様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　９ 月　８ 日現在

機関番号：３７１０２

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：１９Ｋ１１５４１

研究課題名（和文）歩行能力をエコノミーから数値指標化する試みと走･歩の相転移機序解明

研究課題名（英文）Indexing walking ability from economy and control perspectives and exploring mechanisms for gait transition and optimal walking speeds

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・准教授

研究者番号：１０３６８８２１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,700,000円

研究成果の概要（和文）：直立二足歩行は現生人類だけが獲得した特異な移動形態であり、その代謝特性もユニークである。例えばエネルギーコストが最少になる「経済速度」や歩→走へ相転移する「移行速度」が存在する。ところが、それらの個体差は大きく、必ずしも既存の生理指標で説明しきれるものではない。つまり歩行能力を数値指標化することは容易ではないのである。
そこで本研究は、まず移行速度と経済速度の決定要因について免荷条件を用いて探究する。次に歩行速度を正弦波状に変動させ、連続的な過渡応答条件下における歩容調整能力を探究する。これらの探究によって、歩行能力を数値指標化する方策を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義
現生人類だけが獲得した直立二足歩行は必ずしも生物学的に理にかなったものではない。これまでバリアフリー化など様々な社会介入が試されてきたが、高齢者の転倒事故死亡者数は減るどころか過去20年間で2.3倍も増加した。これは交通事故死の3.3倍に相当する。本研究は直立二足歩行の特性を代謝と制御の両面から定量的に示すことに挑んだ。本研究の成果は運動習慣の重要性を社会喚起すること、さらに低体力者などの健康寿命延伸や介護負担軽減に貢献しうる。

研究成果の概要（英文）：Since modern humans are the only species that acquired erect bipedalism in a process of the evolution, its metabolic features are highly unique. There is a specific gait speed that can minimize the energy cost of walking, so called "economical speed (ES)". Another important one is the gait transition speed from walking to running. However, most of the already existing physiological indices cannot fully explain the mechanisms to determine the ES and/or gait transition speed. We firstly explored the mechanisms explaining the ES and gait transition speed using a custom-made body-weight support apparatus. We secondly explored gait stability with a sinusoidal speed-changing protocol (±2 km/h) at 30, 60, and 120 sec periods because it consecutively required adjusting the lower limbs. Summarizing the results of our investigations, we would like to propose some new indices to represent individual walking ability.

研究分野：運動科学

キーワード：歩行　gait transition　経済速度　正弦波負荷法　免荷　筋電図　歩容調整　加齢

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. **研究開始当初の背景**

歩行･走行（ロコモーション）には非常にユニークな代謝特性があり、エネルギーコストが最少になる**経済速度**や、歩→走へ相転移する**移行速度**が存在する（図 1）。健常人の歩行･走行効率は近縁種に比べて高いとされるが、その個体差は大きく、必ずしも既存の体力指標で説明しきれるものではない。

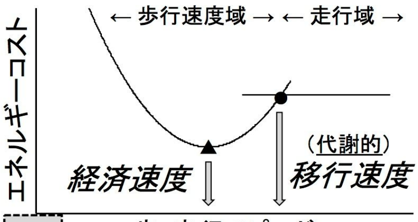

図1

2. **研究の目的**

本研究では、まず下腿筋への力学的応力を実験的に操作し、移行速度や経済速度に対する代謝と活動筋の関与を探究する。次に連続的な過渡応答状態を維持するために速度や傾斜を正弦波状に変動させ、歩容（歩幅やピッチ、歩隔）調整能力に及ぼす加齢と運動習慣の影響を検討する。これらの探究によって、歩行能力をエコノミーと制御の観点から数値化し、新たな健康体力指標を提案することを目的とする。

3. **研究の方法**

3-1. **課題 1. 我々はなぜ走り出すのか？**

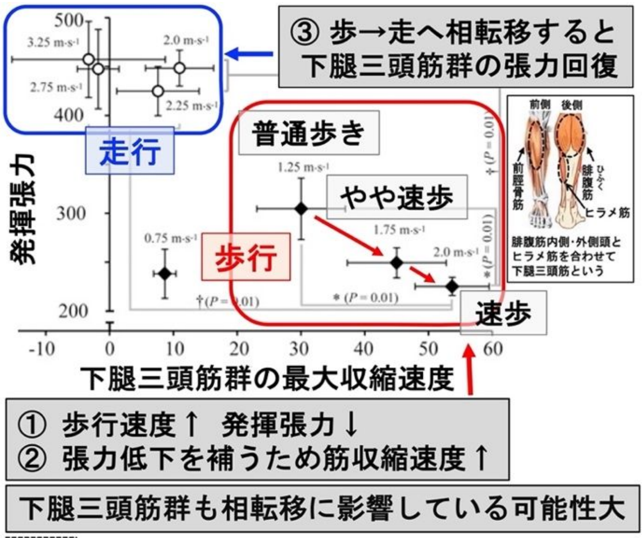

図2 Farris & Sawicki (2012) に加筆

直立二足歩行･走行は、生物的には必ずしも都合が良い動作ではない。膝･腰痛、立ち眩み、転倒骨折リスク、遅い最高疾走速度など数多くの生物的不利益を抱えている。一方、数少ない利点として高い経済性（エコノミー）が挙げられている（Pontzer 2017; Abe et al. 2015）。

図 1 に代謝的移行速度とある。これまで、歩→走へ相転移するのは代謝最少化のため、と考えられてきたが（Cavagna et al. 1977）、自然に歩→走へ相転移する移行速度は代謝から求めた移行速度より 5-6%遅い（Ziv & Rotstein 2009）。つまり、走･歩の相転移の生理学的意義は代謝最少化だけではないことになる。では、真の相転移トリガーは何なのか？ 近年、前脛骨筋の活動量や動員される筋線維タイプが関与していることが示唆されている（Abe et al. 2017, 2018）。ところが疑問の余地がある。前脛骨筋は主に脚を振り出す時（遊脚期）に活動し、推進力発揮に直接貢献しないのである。むしろ推進力発揮に貢献するのは拮抗筋の下腿三頭筋である（図 2 右）。事実、画像解析によるシミュレーションでは、前脛骨筋の拮抗筋である腓腹筋の筋活動も相転移トリガーとして機能する可能性が示唆された（図 2; Farris & Sawicki 2012）。このように様々な機序が提唱されており、「我々はなぜ走り出すのか?」という疑問に答えられる定説は存在しないのが現状である。

そこで申請者らは傾斜を使って下腿筋群の筋活動量を実験的に操作したことがある（Abe et al. 2017, 2018）。ところが、その方法では主働筋（下腿三頭筋）の活動量を増減させたとしても、拮抗筋（前脛骨筋）の活動量は比例的に増減しないというジレンマに陥った。この矛盾を解くには拮抗関係を成す前脛骨筋と下腿三頭筋への力学的応力を等価的に操作する必要がある。この条件を満たすため、申請者は免荷装置を製作し（図 3）、13 名の健常男性を対象に筋電図および代謝を測定し、自然移行速度で歩行/走行した場合の下腿筋群の活動量と平均周波数を比較検討した。

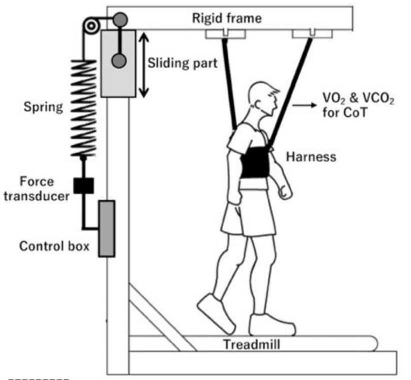

図3 免荷装置 (Abe et al. 2019, 2021)

3-2. **課題 2. 歩く速さはどのように決まるのか？**

図 1 のように歩行時のエネルギーコストは U 字状の二次曲線的応答を示す（Abe et al. 2018）。ところが、この U 字曲線は妊娠（Wall-Scheffler & Myers 2013）、加齢（Horiuchi & Abe et al. 2015）、肥満（Browning & Kram 2005）、心疾患（Wezenburg et al. 2013）、登坂（Abe et al. 2015, 2017）、低酸素暴露（Abe et al. 2017; Horiuchi & Abe et al. 2016）、重量負荷（Abe et al. 2008）など生体負担が高くなる条件で左方シフトし、結果的に経済速度は低下する。しかも減量

（Peyrot et al. 2012）やトレーニング（Mian et al. 2007）で高速化することもない。そこで課題 1 で制作した免荷装置を用いて、40 名の若年健常男性を対象に体重の 30%相当を免荷した場合と統制条件の経済速度と自由歩行速度を比較した。さらに課題 2 では、歩行効率を簡便に求める方法の開発と妥当性を検討するため、過去の論文データを用いてモデル解析を行なった。

3-3. **歩容調整能の評価** ～加齢と運動習慣の影響～

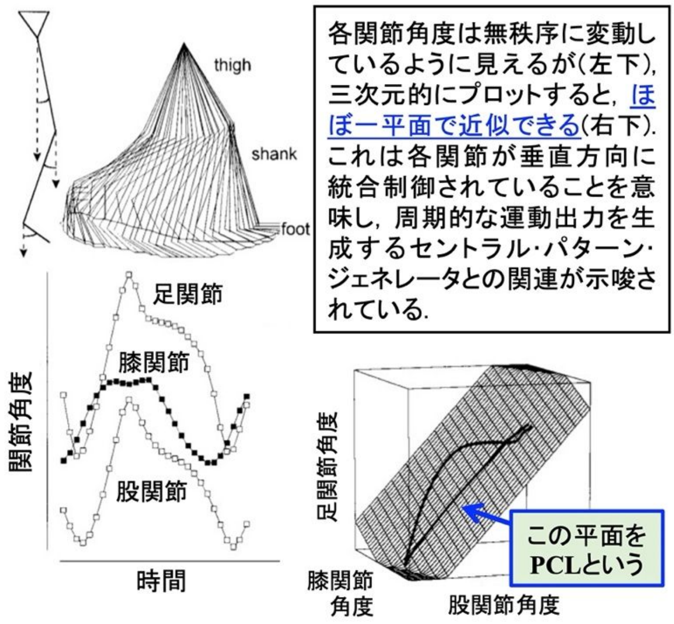

図4　歩行中の下肢統合制御/Planar Covariation Law (PCL)
Lacquaniti et al. (1999) に加筆

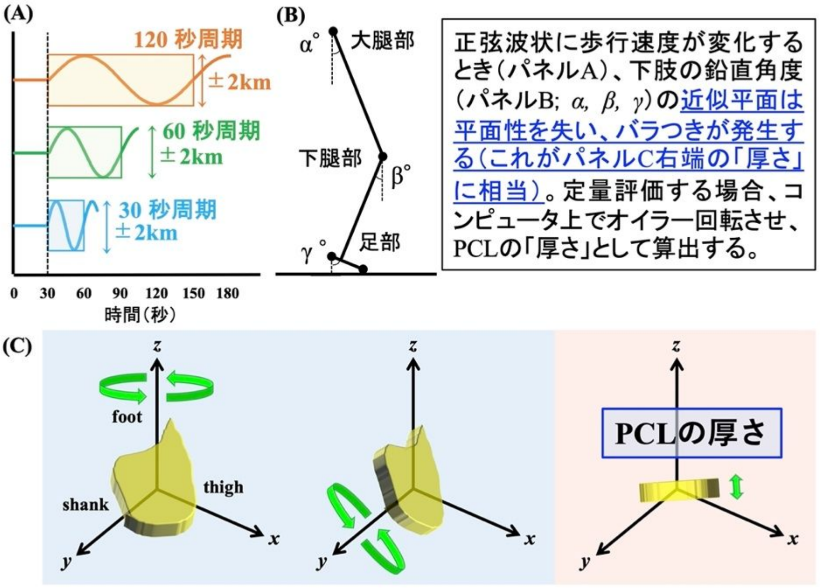

図5　PCLの「厚み」を定量化するための方法
Abe et al. (under review) に加筆

ヒトの走能力は生理指標で評価する手段は既に幾つも確立されている。ところが、競歩など特殊な例を除けば、健常人の歩行機能は身体機能の限界に挑戦する動作ではないため、既存の体力指標で評価することは難しい。特に歩行能力を評価する場合、歩容調整を無視することはできない。歩行中の股-膝-足関節角度は、各々が独立して変動しているように見えるが（図 4 左下）、これらの関節角度を三次元近似すると、ほぼ一平面に近似できる（図 4 右下）。すなわち、各関節角度が垂直方向に統合制御されていることを意味し（Planar Covariation Law; PCL）、周期的な運動出力を生成するセントラル･パターン･ジェネレータとの関連性が示唆されている（e.g., Ivanenko et al. 2008）。例えば躓いた時は統合制御が乱れ、PCL の平面性が損なわれる（Aprigliano et al. 2017, 2019）。これは下肢統合制御の擾乱を意味し、PCL の厚みが歩容調整能力を示す指標として有用であることを意味している。しかしながら、下肢統合制御機能は加齢で低下する（e.g., Dewolf et al. 2019）という報告と、変化しない（e.g., Aprigliano et al. 2017）とする報告が混在し、一貫性が見られない。この不一致は、路面状況や歩行速度など人間-環境間の様々な要因が複合的に絡み合っているためであると予想される。そこで我々は、連続的な過渡応答状態を作り出すためトレッドミル速度を正弦波状に外部制御した（図 5A）。16 この負荷法は歩容調整を連続的に要求するため（Fukuoka & Abe et al. 2017）、歩容調整能力を評価するのに都合が良い。本課題では若年非鍛錬者 17 名、若年鍛錬者 16 名、高齢鍛錬者 16 名を対象に図 5B-5C に示すような方法を用いて周期 30 秒-120 秒における PCL の「厚み」を定量化し、進行方向の歩容安定性を示す指標とした。また、横方向（進行方向に対して直行する方向）の歩隔変動率を定量化した。

4.　研究成果

4-1. **歩→走への相転移**（Gait Transition）**決定要因**

体重の 30%相当の免荷によって代謝的移行速度と自然移行速度は共に高速化したが（図 6A）、両実験条件で代謝的移行速度は自然移行速度より有意に高かった（図 6B）。この結果は歩→走の相転移が代謝によって決定されているわけではないことを意味している。免荷/統制条件共に相転移す

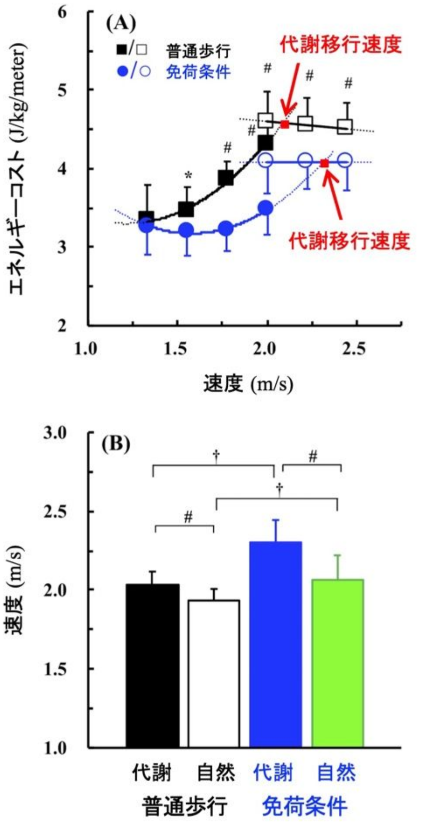

図6 代謝移行速度と自然移行速度
Abe et al. (2019a) に加筆

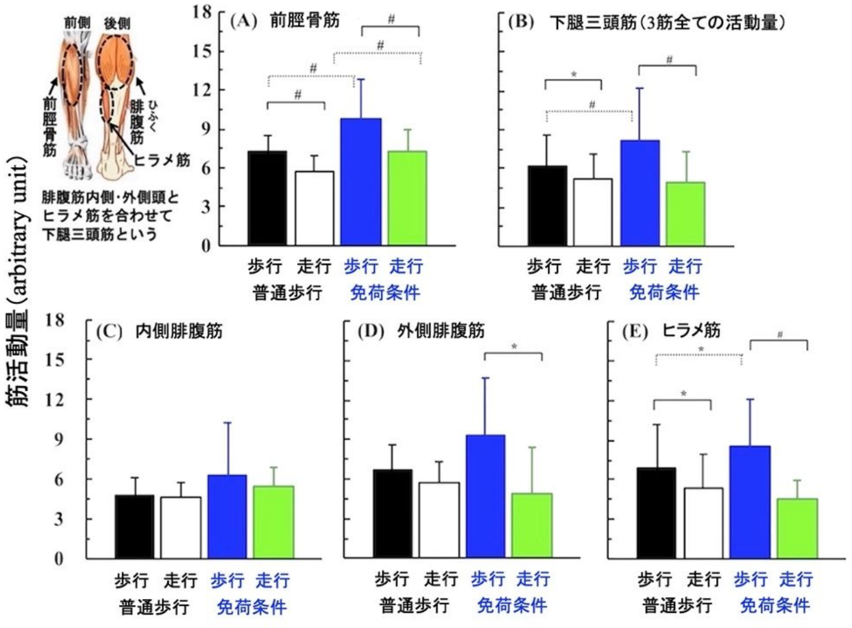

図7 自然移行速度で歩行/走行した時の下腿筋活動量の比較
Abe et al. (2019a) に加筆

ることで前脛骨筋の筋活動量は低下した（図 7A）。この結果は幾つかの先行研究と一致した（e.g. Bartlett & Kram 2008; Hreljac 1993; Malcolm et al. 2009）。また、下腿三頭筋（内側腓腹筋、外側腓腹筋、ヒラメ筋）の総活動量も相転移で低下した（図 7B）。下腿三頭筋を構成する各筋の応答を見ると、ヒラメ筋だけが免荷/統制条件共に相転移によって活動量が低下した（図 7C-7E）。これらの結果は、前脛骨筋と拮抗筋である下腿三頭筋の中でも特にヒラメ筋が相転移トリガーとして機能していることを意味している。

筋電図の平均周波数は腓腹筋を除く前脛骨筋とヒラメ筋は相転移で低下した（図 8A & 8D）。活動筋の平均周波数は稼働する筋線維のタイプ（速筋/遅筋）を識別する手掛かりになる（De Luca et al. 2015）。本研究の結果は前脛骨筋とヒラメ筋の活動量だけでなく、両筋の motor unit 活動も歩→走の相転移に関係していることを意味している。これは遅筋をより多く稼働することで疲労遅延させる生理学的意義があると考えられる。

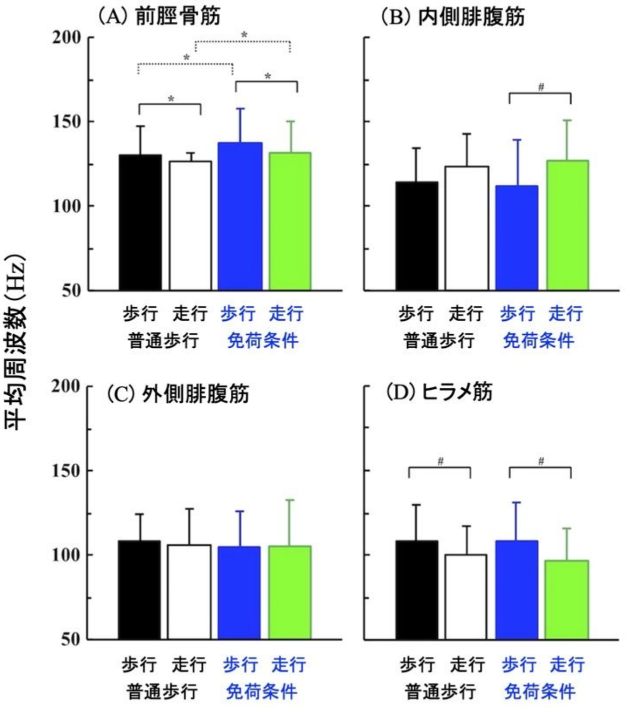

図8 下腿各筋電図の平均周波数の比較
Abe et al. (2019a) に加筆

4-2. 経済速度と自由歩行速度の決定要因

免荷条件で経済速度と自由歩行速度が共に高速化した（図 9-図 10A; Abe et al. 2021）。これまで経済速度が高速化する条件として、発達に伴う脚長増大（DeJaeger et al. 2001）と高酸素吸入による心肺エネルギーコストの低減（Abe et al. 2018）しか報告されていなかったが、3 つ目の経済速度高速化条件が明らかにされた。また、免荷/統制条件共に経済速度と自由歩行速度に有意差は見られなかったことから（図 10）、自由歩行速度は代謝（最小化）で決定されることを意味している。

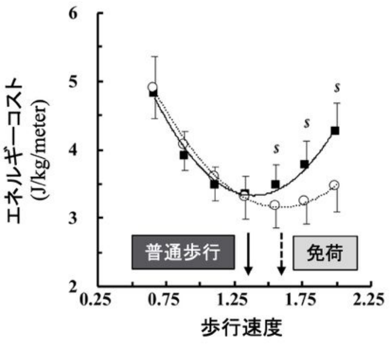

図9 免荷条件のエネルギーコスト曲線
Abe et al. (2021) に加筆

ところで、複合関節運動の動作効率を求める場合、高額な動作解析システムを用いることが多い。しかしながら用いる近似式や効率算

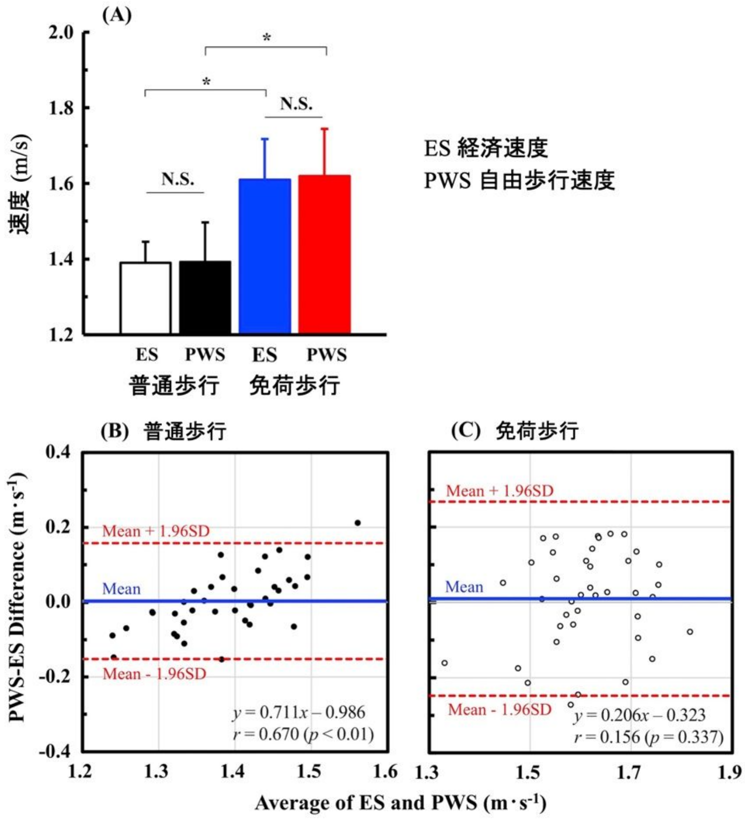

図10 免荷条件における経済速度(ES)と自由歩行速度(PWS)の比較とBland-Altman Plot　Abe et al. (2021) に加筆

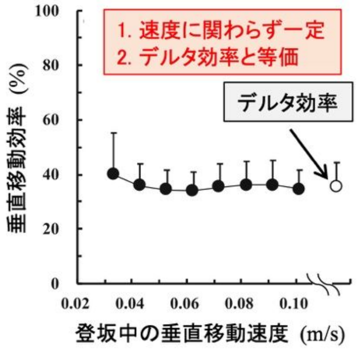

図11 垂直移動効率の速度比較 Abe et al. (2019b) に加筆

出方法の違い（gross 効率、net 効率、デルタ効率など）によって得られる効率値に大きな違いが出る。そこで、ここでは動作解析システムを使わずに、差分法を用いて歩行中の net 効率とデルタ効率を求めた（Abe at al. 2019b; 論文中では「垂直移動効率」と呼んでいる）。その結果、net 効率は歩行速度全域に亘って 35%前後を維持し、速度依存性もないことが明らかとなった（図 11）。この効率値はデルタ効率（35.5±8.8%）と比べても大差はない。異なる方法でデルタ効率 35%を報告した先行研究（Ortega et al. 2015）ともほぼ一致する。これらの結果は、任意の歩行速度かつ短時間の代謝計測（登り&平地）で簡便に歩行効率が算出できることを意味する。言い換えると、低体力者でも小リスクで歩行能力を定量評価可能であることを意味している。

また、本研究で得られた効率値 35%は近縁の霊長類（Hanna et al. 2008）より高いことは驚きであった。これまで、人類の祖先が樹上生活をやめて直立二足歩行を開始したのは「垂直移動（木登り）効率が他の霊長類と比べて低いから」と説明されてきたが、本研究の結果は従来説を真っ向から否定するものであった。現生人類の歩行効率は、水平・垂直方向共に十分に高いのである。従来説は今一度問い直されるべきである。

4-3. 加齢と運動習慣の有無が下肢統合制御機能に及ぼす影響

我々の pilot study では、その結果、加齢より継続的な運動習慣の有無が下肢統合制御機能に強く影響していることを見出した（Abe et al. *under review*）。歩隔変動率には統計的有意差は見られなかった。これらの結果は、歩行機能の低下は中年期どころか、20 歳代前半から潜在的に進行する可能性があることを意味している。また、継続的な運動習慣によって高齢者が若年者と同程度の歩容調整能力を維持できることが示唆された。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計6件（うち査読付論文　6件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　5件）

１．著者名	４．巻
Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka, Masahiro Horiuchi	7
２．論文標題	５．発行年
Why do we transition from walking to running? Energy cost and lower leg muscle activity before and after gait transition under body weight support	2019年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
PeerJ	(12 pages)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.7717/peerj.8290	有
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスとしている（また、その予定である）	-

１．著者名	４．巻
Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka, Masahiro Horiuchi	38
２．論文標題	５．発行年
On the simple calculation of walking efficiency without kinematic information for its convenient use	2019年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
Journal of Physiological Anthropology	(6 pages)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1186/s40101-019-0211-4	有
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスとしている（また、その予定である）	-

１．著者名	４．巻
Masahiro Horiuchi, Yoko Handa-Kirihara, Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka	37 (No.14)
２．論文標題	５．発行年
Combined effects of exposure to hypoxia and cool on walking economy and muscle oxygenation profiles at tibialis anterior	2019年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
Journal of Sports Sciences	1638-1647
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1080/02640414.2019.1580130	有
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	-

１．著者名	４．巻
Daijiro Abe, Shunsuke Sakata, Kiyotaka Motoyama, Naoki Toyota, Hidetsugu Nishizono, Masahiro Horiuchi	13 (No.107)
２．論文標題	５．発行年
Economical and preferred walking speed using body weight support apparatus with a spring-like characteristics	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation	(7 pages)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.1186/s13102-021-00336-7	有
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスとしている（また、その予定である）	-

１．著者名
本山清喬，小森大輔，安陪大治郎，西薗秀嗣，金高宏文，髙橋仁大

４．巻
13

２．論文標題
トレーニングエクササイズにおける動作様式の違いが力学変量に及ぼす影響を簡易的に評価する方法の検討：フライングスプリット動作に対する単一対象者・複数試行測定，複数対象者・単一試行測定及び複数対象者・複数試行測定の比較より

５．発行年
2021年

３．雑誌名
スポーツパフォーマンス研究

６．最初と最後の頁
1-14

掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）
なし

査読の有無
有

オープンアクセス
オープンアクセスとしている（また、その予定である）

国際共著
－

１．著者名
本山清喬，金高宏文，綿谷貴志，豊田直樹，安陪大治郎，西薗秀嗣，髙橋仁大

４．巻
35

２．論文標題
ラテラルジャンプにおける体幹の煽りの有無が下肢関節伸展トルクに及ぼす影響

５．発行年
2021年

３．雑誌名
九州体育･スポーツ学研究

６．最初と最後の頁
1-10

掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）
なし

査読の有無
有

オープンアクセス
オープンアクセスとしている（また、その予定である）

国際共著
－

〔学会発表〕　計5件（うち招待講演　1件／うち国際学会　3件）

１．発表者名
Daijiro Abe, Shunsuke Sakata, Kiyotaka Motoyama, Naoki Toyota, Hidetsugu Nishizono, Masahiro Horiuchi

２．発表標題
Economical and preferred walking speed with and without body weight support

３．学会等名
Rocky Mountain American Society of Biomechanics (RMASB) 2020（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
Daijiro Abe

２．発表標題
Economical walking speed in humans

３．学会等名
Third Departmental Symposium 2020, (Invited Speaker by Department of Psychology, Educational Science, and Human Movement, University of Palermo, Italy)（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2020年

1．発表者名 安陪大治郎、福岡義之、堀内雅弘
2．発表標題 Gait Transitionのトリガーを探る試み ～免荷実験からのアプローチ～
3．学会等名 第79回日本生理人類学会大会
4．発表年 2019年

1．発表者名 安陪大治郎，本山清喬，田代雄大，齋藤輝，西薗秀嗣，堀内雅弘．
2．発表標題 年齢および運動習慣がgait variabilityに及ぼす影響
3．学会等名 第82回日本生理人類学会大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 Kiyotaka Motoyama, Daijiro Abe, Shunsuke Sakata, Hidetsugu Nishizono
2．発表標題 Ball gripping and step characteristics during back swing in throwing.
3．学会等名 The 2020 Yokohama Sport Conference（国際学会）
4．発表年 2020年

〔図書〕　計1件

1．著者名 安陪大治郎	4．発行年 2022年
2．出版社 国際文献社	5．総ページ数 263頁
3．書名 新編 生理人類学入門 第3章3項「直立二足歩行・走行」31-34頁	

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	本山　清喬 (Kiyotaka Motoyama) (80824903)	九州産業大学・健康・スポーツ科学センター・助教 (37102)	
研究分担者	堀内　雅弘 (Horiuchi Masahiro) (50310115)	山梨県富士山科学研究所・環境共生研究部・主幹研究員 (83501)	
研究分担者	西薗　秀嗣 (Nishizono Hidetsugu) (10125338)	九州産業大学・人間科学部・教授 (37102)	
研究分担者	福岡　義之 (Fukuoka Yoshiyuki) (20265028)	同志社大学・スポーツ健康科学部・教授 (34310)	削除：2019年8月23日

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関