

歩行における下肢関節の動きからみた 外的エネルギーについて

松尾 彰文 福永 哲夫

External energy in walking from viewpoint of the movement in ankle and knee joints.

Matsuo Akifumi, Fukunaga Tetsuo

Abstract

In the walking at different speeds, the vertical and forward components of the force exerted by the foot on the ground and the displacement of the centre of gravity of the body were measured by means of force platform and 16 mm cine film. From these records the external mechanical energy changes of the centre of gravity were calculated in two components; forward energy change (E_f) and upward energy change (E_v). The present experiment was performed with 8 healthy normal male subjects. Work done due to forward velocity changes (W_f) increased linearly with the walking velocity. Work done against gravity (W_v) scattered about 0.7-2.1 watt/kg independent of the walking velocity. It was observed that the movement of knee joint had an important role to the energy transport between vertical and forward, and plantar flexion of ankle joints was related to the increment of E_{tot} .

抄 録

本研究では、歩行速度 (V_f) の変化にともなう身体重心のエネルギー (E_{tot}) の変化を膝関節および足関節の角度変化から考察しようとするものである。 E_{tot} は、圧力盤と16mm フィルムを用いて、進行方向と垂直方向に分けて計算した。膝関節と足関節角度は16mm フィルム分析から求めた。被検者として、健康な男子大学生8名を選んだ。その結果、進行方向の速度維持のために必要な仕事 (W_f) は、 V_f の増加に比例して増加する傾向がみられ、重力に抗する仕事 (W_v) は V_f に対して一定の傾向が得られなかった。歩行中の膝関節の動きは主に位置エネルギーから運動エネルギーに変わることに関係しており、足関節の底屈期と E_{tot} の増加の時期とが一致していることがみられた。このことから、足関節の底屈が E_{tot} の増加に寄与していることを示すものと考えられる。

諸言

歩行中の外的仕事は効率を計算するときの分子の一部として測定されてきた。Cavagna ら^{1),3),4)}は加速度計や圧力盤を用いて身体重心の動きを進行方向と垂直方向に分けて測定した結果から、身体重心のエネルギーを計算した。外的仕事(W_{tot})は、一步内での身体重心のエネルギーの増加量の総和とした。また、Cavagna と Kaneko⁵⁾は、16mm フィルム分析から、四肢の重心に対する運動エネルギーと回転エネルギーを含めて歩行中の身体のエネルギーを計算した。身体重心のエネルギーは外力の作用により、また、四肢のエネルギーは内力の作用により増減する。そのため、身体重心のエネルギーの増加量の総和を外的仕事、四肢のエネルギーの増加量を内的仕事ということが出来る¹⁾。

Cavagna ら³⁾は、身体重心のエネルギー (E_{tot}) を位置エネルギー (E_p) と運動エネルギー (E_k) に分けた場合に、比較的ゆっくりした歩行では、位置エネルギーが増加するとき運動エネルギーが減少し、逆に運動エネルギーが増加するとき位置エネルギーが減少する傾向があると報告している。このようなエネルギーの変化から、マルガリア⁶⁾は、歩行中の身体重心の動きは、転がりながら進んでいく卵に似ていると述べている。これは、歩行中の身体重心がエネルギー保存則により運動エネルギーから位置エネルギーへ、位置エネルギーから運動エネルギーへ変わりながら移動していることを例えたものである。しかしながら、摩擦等で幾分かエネルギーが消耗するので、移動速度を維持するために外部からの力の作用が必要になる。歩行の場合には、筋の活動により地面を蹴り、その地面反力が外部からの力として身体重心に作用し、身体重心のエネルギーが増加する。

本研究では、身体重心のエネルギーの増加量の総和を人が外界に対して積極的に作用した力による仕事としてとらえ、身体重心のエネルギーの増減と下肢関節の動きの関連性を明らかにしようとした。

方法

1. 被検者

被検者として健康な男子大学生 8 名を選んだ。被検者の身体特性を表 1 に示した。

2. 実験手順

本実験で用いた装置は、圧力盤、16mm 映画カメラ、パルスジェネレーター、歪アンプ、データレコーダーである。

圧力盤は、進行方向と垂直方向の分力が検出できるようにストレンゲージを貼布したものをを用いた。圧力盤の大きさは、縦 0.75m、横 0.50m であった。この圧力盤の固有振動は 109Hz であった。

動作分析には、歩行路から 30m 離れた地点から毎秒 50 コマで撮影した 16mm フィルムを用いた。

圧力盤の記録は、データレコーダーに記録した。16mm フィルムと圧力盤の記録の周期には、パルスジェネレーターから発振される 50Hz の矩形波を用いた。

被検者は、最大速度からはじめ、4~5 種の異なる歩行速度で圧力盤上を通過した。被検者には、圧力盤の前後で歩行速度を変化させないように注意した。

3. フィルム分析

フィルム分析は、モーションアナライザーとグラフィックスシステムを組み合わせた方法で行なった。身体重心は、三浦ら⁹⁾による座標測定方式による合成重心の算出法を用い、同時に、膝関節および足関節の角度を測定した。身体重心については、進行方向と垂直方向の二方向での位置の変化を求めた。また、膝関節および足関節の角度変化を求めた。進行方向の歩行速度 (V_f) は、身体重心が接地脚の直上を通過する時点の前後 5 点の位置から最小二乗法により計算した。

4. エネルギーおよび仕事量の計算

Table 1. Physical characteristics of subjects.

Subject	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
Yu	28	167.0	64.0
Mi	27	183.7	73.5
Ts	22	171.6	68.0
Uk	22	172.1	60.0
Nt	20	174.6	62.0
Sa	21	166.0	56.0
Nk	22	173.3	64.5
Ou	19	165.8	58.5

図1に、実験記録の例を示した。本研究では、片足の地面反力が測定された。歩行中の両脚支持期では身体へは、両足から作用する力の合力が作用する。そのため、身体重心に作用した力として片脚で測定した力が逆の脚でも同じように作用しているものとして、両脚支持期中の合力を求めた³⁾。エネルギーの計算は、CavagnaとMargaria³⁾らの方法に従って行なった。位置エネルギーEP(図中の破線)は、フィルム分析から得られた身体重心の垂直移動から計算した。垂直方向と進行方向の運動エネルギー(E_{kv} , E_f)は、力曲線を積分して得られた速度から計算した。垂直方向のエネルギー(E_v)は、 E_p と E_{kv} の合計とした。力曲線の積分は、図式積分法を用いた。歩行中の仕事量は、Cavagnaら^{1), 3), 4)}の方法に従い、

一步内のエネルギー増加量とした。すなわち、垂直方向の重力に抗する仕事(W_v)は、図中の ΔE_v 、歩行速度の維持のために必要な仕事(W_f)は、図中の ΔE_f とした。また、外的仕事(W_{tot})は E_{tot} の増加量の合計(A+B)とした。

歩行中の仕事量(W_f , W_v , W_{tot})に1秒間の歩数を乗じて、1秒間あたりの仕事量を計算した。

また、 E_f と E_v の変化の様子を定量化するために、進行方向と垂直方向の正相のずれを1歩の時間を 360° として角度で表し、これを位相角とした。

結果

図2は、歩行速度に対して、体重あたりの仕事量を各成分ごとにプロットしたものである。 W_f

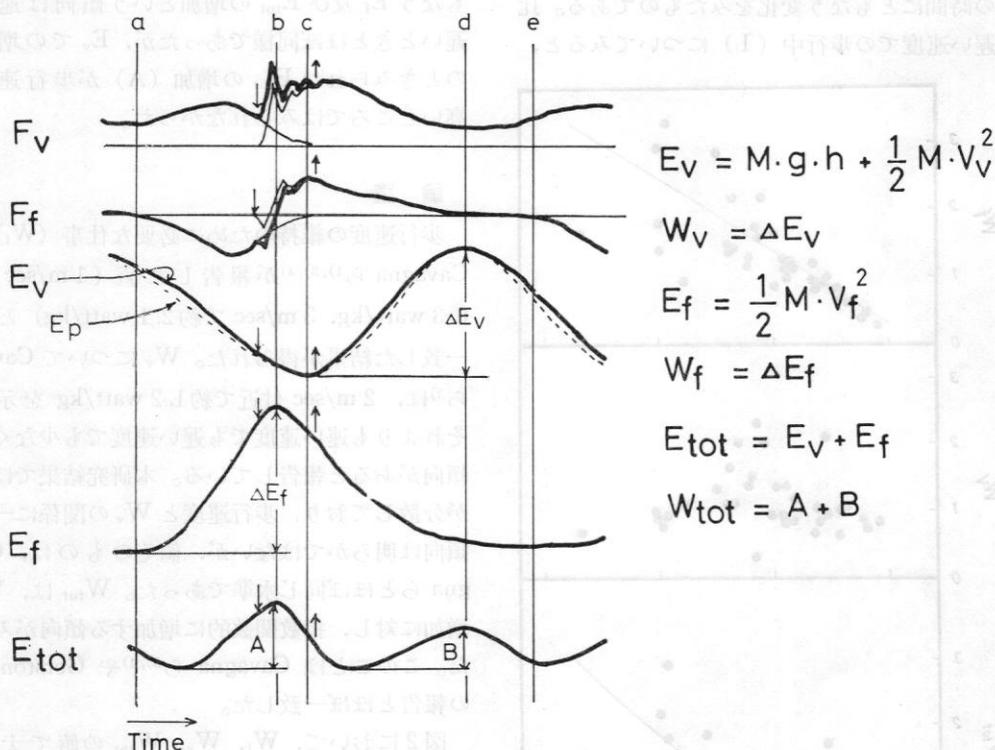


Fig. 1. Schematic illustration for force and energy curves. Two upper curves represent forward exerted by the foot on the force platform, and two middle curves represent the vertical and forward energy changes. The bottom curve indicates total energy changes. The interval of 'a-b' indicates the positive phase of forward direction, 'c-d' indicates the positive phase of the vertical direction. Down and upward arrow represent the moment of landing and take-off respectively. The duration between downward and upward arrows mean double foot contact period.

は、約 0.4 watt/kg (1 m/sec) から歩行速度の増加にともない約 2.0~2.8 watt/kg (3 m/sec) までほぼ直線的に増加する傾向がみられた。一方、 W_v は、歩行速度の変化にかかわらず 0.7~2.1 watt/kg の値の間で分散する傾向を示した。 w_{tot} は、 V_f が約 1 m/sec のとき 0.3 watt/kg を示し、3 m/sec では約 1.7 watt/kg と V_f の増加にともない急激に増加する傾向がみられた。 W_{tot} は、測定した各歩行速度の範囲で、 W_f と W_v の合計よりも少ない値を示した。

図 3 は、歩行速度 V_f と位相角 (phase angle) との関係のみたものである。進行方向と垂直方向の位相角は、 V_f が速くとも、遅くとも、ほぼ一定の値 (約 180°) を示した。

図 4 は、膝および足関節角度、 E_f 、 E_v および E_{tot} の時間にもなう変化のみたものである。比較的遅い速度での歩行中 (I) についてみると、

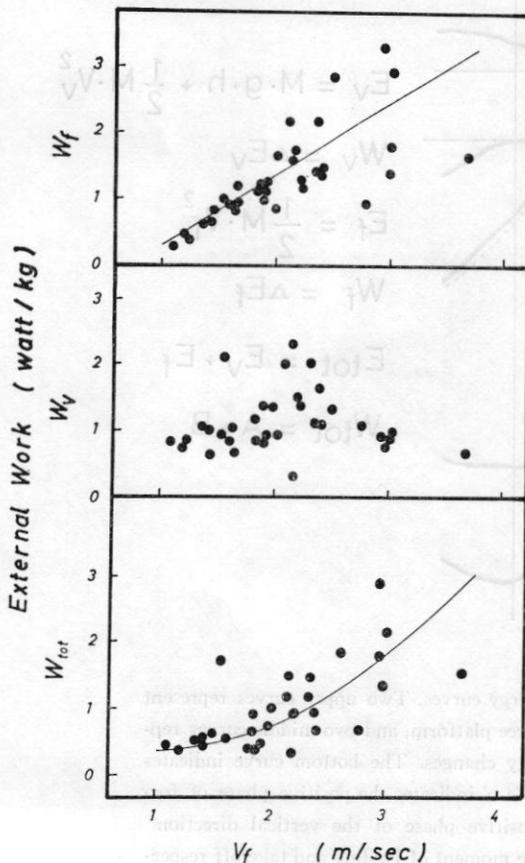


Fig. 2. The work done per body weight of each component as a function of walking velocity.

着地脚の膝関節が伸展しているとき (a-b), E_v は増加し E_f は減少する。この膝関節の伸展期の後半に E_{tot} はわずかに増加する (A)。膝関節が最も伸展したとき (b), E_v は最大値をとり、このとき E_f は最小値をとっている。その後、膝関節はほとんど変化なく (b-c), つぎに E_v は減少しはじめ、さらに膝関節の屈曲にともない離地時 (↑) まで E_v の減少はつづく。

一方、足関節についてみると、足底屈 (plantar flexion) の相 (c-↑) で E_f の急激な増加がみられ更にこのとき E_{tot} も同じように増加している (B)。また、逆に足背屈 (dorsal flexion) の相 (a-b) では、 E_v の減少及び E_f の増加がみられた。歩行速度が高くなった場合でも、膝関節の伸展にともなう E_v の増加、及び足底屈にともなう E_f 及び E_{tot} の増加という傾向は速度が遅いときとほぼ同様であったが、 E_v での増加相のときみられた E_{tot} の増加 (A) が歩行速度の高いところではみられなかった。

論 議

歩行速度の維持のために必要な仕事 (W_f) は、Cavagna ら^{1), 3), 4)} が報告した値 (1 m/sec で約 0.3 watt/kg, 3 m/sec で約 2.1 watt/kg) とほぼ一致した結果が得られた。 W_v について Cavagna ら³⁾ は、2 m/sec 付近で約 1.2 watt/kg を示し、それよりも速い速度でも遅い速度でも少なくなる傾向があると報告している。本研究結果では、値が分散しており、歩行速度と W_v の関係に一定の傾向は明らかではないが、値そのものは、Cavagna らとほぼ同じ水準であった。 W_{tot} は、 V_f の増加に対し、指数関数的に増加する傾向がみられた。このことは Cavagna ら^{3), 4)} や Gerston ら⁶⁾ の報告とほぼ一致した。

図 2 において、 W_f 、 W_v 、 W_{tot} の値で大きく分散しているプロットがみられる。このような結果が生じる原因として次のようなことが考えられる。まず第 1 に、圧力盤の前後で歩行速度が大きく異なっている場合である。このような原因による値の誤差を除くために、16mm フィルム分析により身体重心の歩行速度が、圧力盤の前後で 10% 以上の差がある場合には、そのデータを除去し

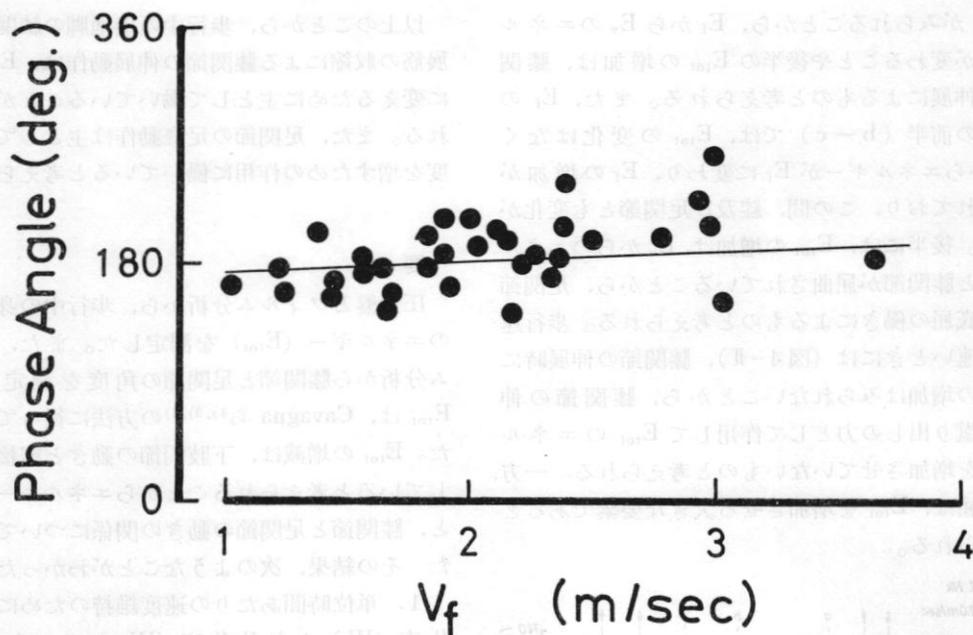


Fig. 3. Phase angle between both positive phases in forward and vertical direction as a function of walking velocity.

た。第2には、左右の脚で、身体に作用する力が異なる場合である。本研究では、Cavagna ら³⁾と同様に身体重心に作用する力を求めるときに、片側の脚により作用した力が、他方の脚の場合にも同様に作用していると仮定している。そのため、歩行時に、左右の脚で作用する力に差がある場合には、図2のように分散した値が得られるものと考えられる。

位相角についてみると、本研究結果では歩行速度とは無関係にほぼ一定の値(約 180°)を示した。位相角が歩行速度とは関係なく一定であるということは、どの歩行速度でも位置エネルギーから運動エネルギーへ、あるいは逆へと、エネルギーが変わっていることを示している。一方、Cavagna ら⁴⁾は、歩行速度が増大するにつれ、 E_v と E_f の増加および、減少の相が重なり合ってくることを論議している。走運動では、 E_v と E_f の正相および負相がほとんど一致していることからすれば、Cavagna ら⁴⁾の報告は、進行速度が増大するとともに、歩行から走行への動きの移行が連続的に行なわれていることを意味している。一方本研究では歩行速度が増加しても E_f の正相と E_v の負相が常に一致している。つまり、歩行の速度をいか

に増加させようとも、歩行と走行とは動きの様式が全く異なるものであることを示唆すると考えられる。

このように、本研究と Cavagna らの結果が異なる原因として、速い速度の被検者の歩行様式が Cavagna と本研究とで異なることを示すものであるが、その差異については、更に検討を要するであろう。

接地脚の膝関節と足関節の変化とエネルギー曲線との関係(図4)をみると膝関節の伸展時に E_v が増加し、足底屈時には、 E_f 及び E_{tot} が増加する傾向がみられた。辻野と後藤¹⁰⁾は、歩行中の接地脚の膝及び足関節の筋の働きについての筋電図の測定から足関節の足底屈筋である腓腹筋は、足底全面が接地する頃から離地直前まで放電がみられ、ヒラメ筋も腓腹筋とはほぼ同様の放電様相を示すことを報告している。また、膝関節の伸展筋である内側広筋、太腿直筋とともに、接地中は、膝関節の伸展時に働く。これらのことから、接地中の膝関節の伸展及び足関節の底屈は、筋の収縮によりなされていると考えられる。歩行速度が比較的遅いときには(図4-1)、膝関節の伸展時の前半に E_{tot} の増加はみられず、後半に E_{tot} の増加

(A) がみられることから、 E_f から E_v のエネルギーが変わることや後半の E_{tot} の増加は、膝関節の伸展によるものと考えられる。また、 E_f の正相の前半 (b-c) では、 E_{tot} の変化はなく E_v からエネルギーが E_f に変わり、 E_f の増加が得られており、この間、膝及び足関節とも変化がない。後半には、 E_{tot} の増加は、 E_v からのエネルギーと膝関節が屈曲されていることから、足関節の足底屈の働きによるものと考えられる。歩行速度が速いときには (図4-II)、膝関節の伸展時に E_{tot} の増加はみられないことから、膝関節の伸展は蹴り出しの力として作用して E_{tot} のエネルギーを増加させていないものと考えられる。一方、足底屈は、 E_{tot} を増加させる大きな要素であると考えられる。

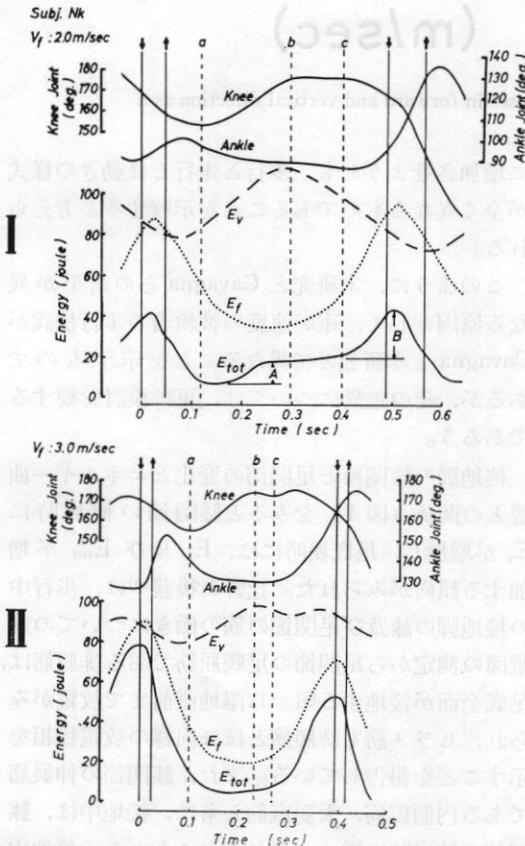


Fig. 4. Changes in angle of ankle and knee joints, and forward vertical and external energy as a function of time, when the subject Nk walked on the platform with the two different walking velocities.

以上のことから、歩行中の接地脚の膝関節の伸展筋の収縮による膝関節の伸展動作は、 E_f を E_v に変えるために主として働いていることが考えられる。また、足関節の足底動作は主として歩行速度を増すための作用に働いていると考えられる。

要約

圧力盤とフィルム分析から、歩行中の身体重心のエネルギー (E_{tot}) を測定した。また、フィルム分析から膝関節と足関節の角度を測定した。 E_{tot} は、Cavagna ら^{1), 3), 4)}の方法に従って計算した。 E_{tot} の増減は、下肢関節の動きと密接に関連していると考えられることからエネルギーの増減と、膝関節と足関節の動きの関係について考察した。その結果、次のようなことがわかった。

1. 単位時間あたりの速度維持のために必要な仕事 (W_f) と外的仕事 (W_{tot}) は、歩行速度 (V_f) の増加にともない増加する傾向を示し、重力に抗する仕事 (W_v) は、 V_f に対して 0.7~2.1 watt/kg の値で分散し、一定の傾向が得られなかった。
2. 進行方向と垂直方向のエネルギー (E_f , E_v) にみられる位相角のずれは、 V_f に対して、ほぼ180度を示し、 E_f と E_v の正相は、 V_f とは無関係にほぼ逆位相であった。
3. 支持脚の膝関節の動きは、 E_{tot} を増加させることよりも、 E_f が E_v へ変わるために重要な役割を果たしており、 E_{tot} の増加は主に足関節の足底屈が重要な役割を果たしている。

本実験は、1976年、中京大学体育学部で行なわれたものである。実験に際し、多大の援助をいただいた中京大学運動生理学研究室の諸氏にここに謹んで感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Cavagna, G. A., F. P. Saibene and R. Margaria. External work in walking. *J. Appl. Physiol.* 18(1), 1-9, 1963.
- 2) Cavagna, G. A., F. P. Saibene and R. Margaria. Mechanical work in running. *J. Appl. Physiol.* 19(2), 249-256, 1964.
- 3) Cavagna, G. A. and R. Margaria. Mechanics of

- walking. *J. Appl. Physiol.* 21(1), 271-278, 1966.
- 4) Cavagna, G. A., H. Thys and A. Zamboni. The sources of external work in level walking and running. *J. Physiol.* 262, 639-657, 1976.
 - 5) Cavagna, G. A. and M. Kaneko. Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268, 467-481, 1977.
 - 6) Gersten, J. W., W. Orr, A. W. Sexton and D. Okin. External work in level walking. *J. Appl. Physiol.* 26(3), 286-289, 1969.
 - 7) ホッホムート, G. (遠藤万里訳) スポーツ運動のバイオメカニクス。新体育社 1981.
 - 8) マルガリア, R. (金子公有訳) 身体運動のエネルギー。ベースボールマガジン社 1978.
 - 9) 三浦望慶, 池上康男, 松井秀治. 部分及び合成重心係数を用いる座標測定方式による合成重心の算出. *体育の科学*. 24(8), 517-522, 1974.
 - 10) 辻野昭, 後藤幸弘. 歩く。身体運動学概論。大修館書店, 1976.
 - 11) Winter, D. A. A new definition of mechanical work done in human movement. *J. Appl. Physiol.* 46(1), 1979.