最低速度が2.2~4.4 m/sec, 3.1±0.6 m/secであった。

1). 歩数と歩巾について

図5は走速度 (V_f) に対する歩数 (S_{fr}) および

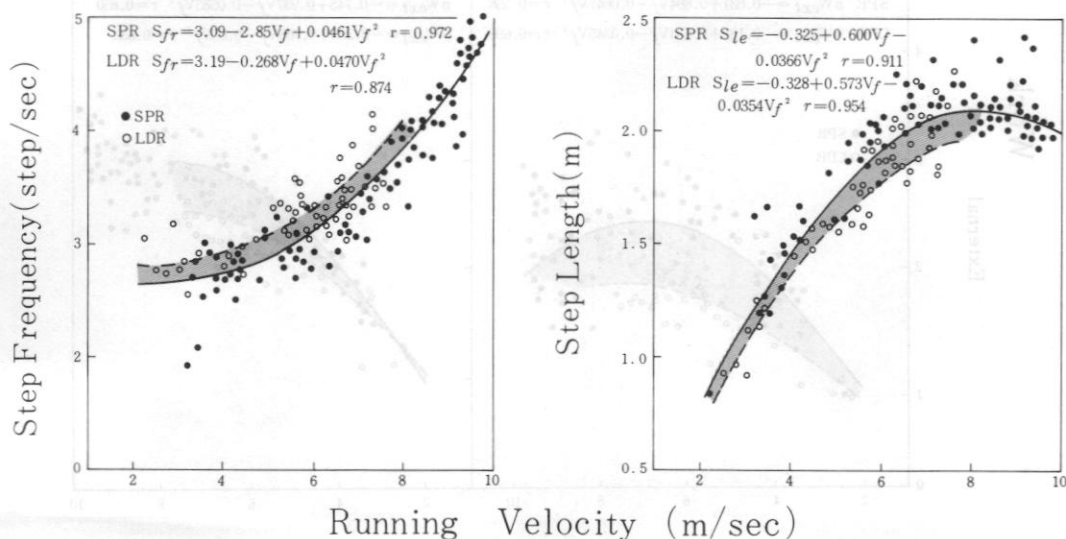


Fig.5. Step frequency and step length as a function of the running velocity. Closed circle represents the data of sprinter. Open circle is long distance runner. Continuous curve indicates quadratic equation of sprinter (SPR), broken curve is long distance runner (LDR). Dark area enclosed two curves indicate the difference between sprinter and long distance runner.

歩巾 (S_l) の関係のみたものである。図中の●印は短距離選手, ○印は長距離選手, 実線は短距離選手, 破線は長距離選手の回帰方程式 ($Y = a + bx + cx^2$) を示している。各群の回帰方程式は、各被検者ごとに計算した値の平均値として求めた。

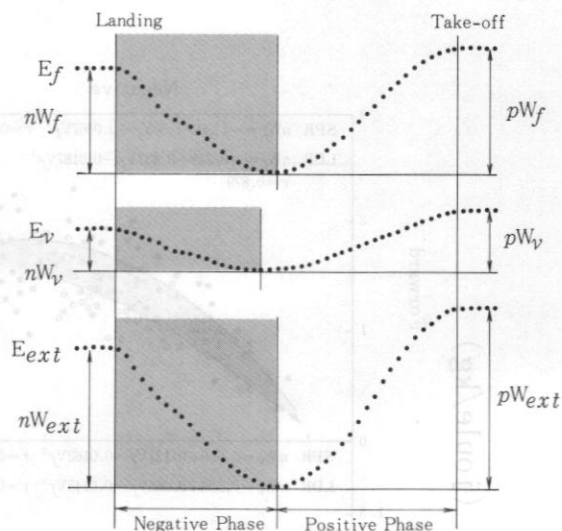


Fig.4. Schematic illustration of energy changes in center of gravity of the body. E_f is forward energy, E_v vertical and E_{ext} external energy. Negative phase is represented by dark area.

走速度が比較的遅いときは、歩巾の増加が顕著であるが、速くなると、歩数の増加が顕著になり、最大速度近くでは、歩巾の減少がみられた。歩数では、長距離選手は短距離選手よりも高い値を示し、歩巾で低い値を示す傾向がみられた。

2). 外的仕事

図6は、走速度に対する前後方向の仕事、垂直方向の仕事および外的仕事の関係を示している。左側が負仕事、右が正仕事である。図中の記号は図5と同じ様に示した。

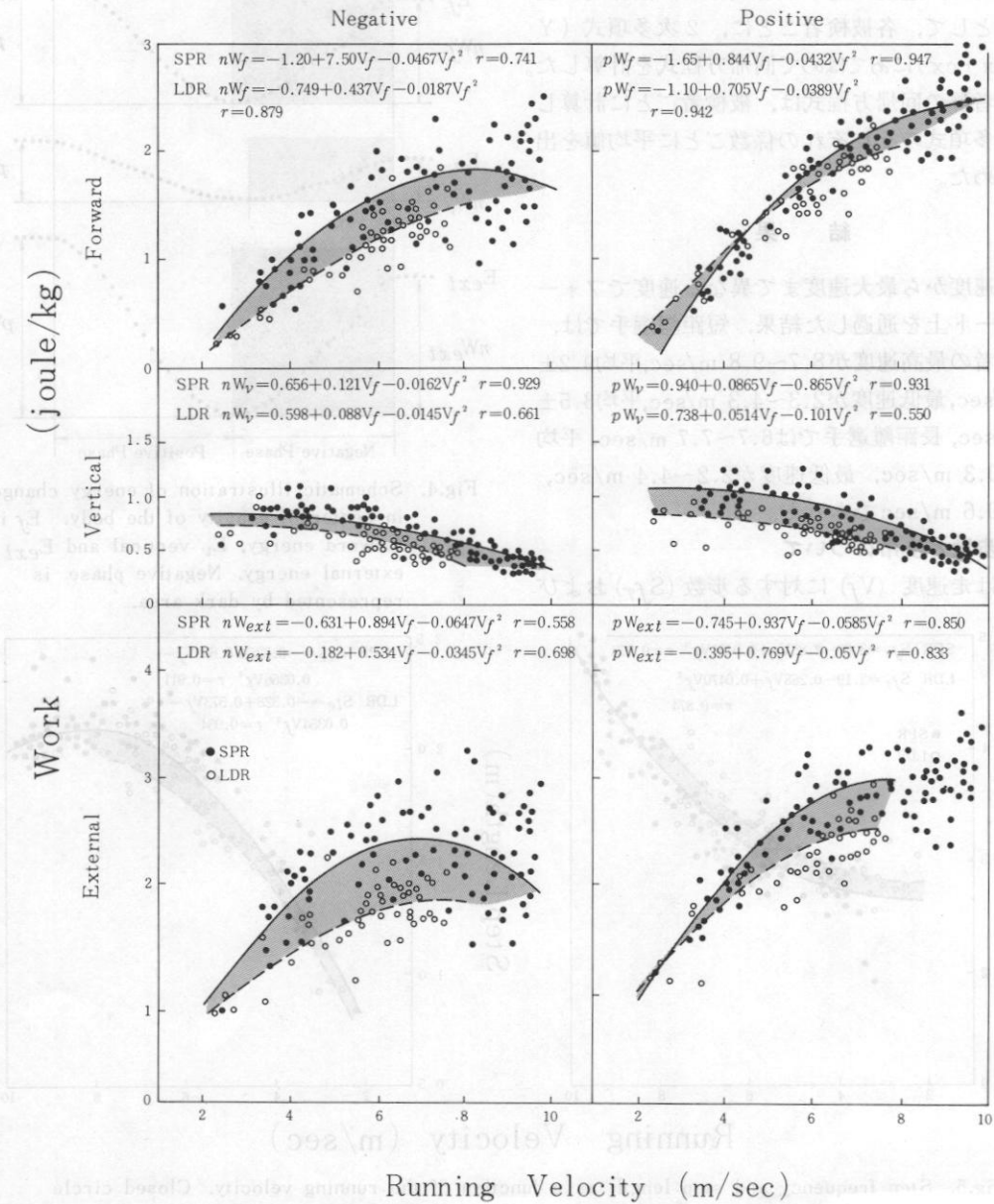


Fig.6. Negative and positive each work as a function of the forward running velocity. Symbol as in Fig.5.

短距離選手についてみると、負および正の前後方向の仕事ならびに外的仕事は走速度に対し、増加するが、速度が速くなるにつれて増加傾向が少なくなる。負の前後方向の仕事、及びに正負の外的仕事では、最高速度付近(約7~8 m/sec)で最大値($nW_f=1.8$, $nW_{ext}=2.4$, $pW_{ext}=3.0$ Joule/kg)に達し、それ以後、減少する傾向がみられた。垂直方向の仕事は、約3 m/secで、負仕事が約1.0 Joule/kg, 正仕事が約1.2 Joule/kgの値を示し、最高速度9 m/sec付近では、負の仕事は約0.6 Joule/kg, 正の仕事は約0.5 Joule/kgの値を示した。

長距離選手についてみると、短距離選手とほぼ同様の傾向がみられたが、全体にみて、低い値を示した。

図7は、負の仕事と正の仕事の関係をみたものである。図中の記号は、図5と同じである。各成分ともに、正の仕事は、負の仕事に比例して増加する傾向がみられ、負の仕事よりも大きい値を示す傾向がみられた。前後方向の仕事では、短距離選手と比較すると長距離選手が、高い値を示す傾向がみられ、垂直方向についてみるとわずかではあるが、短距離選手が高い値を示す傾向がみられた。外的仕事では、負の仕事が約2 Joule/kgまでは短距離選手が高い値を示し、それ以上では長距離選手が高い値を示した。

3). 平均パワー

図8に、走速度と平均パワーの関係を示した。図中の記号は、図5と同様に示した。

短距離選手では、前後方向および外的平均パワーは、走速度の増加にともない増加するが、増加の割合は減少する傾向がみられた。

負および正の前後方向の平均パワーと外的平均パワーは、3 m/sec付近でそれぞれ、5.7, 2.7, 14.8, 9.2 watt/kgの値を示し、走速度の増加にともない増加し、最高速度付近(約9 m/sec)では、39, 41, 50, 48 watt/kgの値を示した。垂直方向の平均パワーをみると、6~7 m/sec 付近で最大値(負の平均パワーが13.6 watt/kg, 正が13.4 watt/kg)に達し、それよりも遅くとも速くとも減少する傾向がみられた。

長距離選手についてみると、各成分の負の平均パワーは、短距離選手よりも低い値を示す傾向がみられた。正の平均パワーでは、短距離選手とほぼ同じ値を示す傾向がみられた。

図9は、負の平均パワーに対する正の平均パワーの関係をみたものである。図中の記号は、図5と同じ様に示した。各成分とも負の平均パワーに比例して正の平均パワーが増加する傾向がみられた。

短距離選手についてみると、前後方向の平均パ

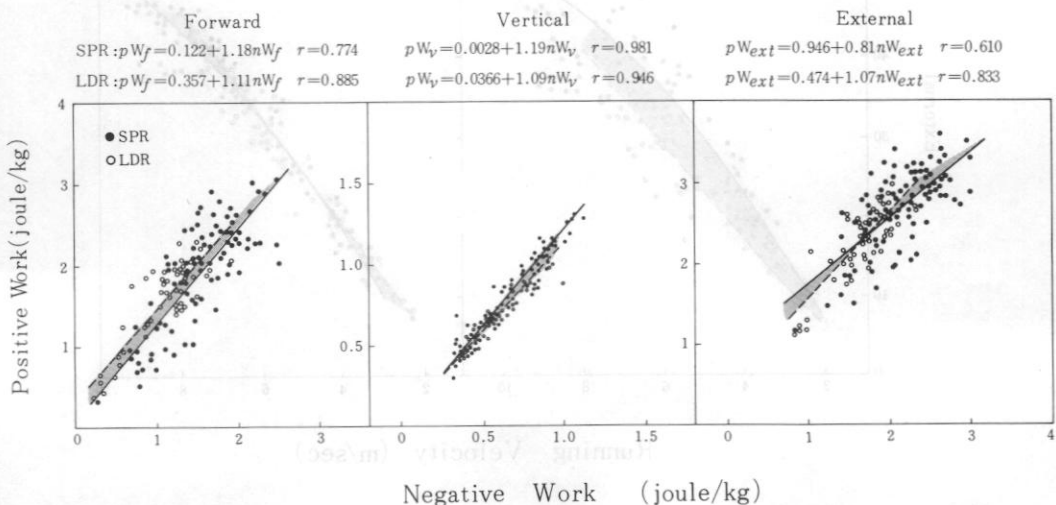


Fig.7. The relationship between negative work and positive work. Symbols as in Fig.5.

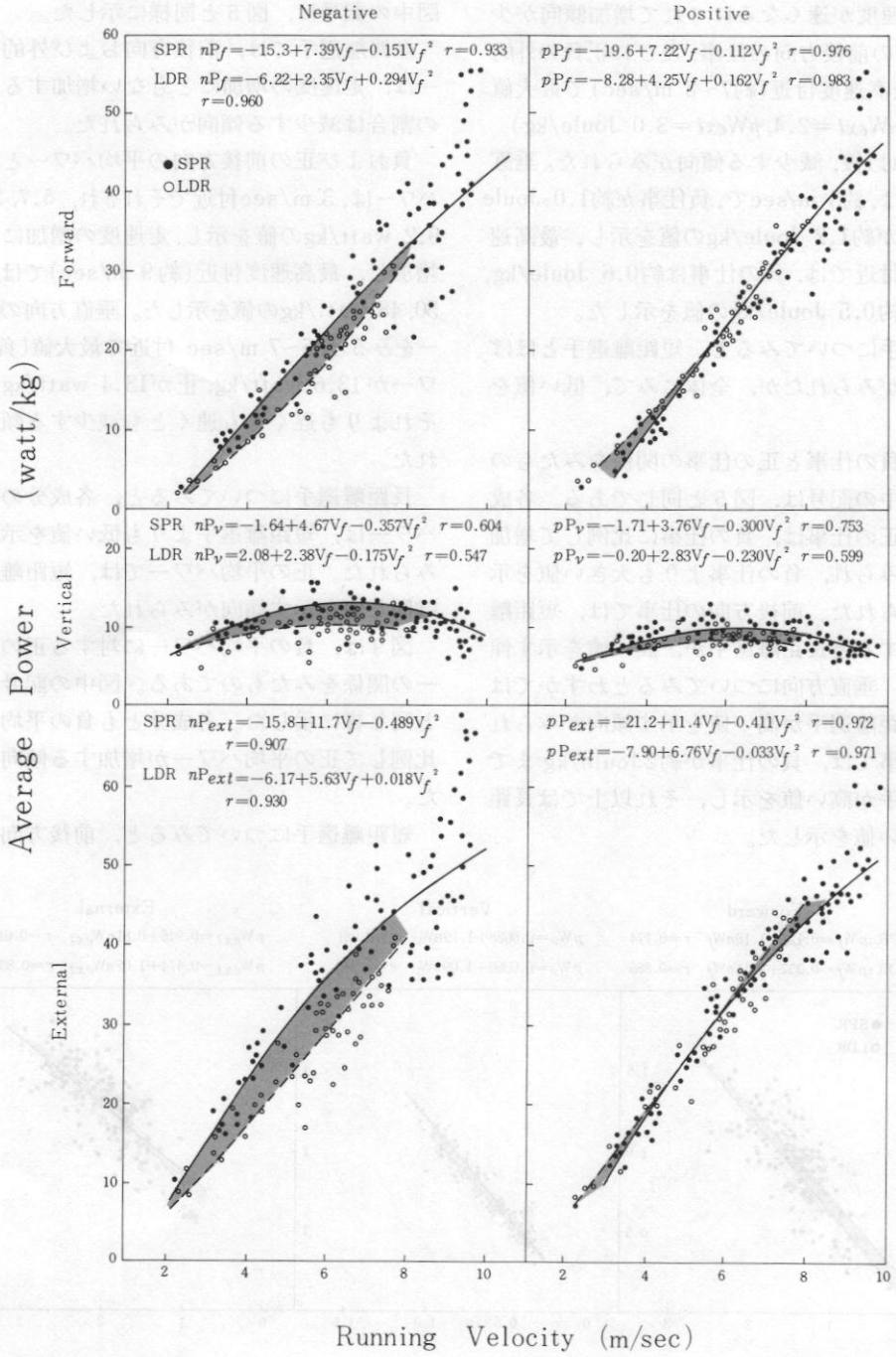


Fig.8. Each negative and positive average power as a function of the forward running velocity. Symbols as in Fig.5.

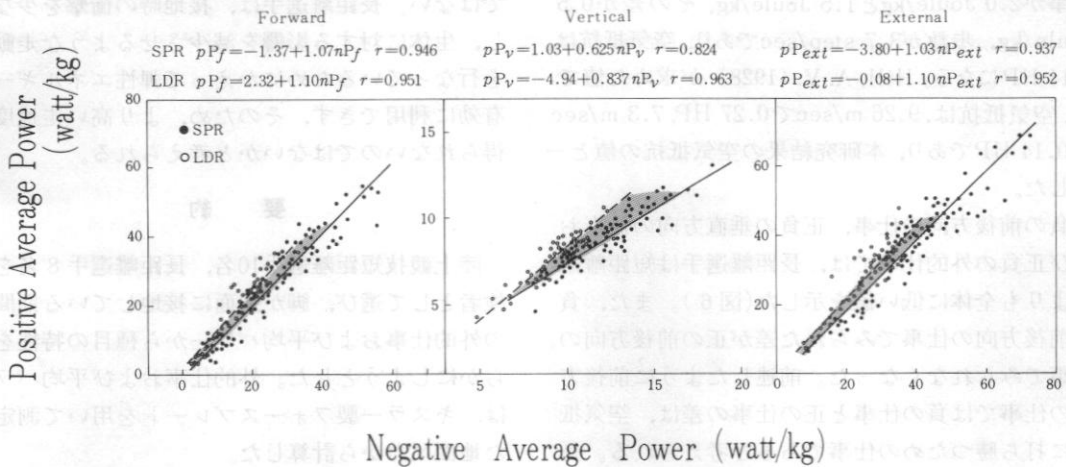


Fig.9. The relationship between negative and positive average power. Symbols as in Fig.5.

ワーは負と正の値がほぼ同じ値を示した。垂直方向の平均パワーは、負の値が高い値を示した。また、外的平均パワーは、負の値が正の値よりも高い値を示す傾向がみられた。

長距離選手では、負の平均パワーに比べ、正の平均パワーが高い値を示した。垂直方向の平均パワーでは、短距離選手と同様に負の平均パワーが大きい値を示した。しかし、全体にみると、長距離選手は、負に対して正の平均パワーが、短距離選手よりも高い値を示した。

論 議

短距離選手における走速度に対する歩数および歩巾の関係は、Hogberg (1952)、松井 (1966)、星川ら (1971) および Fukunaga, T. ら (1980) の報告とほぼ同様の傾向が得られている。長距離選手は、短距離選手に比べ、歩数は高い値を示し、歩巾は低い値を示した。Nelson, R.C. ら (1976) は、長距離トレーニングを積むことにより、速度に対する歩数と歩巾の関係は、歩数が増加し、歩巾が減少する傾向があると報告している。このことから、短距離選手と長距離選手の間にみられる差は、長距離選手の特性により生じたものと考えられる。

本研究では、走運動の1周期内の平均速度が一定の値でくり返されていると仮定した。

本研究の1周期は、重心の垂直移動が最高点に達した時点から、フォースプレートに接地したあ

と重心が最高点に達するまでである。接地脚の左右差はないものとして分析を行なった。

走速度に対する正の外的仕事は3~9 m/secの間で12~50 Joule/kgの変化を示す。また、前後方向のそれは、11~43 Joule/kgの変化を示す。垂直方向の仕事は、3 m/secで6 Joule/kg、6 m/secで最大値、9 Joule/kg、9 m/secでは7 Joule/kgの変化であり、外的仕事は主に前後方向の仕事に影響されている。正の前後方向の仕事は、接地時に減少したエネルギーと空気抵抗と摩擦などにより減少したエネルギーに等しい。本研究ではこの摩擦によるエネルギー消失は測定不可能であり、Cavagnaら (1971) に従い、このエネルギーが少量であるとして除外した。空気抵抗がないところでは、身体が空中にある期間に速度を減少させる力の作用は重力以外にはなく、前後方向の速度は、接地前と離地後で差がないものと考えられる。そのときには、正と負の前後方向の仕事に差はないと考えられる。空気抵抗がある場合には、正の前後方向の仕事と負の前後方向の仕事の差は、空気抵抗に対する仕事と考えられる。本研究結果の最大速度時の各項目の平均値は、短距離選手では、速度が9.2 m/sec、正と負の前後方向の仕事は、2.5 Joule/kg、1.8 Joule/kgでその差0.7 Joule/kgであった。このときの歩数4.4 step/secを乗じて1秒間の空気抵抗を計算すると、0.28 H.P.になる。一方、長距離選手の場合、速度が7.3 m/sec、正と負の前後方向の

仕事は2.0 Joule/kgと1.5 Joule/kg, その差が0.5 Joule/kg, 歩数が3.7 step/secであり, 空気抵抗は, 0.14 HPになる。Hill, A. V. (1928) が求めた値では, 空気抵抗は, 9.26 m/secで0.27 HP, 7.3 m/secで0.14 HPであり, 本研究結果の空気抵抗の値と一致した。

負の前後方向の仕事, 正負の垂直方向の仕事および正負の外的仕事では, 長距離選手は短距離選手よりも全体に低い値を示した(図6)。また, 負の前後方向の仕事でみられた差が正の前後方向の仕事でみられなくなった。前述したように前後方向の仕事では負の仕事と正の仕事の差は, 空気抵抗に打ち勝つための仕事であると考えられる。長距離選手は走速度に対する歩数は短距離選手よりも高い値を示す。従って, 長距離選手は, 1歩内で受ける空気抵抗に対抗するための仕事を少なくしているものと考えられる。また, 長距離選手が短距離選手よりも負の仕事が少ない。このことは長距離選手が, 接地時の衝撃を少なくするような走動作を行なっているものと考えられる。

長距離選手と短距離選手の比較を平均パワーでみると, 負の平均パワーで差がみられる程度で, 正の平均パワーは両選手群で各成分ともにはほぼ同水準の値がみられた。しかしながら, 負のパワーでは各成分で長距離選手が低い値を示した。パワーは, 速度と力の積であるから, 同一速度で負の平均パワーが少ないことは, 接地期の負の相の地面反力が少ないことを意味している。しかも, 長距離選手は歩数が多いことから, 負相の時間も短くなり, 平均パワーでの差は, 少なくなると考えられた。それにもかかわらず, 長距離選手が負の平均パワーで短距離選手よりも低い値を示している。このことから, 接地時の衝撃を受け止める動作に長距離選手と短距離選手の差があるものと考えられる。

Cavagnaら(1971)は, 筋の弾性エネルギーは7~8 m/sec以上の走速度で影響を与えるとなると論じている。本研究の長距離選手の最大速度は, 7.3 m/secであり, 弾性エネルギーの利用にはあまり影響のない速度と考えられる。しかしながら長距離選手の最大速度での疾走中に弾性エネルギーの有効な利用が行なわれているかどうか明確

ではない。長距離選手は, 接地時の衝撃を少なくし, 生体に対する影響を減少させるような走動作を行なっているためにかえって弾性エネルギーを有効に利用できず, そのため, より高い走速度が得られないのではないかと考えられる。

要 約

陸上競技短距離選手10名, 長距離選手8名を被検者として選び, 脚が地面に接地している期間中の外的仕事および平均パワーから種目の特性を明らかにしようとした。外的仕事および平均パワーは, キスラー製フォースプレートを用いて測定した地面反力から計算した。

1. 外的仕事および平均パワーは, 短距離選手では, $3.6 \pm 0.6 \sim 9.2 \pm 0.4$ m/sec, 長距離選手では, $3.1 \pm 0.6 \sim 7.3 \pm 0.3$ m/secの範囲の速度で測定した。

2. 走速度と歩数および歩巾の関係で, 長距離選手は短距離選手に比べ歩数が高く, 歩巾が低い値を示す傾向がみられた。

3. 正および負の外的仕事は, 7~8 m/sec付近で最大値(正3.0 Joule/kg, 負2.4 Joule/kg)に達し, それ以後, 減少する傾向がみられた。

4. 最大速度での正と負の前後方向の仕事の差から, 空気抵抗に対するパワーを計算した。短距離選手は, 9.2 m/secのとき0.28 H.P., 長距離選手では7.3 m/secのとき0.14 H.P.の値を示し, Hill(1928)が求めた値と一致した。

5. 長距離選手は, 接地時の衝撃を少なくし生体に与える衝撃を少なくするような動作で走っていると考えられた。

本研究を実施するに当たり御協力をいただいた順天堂大学の佐久間和彦先生, 和光大学の矢田秀昭先生, 被検者として御協力していただいた順天堂大学および東京大学の陸上競技部員に心から感謝の意を表します。なお, 本研究の一部は, 第60回体力医学会関東地方会に発表した。

REFERENCE

- 1) Cavagna, G. A., F. P. Saibene and R. Margaria: Mechanical work in running. *J. Appl. Physiol.* 19 (2); 246-256, 1964.
- 2) Cavagna, G. A., F. P. Saibene and R. Margaria: Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle. *J. Appl. Physiol.* 20 (1): 157-158, 1965.
- 3) Cavagna, G. A., L. Komarek and S. Mazzoleni: The mechanics of sprint running. *J. Physiol.* 217; 709-721, 1971.
- 4) Cavagna, G. A.: Force platform as ergometer. *J. Appl. Physiol.* 39 (1); 174-179, 1975.
- 5) Cavagna, G. A., H. Thys and A. Zamboni: The source of external work in level walking and running. *J. Physiol.* 262; 639-657, 1976.
- 6) Cavagna, G. A. and M. Kaneko: Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268; 467-481, 1977.
- 7) Fenn, W. O.: Frictional and kinetic factors in the work of sprint running. *Am. J. Physiol.* 92; 583-611, 1930.
- 8) Fenn, W. O.: work against gravity and work due to velocity changes in running. *Am. J. Physiol.* 93; 433-462, 1930.
- 9) Fukunaga, T., A. Matsuo, K. Yuasa, H. Fujimatsu, and K. Asahina: Effect of running velocity on external mechanical power output. *Ergonomics*, 23 (2); 123-136, 1980.
- 10) Hill, A. V.: The air-resistance to a runner. *Proc. roy. Soc. B* 118, 380-384, 1928.
- 11) Hogberg, P.: Length of stride, stride frequency "flight" period and maximum distance between the feet during running with different speeds. *Arbeits-physiologie*, 14, 431-436, 1952.
- 12) 星川保, 宮下充正, 松井秀治: 歩および走における歩巾と歩数に関する研究, *体育学研究*, 16 (3); 157-162, 1971.
- 13) 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); 582-585, 1966.
- 14) Luhtanen, P. and P. V. Komi: Mechanical energy states during running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 38; 41-48, 1978.
- 15) Luhtanen, P. and P. V. Komi: Force-, power-, and elasticity-velocity relationships in walking, running, and jumping. *Eur. J. Appl. Physiol.* 44; 279-289, 1980.
- 16) Nelson, R. C., and R. J. Gregor: Biomechanics of distance running: a longitudinal study. *Research Quarterly* 47 (3); 417-428, 1976.
- 17) Norman, R., M. Sharratt, J. Pezzack, and E. Noble: Reexamination of the mechanical efficiency of horizontal treadmill running. *Biomechanics V-B*. Baltimore, University Park Press. 1976.