

身体運動における力学的エネルギー利用の有効性と その評価指数

阿江通良, 藤井範久

Effectiveness of mechanical energy utilization and its index in human movement

AE Michiyoshi and FUJII Norihisa

Abstract

To express a skillful motion and/or an efficient movement in sports, the term "efficiency of movement" is frequently used. Since a good performance in sports will be achieved through an effective utilization of mechanical energy which is converted from physiological energy through body motions, the effectiveness of mechanical energy utilization should be considered to evaluate sports techniques and skilled performance, as well as efficiency—defined as the ratio of mechanical energy to physiological energy, and economy—defined as the submaximal oxygen uptake required to perform a given task.

This paper introduced the concept of "effectiveness of mechanical energy utilization" and effectiveness index (EI) with examples of running and drop jumping, and examined methods for the estimation of mechanical work done in human movement, which would be applicable to various sports activities.

EI could be calculated by the following equation.

$$EI = \frac{\text{Performance or Effective energy (work)}}{\text{Mechanical energy (work)}}$$

Although several methods have been suggested for the estimation of mechanical work in human movement, which was the denominator of the equation, joint power method (See method ④ in the text) was seemed to be mechanically reasonable for the present study. However, a segment energy method (See method ③c in the text) was also used as an alternative in the cases to which the joint power method could not be applicable. Applications of EI to running and drop jumping in the present study suggested that EI would be a useful measure for the evaluation of sports techniques and skilled performance.

1. 緒言

身体運動，特にスポーツ運動では，「むだのない動き」，「効率のよい動き」という表現で巧みな動作やよい動きなどを表すことが多い。このような巧みな動作やよい動きに内在する運動技術をバイオメカニクスのとらえと，運動課題を達成するために生理的エネルギー（発生エネルギー）を力学的エネルギー（出力エネルギー）に変換し，その力学的エネルギーを運動課題に応じて効果的に使うための運動経過ということになる。

Figure 1 は，入力としての生理的エネルギーが運動課題の達成あるいはパフォーマンスに変換されるまでの過程をエネルギーの流れに着目して示したものである。一般に，バイオメカニクスでは，運動技術の良し悪しの評価の指標として筋が活動して出力される力学的エネルギー（出力）と生理的エネルギー（入力）に対する比，すなわち効率（力学的エネルギー／生理的エネルギー）を用いることが多い。効率は，消費された生理的エネルギーが同じであれば，力学的エネルギーが大きいほど，高くなる。しかし，スポーツ運動では，短距離走のように力学的エネルギーが大きいほど，高いパフォーマンスが得られると考えられるものもあるが，長距離走のように，上下動の大きい疾走フォームで走ると，力学的エネルギーが大きくてもパフォーマンスが高くないばかり

か，逆に低くなるものもあると考えられる。したがって，運動技術を評価する場合には，効率のみではなく，出力された力学的エネルギーをどの程度パフォーマンスあるいは有効なエネルギーに変換できたかが問われるべきであろう。

Cavanagh and Kram¹¹⁾ は「運動の効率 (efficiency of movement)」に関連する用語として，efficiency (効率)，economy (経済性)，effectiveness (有効性) をあげ，長距離走を例にその定義を試みている。すなわち，efficiency を muscular efficiency (力学的エネルギー／生理的エネルギー)，muscle efficiency (筋内でエネルギーが筋張力に変換される過程の効率) に区別し，economy を一定の課題（例えば，一定スピードでのランニング）を達成するのに要した体重当たりの最大下酸素摂取量，effectiveness を発揮された力と有効な力の比と定義している。しかし，economy は動きの評価の尺度にはなり得るが，Figure 1 に示したように生理的エネルギーを力学的エネルギーに変換する過程を含んだものであり，力学的エネルギー利用の有効性そのものを示すものではないといえる。また彼らは，Index of effectiveness の概念をサイクリングを例にして以下の式(1)で説明し，エネルギー消費と skilled performance との関係やスポーツ用具とパフォーマンスとの関係の尺度として適していると述べているが，全身の運動にお

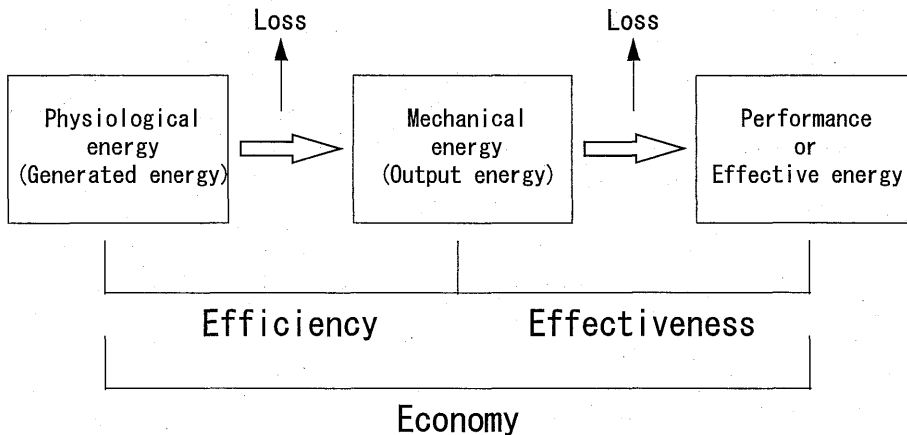


Figure 1 Flow of energy in human movement and three Es, i. e. efficiency, economy, and effectiveness.

ける力学的エネルギー利用の有効性の指標とは考えていないようである。

$$\text{Index of effectiveness} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_e dt}{\int_{t_1}^{t_2} F_r dt} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 F_r はサイクリストがペダルに加えた力、 F_e は推進に使われた力(クランクに直角な力)である。

本研究の目的は、運動技術やスポーツ技術をバイオメカニクスの的に評価する場合の観点の一つとして、力学的エネルギー利用の有効性(Effectiveness of mechanical energy utilization)の考え方およびその評価指数を提案し、ランニング、跳躍などへの適用例を示すことである。

2. 力学的エネルギー利用の有効性の定義と有効性指数

Figure 1 に示したように、運動課題は力学的エネルギーを身体運動によって有効なエネルギーあるいはパフォーマンスという形に変換することによって達成される。したがって、力学的エネルギーがどのように有効に変換されたかは、式(2)から算出される有効性指数によって知ることができる。

$$\text{Effectiveness Index} = \frac{\text{Performance or Effective energy (work)}}{\text{Mechanical energy (work)}} \quad (2)$$

この有効性指数の特徴は、効率や式(1)で定義される有効性とは異なり、力学的エネルギー、パワー、仕事などの力学量のみでなく、運動課題に応じて跳躍記録、疾走タイム、さらには得点のようなパフォーマンスを表す適切な変量を分子に代入することができ、同一の課題をもつ運動であれば、その技術を評価できることにある。式(2)の分母は、一般に運動課題を達成するのに要した力学的エネルギーの変化、すなわち力学的仕事であり、例えば、ランニングでは1歩あるいは1サイクル中になされた力学的仕事、跳躍では踏切局面でなされた仕事などがこれに相当する。

しかし、複数の身体部分の組み合わせで成り立つ全身の運動における力学的仕事を算出するには、身体モデルをどのように定義するか、身体部分内における位置エネルギーと運動エネルギーの交換(energy exchange)や、身体部分間のエネルギーの伝達(energy transfer)をどのように見積もるか、外力による仕事をどのように考える

かなどの問題がある²⁻⁶⁾。そこで、身体運動における力学的仕事の計算方法を概観し、本研究の目的に適した方法について検討することにする。なお、Aleshinsky²⁾は、ランニングのような循環運動では力学的仕事を力学の定義のまま計算すると、ゼロになることがあるなどの理由で力学的仕事という用語ではなく、Mechanical Energy Expenditure (MEE) を用いている。

3. 力学的仕事の各種計算方法

これまでバイオメカニクスの研究では様々な力学的仕事の定義や計算方法が提案され、用いられてきているが、身体モデルや生体のなした力学的仕事についての考え方などに着目してまとめると、以下のような5種類に大別できるであろう。

- ①質量中心モデルによる方法(Cavagna et al.^{8,9)}, Fukunaga et al.¹⁸⁾)

$$E = Mgh + \frac{1}{2}MV^2, W = \Delta E$$

ここで、 E はエネルギー、 M は身体質量、 g は重力加速度、 h は高さ、 V は質量中心の速度、 W は力学的仕事、 ΔE はエネルギー変化分を示す。

- ②外的仕事+内的仕事による方法(Fenn^{16,17)}, Cavagna and Kaneko¹⁰⁾, 金子²³⁾, Kaneko et al.²⁴⁾)

$$W_{\text{ext}} = \Delta \left(Mgh + \frac{1}{2}MV^2 \right)$$

$$W_{\text{int}} = \Delta \sum_i \left(-\frac{1}{2}m_i v_i^2 + \frac{1}{2}I_i \omega_i^2 \right)$$

$$W = |W_{\text{ext}}| + |W_{\text{int}}|$$

ここで、 W_{ext} は外的仕事、 W_{int} は内的仕事、 m_i は部分質量、 v_i は部分の速度、 I_i は部分の慣性モーメント、 ω_i は角速度、 Δ は変化分である。

- ③力学的エネルギー変化分の和による方法(Pierrynowski et al.^{27,28)}, Norman et al.²⁵⁾, Ito et al.²²⁾)

・時刻 j における部分 i の力学的エネルギー:

$$E_{i,j} = m_{i,j}gh_{i,j} + \frac{1}{2}m_{i,j}v_{i,j}^2 + \frac{1}{2}I_{i,j}\omega_{i,j}^2$$

a. 部分内およびの部分間のエネルギーの変換お

よび伝達がないと仮定した場合

$$W_n = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n (|\Delta PE_{i,j}| + |\Delta KE_{i,j}| + |\Delta RE_{i,j}|)$$

b. 部分間にエネルギーの伝達がないと仮定した場合

$$W_w = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n |\Delta E_{i,j}|$$

c. 部分内および部分間にエネルギーの交換および伝達が行われると仮定した場合

$$W_{wb} = \sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^s (\Delta E_{i,j}) \right|$$

これらの式において、PEは位置エネルギー、KEは並進運動エネルギー、REは回転運動エネルギー、 $\Delta E_{i,j}$ は時刻jにおける部分iのエネルギー変化分、sは身体部分の数、nは時間である。

④関節トルクパワーによる方法 (Elftman^{13,14}, Cappozzo et al.⁷, Winter et al.^{32,33}, Quanbury et al.²⁹, Robertson et al.³⁰, Aleshinsky²⁻⁶, 阿江ら¹¹)

$$W_{i,j} = \int_{ts}^{te} |T_i \omega_i| dt$$

$$W = \sum_{j=1}^n W_{i,j}$$

ここで、Tは関節トルク、tsは動作開始時刻、teは動作終了時刻である。

⑤推定筋力による方法 (山崎ら³⁶, 江原ら¹⁵, Fujii and Moriwaki¹⁹, Pandy and Zajac²⁶)

$$W_{i,j} = \int_{ts}^{te} |F_{i,j} \cdot V_{i,j}| dt$$

$$W = \sum_{j=1}^n W_{i,j}$$

ここで、Fは筋張力、Vは筋の収縮速度である。

この他にも、方法③にもとづいて正負の仕事の比率、弾性要素に蓄えられたエネルギーの再利用などを考慮した非常に複雑な Williams and Cavanagh³⁵の方法、方法④と同様の考え方であるが、負の仕事をゼロとみなし、正の仕事のみを身体の力学的仕事としている吉福³⁷の方法などがある。また、Aleshinsky²⁻⁶は外力および内力(筋)による身体部分の力学的エネルギーの変化を推定するには、方法④に外力および外力モーメントによる影響を考慮すべきであることを理論的

考察により示している。

上述した5種類の方法のうち、方法①では身体を単一の質点(質量中心)にモデル化するので、実際の身体運動における力学的仕事を十分に推定しているとはいえず、身体部分モデルに比べて力学的エネルギーが16%程度低くなるという報告³⁴もある。方法②では、力学的には相互に関係し、分離できない Wext と Wint を分離して別個に仕事を算出し、それらを加算して全身の力学的仕事としている点に問題があると考えられる。方法③の a, b, c のうち、一般に、身体運動における力学的仕事の算出に用いられるのは方法 c (以下、方法③c という) である^{22,25,27,28}。方法③c では、身体をリンクシステムにモデル化し、部分内のエネルギー交換および部分間のエネルギーの伝達があると仮定してシステムのエネルギー変化分を力学的仕事として算出するので、力学的には妥当であると考えられる。しかし、実際の身体運動を考えると、すべての部分間にエネルギーの伝達が行われていると仮定している点に問題が残るであろう。

方法④では、剛体リンクモデルの各リンクのエネルギー変化は関節力によるパワー(関節力×関節速度)および関節トルクパワー(関節トルク×関節角速度)によって生じ、このうち後者を関節まわりの筋群が発揮したパワーと考えて、その時間積分値を筋のなした力学的仕事とするものである。この方法では、関節トルクを関節まわりの筋群の合成トルクと考えるので、force platform などの適切な計測装置があれば、現在の動作分析的手法により算出可能である。しかし、この方法では各関節に独立した筋群のトルクのみが作用すると仮定するので、二関節筋などを介したエネルギーの伝達などは見積もれない。

一方、方法⑤では個々の筋力をモデルによって推定し、個々の筋がなした力学的仕事を算出して加算する。したがって、身体運動において筋がなした力学的仕事を推定するには、方法⑤が理論的には、最もよい方法である。しかし、筋力の推定法には、未知数(筋力)の個数が方程式の個数よりも多い不定問題となる、筋モデルのパラメータの決め方にまだ課題がある、全身の筋群にあてはめることはかなり困難であるなど多くの問題があり、幅広い身体運動に適用することは、現状では無理であろう。

このように各方法には、モデルや算出方法に関する仮定などに様々な問題が指摘できる。しかし、van Ingen Schenau and Cavanagh³¹⁾は、文献的考察および理論的考察から、持続的な運動における力学的パワーの推定には方法④が実用的であるとしており、Gagnon and Smyth²⁰⁾も方法④で荷物の上げ下ろし動作の力学的仕事を算出している。また方法④では、例えば、走運動や跳躍では下肢関節、投動作では体幹および上肢の関節というように、運動に関与が大きいとみられる部分の力学的仕事のみを算出できるという利点がある。

このように考察してみると、身体運動における力学的仕事を推定する方法としては、現段階では方法④が妥当であると考えられる。したがって、本研究では、有効性指数の分母（力学的仕事）の算出には、方法④を用いることにした。

なお、関節の固定を伴う運動、あるいは主働筋群と拮抗筋群のトルクが釣り合うような運動では、関節トルクパワーがゼロになるので、方法④では力学的仕事を正しく推定できない場合がある。このような場合に力学的エネルギーの有効性を評価する場合には、筋放電量、あるいは Chapman et al.¹²⁾が示唆しているように関節トルクの動作時間による積分値などを式(2)の分母に代入するなどの工夫が必要であろう。

4. 有効性指数の算出

(1)短距離走の有効性指数

Figure 2は、5名の大学男子短距離選手（最高記録100m 10秒4から11秒0）の全速疾走中の有効性指数を式(3)により算出したもので、上図は実験時の、下図は100 mの最高記録から求めた平均速度との関係を示している。短距離走の場合には、疾走速度がパフォーマンスの1つと考えられるので、式(3)の分子には水平方向での並進運動エネルギーを、分母には、剛体リンクモデルにより推定した13個の関節トルクから方法④により求めた力学的仕事を代入した。

$$EI = \frac{\frac{1}{2}MV^2}{W} \quad (3)$$

ここで、Mは選手の質量、Vは1歩の平均疾走速度（水平速度）、Wは方法④により算出した力学的仕事である。

Figure 2から疾走速度に大きな差がみられる場合には、有効性指数にも差が見られること、疾走

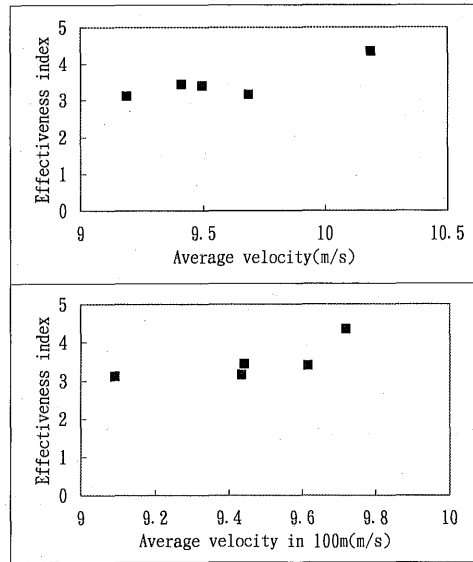


Figure 2 Effectiveness index of sprint running for five male sprinters.

速度が大きい場合でも有効性指数が小さい場合があることなどがわかる。しかし、これらの差が統計的に有意なのか、いかなる要因によるのかなどに関しては、更に多くのデータを収集し理論的に検討する必要がある。

(2)ドロップジャンプの有効性指数

Figure 3の上図は一流三段跳選手1名（日本記録保持者）が台高0.8 mのドロップジャンプを行った場合の踏切における下肢の3関節（股、膝、足）の絶対仕事（方法④による算出）を、下図は有効性指数を、それぞれ跳躍初速度と関係づけて示したものである。またFigure 4はFigure 3に示した試技の有効性指数と各関節の絶対仕事および総絶対仕事に対する各関節の貢献度との関係を示したものである。有効性指数は式(2)の分子にパフォーマンスの指標としての跳躍高を位置エネルギーに換算したものを、分母には下肢関節の絶対仕事を代入して求めた。したがって、この場合の有効性指数は下肢関節によってなされた力学的仕事が多ければ跳躍高に変換されたかを示すと考えられる。

Figure 3から、この被験者の場合には、力学的仕事と跳躍初速度の大きさとはかならずしも一致しないこと、跳躍初速度が大きいほど、有効性指

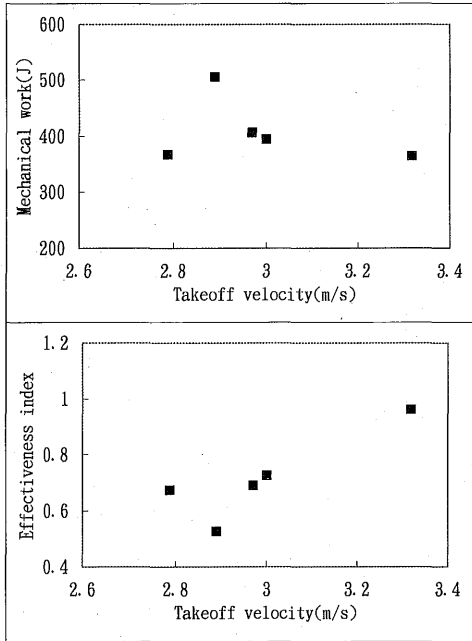


Figure 3 Mechanical work and effectiveness index of drop jumping for an excellent triple jumper.

数が大きい傾向にあることなどがわかる。さらに、Figure 4 から力学的仕事に大きな差がない場合でも有効性指数には差が見られること、有効性指数の大きい場合（例えば、EI=0.96の試技）には、足、膝、股の各関節がほぼ均等か、あるいは大きな筋群が関与する股関節や膝関節がやや大きな仕事をしているが、有効性指数の小さい場合（EI=0.53や0.63などの試技）には1つの関節が大きな仕事をしており、貢献度に偏りのあることがわかる。

これらのことは、ドロップジャンプのように踏切での力学的仕事に大きな初速度を生じると考えられる場合でも、発揮された力学的エネルギーの利用の仕方、下肢関節の貢献度のバランスなどによりパフォーマンスに差が生じることを示唆していると考えられる。なお、これらのことが他の選手の場合にもあてはまるか、どのような技術的要因が関与するのかなどについては、さらに多くのデータを収集し、詳細に検討する必要がある。

上述の例から、短距離走、ドロップジャンプのような短時間のパワー的な運動においても、力学的エネルギー利用の有効性がパフォーマンスと関

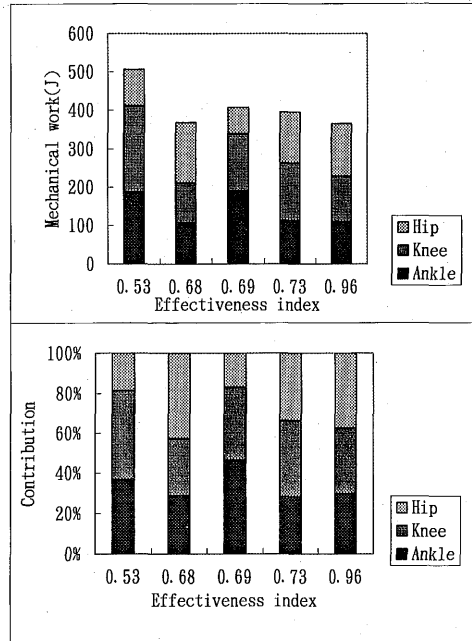


Figure 4 Mechanical work done by the lower limb joints and the contributions in various effectiveness indexes in drop jumping. These indexes were taken from those in Figure 3.

係していること、その評価に本研究で提示した有効性指数が利用できることなどがわかる。

5. 力学的仕事推定のための簡便法

3. では、運動中に発揮された、あるいは消費された力学的エネルギーを推定する方法のうち、現段階で利用可能なバイオメカニクスの方法について検討し、方法④が実用的であることがわかった。方法④では、通常、剛体リンクモデルにより関節のトルクを算出し、それに関節角速度を乗じて力学的パワーを求める。この関節トルクは、身体部分の質量、加速度から推定された関節に作用する力（関節力）を運動方程式に代入して算出される。しかし、身体に作用する外力、特に短時間に作用する大きな外力を変位計測データから精度よく求めることはむずかしく、一般には外力をforce platformなどを用いて測定することが望ましい。また、歩行、スピードスケート、鉄棒運動などのように両足、あるいは両手が外部の物体と接触している場合は、閉ループ問題と呼ばれ、閉

ループを含む運動における外力を精度よく知るには、複数の力測定装置を用いる必要が生じる。したがって、各種の状況における運動、特に競技会での運動や閉ループを含む運動における力学的仕事の算出に方法④をそのまま適用できない場合が多い。

そこで、有効性指数を各種の運動へ適用する場合には、他の方法で力学的仕事を推定することを検討しておく必要がある。すでに述べたように、様々な身体運動に適用可能で、実際にも用いられているものは、方法③cである。しかし、身体部分間のエネルギーの伝達が完全に生じると仮定しているため、方法④で推定される力学的仕事よりも小さくなることが予想される。このことに関して Aleshinsky⁵⁾ は理論的に両方法を検討した結果、方法③cで推定される力学的仕事は、外力による仕事がなく、すべての関節トルクによる仕事と同じ符号をもつか、1つの関節による仕事以外がゼロである場合には、方法④で推定される力学的仕事の最小値と一致すると述べている。しかし、実際のデータによる検討は行っていない。

そこで、本研究では部分運動として腕の振込動作（ランニング型および両腕型）および体幹の屈曲・伸展動作を、全身運動として疾走速度の異なるランニングを例にして方法③cおよび④で算出した力学的仕事を比較して、方法③cが実際の身体運動における力学的仕事の見積りに適用可能かを検討した。

(1)部分運動における力学的仕事の算出

Figure 5は、検討に用いた部分運動を示したものである。腕については、ランニングのように左右の腕を交互に振る動作と両腕をそろえて後方から前上方に振る動作を、体幹については、両腕を体側に固定したままで、股関節を伸展する動作、屈曲する動作、屈曲して素早く伸展する動作を行った。被験者（3名）の右側方からこれらの動作を16mmカメラで撮影し、動作部分の変位データを得た。そして、平面の剛体リンクモデルを動作部分に適用して、腕の動作では、手、肘、肩関節の、体幹の動作では、頸、手、肘、肩、股の各関節のトルクを算出し、方法④により力学的仕事を算出した。また身体各部の力学的エネルギーを算出し、方法③cにより力学的仕事を算出した。

Figure 6は、両方法によって算出した力学的仕事を示したもので、横軸が方法④、縦軸が方法③

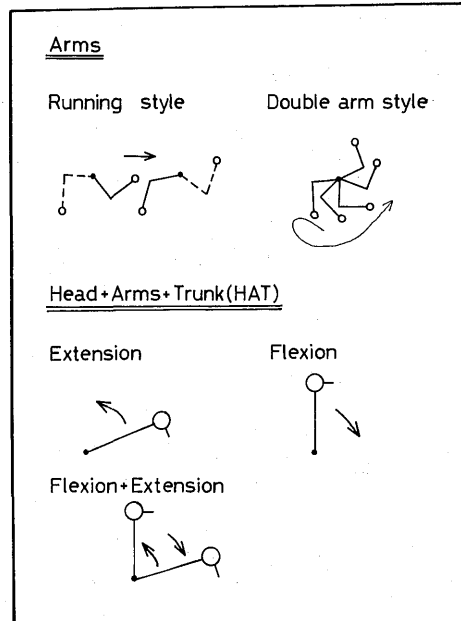


Figure 5 Segment motions used for the estimation of mechanical work.

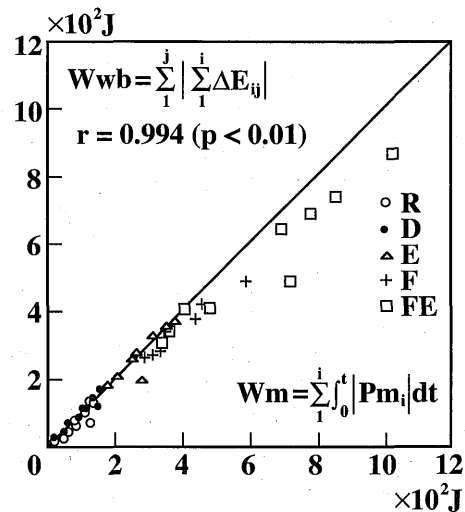


Figure 6 The relationship between mechanical works estimated with a segment energy method and a joint power method for segment motions shown in Figure 5. (R, running style ; D, double arm style ; E, extension of the hip joint ; F, flexion ; FE, flexion and extension)

cによる力学的仕事である。両者の間には、高い相関関係がみられ ($r = 0.99$)、方法③cによっても方法④と同様に力学的仕事が推定できることを示している。しかし、方法③cによる力学的仕事は方法④によるよりも小さい傾向にあり、この傾向は力学的仕事が大きいくほど強いことがわかる。

式(4)に示したように、部分の力学的エネルギーの変化 (ΔE_{seg}) は、関節トルクによる変化 ($T \cdot \omega$) と関節力による変化 ($F \cdot V$) の総和に等しいと考えられる。

$$\Delta E_{seg} = T \cdot \omega + F \cdot V \quad (4)$$

部分運動では、腕の動作では肩関節に、体幹の動作では股関節に作用する関節力は外力となるが、本研究における部分運動のモデルではこれらの影響を考慮していない。したがって、方法③cによる力学的仕事 (式(4)の左辺の積分値) が方法④による場合 (式(4)の $T \cdot \omega$ の積分値) と異なったのは、本研究では外力としての関節力によるエネルギーの変化 (式(4)の $F \cdot V$) をゼロとしたことによると考えられる。また、すでに指摘したように、方法④では、二関節筋などによるエネルギーの伝達を見積もれないということも原因の一つと考えられる。

(2)ランニング

Figure 7 は、5名の男子短距離選手が約2.5 m/s から約10 m/s までの各種の速度で疾走した場合の1歩当たりの力学的仕事を方法④により算出したもので、正負の仕事 (Pw, Nw) および絶対仕事 (Abw) が示されている。

正負の仕事、絶対仕事とも、疾走速度の増大にともなって大きくなるが、変化の傾向は正仕事が直線的に増大するのに対し、負および絶対仕事は指数関数的に増大していることがわかる。また絶対仕事の変化は、後藤²¹⁾の報告した分速50 m (約0.8 m/s) から450 m (約7.5 m/s) までの疾走速度の変化にともなう下肢7筋の筋放電量の合計および酸素需要量の変化と類似したものになっている。

Figure 8 の上図は、方法③cおよび④で求めた力学的仕事 (それぞれ Wwb, Wjp) を、下図は有効性指数を比較したものである。

Figure 8 から、部分運動と同様に、両方法による力学的仕事および有効性指数の相関は高いが、

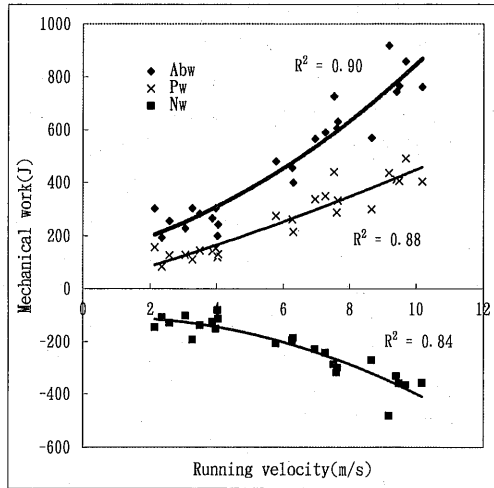


Figure 7 Mechanical work done by 13 joints in running.
(Abw, absolute work ; Pw, positive work ; Nw, negative work)

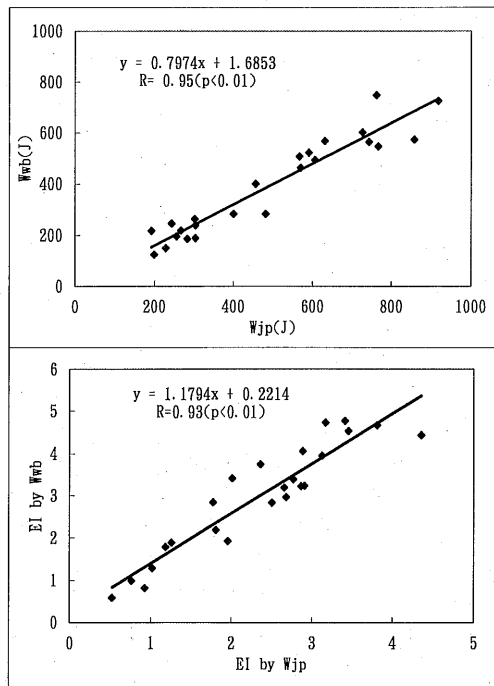


Figure 8 Relationships between mechanical works (the upper) and effectiveness indexes (the lower) estimated with the segment energy method (Wwb) and the joint power method (Wjp).

方法③c, すなわち身体部分間のエネルギーの完全な伝達を仮定したモデルによる場合の力学的仕事は方法④の場合よりも小さいことがわかる。

これらのことから, ランニングのような全身運動においても, 関節トルクパワーによる方法が適用できない場合には, その代替として方法③cの身体部分のエネルギー変化による方法が利用できると考えられる。

なお, Figure 8 に示したランニングの場合(疾走速度約 2 m/s から 10 m/s)には, 方法 3c から算出された力学的仕事(Wwb)を独立変数, 関節トルクパワーから算出された力学的仕事(Wjp)を従属変数とすれば, $W_{jp} = 1.1434 W_{wb} + 40.912$ ($R^2=0.91$) という推定式が得られた。しかし, 推定式の係数は身体運動の種類によって異なると考えられる。したがって, 身体運動における力学的エネルギー利用の有効性を本研究で提案した指数により評価する場合には, 力学的仕事の算出方法を明示しておく必要がある。

6. まとめ

本研究では, 運動技術やスポーツ技術をバイオメカニクス的に評価するため, 身体運動における力学的エネルギー利用の有効性の考え方およびその評価指数を提案し, その基礎になる力学的仕事の算出法について検討した。次いで, 適切な方法による有効性指数の算出法をランニング, ドロップジャンプ, 腕と体幹の部分運動などを例にして示した。

その結果, ①運動技術やスポーツ技術をバイオメカニクスの観点から評価するために式(2)により算出される有効性指数が利用できること, ②有効性指数は, 効率とは異なり, 式(2)の分子にパフォーマンスの指標となる様々な変量を用いることができる利点があること, ③力学的仕事を推定するには, 現段階としては関節トルクパワーによる方法(方法④)が実用的と考えられること, ④関節トルクを精度よく算出できない場合には身体部分の力学的エネルギーの変化から力学的仕事を推定する方法(方法③c)が代替的方法として利用できることなどがわかった。

引用文献

- 1) 阿江通良, 宮下憲, 横井孝志, 大木昭一郎, 渋川侃二 (1986) : 機械的パワーからみた疾

走における下肢筋群の機能および貢献度. 筑波大学体育科学系紀要 9 : 226-239.

- 2) Aleshinsky SY (1986) : An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem-I. Basic concepts, description of the model, analysis of a one-link system movement. J Biomech 19 : 287-293.
- 3) Aleshinsky SY (1986) : An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem-II. Movement of the multi-link chain model. J Biomech 19 : 295-300.
- 4) Aleshinsky SY (1986) : An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem-III. Mechanical energy expenditure reduction during one link motion. J Biomech 19 : 301-306.
- 5) Aleshinsky SY (1986) : An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem-IV. Criticism of the concept of 'energy transfers within and between links'. J Biomech 19 : 307-309.
- 6) Aleshinsky SY (1986) : An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem-V. The mechanical energy expenditure reduction during motion of the multi-link system. J Biomech 19 : 311-315.
- 7) Cappelz A, Figura F, Marchetti M and Pedotti A (1976) : The interplay of muscular and external forces in human ambulation. J Biomech 9 : 35-43.
- 8) Cavagna GA, Saibene FP and Margaria R (1963) : External work in walking. J Appl Physiol 18 : 1-9.
- 9) Cavagna GA, Saibene FP and Margaria R (1964) : External work in running. J Appl Physiol 19 : 249-256.
- 10) Cavagna GA and Kaneko M (1977) : Mechanical work and efficiency in level walking and running. J Physiol 268 : 467-481.
- 11) Cavanagh PR and Kram R (1985) : The efficiency of human movement-A statement of the problem-. Med Sci Sports Exerc 17 :

- 304-308.
- 12) Chapman AE, Caldwell GE, Herring RM, Lonergan RM, and Selbie SW (1987) : Mechanical energy and preferred style of running. (Ed.) Jonsson B (In) Biomechanics X-B : 875-879.
 - 13) Elftman H (1939) : The function of muscles in locomotion. Am J Physiol 125 : 357-366.
 - 14) Elftman H (1940) : The work done by muscles in running. Am J Physiol 129 : 672-684.
 - 15) 江原義弘, 別府政敏, 野村進 (1988) : 歩行の効率. バイオメカニズム 9 : 93-103.
 - 16) Fenn WO (1930) : Frictional and kinetic factors in the work of sprint running. Am J Physiol 92 : 583-611.
 - 17) Fenn WO (1930) Work against gravity and work due to velocity changes in running-Movements of the center of gravity within the body and foot pressure on the ground-. Am J Physiol 93 : 433-462.
 - 18) Fukunaga T, Matsuo A, Yuasa K, Fujimatsu H and Asahina K (1978) : Mechanical power output in running. (Eds.) Asmussen E and Jørgensen K (In) Biomechanics VI-B : 17-22.
 - 19) Fujii N and Moriwaki T (1991) : Functional evaluation of two-joint muscle in squat jump motion based on concept of power flow. Mem Grad School Sci & Technol Kobe Univ 10-A : 127-143.
 - 20) Gagnon M and Smyth G (1991) : Muscular mechanical energy expenditure as a process for detecting potential risks in manual handling. J Biomech 24 : 191-203.
 - 21) 後藤幸弘 (1983) : 各種速度条件下の歩行・走行における筋活動量と酸素需要量の関係. 関西医科大学雑誌 35 : 353-383.
 - 22) Ito A, Komi PV, Sjödiu B, Bosco C and Karlsson J (1983) : Mechanical efficiency of positive work in running at different speeds. Med Sci Sports Exerc 15 : 299-308.
 - 23) 金子公宥 (1978) : ランニングの力学的エネルギーと効率. 体育の科学 28(1) : 22-27.
 - 24) Kaneko K, Ito A, Fuchimoto T and Toyooka J (1981) : Mechanical work and efficiency of young distance runners during level running. (Eds.) Morecki A, Fidelus K, Kedzior K and Wit A (In) Biomechanics VII-B : 234-240.
 - 25) Norman RW, Sharratt MT, Pezzack JC, and Noble EG (1976) : Reexamination of the mechanical efficiency of horizontal treadmill running. (Ed.) Komi PV (In) Biomechanics V-B : 87-93.
 - 26) Pandy MG and Zajac FE (1991) : Optimal muscular coordination strategies for jumping. J Biomech 24 : 1-10.
 - 27) Pierrynowski MR, Winter DA and Norman RW (1980) : Transfer of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill running. Ergonomics 23 : 147-156.
 - 28) Pierrynowski MR, Norman RW and Winter DA (1981) : Mechanical energy analyses of the human during load carriage on a treadmill. Ergonomics 24 : 1-14.
 - 29) Quanbury AO, Winter DA and Reimer GD (1975) : Instantaneous power and power flow in body segments during walking. J of Human Movement Studies 1 : 59-67.
 - 30) Robertson DGE and Winter DA (1980) : Mechanical energy generation, absorption and transfer amongst segments during walking. J Biomech 13 : 845-854.
 - 31) van Ingen Schenau GJ and Cavanagh PR (1990) : Power equations in endurance sports. J Biomech 23 : 865-881.
 - 32) Winter DA, Quanbury AO and Reimer GD (1976) : Instantaneous energy and power flow in normal human gait. (Ed.) Komi PV (In) Biomechanics V-A : 334-340.
 - 33) Winter DA and Robertson DGE (1978) : Joint torque and energy patterns in normal gait. Biological Cybernetics 29 : 137-142.
 - 34) Winter DA (1979) : A new definition of mechanical work done in human movement. J Appl Physiol 46 : 79-83.
 - 35) Williams KR and Cavanagh PR (1983) : A model for the calculation of mechanical power during distance running. J Biomech 16 : 115-128.
 - 36) 山崎信寿 (1975) : 計算機シミュレーション

による2足歩行の力学的解析. 人間工学 11
(4): 105-110.

37) 吉福康郎 (1984) : 身体のなす力学的仕事の

定義に対する考察. J J Sports Sci 3 (3) :
254-260.