

若年者と高齢者における前方・側方ステップ動作について

—矢状面・前額面パワーの分析から—

Analysis of Sagittal and Coronal Plane Power in Stepping

小比賀 柚木^{1,2)} 山田 拓実³⁾ 江原 義弘⁴⁾ 伊藤 弥生⁵⁾

YUKI OBIKA, RPT, MS^{1,2)}, TAKUMI YAMADA, RPT, PhD³⁾, YOSHIHIRO EHARA, PhD⁴⁾, YAYOI ITO, RPT, MS⁵⁾

¹⁾ Medical Corporation Tatsuoka: 4-9-8 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0034, Japan. TEL +81 3-3811-0088

²⁾ Graduate School of Human Health Sciences of Tokyo Metropolitan University

³⁾ Faculty of Health Sciences, Tokyo Metropolitan University

⁴⁾ Niigata University of Health and Welfare

⁵⁾ Sanraku Hospital

Rigakuryoho Kagaku 25(3): 357-362, 2010. Submitted Nov. 4, 2009. Accepted Dec. 14, 2009.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to investigate whether there were age-related differences in lower extremity joint power and energy in forward stepping or side stepping. [Subjects] The subjects were 10 healthy younger and 12 healthy older women. [Methods] A three-dimensional motion analysis system with force plates was used to gather data. Lower extremity peak negative joint power, negative energy and time to absorb energy, were examined during the single-leg-support phase of stepping. [Results] In forward stepping, older women exhibited smaller lower extremity negative energy and a longer time to absorb energy than younger women. In side stepping, older women exhibited smaller lower extremity peak negative joint power and a longer time to absorb energy at the hip. [Conclusion] An inability to absorb energy quickly puts older women at more risk of falls.

Key words: older women, stepping, power

要旨: [目的] 前方・側方ステップの接地後に生じる下肢の各関節パワーとエネルギーについて、若年者と高齢者の違いを明らかにした。[対象] 若年者10人、高齢者12人とした。[方法] 3次元動作解析装置を用いてステップ動作を計測してパワーを算出し、2つのステップ動作を分析し比較した。[結果] 前方ステップでは、高齢者で各関節の負のパワーの負のピーク値、負のエネルギーが有意に小さく、各関節の制動時間が長かった。側方ステップでは、高齢者で負のパワーの負のピーク値が有意に小さく、制動時間が長かった。[結語] 高齢者では若年者に比べ、エネルギーを吸収する迄の時間が長く、エネルギーを下肢3関節で素早く吸収する能力が低下していることが転倒の要因として考えられた。

キーワード: 高齢者, ステップ, パワー

¹⁾ 龍岡介護老人保健施設 リハビリテーション部: 東京都文京区湯島4-9-8 (〒113-0034) TEL 03-3811-0088

²⁾ 首都大学東京大学院 人間健康科学研究科

³⁾ 首都大学東京 健康福祉学部

⁴⁾ 新潟医療福祉大学

⁵⁾ 三楽病院

受付日 2009年11月4日 受理日 2009年12月14日

I. はじめに

近年の高齢社会の到来とともに増加しつつある高齢者の転倒は、心理的影響、社会的負担において重要な問題となっている。頸部骨折は転倒の1%しか生じないといわれるが、その他多くの転倒者は、重篤な機能障害を引き起こさなくとも、転倒による自信喪失や恐怖感から活動性が低下し、長期的には機能低下が起こりうる。転倒の予防には、まずその原因を明らかにする必要がある。転倒の危険因子には、下肢筋力の低下、反応時間の遅延、歩行能力の低下、バランス能力の低下¹⁾などが挙げられている。さらに、滑りやつまずきなどの急激な外乱による転倒が最も多い転倒様式とされており、高齢者の転倒に関する研究では、外乱を加えた研究²⁻⁸⁾が多く見受けられる。バランスを回復するにあたり、股関節戦略あるいは足関節戦略のような足固定戦略ではバランスの回復が不十分な場合は、ステップ戦略を使うと安定性が回復する⁴⁾ことが報告されている。

ステップ動作では、若年者と高齢者におけるバランスの回復応答の違いについて、数多くの研究⁵⁻⁸⁾がされている。特に前方へのステップ動作については、支持面を揺動させたり腰部等へ外力を加えるなどの外乱からバランスを回復する際、若年者は1回のステップで回復するのに対し、高齢者ではより多く足を踏み出すmultiple stepsをとる傾向があるということは数多く報告されている^{5,6)}。Lordらによると、常にその場に踏み留まると指示した状態で外力を加えると、転倒経験高齢者では、その場でバランスを保つよりも、ステップを踏んで新たな支持基底面を生み出すことが多かった⁷⁾としている。Hallらは支持面を揺動させた際の下肢に生じるパワー（関節まわりでなされる単位時間あたりの仕事）を求めたところ、若年者に比べ、高齢者ではエネルギーを吸収する能力が低下するためステップを生じやすいと報告している⁸⁾。外乱を加えない条件でもこれまでに、踏み出した下肢に生じる関節モーメントのピーク値やバランスの回復に要する時間、パワーなど、力学的分析が行われている⁹⁻¹¹⁾。その中でも、安定性を回復する際の、体節と筋のアライメント保持には複数の関節の複数の方向への力を必要とする⁴⁾ことや、バランス機能評価の指標には、筋力や筋収縮速度よりも、パワーの方がよりふさわしい¹²⁾とする報告がある。また、バランスを崩しステップをすることで生じたエネルギーを、どの関節が吸収して制動に働いているかを明らかにするためには、エネルギーにも着目

した力学的分析が必要であると考えられる。しかし、前方へのステップ動作研究のうち、パワーに関する矢状面での分析はHall⁸⁾やMadigan¹¹⁾の報告が見受けられるがエネルギーに関する報告は無い。また、側方へのステップ動作自体の研究も少なく、特に前額面でのパワーやエネルギー（関節まわりでなされた仕事量）に関する報告はされていない。

よって本研究は、前方と側方への2種類のステップ動作を行い、接地後に生じる下肢の各関節パワーとエネルギーを矢状面と前額面でそれぞれ算出し、若年者と高齢者における前方・側方ステップ動作の違いを明らかにすることを目的とした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象者は健康若年女性10人（22～24歳、平均年齢22.6歳）、転倒による外傷歴や下肢の骨折歴の無い高齢女性12人（67～89歳、平均年齢73.9歳）とした。身長・体重の平均と標準偏差は若年者で160.1±5.2 cm、46.8±14.4 kg、高齢者で150.0±4.3 cm、49.7±6.5 kgであった。本研究は首都大学東京研究安全倫理審査委員会の承認を受けた後（承認番号07023）、すべての対象者に対し、口頭と紙面にて測定趣旨を説明し、同意を得た。

2. 方法

課題動作は、右足を前方と側方に踏み出す2種類の動作とした。対象者は、あらかじめステップ動作が可能かどうか数回練習をしてから課題を行った。ここでのステップ動作課題は、最小の努力で目標地点までステップすること、確実に両脚離地してステップを踏むこと、着地し速やかに静止すること、および動作終了後は支持脚に反対側の下肢を接触せず片脚立位姿勢を数秒間保持することとした。「用意スタート」と開始の合図をかけ、課題動作を行った。開始肢位は両上肢を下垂した静止立位姿勢とし、2枚の床反力プレートにそれぞれ片脚が位置するようにした。前方ステップでは右足を一つ前の床反力プレートに、側方ステップでは右足を一つ右の床反力プレートにそれぞれ印した60 cm先の目印に向かって踏み出した。上肢の動きは制限しなかった。

4枚（1枚：60 cm×40 cm）の床反力計（Kisler社製）を含めた3次元動作解析装置Vicon MX（VICON motion systems社製）を用い、ステップ動作の開始から終了までの床反力と3次元位置データを計測した。身体標点

として赤外線反射マーカーを第7頸椎、第10胸椎、胸骨柄、剣状突起、右肩甲骨、左右の前頭結節、外後頭隆起の左右、両肩峰、両上腕、両肘関節、両橈骨茎状突起、両尺骨茎状突起、両第3中手骨頭、両上前腸骨棘、両上後腸骨棘、両大転子、両膝関節、両下腿、両外果、両踵骨、両第2中足骨頭の計37箇所貼付した。15リンクの全身セグメントモデルを使用した。3次元位置データは100 Hz、床反力データは1,000 Hzでサンプリングした。

若年者、高齢者ともに5試行測定し、このうち3次元位置データに不備のない3～5試行のデータを採用し、1人あたり若年者平均4.8試行、高齢者平均4.9試行を分析した。得られた床反力データと3次元位置データから、床反力、床反力作用点、関節角度、関節モーメントを、Winterの身体パラメータを用いて逆力学的に算出した。関節角度は3次元オイラー角度を求めた。パワーの計算はBodyBuilder (VICON motion systems社製 Version 3.6) を用いてプログラムを作成し算出した。

前方ステップでは屈曲・伸展関節モーメントと屈曲・伸展関節角速度の積でパワーを求めた。側方ステップでは内外転関節モーメントと内外転関節角速度の積でパワーを求めた。関節角度は、股関節屈曲、股関節外転、膝関節屈曲、足関節背屈の方向を+とした。関節モーメントは、股関節伸展モーメント、股関節外転モーメント、膝関節伸展モーメント、足関節底屈モーメントを+とした。パワーの値について、正の場合はその関節まわりに力を発生しながら動きが生じていることを、負の場合はその関節まわりで力を吸収して動きに制動をかけていることを示している。

3次元位置データはWoltring filterをかけた。床反力は20 Hz、関節角速度は6 Hzでローパスフィルタ (Butterworth filter) をかけノイズを除去した。その後、関節モーメントと関節角速度の積をとりパワーを計算した。パワーを時間で積分し、エネルギーの値を求めた。パワーとエネルギーは体重で除して標準化した。右足が床反力プレートから離れた時点から、右足がもう一枚の床反力プレートに接地した時点までの床反力作用点の移動距離を求め、ステップ動作の移動距離とした。パワーのグラフより、接地後の各関節の負のパワーが0となるまでの区間を各関節の制動時間とし、その間の各関節における負のピークの値を各関節の負のパワーの負のピーク値 (以下: 負のピークパワー) とした。エネルギーのグラフより、各関節におけるエネルギーの第一のピークの値を各関節の負のエネルギーとした。各関節のパワーの波形から、制動時間内に1つの負のピーク

を生じている波形を1峰性、制動時間内に複数の変動がある波形を多峰性として目視により判断した。右股関節、右膝関節および右足関節の、負のピークパワー、負のエネルギー、制動時間の値を求め、前方ステップ動作では矢状面を、側方ステップ動作では前額面における各関節それぞれの値を若年者と高齢者とで比較、分析した。

統計解析は、SPSS15.0J for Windowsを使用した。右下肢3関節の負のピークパワー、負のエネルギーおよび制動時間について、Mann-WhitneyのU検定を使用し、若年者と高齢者で比較した。右下肢3関節間の負のピークパワー、負のエネルギーおよび制動時間について、Kruskal-Wallis testとTukeyの検定を使用し、若年者と高齢者でそれぞれ比較した。若年者、高齢者のパワーの波形に関して、一峰性の波形パターンを発揮する人数を比較するためにカイ二乗検定を行った。有意水準は5%未満とした。

III. 結果

前方・側方ステップの各関節の負のピークパワーを表1、負のエネルギーを表2、制動時間を表3に示した。若年者、高齢者における前方ステップ接地後の下肢3関節パワーについて代表例各1例を図1、2に示した。若年者、高齢者における側方ステップ接地後の下肢3関節パワーについて代表例各1例を図3、4に示した。

まず、前方ステップについて、若年者と高齢者の負のピークパワー、負のエネルギーともに、全ての関節において若年者よりも高齢者のほうが有意に小さかった。制動時間では、全ての関節において若年者よりも高齢者のほうが有意に長かった。3関節のパワーが全て

表1 前方・側方ステップにおける下肢3関節の負のピークパワー (W/kg)

	若年者	高齢者
前方ステップ		
股関節	-1.56 ± 1.08	-0.30 ± 0.27 *
膝関節	-3.85 ± 1.46	-1.22 ± 1.22 *
足関節	-3.98 ± 2.62	-2.15 ± 1.17 *
側方ステップ		
股関節	-1.89 ± 0.45	-1.38 ± 0.76 *
膝関節	-0.46 ± 0.24	-0.52 ± 0.51
足関節	-0.09 ± 0.10	-0.07 ± 0.09

平均±標準偏差, *: p<0.05

表2 前方・側方ステップにおける下肢3関節のエネルギー吸収量 (J/kg)

	若年者	高齢者	
前方ステップ			
股関節	0.07 ± 0.06	0.02 ± 0.03 *	
膝関節	0.21 ± 0.15	0.06 ± 0.09 *	
足関節	0.34 ± 0.20	0.25 ± 0.16 *	
側方ステップ			
股関節	0.15 ± 0.06	0.17 ± 0.11	
膝関節	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.03 *	
足関節	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.01 *	

平均±標準偏差, *: p<0.05

表3 前方・側方ステップにおける下肢3関節の制動時間 (sec)

	若年者	高齢者	
前方ステップ			
股関節	0.12 ± 0.04	0.19 ± 0.20 *	
膝関節	0.15 ± 0.15	0.20 ± 0.11 *	
足関節	0.20 ± 0.11	0.39 ± 0.23 *	
側方ステップ			
股関節	0.25 ± 0.13	0.58 ± 0.25 *	
膝関節	0.15 ± 0.09	0.20 ± 0.11 *	
足関節	0.18 ± 0.07	0.25 ± 0.12 *	

平均±標準偏差, *: p<0.05

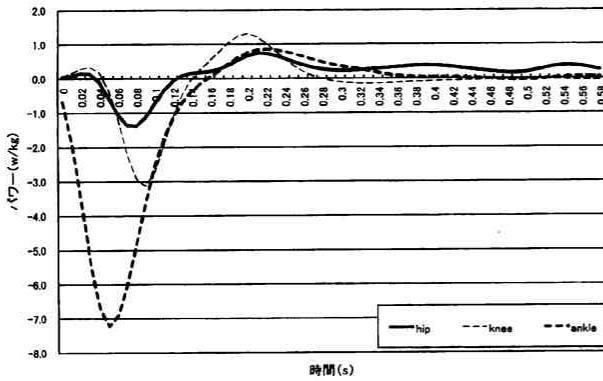


図1 若年者における前方ステップ接地後の下肢3関節パワー (矢状面)

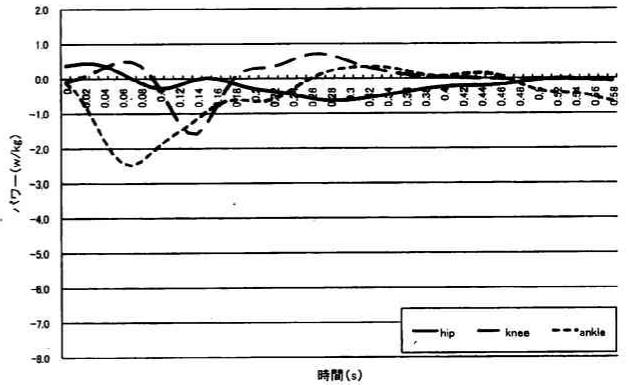


図2 高齢者における前方ステップ接地後の下肢3関節パワー (矢状面)

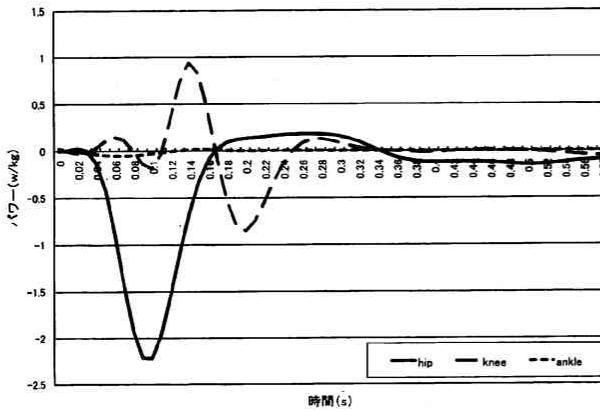


図3 若年者における側方ステップ接地後の下肢3関節パワー (前額面)

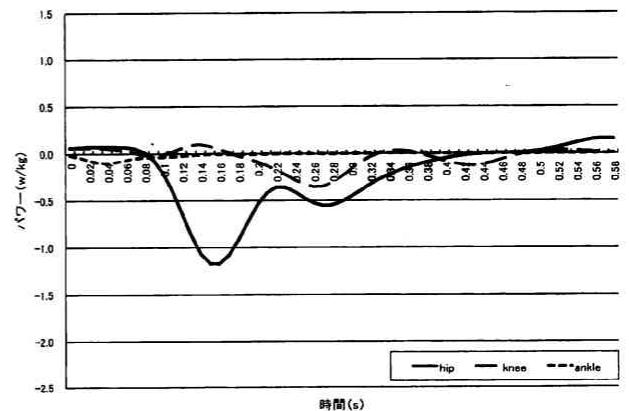


図4 高齢者における側方ステップ接地後の下肢3関節パワー (前額面)

1峰性の波形を示したのは若年者では49試行中28試行(57.1%)、高齢者では59試行中16試行(27.1%)であり、若年者で有意に多かった。1関節のみが1峰性を示したのは、若年者では49試行中6試行(12.2%)、高齢者では59試行中13試行(27.1%)と、高齢者で有意に多かった。若年者と高齢者の移動距離は、それぞれ 52.7 ± 8.8 , 54.5 ± 8.1 cmであった。

次に、側方ステップについて、股関節の負のピークパワーのみ、高齢者のほうが有意に小さかった。股関節のパワーの波形が1峰性を示したのは、若年者では、47試行中35試行(74.5%)、高齢者では59試行中13試行(22%)であり、若年者で有意に多かった。若年者、高齢者ともに股関節に生じる負のピークパワー、負のエネルギーが他の下肢2関節に比べ有意に大きかった。若年者と高齢者の移動距離は、それぞれ 55.6 ± 2.6 , 45.2 ± 8.5 cmであり、高齢者で有意に短かった。

IV. 考 察

前方ステップ動作では、各関節の負のピークパワー、負のエネルギーともに、若年者よりも高齢者で有意に小さかった。各関節の制動時間も、若年者よりも高齢者で有意に長かった。これらのことから、高齢者は若年者よりもエネルギーの吸収量は少なく、エネルギーを吸収するまでの時間が長いことがわかった。また、制動時の関節パワーについて、若年者は3関節とも1峰性を示す割合が高齢者よりも多かったが、高齢者では足関節については2峰性を示す割合が多かった。これらのことから、前方ステップ動作について、若年者は3関節全てが制動に働くのに対し、高齢者では関節全てで衝撃を吸収することが難しく、各関節での衝撃吸収の作用が若年者に比べて低下していることが示された。

前方ステップでは高齢者はmultiple stepsをとる傾向があるといわれている^{5,6)}。側方ステップにおいてWinterらによると、下肢を側方に1回で踏み出す反応は高齢者よりも若年者でより多く見られ、ステップした下肢を前または後に回して踏み出すクロスステップが若年者よりも高齢者の方で多く見られたと報告している¹³⁾。また、前方へステップを踏んだとき、高齢者は若年者よりもより側方に踏み出す¹⁴⁾ことや、高齢者は特に側方の不安定性を受けやすく、転倒しやすい⁷⁾との報告もある。これらの報告から、高齢者の側方の不安定性を生じている原因を明らかにすることが転倒メカニズムを解析する上で重要なことであると示唆している。

側方ステップでは若年者、高齢者ともに股関節に生

じる負のピークパワーと負のエネルギーが3関節のうちで最も大きかった。これは、内外側方向の安定性を回復するには、足関節と膝関節とではほとんど不可能で、股関節がその主要な関節となる⁹⁾と報告されていることから、前額面における股関節の重要性が支持される結果となった。足関節の値に誤差があったとしても、足関節については股関節の約5%と小さい値でありこの結果に影響は少ないと考えられた。若年者と高齢者とで股関節における負のエネルギーに有意差は認められなかったが、負のピークパワーは高齢者で有意に小さく、制動時間が長かった。さらに、高齢者の股関節パワーは多峰性を示していた。つまり、高齢者では若年者よりも接地後、股関節まわりのエネルギーを吸収できないことが考えられた。これらのことから、制動時間の延長と運動エネルギーの吸収能力の低下という加齢に伴った変化が、転倒に繋がっていくと考えられた。側方への転倒は大腿骨頸部骨折を引き起こす最も危険な転倒である¹⁾。内外側の姿勢動揺は過去の転倒歴と関係がある¹⁵⁾ことから、今後も高齢者における側方のバランス能力について着目し、転倒の要因について明らかにしていくことが重要である。

本研究により、前方・側方ステップ動作ともに、高齢者はステップによって生じたエネルギーを効率的に吸収する能力が若年者よりも低下することが示唆された。側方ステップでは、特に前額面における股関節の重要性が明らかとなった。しかし、高齢者では若年者よりも股関節まわりのエネルギー吸収に時間を要し、股関節の働きが若年者よりも低下していた。パワーの分析から、若年者と高齢者における前方、側方ステップ動作の違いが明らかとなった。転倒予防プログラムとして、股関節まわりの筋力強化が必要であると考えられた。

引用文献

- 1) 岡 正典, 島 浩人, 速水 尚・他: 転倒の研究. 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 2003, 24: 341-348.
- 2) 古名丈人, 島田裕之: 高齢者の歩行と転倒—疫学的調査から—, バイオメカニクス学会誌, 2006, 30: 132-137.
- 3) 大高洋平: 転倒の病態と歩行分析. 総合リハ, 2006, 34(2): 117-123.
- 4) Shumway-Cook A, Woollacott MH: モーターコントロール運動制御の理論と臨床応用 第2版. 田中 繁, 高橋 明 (監訳), 医歯薬出版, 東京, 2004, pp173-203.
- 5) Mille ML, Johnson ME, Martine KM, et al.: Age-dependent differences in lateral balance recovery through protective stepping. Clin Biomech, 2005, 20: 607-616.

- 6) Maki BE, Edmondstone MA, Mcllory WE: Age-related differences in laterally directed compensatory stepping behavior. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2000, **55**(5): 270-277.
- 7) Lord SR, Rogers MW, Howland A, et al.: Lateral stability, sensorimotor function and falls in older people. *J Am Geriatr Soc*, 1999, **47**: 1077-1081.
- 8) Hall CD, Jensen JL: Age-related differences in lower extremity power after support surface perturbations. *J Am Geriatr Soc*, 2002, **50**(11): 1782-1788.
- 9) Thelen DG, Muriuki M, James J, et al.: Muscle activities used by young and old adults when stepping to regain balance during a forward fall. *J Electromyogr Kinesiol*, 2000, **10**: 93-101.
- 10) Madigan ML, Lloyd EM: Age-related differences in peak joint torques during the support phase of single-step recovery from a forward fall. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2005, **60**(7): 910-914.
- 11) Madigan ML: Age-related differences in muscle power during single-step balance recovery. *J Appl Biomech*, 2006, **22**: 186-193.
- 12) Foldvari M, Clark M, Laviolette LC, et al.: Association of muscle power with functional status in community-dwelling elderly women. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2000, **55**(4): 192-199.
- 13) Winter DA: Moments of force and mechanical power in jogging. *J Biomech*, 1983, **16**(1): 91-97.
- 14) Rogers MW, Hedman LD, Johnson ME, et al.: Lateral stability during forward-induced stepping for dynamic balance recovery in young and older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2001, **56**(9): 589-594.
- 15) Rogers MW, Mille ML: Lateral stability and falls in older people. *Exerc Sport Sci Rev*, 2003, **31**(4):182-187.