

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20770201  
 研究課題名 (和文) ヒトの陸上移動運動に関する生理人類学的研究：筋由来の弾性エネルギーに着目して  
 研究課題名 (英文) Physiological and anthropological research of human locomotion with special reference to muscle elasticity in the lower leg extremities  
 研究代表者  
 安陪 大治郎 (ABE DAIJIRO)  
 九州産業大学・健康・スポーツ科学センター・講師  
 研究者番号：10368821

研究成果の概要 (和文)：現存する生物のうち、直立二足運動が可能な生物はヒトだけである。しかしながら、ヒトの二足運動には、いくつかの決定的な問題点がある。たとえば重い頭部が高い位置にあるためにバランスが悪いことや、内臓諸器官など急所が多い胴体前面を常に晒してしまうこと、さらに重力の関係上、腰痛を起こし易いことなどが挙げられる。このような問題点があるにも関わらず、ヒトが直立二足運動を獲得したのは、これまで指摘されてきた欠点を凌駕するような利点があることが条件である。

最も代表的な直立二足運動である歩行動作では、身体重心を基点とした運動エネルギーと位置エネルギーの変換効率がエネルギー節約機構として機能しており、もう一つの代表的な直立二足運動である走動作では、下肢の筋腱複合体が伸張された時に蓄えられる”弾性エネルギー”が、エネルギー節約機構として機能していると説明されてきた (Cavagna et al. 1963, 1964)。しかしながら、これらの説には近年いくつかの反証が投げかけられている。たとえば、Fukunaga et al. (2001) は、歩行中にもアキレス腱の伸張・短縮が発生していることを報告している。言い換えると、アキレス腱由来の弾性エネルギーは歩行中にも発生し、エネルギー消費の低減に一役買っている可能性を示唆している。本研究では、歩行および走動作における下肢筋で発揮される筋弾性の生理人類学的な意義について検討した。

研究成果の概要 (英文)：Bipedal locomotion can be achieved by human beings only. However, it has several critical issues. Gait balance is not stable due to a higher head position. Abdominal region always turns to the gait direction, meaning that a vital spot is exposed in front of the trunk. Back pain likely occurs due to the gravity. A functional potentiality is necessary for humans to acquire bipedal locomotion regardless of those issues. Recoil of the stored elastic energy and high efficiency for transferring gravitational potential energy and kinetic energy are the possible factors for explaining energy saving mechanisms during walking and running, respectively. However, these hypothesis have recently been attacked. For example, Fukunaga et al. (2001) showed that the Achilles tendon was stretched even during walking, suggesting that the recoil of the stored elastic energy served as an energy saving mechanism during walking. The present study examined muscle elasticity in the lower extremities during human locomotion for examining its physiological polymorphism and functional potentiality.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 2,700,000 | 810,000 | 3,510,000 |
| 2009年度 | 500,000   | 150,000 | 650,000   |
| 総計     | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・応用人類学

キーワード：歩行、ランニング、ロコモーション、機能的潜在性、生理的多型性、生理人類学

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの代表的な陸上移動運動形態である歩行とランニングには、それぞれ異なるエネルギー消費節約機構が存在する。ランニングでは、主にアキレス腱の伸張・短縮時に発生する「弾性エネルギー」と呼ばれるバネ作用が活動筋の力学的エネルギーを補完するため、本来必要なエネルギー消費量よりも実際には少なくすむと説明されてきた (Cavagna et al. 1964)。一方、歩行では非常に高い位置エネルギーと運動エネルギーの変換効率が、活動筋の力学的エネルギーの産出を補完し、結果的に産出されるエネルギー消費が抑制されると考えられてきた (Cavagna et al. 1963)。

しかしながら、スポーツ科学分野で古くから信じられてきたこの学説には、近年いくつかの面白い反証が突きつけられている。たとえば、Fukunaga et al. (2001) は、なんと「歩行中」でもアキレス腱の伸張・短縮が発生していることを報告している。言い換えると、アキレス腱由来の弾性エネルギーは歩行中にも発生し、歩行のエネルギー消費の低減に一役買っている可能性を示唆している。これらの報告は、1960年代から続いていた、ヒトの陸上移動運動のエネルギー節約機構の解釈に対して疑問を投げかけている。

### 【問題点 1】

#### 歩行中の協働筋間における筋弾性発揮のコーディネーション

歩行における弾性エネルギー再利用説に関するいくつかの先行研究は、全てがアキレス腱の伸張・短縮のみに着目してきた (Fukunaga et al. 2001; Lichtwark & Wilson 2006; Sasaki & Neptune 2006)。また Lichtwark et al. (2007) は、歩行速度の大小、傾斜角度の有無に関わらず、アキレス腱の伸張・短縮度合いは変化しなかったと報告している。すなわち、歩行中に得られるアキレス腱由来の弾性エネルギーの再利用は、ある一定の限界があることになる。このことは、アキレス腱に付随する下腿筋群 (ヒラメ筋、腓腹筋) が、アキレス腱で産出できなかった弾性エネルギーの産出を補完する可能性を示唆しているが、協働筋であるヒラメ筋と腓腹筋が、それぞれどのように弾性エネルギーの発生に貢献しているのか明らかにされていない。

たとえば、下腿筋にはヒラメ筋と腓腹筋という二つの協働筋が存在する。両者の違いは、ヒラメ筋が単関節筋であるのに対して腓腹筋が二関節筋であることである。単純な背伸び動作などでは、強大な力を発揮する単関節筋 (ここではヒラメ筋) が主として足関節の底屈運動を制御すると考えられるが、歩行や

ランニングなどの複合関節運動では単関節筋 (ヒラメ筋) に加えて複合関節筋 (ここでは腓腹筋) が動作遂行に参画する。したがって、下腿全体をとおした筋弾性の発揮には、協働筋間で何らかのコーディネートを受けていることが予想される。言い換えると、単関節筋 (ヒラメ筋) の弾性エネルギー産出が限界に近づくと、複合関節筋 (腓腹筋) で弾性エネルギーの産出を補うような生理的多型性の存在が示唆される。

また、このような事象は部位間でも検討できる。大腿部には外側広筋や中間広筋など 4 種の協働筋が存在し、歩行・ランニング時の主働筋として機能する。下腿部と大腿部でどのように筋弾性発揮のコーディネーションを行っているのか興味深い。

### 【問題点 2】

#### ランニングにおける筋弾性発揮の生理人類学的意義の検討

ランニングでは歩行に比べて活動筋において大きな力を発生するため、大腿四頭筋においてかなりの量の弾性エネルギーを産出する必要がある。筋・腱複合体で発揮された筋弾性が走効率 (ランニングエコノミー) に貢献していることは既に知られているが、非侵襲的な手法で筋弾性の評価が行われた事例は極めて少ない (Abe et al. 2007, Bourdin et al. 1995)。

## 2. 研究の目的

本申請では上記の問題点について、それぞれ次の検討を行うことを目的とする。

- (1) 歩行動作における下腿部協働筋群 (ヒラメ筋/腓腹筋) の筋弾性発揮のコーディネーションについて検討すること。
- (2) (1)に関連して、部位間 (大腿部/下腿部) の筋弾性発揮のコーディネーションについて検討すること。
- (3) ランニング動作における筋弾性の発揮が、ランニングエコノミー (走効率) にどのような影響を及ぼすか検討すること。

これらの研究課題を順次検討することによって、筋弾性の発揮がヒトの陸上移動運動におけるエネルギー消費節約機構としてどのように貢献しているのか、機能的潜在性・全身的協働といった視点から、ヒトの陸上移動運動に関する生理人類学的な意味を追究することができると考えられる。

## 3. 研究の方法

空調設備が整った実験室内に設置されたトレッドミル上にて全ての測定を行った。予備実験にて得られた自由歩行時の stride rate を固定し、【問題点 1】で説明した「協

働筋間の筋弾性発揮の「コーディネーション」について 100m/分(早歩き), 75m/分(普通), 50m/分(ゆっくり)で歩行動作を行うときの下腿筋の筋電図を30-40歩表面筋電図法で記録した。このとき、同期して得られた足関節角度および膝関節角度から、各筋の筋電図を伸張性収縮(Ecc)と短縮性収縮(Con)を分類することができる(Fig. 1)。それぞれの期の積分筋放電量の比(Ecc/Con比)を、報告者らの先行研究(Abe et al. 2007, 発表2009a, 同2009b)にしたがって筋弾性の指標とした。

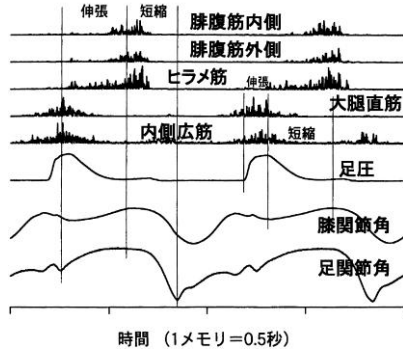


Fig. 1 表面筋電図による歩行中の筋弾性評価

トレッドミルでの筋電図の測定に平行して、酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ ; ml/kg/min)の測定を行った。得られた酸素摂取量を歩行速度( $v$ ; m/min)で除すことによって、単位距離あたりのエネルギーコスト( $C$ ; ml/kg/meter)を算出した( $C = \dot{V}O_2/v$ ; Abe et al. 2004, 2007a, 2007b)。

平成 21 年度は、【問題点 2】で指摘した、「ランニングにおける筋弾性発揮の生理人類学的意義」について検討を行った。ここでは、歩行動作における諸検討(問題点 1)と同じように、表面筋電図法を用いて外側広筋から筋電図計測を行った。実験条件の違いによって筋弾性発揮の差異を人工的に抽出するため、ランニングでは走速度を 200m/分に固定した上で、登り(+5%)/平地/下り(-5%)を設定した。さらに重量負荷物(2.3kg)を後背部に付加した。ランニングエコノミー( $C$ )と筋弾性の評価方法は歩行動作と同じとした。

また、ランニングにおける膝関節の動きは歩行の場合と若干異なるため、Fig. 2のように伸張期(Ecc)と短縮期(Con)を区分した。

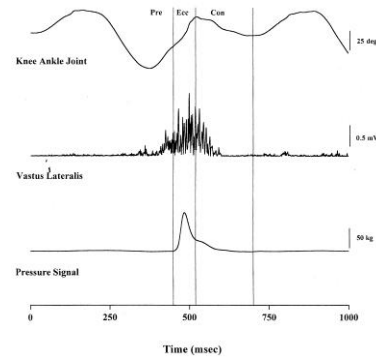


Fig. 2 歩行中の筋弾性の評価 (外側広筋)

#### 4. 研究成果

H20 年度は、歩行動作における下腿筋群の筋弾性発揮に関する協働筋間比較、部位間比較を行った。被験者は各種既往症歴を持たない男子大学生 11 名であった。

歩行速度が増加するにつれて、下腿部 3 筋(腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、ヒラメ筋)の筋弾性は有意に「低下」し(Fig. 3)、反対に大腿部 2 筋(内側広筋、大腿直筋)の筋弾性が有意に増加した(Fig. 4)。また、大腿部協働筋間に大きな筋弾性の差は見られなかったが、下腿部協働筋間において、単関節筋であるヒラメ筋の弾性発揮が大きい傾向が見られた(Fig. 3 下)。

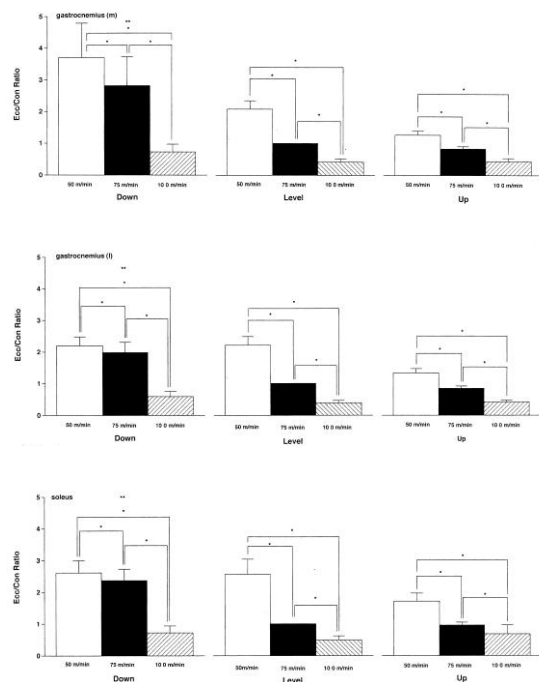


Fig. 3 歩行速度および路面傾斜角度の違いによる下腿部協働筋群の筋弾性の比較 (上から腓腹筋内側頭, 同外側頭, ヒラメ筋; 安陪ほか 2009a, b)

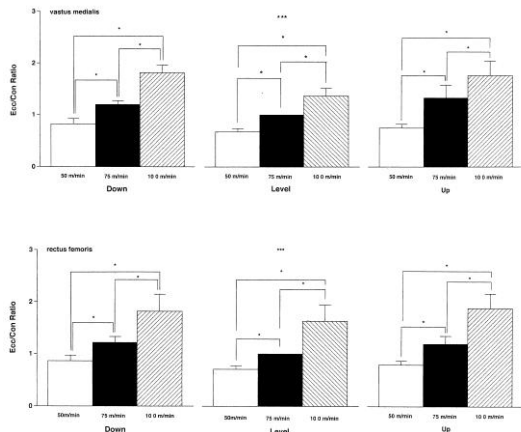


Fig. 4 歩行速度および路面傾斜角度の違いによる大腿部協働筋群の筋弾性の比較 (上から内側広筋、外側広筋; 安倍ほか2009a, b)

近年、歩行中にもアキレス腱の伸張・短縮が発生していることが指摘されているが、アキレス腱由来の弾性エネルギーは歩行中にも発生し、歩行のエネルギー消費の低減に一役買っていることを意味している。関連した先行研究の全てが、アキレス腱の伸張・短縮のみに着目しているが、歩行速度の大小、傾斜角度の有無に関わらず、アキレス腱の伸張・短縮度合いは変化しなかったことが判明している。これらの先行研究と本年度の研究結果は、歩行中に得られるアキレス腱由来の弾性エネルギーの再利用には、ある一定の限界があり、それを補完するように筋が弾性を発揮していることを示唆している。特に、下腿部分では歩行速度が増加するに従って筋弾性が低下する(剛性が高くなる)理由は、歩行速度増加によって増大する着地衝撃に対する生体側の防御作用であると考えられる。一方、大腿部での筋弾性の増加は、下腿部で減少した筋弾性を補完するためのものであると考えられる。

本研究で観察された、歩行速度変化、傾斜変化に伴う脚部位間および協働筋間における筋弾性のコーディネートは、ヒトのロコモーション(移動運動)における筋機能の機能的潜在性の存在を意味しているものと考えられた。

H21年度は筋弾性がランニング中のエネルギー消費節約機構に及ぼす影響について検討を行った。被験者は陸上競技歴のある男性8名であった。

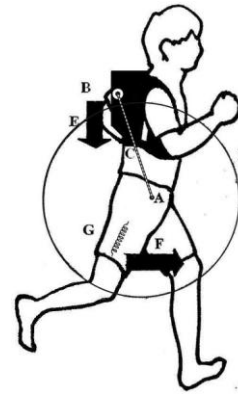


Fig. 5 重量負荷物を後背部に付加したときに発生する力とトルク (Abe et al. 投稿準備中)

ランニングで重量物を付加すると、脚筋では筋弾性が高まる(Bourdin et al. 1995)。しかしながら、Abe et al. (2004, 2008a, 2008b)が指摘するように、後背部への重量物の付加は、「身体重心回りの回転トルク」を生み出すため(Fig. 5のF)、本研究では傾斜角度条件を併用することによって、ランニングエコノミーに及ぼす重量負荷と傾斜角度の影響を個別に検討するモデルを考えた(Fig. 6)。

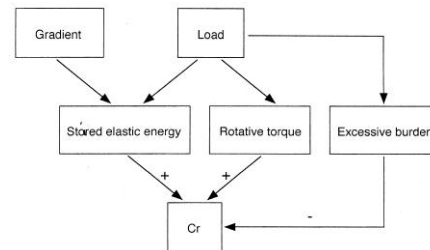
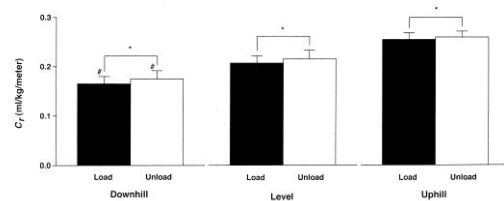


Fig. 6 ランニングエコノミーに対する重量負荷と傾斜角度の影響. (+はポジティブな影響、-はネガティブな影響を意味する; Abe et al. 投稿準備中)

その結果、下り(D条件)と平地条件(L条件)において、ランニングエコノミーと筋弾性は一義的に対応した変化を示した(Fig. 7上下)。さらに詳しく観察すると、ランニングエコノミーと身体重心回りの回転トルクは、統計的に有意な相関関係ではなかったが(Fig. 8上)、筋弾性はランニングエコノミーと統計的に有意な相関関係を示した(Fig. 8下)。





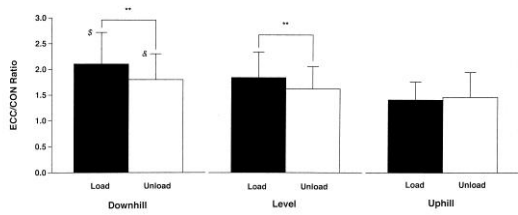


Fig. 7 傾斜角度と重量負荷がランニングエコノミー(上)と筋弾性(下)に及ぼす影響(安陪ほか 2009b)

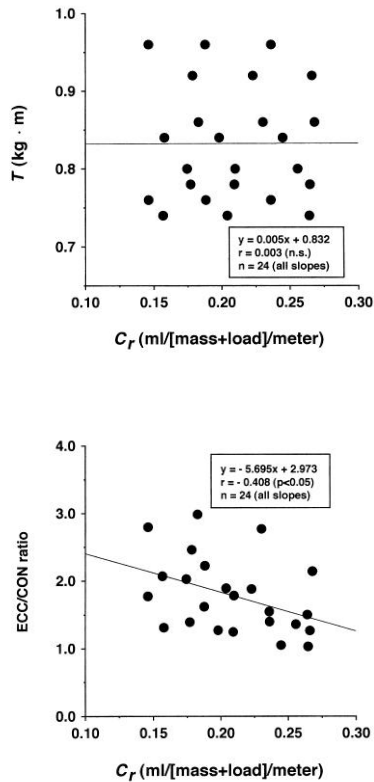


Fig. 8 ランニングエコノミーと身体重心回りの回転トルク(上)および筋弾性(下)の関係

ランニングエコノミーの決定因子について、これまでスポーツ界では諸説叫ばれてきたが、未だに統一した見解は得られていない。本研究では、ヒトの陸上移動運動(ロコモーション)におけるエネルギー節約機構の一つとして、筋・腱のバネ作用に注目したが、本研究の成果は、筋弾性を人工的に且つ簡便に増加させる手法として重量負荷の後背部への配置が有効であることを示唆している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Daijiro Abe, Yoshiyuki

Fukuoka, Satoshi Muraki, Akira Yasukouchi, Shigemitsu Niihata. Interaction effects of load and gradient on running economy. (投稿準備中/査読有) **掲載決定でしょうか?**

- ② Daijiro Abe, Norio Hotta, Yoshiyuki Fukuoka, Yoko Ohta, Keiko Hamasaki. Biomechanical analysis of gait and sit-to-stand patterns using a specially made knee supporter in healthy young and elderly individuals. *Journal of Physiological Anthropology* Vol. 29 pp. 65-70, 2010 査読有
- ③ 安陪大治郎. 高強度ダイナミック運動時における大腿部協働筋群の筋活動様相. *健康・スポーツ科学研究* Vol. 12 pp. 45-49, 2010 査読有
- ④ Daijiro Abe, Satoshi Muraki, Akira Yasukouchi. Ergonomic effects of load carriage on energy cost of gradient walking. *Applied Ergonomics* Vol. 39 pp. 144-149, 2008a 査読有
- ⑤ Daijiro Abe, Satoshi Muraki, Akira Yasukouchi. Ergonomic effects of load carriage on the upper and lower back on metabolic energy cost of walking. *Applied Ergonomics* Vol. 39 pp. 392-398, 2008b 査読有
- ⑥ Takayoshi Yoshida, Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka, Richard L. Hughson. System analysis for oxygen uptake kinetics with step and pseudo-random binary sequence exercise in endurance athletes. *Measurement in Physical Education and Exercise Science* Vol. 12, pp. 1-9, 2008c 査読有
- ⑦ Norio Hotta, Daijiro Abe, Takayoshi Yoshida, Tomoko Aoki, Yoshiyuki Fukuoka. Influence of work rate on dynamics of  $O_2$  uptake under hypoxic conditions in humans. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* Vol. 48 pp. 129-137, 2008d 査読有
- ⑧ 岩城彩, 安陪大治郎, 奥本正, 揖斐祐治, 坂口泰, 三宅勝次, 宮広重夫, 金丸キミエ, 新畑茂充. 二次元画像解析法を用いた走フォーム分析とランニングエコノミーの関係. *広島陸上競技研究* Vol. 11 pp. 1-5, 2008e 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① 安陪大治郎 ほか4名. 歩行動作における筋弾性に関する研究: 歩行速度と傾斜角度に関する検討. 第61回日本生理人類学会大会 2009a ポスター発表  
**発表年月日と場所は?**
- ② 安陪大治郎 ほか4名. 歩行動作における筋由来の弾性エネルギーに関する研究: 歩行速度に関する検討. 第60回日本生理人類学会大会 2009b ポスター発表  
**発表年月日と場所は?**
- ③ 安陪大治郎. Ergonomics of human land locomotion with load carriage. 第2回身体運動の科学 ワークショップ 2008a  
口頭発表 **発表年月日と場所は?**
- ④ 安陪大治郎 ほか4名. コイル型ボーン付きサポーターの運動補助機能に関する人間工学的評価. 第58回日本生理人類学会大会 2008b ポスター発表 **発表年月日と場所は?**

~~〔図書〕(計0件)~~

~~〔産業財産権〕~~

~~○出願状況(計0件)~~

~~名称:~~

~~発明者:~~

~~権利者:~~

~~種類:~~

~~番号:~~

~~出願年月日:~~

~~国内外の別:~~

~~○取得状況(計0件)~~

~~名称:~~

~~発明者:~~

~~権利者:~~

~~種類:~~

~~番号:~~

~~取得年月日:~~

~~国内外の別:~~

~~〔その他〕~~

~~ホームページ等~~

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安陪 大治郎 (ABE DAIJIRO)

九州産業大学・健康・スポーツ科学センター・講師

研究者番号: 10368821

~~(2) 研究分担者~~

~~( )~~

~~研究者番号:~~

~~(3) 連携研究者~~

~~( )~~

~~研究者番号:~~