

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26440266

研究課題名(和文) 環境適応能としての移行速度と経済速度に関する生理人類学的検討

研究課題名(英文) Anthropological investigations for economical walking speed and gait transition speed as an environmental adaptation

研究代表者

安倍 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：進化の過程で直立二足歩・走行を獲得できた現生生物はヒトだけである。ところが、腰痛、痔、立ち眩み、膝痛、転倒、遅い最大疾走速度など、多くの不利益を抱えることになった。数少ない利点の一つは高い移動効率であるとされる。さて、歩行ではエネルギーコストが最少になる速度があり、経済速度と呼ばれている。また、歩・走行のエネルギーコストには結節点となる速度があり、移行速度と呼ばれている。本研究では低・高酸素暴露、傾斜などの介入による経済速度と移行速度の変化を定量化し、その機序を検討した。また、移行速度で「速歩」または「遅走」した場合の下腿筋活動量や平均周波数の差異から、移行速度の活動筋側の機序を探究した。

研究成果の概要(英文)：Erect bipedalism is inherent in human locomotion, while it involves many biological disadvantages, such as back pain, knee pain, hemorrhoids, fall risk, and slow maximal running speed. One of the most important biological benefits of the erect bipedalism has been known to be economical. There is a U-shaped relationship between energy cost of transport per unit distance (CoT) and walking speed ( $v$ ), meaning that there exists a specific walking speed minimizing the CoT. Such a specific walking speed is called economical speed (ES). A linear relationship exists between CoT and running speeds, indicating that there is an intersection between those CoT- $v$  relationships. It is termed 'energetically optimal transition speed' (EOTS). The ES and EOTS were examined under normobaric hypoxia, hyperoxia, and normoxia at different gradients. Muscle activities and mean power frequency of the lower leg extremities were also investigated to examine the mechanisms for explaining the gait transition.

研究分野：生理人類学

キーワード：直立二足歩行 経済速度 至適速度 移行速度 ロコモーション 筋電図 適応進化

1. 研究開始当初の背景

直立二足歩行はヒトの進化と密接に関連している。現存する生物種の中では、唯一ヒトだけが直立二足歩・走行(ロコモーション)を遂行可能であるが、ロコモーションは、大きく分けて歩行動作と走動作がある。成人男性の場合、約 4.8 km・h<sup>-1</sup> 前後で経済速度が出現する(\*エネルギーコスト[CoT; J・kg<sup>-1</sup>・km<sup>-1</sup>]が最少になる速度)。さらに速度を上げると、7.2-8.0 km・h<sup>-1</sup> 程度で、歩行から走行へと自然に相転移する。この速度は Walk-to-Run Transition Speed (移行速度) と呼ばれてきた。

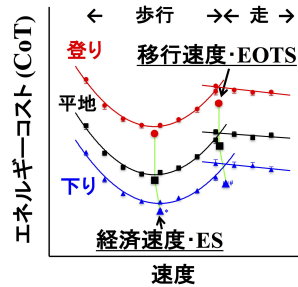


図1. Abe et al. (2015)を加筆修正

このように、ヒトのロコモーションは極めてうまく最適化されており、移動速度に応じてエネルギー消費量をできるだけ少なく抑えるように制御される。近縁の生物種の中では、ヒトは長時間かつ長距離の移動能力に特に優れていると言われる所以でもある (Bramble & Lieberman 2004)。このような最適制御は、ヒトが進化の中で獲得した代表的な環境適応能の一つであるが、一方で、移行速度に関する活動筋側メカニズムや個体差、環境変化に対応した経済速度の変化などは十分に解明されていない。

経済速度については、申請者らによる先行研究で、そのメカニズムや傾斜の有無による経済速度の変動は述べられてきたが (Abe et al. 2008a, 2008b) 例えば高温・低温環境や低酸素環境下など、実際の登山や高所滞在を模した条件での検討は行われていない。

一方、移行速度のメカニズムについては諸説ある。力学的理由 (Hreljac et al. 2008, Caekenberghe et al. 2010)、エネルギー論的理由 (Minetti et al. 1994)、筋生理的な最適化 (Farris & Sawicki 2012)、代謝要因 (Ganley et al. 2011) などが提唱されてきた。人類学的な見地から考えると、ヒトのロコモーションは、生体内でエネルギー消費量を最少にするような制御を受ける結果、歩行動作から走動作へと移行するはずである。しかしながら、いくつかの反例もある。たとえば歩行速度が徐々に増加し、歩行動作から走動作へ移行する時に、主観的運動強度 (RPE; Rating of Perceived Exertion) は一時的に低下するが、酸素摂取量 (VO<sub>2</sub>; mL・kg<sup>-1</sup>・min<sup>-1</sup>) や CoT 値は低下どころか、むしろ増加してしまうことは興味深い (e.g. Minetti et al. 2001)。この事実は、歩行動作から走動作へと移行する理由は、少なくともエネルギー消費量の最少化のためだけではないことを意味している。

上記のように、移行速度のメカニズムや個体差を説明する要因は未だ特定されていない。たとえば、速度漸増時と漸減時の移行速度は一致しないという報告 (Segers et al. 2007; Hreljac et al. 2007) と一致するという報告 (Turvey et al. 1999; Prilutsky & Gregor 2001) が混在する。速度漸増時と漸減時の移行速度が一致するという研究では、その「トリガー」として、前脛骨筋の筋放電量に注目している (Bartlett & Kram 2008; Malcolm et al. 2009; Segers et al. 2013)。そもそも前脛骨筋は伸張反射などの姿勢制御に関わる重要な筋であるが、拮抗筋である腓腹筋の筋活動様相を併せて検討した方がよいと考えられる。

上記のように、移行速度のメカニズムや個体差を説明する要因は未だ特定されていない

い。たとえば、速度漸増時と漸減時の移行速度は一致しないという報告 (Segers et al. 2007; Hreljac et al. 2007) と一致するという報告 (Turvey et al. 1999; Prilutsky & Gregor 2001) が混在する。速度漸増時と漸減時の移行速度が一致するという研究では、その「トリガー」として、前脛骨筋の筋放電量に注目している (Bartlett & Kram 2008; Malcolm et al. 2009; Segers et al. 2013)。そもそも前脛骨筋は伸張反射などの姿勢制御に関わる重要な筋であるが、拮抗筋である腓腹筋の筋活動様相を併せて検討した方がよいと考えられる。

2. 研究の目的

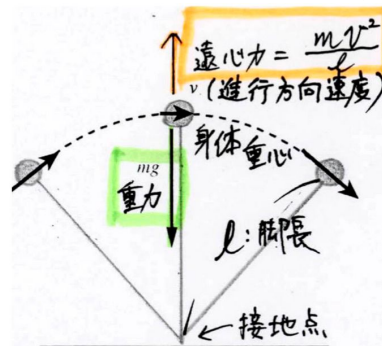
そこで本研究では、ヒトの移行速度や経済速度に関する諸般の未解明事項を総合的に検討することによって、ヒトの環境適応能の一つであるロコモーション最適制御に関する生理人類学的な理解を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

各々の検討毎に被験者が異なることに加え、既存の方法論そのものに対する検討を行ったプロジェクトもあるため、関連する方法論は「4. 研究成果」の中に記載する。

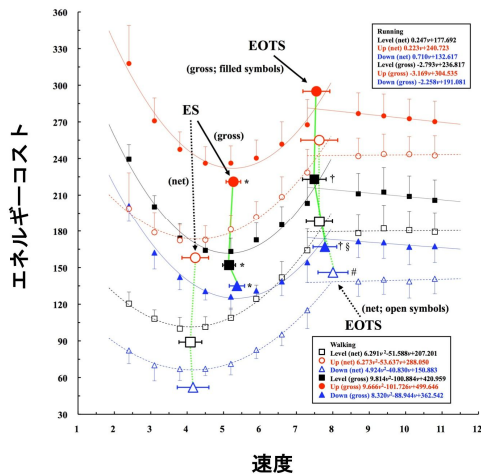
4. 研究成果

経済速度と移行速度の算出には、方法論的な問題点がある。特に結果の解釈に影響するのが gross CoT 値と net CoT 値 (gross CoT から安静時代謝を差し引いたもの) の問題である。このため、両 CoT 値を使った場合、経済速度や移行速度にどの程度の差異が生じるか、モデル解析による検討を行った (Abe et al. 2015)。まず、傾斜路面における移行速度と経済速度の決定要因に関する仮説モデルとして、逆振り子モデルと動的線形理論を併用した。着床期の身体重心は逆振り子状態であるため、遠心力 (F)、身体重量 (m)、対地速度 (v)、脚長 (l) には  $F=mv^2/l$  の関係が成立する (下図; 黄色枠)。この遠心力は重力 (下図; 緑枠) と等しいので、 $F=mv^2/l = mg$  の関係が得られる (g は重力加速度)。これを v について解くと、 $v = \sqrt{gl}$  となる。これより速い速度では、遠心力によって自然に脚が地面から離れ、理論的には歩行動作から走動作へと移行することを意味している。同様に、動的線形理論から経済速度 (ES) = 1.428 l で得られるとしている (Donelan & Kram 1997)。

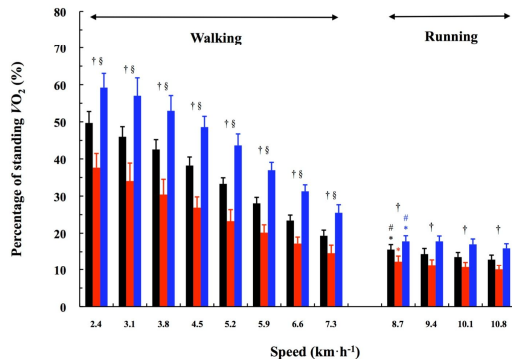


Srinivasan & Ruina (2012)に加筆

実測での被験者は、よく鍛錬された運動選手 11 名とした。平地、傾斜 ( $\pm 5\%$ ) に設定されたトレッドミル上で 8 歩行速度、および 4 走行速度における酸素摂取量 ( $VO_2$ ;  $mL O_2 \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ) を測定した。 $VO_2$  は各々の速度で除され、単位距離当たりの酸素消費量 (CoT;  $mL O_2 \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$ ) に変換された。歩行と走行で得られた CoT 値を開数近似したところ、経済速度と移行速度は、全ての傾斜において動的線形理論から推定される値と大きく異なっており、同モデルでは説明できないことが判明した。近似式の各係数を詳細に分析したところ、ゼロ速度時の代謝 (standing  $VO_2$ ) の取り扱いが経済速度の算出に大きな影響を及ぼしており、特に低速域での影響度は高速域に比べて相対的に大きく、傾斜による代謝差を考慮しても、standing  $VO_2$  の取り扱いによって経済速度は約 20% 程度変動することが明らかにされた。一方、移行速度は standing  $VO_2$  による有意な影響が平地と下りで観察されたが、その影響はわずかに 3% 未満であった。また、走行時の CoT 値に対する standing  $VO_2$  の影響は 9.4 km/h 以上で消失した (Abe et al. *PLoS One*, 2015)。



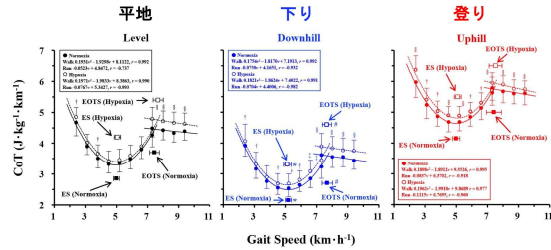
Abe et al. (2015) を加筆修正  
 実線=gross, 破線=net 赤=登り、黒=平地、青=下り  
 net CoT を用いた経済速度は gross CoT より 20% 程度遅く見積もられる (左側 2 本の緑線)。移行速度は net-gross の影響は小さく、3% 未満であった。



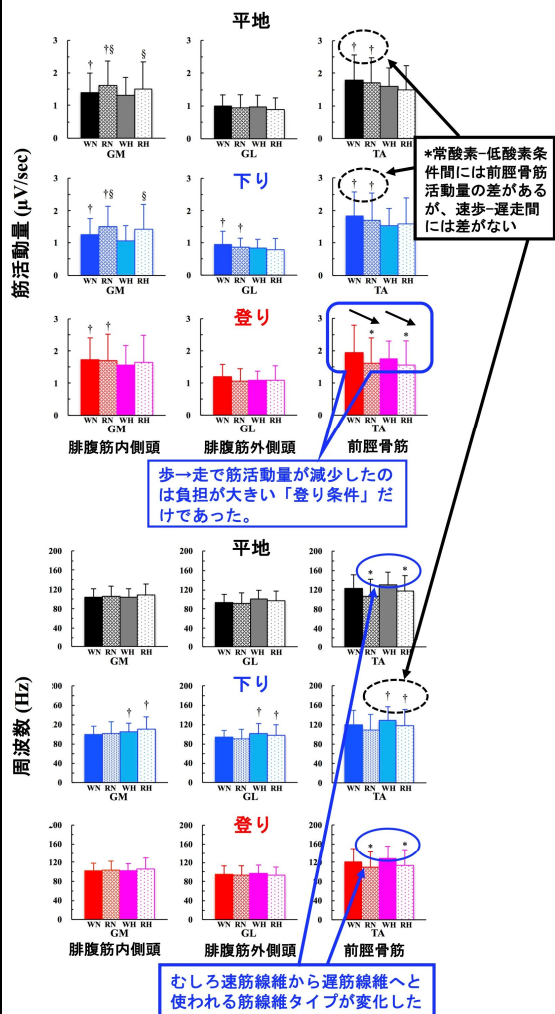
Abe et al. (2015)  
 代謝の少ない低速ほど CoT に対する安静時代謝の比率が高い。gross CoT から安静時代謝を差し引くことの影響は 8.7 km/h まで続き、9.4 km/h でその影響は消失した。

これらの結果を踏まえ、H27 年度は 15 名の健常男性を対象に吸入酸素濃度を低下さ

せる実験的検討を行った。傾斜条件 (平地/傾斜  $\pm 5\%$ ) と吸入酸素条件 (常圧常酸素/常圧低酸素  $\cdot 15\% FiO_2 =$  標高 2700m 程度に相当) を組み合わせて経済速度と移行速度を求めた。移行速度と経済速度は、共に「下り」で他の傾斜条件より有意に高かったが、吸入酸素条件間における有意差はみられなかった (下図)。



Abe et al. (2017) 実線=常圧常酸素、破線=常圧低酸素 (15%  $FiO_2$ )  
 全ての傾斜において経済速度と移行速度には吸入酸素濃度による差は見られなかった。



Abe et al. (*PLoS ONE* 2017) に加筆

次に、移行速度で「速歩」と「遅速」を行い、下腿筋群 (前脛骨筋、腓腹筋外側頭、腓腹筋内側頭) の表面筋電図を導出した。そして筋活動量と平均周波数を得た。その結果、歩-走の相転移によって、前脛骨筋の筋活動量が有意に減少した (筋の負担が減った) のは「上り」だけであった。一方、「下り」と「平地」では前脛骨筋の筋活動量に有意な変

化は観察されず、むしろ平均周波数が減少した。これは、より疲労耐性の高い遅筋線維を選択的に稼働することによって、筋活動量の増加（エネルギー消費量の大幅増に繋がる）を回避する機能的潜在性を示唆している（Abe et al. 2017）。

本研究では、特に筋電図の方法論的問題点についても言及した。幾つかの先行研究（e.g. Bartlett & Kram 2008; Malcolm et al. 2009）ではある一定時間の筋電図を切り出し、全波整流することで筋活動量を評価している。ところが、移行速度において「速歩」または「遅走」とすると、ステップ数が極端に異なる（遅走>速歩）このため、筋活動量を評価する場合、時間とステップ数を用いて筋活動量を正規化するべきであることを指摘した。

ここで得られた結果から、標高 2700m に相当する「moderate な」常圧低酸素条件では、吸入酸素濃度に関わらず経済速度や移行速度は変化しないが、移行速度における「速歩」と「遅走」を比較すると、下腿筋活動様相は吸入酸素濃度より傾斜による影響を強く受けることを意味している。

H28 年度は吸入酸素条件を常圧高酸素（40% FiO<sub>2</sub>）に設定し、終末呼気二酸化炭素濃度を実験的に操作した。対象者は健康男性 17 名であった。上記の実験的操作によって、高酸素条件では常酸素条件に比べ、高速歩行および走行時において有意に換気応答が抑制された。また、経済速度は高酸素条件の上り傾斜で、常酸素に比べて有意に高速化した。肥満、加齢、上り傾斜、低酸素、重量負荷などは経済速度を低下させるが、今回、下り傾斜条件以外で初めて経済速度が高速化する条件を見いだしたことになる。言い換えると、活動筋への O<sub>2</sub> delivery が経済速度の決定要因の一つであることを示唆する結果であった。

そこで、常酸素-高酸素条件間にみられた CoT の差異に対して、換気（呼吸）および心拍（循環）の影響をモデル解析によって検討した。その結果、呼吸・循環という推進力発揮に直接的に貢献しないエネルギーコストが、常酸素-高酸素条件間に見られた CoT の差異を約 90%説明することが示された。これまで、換気のエネルギーコストは強制過換気や CO<sub>2</sub> loading を伴った induced hyperpnea など、主に安静時に測定されてきた。これは、強度の高い運動中に換気のエネルギーコストを非侵襲的に測ることに安全上の限界があったからである。また、運動時の心拍動に要するエネルギーコストは、これまでヒトで非侵襲的に測定されたことはない。本研究では心拍動のエネルギーコストが、換気に要するエネルギーコストと同程度であったことに加え、40%FiO<sub>2</sub> という moderate な高酸素吸入を行うことによって、運動時の心拍動コストを非侵襲的に測定できることを示せたことに方法論的なオリジナリティーがあると考えている。

筋活動については、前脛骨筋の筋活動量、平均周波数共に歩行から走行への相転移によって有意に低下した。また、他部位の筋活動量も相転移によって微減することが示された。現在、この生理学的解釈を進めている（投稿準備中）。

## 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 10 件）

1. Masahiro Horiuchi, Yoshiyuki Fukuoka, Yoko Handa, Daijiro Abe, Herman Pontzer. (2017) Measuring the energy of ventilation and circulation during human walking using induced hypoxia. *Scientific Reports*, Vol.7, (in press). 査読有り
2. Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka, Masahiro Horiuchi. (2017) Muscle activities during walking and running at energetically optimal transition speed under normobaric hypoxia on gradient slopes. *PLoS ONE*, Vol.12(3), e0173816 (15 pages). 査読有り
3. Yoshiyuki Fukuoka, Masaaki Iihoshi, Juhalee Tuba Nazunin, Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuba. (2017) Dynamic characteristics of ventilatory and gas exchange during sinusoidal walking in humans. *PLoS ONE*, Vol.12(1), e0168517 (14 pages). 査読有り
4. Masahiro Horiuchi, Yoko Handa, Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka. (2016) Walking economy at simulated high altitude in human healthy young male lowlanders. *Biology Open*, Vol.5(10), pp.1408-1414. 査読有り
5. 安陪大治郎. (2016) 連続背伸び動作における下腿筋群の筋活動. *健康・スポーツ科学研究*, Vol.18, pp.37-39. 査読なし
6. Masahiro Horiuchi, Junko Endo, Yukari Horiuchi, Daijiro Abe. (2015) Comparisons of energy cost of walking and economical walking speed at various gradients in healthy younger and older adults. *Journal of Exercise Science & Fitness*, Vol.13(2), pp.79-85. 査読有り
7. Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka, Masahiro Horiuchi. (2015) Economical speed and energetically optimal transition speed evaluated by gross and net oxygen cost of transport at different gradients. *PLoS ONE*, Vol.10(9), e0138154 (14 pages). 査読有り
8. Daijiro Abe, Takayoshi Yoshida, Hatsumi Ueoka, Koji Sugiyama, Yoshiyuki Fukuoka. (2015) Relationship between perceived exertion and blood lactate concentrations during incremental running test in young females. *BMC Sports Science, Medicine, and Rehabilitation*, Vol.7, article number 5 (9 pages). 査読有り
9. Masahiro Horiuchi, Satoshi Muraki, Yukari Horiuchi, Naofumi Inada, Daijiro Abe. (2014) Energy cost of pushing a wheelchair on various



gradients in young men. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol.44(5), pp.442-447.

査読有り

10. 安陪大治郎ほか6名. (2014) 男女大学生における肥満と隠れ肥満、および隠れ肥満予備群に関する実態調査. *健康・スポーツ科学研究*, Vol.16, pp.5-9. 査読なし

〔学会発表〕(計 3 件)

1. Daijiro Abe. Biological benefits of human bipedal locomotion. *12<sup>th</sup> International Congress of Physiological Anthropology* (Japan Society of Physiological Anthropology) 2015年10月29日(東京ベイ幕張ホール・千葉県幕張市)
2. 福岡義之, 福場義之, 安陪大治郎, 古賀俊策. 軽度低酸素環境下における正弦波歩行運動時のガス交換動態. 日本体力医学会 2014年9月(長崎大学・長崎県長崎市)
3. Daijiro Abe. Energetics of human bipedal gait at gradient environments. *Conference on Anthropology: Physiological and Cultural* (Organized by Prof. Dr. Kazuhiko Yamamoto (Kyushu University)) 2014年5月21日(九州大学芸術工学府・福岡県福岡市)

〔図書〕(計 1 件)

1. 安陪大治郎. 人間科学の百科事典(丸善出版)第二章「足」92-93頁, 第七章「動作経済の法則」416-417頁, 第八章「運動と健康」453-455頁(以上、単著), 第7章概説文「ヒトの営み」(安陪大治郎、中村晴信)379頁. 2015年1月

〔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

福岡義之 (FUKUOKA Yoshiyuki)  
同志社大学・スポーツ健康科学部・教授  
研究者番号：20265028

堀内雅弘 (HORIUCHI Masahiro)  
山梨県富士山科学研究所・環境共生研究部・主任研究員  
研究者番号：50310115

(3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

( )