

原 著

水平外乱時の姿勢制御に関するバイオメカニクス的研究 —高齢者と若年者の姿勢保持動作の比較—

宮川健*¹ 吉本瑛恵*²

要 約

本研究では、65歳以上の高齢者男性8名、ならびに男子大学生8名を対象とし、予期しない床面の水平移動に対する姿勢保持動作をバイオメカニクス的に分析した。外乱刺激前後での姿勢変化を定量比較した結果、高齢者と若年者で有意な差が認められたのは、後方ステップでの肩峰点変位・股関節運動角度・膝関節運動角度・足部滞空時間、前方ステップでの肩峰点変位・膝関節運動角度の6項目であった。これらの結果から、高齢者は、床面が前方へ移動する外乱に対しては転倒予防のより安全な対応のために「股関節方略」と「ステップ方略」の両方の姿勢制御が同時に行われていること、床面が後方へ移動する外乱に対しては足部を前方へ踏み出してはじめとは違う姿勢へと移行する「ステップ方略」のみでの姿勢制御が行われていることが明らかとなった。

1. 緒言

平成30年9月の敬老の日に公表された総務省の推計によると、日本の総人口に占める70歳以上の割合は初めて2割を超え、65歳以上の割合を示す高齢化率は28.1%となった¹⁾。超高齢社会の我が国において、高齢者の生活機能の維持や自立に向けた取り組みが重要な課題として各方面ですすんでいることは言うまでもない。特に高齢期のQOLに密接に関わりがあるとされる転倒ならびに転倒予防に関する研究においては、疾病や加齢などの身体的要因に関するものから、物的環境・住宅環境などの生活環境要因に関するものまで、さらには介入研究の実例など、これまで多くのエビデンスが集積されている^{1,2)}。

転倒とは何らかの原因により姿勢制御が不能になった場合に生じる。多くの研究者は、その姿勢制御の機能は加齢によって変化することを報告している^{2,4)}。特に、感覚障害、反応時間遅延、筋力低下、バランス機能低下、歩行機能低下、起居動作機能低下などが姿勢制御の機能低下につながり、転倒の大きな危険因子となることを指摘している^{5,6)}。立位時の姿勢の乱れがなぜ高齢者においてだけ転倒に移行してしまうのか、これが本研究の学術的な問いである。

ところで、ヒトの立位における姿勢制御の特性として、姿勢を維持するための3つの方略 (strategy) が存在することが明らかになっている。第一の方略は、足関節の筋群を中心としてバランスを維持する方略である (足関節方略)。第二の方略は、股関節を支点として大きく体幹を運動させることでバランスを維持する方略である (股関節方略)。第三の方略は、片足を前後左右に踏み出すことで支持基底面の面積を大きくしてバランスを維持する方略である (ステップ方略)。これらの方略は刺激が大きくなるに伴い、足関節方略、股関節方略、ステップ方略の順に発現すること、高齢者は「股関節方略」による制御の割合が若年者と比較して多いこと、筋力トレーニングや歩行による転倒予防プログラムの介入によって姿勢制御の方略が変化すること、認知課題や巧緻運動課題を伴う二重同時課題によって動作の反応時間が遅れることが報告されている^{2,3,5,7,8)}。

しかしながら、これまでの研究では、①実験的制約がなければ足関節からすぐにステップ方略に移行する被験者も少なくないことなど「3つの方略」の関係性 (相互関係) については十分な検討がなされていないこと、②研究の多くは前後方向の外乱刺激が用いられており左右方向あるいは斜め方向への刺

*1 川崎医療福祉大学 医療技術学部 健康体育学科

*2 株式会社ケイアイリンク

(連絡先) 宮川健 〒701-0193 倉敷市松島288 川崎医療福祉大学

E-mail : miyaken@mw.kawasaki-m.ac.jp

激に対する姿勢応答についての報告はみあたらないこと, ③高齢者を用いた実験では転倒の危険があるために倫理上の問題から十分な数のデータが得られているとは言えないこと, ④精神的または身体的な疲労が「3つの方略」に及ぼす影響は明らかになっていないこと, ⑤水平外乱刺激にステップ方略を多用する高齢者は本当に転倒リスクが高いと言ってよいのかなど, 未だに多くの検討課題が残されている。

そこで本研究では, 高齢者を対象として水平外乱刺激により誘発される姿勢保持動作をバイオメカニクス的手法により分析し, 静止立位における高齢者の姿勢の乱れがどのように生じるかを若年者との比較から検討すること, ならびに高齢者の姿勢制御の方略について考察することを目的とした。

2. 方法

立位時に予期しない水平外乱刺激(床面水平移動)が生じた際の姿勢保持動作を定量的に比較するために, 高齢者と若年者を対象とし, 高速度ビデオカメラ2台を用いて動作分析を行なった。本研究の実施にあたっては, 川崎医療福祉大学倫理委員会より承認を得た(承認番号第15-175号)。

2.1 被験者

健康な男子大学生8名(20.6±0.7歳, 身長172.4±7.7cm, 体重65.9±8.0kg)と, 健康な65歳以上の男性8名(74.6±3.4歳, 身長163.0±9.2cm, 体重60.0±8.2kg)を被験者とした(表1)。被験者には事前に口頭および書面にて研究内容を説明し, 研究への参

加同意を得た。

2.2 実験構成

被験者には水平外乱発生装置(STEP BALANCE TRAINER:株式会社ナム製)上で開眼状態の立位姿勢をとらせた(図1, 図2)。その際, 頭頂点, 左右の肩峰点, 腸棘点, 膝蓋中点, 外果点, 足先点の合計11箇所には直径1cmの反射マーカーを貼付した。また, 被験者に対しては積極的に足を出すよう指示し, 全測定が始まりと終わりだけ声で合図をし, 一回毎の台移動予告は行わなかった。測定時の台移動回数は合計20回とし, 移動幅と移動方向の回数が全て同じになるように移動操作をランダムに行った。台移動の移動幅は10cmと20cmの2種類, 加速度は1.96m/s²(0.3G)とした。その際の姿勢保持動作を高速度カメラ(IEEE1394b:フォーアシスト製)2台を用いて2方向から毎秒200フレーム(シャッター速度:1/250sec, 撮影時間:3秒)でビデオ撮影をした。

2.3 解析方法

得られたビデオ画像から三次元移動解析システムFrame-DIAS5(DKH社製)を用いて, 静止立位時からステップ後の姿勢における頭頂点・肩峰点・腸棘点・膝蓋点・足先点の変位量と体幹角度・股関節角度・膝関節角度, および足が離床してから着床するまでの滞空時間を算出した。

2.4 統計処理

若年者と高齢者の平均値の差の検定には対応のないt検定を用い, 有意水準は5%未満とした。統計

表1 被験者の特徴

若年者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	高齢者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)
平均	20.6	172.4	65.9	平均	74.6	163.0	60.0
標準偏差	0.7	7.7	8.0	標準偏差	3.4	9.2	8.2

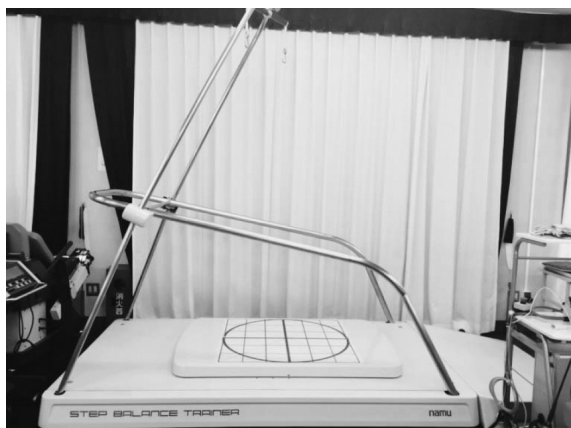


図1 水平外乱発生装置(Step Balance Trainer)



図2 実験風景

ソフトはKaleida Graph（ヒューリンク社）を使用した。

3. 結果

3.1 外乱刺激による姿勢変化の特徴

全ての被験者において、床面が前方へ移動する場合は足部が後方へ出る「後方ステップ動作」、床面が後方へ移動する場合は足部が前方へ出る「前方ステップ動作」が認められ、若年者および高齢者による違いは観察されなかった。

3.2 ステップ動作中の身体特徴点の変位量

台移動に伴うステップ動作中の各身体特徴点の変位量を表2に示した。肩峰点の変位は若年者で $25.41 \pm 1.56\text{cm}$ 、高齢者で $30.62 \pm 5.06\text{cm}$ を示し、高齢者が有意に大きな値であった ($p < 0.05$)。それ以外の特徴点については有意な差は認められなかったもの、足先点以外はすべて高齢者で大きな値を示した。また、台の前方移動に伴う後方ステップと台の後方移動に伴う前方ステップを比較すると、若年者および高齢者ともに、前方ステップ時の変位量のほうが後方ステップ時より大きい値を示した。

3.3 ステップ動作中の身体の関節角度変化

台移動に伴うステップ動作中の体幹および各関節の角度変化量を表3に示した。体幹角度は、鉛直軸

と体幹軸（左右肩峰点の midpoint と左右腸棘点の midpoint を通る軸）のなす角度とし、身体が前方へ傾斜した場合は+（プラス）、後方へ傾斜した場合は-（マイナス）と定義した。後方ステップ時には高齢者が大きく後傾する傾向にあったが、有意な差は認められなかった。

股関節角度は、体幹軸と大腿軸（腸棘点と膝蓋点を通る軸）のなす角度とし、伸展を+（プラス）、屈曲を-（マイナス）と定義した。後方ステップにおいて若年者と高齢者に有意な違いがあり、若年者は股関節が伸展した状態での着地、高齢者は股関節が屈曲した状態での着地が認められた。前方ステップにおいては若年者と高齢者では有意な差は認められなかった。

膝関節角度は、大腿軸（腸棘点と膝蓋点を通る軸）と下腿軸（膝蓋点と足関節点を通る軸）のなす角度とし、伸展を+（プラス）、屈曲を-（マイナス）と定義した。後方ステップにおいては、若年者 -6.45 ± 8.39 度、高齢者 -20.82 ± 12.10 度を示し、高齢者が有意に大きく膝関節を屈曲していた。一方、前方ステップにおいては、若年者は膝関節を伸展の状態 ($+9.90 \pm 4.58$ 度) で、高齢者は屈曲の状態 (-14.78 ± 4.11 度) で着地をしており、膝関節角度に有意な違いが認められた ($p < 0.05$)。

表2 身体特徴点の変位量

単位(cm)

	若年者		有意差	高齢者	
	平均	標準偏差		平均	標準偏差
前方移動（後方ステップ動作）					
頭頂点	28.33	3.00	t=-1.923, ns	33.33	6.57
肩峰点	25.41	1.56	t=-2.772, p<0.05	30.62	5.06
腸棘点	24.11	1.65	t=-1.551, ns	26.37	3.69
膝蓋点	25.56	2.58	t=-2.061, ns	28.83	3.38
足先点	32.65	5.53	t=0.467, ns	31.08	7.06
後方移動（前方ステップ動作）					
頭頂点	35.13	6.66	t=-1.630, ns	46.76	19.06
肩峰点	27.00	2.96	t=-2.260, p<0.05	33.93	8.15
腸棘点	26.29	2.46	t=-2.110, ns	29.31	3.22
膝蓋点	33.40	6.71	t=1.845, ns	28.36	3.82
足先点	34.24	5.14	t=0.828, ns	32.09	5.25

表3 体幹および下肢関節の角度変化

単位 (度)

	若年者		有意差	高齢者	
	平均	標準偏差		平均	標準偏差
前方移動 (後方ステップ動作)					
体幹(注1)	-1.16	3.56	t=1.591, ns	-6.68	9.01
股関節 (注2)	6.74	4.01	t=3.366, p<0.05	-5.75	9.52
膝関節 (注3)	-6.45	8.39	t=2.632, p<0.05	-20.82	12.10
後方移動 (前方ステップ動作)					
体幹(注1)	24.20	27.86	t=0.162, ns	22.50	10.13
股関節 (注2)	-12.49	10.51	t=0.331, ns	-14.78	16.47
膝関節 (注3)	9.90	4.58	t=11.349, p<0.05	-14.78	4.11

(注1) 体幹軸と鉛直軸のなす角度, +前傾, -後傾

(注2) 体幹軸と大腿軸のなす角度, +伸展, -屈曲

(注3) 大腿軸と下腿軸のなす角度, +伸展, -屈曲

表4 足部の滞空時間

単位 (秒)

	若年者		有意差	高齢者	
	平均	標準偏差		平均	標準偏差
前方移動 (後方ステップ動作)					
滞空時間	0.34	0.51	t=-3.633, p<0.05	0.51	0.14
後方移動 (前方ステップ動作)					
滞空時間	0.27	0.04	t=0.548, ns	0.26	0.09

3.4 ステップ動作中の足部の滞空時間

ステップ動作において、足部の離地から着地までの時間を滞空時間として算出した(表4)。後方ステップ動作では、若年者 0.34 ± 0.51 秒、高齢者 0.51 ± 0.14 秒と高齢者のほうが有意に長い時間を要していた($p < 0.05$)。前方ステップ動作では、有意な違いは認められなかった。また、すべての被験者において、後方ステップ時の滞空時間より前方ステップ時の滞空時間のほうが有意に短かったが、高齢者においては前方ステップと後方ステップの時間の差が大きい傾向にあった。

3.5 結果のまとめ

水平外乱刺激により誘発される姿勢保持動作をバイオメカニクス的手法により分析した結果、若年者と高齢者で統計的に有意な違いが認められたのは、前後のステップ動作で合わせて6項目であった。床面前方移動による後方ステップ動作では、①肩峰点の変位量は若年者より高齢者の方が大きかった。②

股関節角度は、若年者は伸展していたが高齢者は屈曲していた。③膝関節角度は、若年者より高齢者の方が大きく屈曲していた。④足部の滞空時間は、若年者より高齢者の方が長かった。床面後方移動による前方ステップ動作では、①肩峰点の変位量は、若年者より高齢者の方が大きかった。②膝関節角度は、若年者は伸展していたが高齢者は屈曲していた。

4. 考察

4.1 床面移動における若年者の姿勢制御

一般的に、立位時の外乱が大きくなるに従って、姿勢制御は足関節方略、股関節方略、ステップ方略と移行することが知られている。飯島らは、大学生を対象として、台移動の加速度を 0.6m/s^2 から 4.4m/s^2 まで変化させて、漸増する水平外乱刺激に対する姿勢応答を分析している⁷⁾。その中で、関節運動の角加速度ピーク値から3つの方略の移行過程を調べた結果、すべての被験者は、台移動加速度が $0.6 \sim 2.8\text{m/s}^2$

で足関節方略, 2.8m/s^2 以上でステップ方略を用いた「足関節群」, $0.6\sim 2.5\text{m/s}^2$ で足関節方略, $2.5\sim 3.3\text{m/s}^2$ で股関節方略, 3.3m/s^2 以上でステップ方略を用いた「中間群 (典型的な群)」, $0.6\sim 1.3\text{m/s}^2$ で足関節方略, $1.3\sim 2.5\text{m/s}^2$ で股関節方略, 2.5m/s^2 以上でステップ方略を用いた「股関節群」の3つの群に分類されたと報告している。

本研究では, 若年者および高齢者ともに 2.0m/s^2 の台移動加速度を用いた。飯島らの報告では, 若年者がステップ方略を用いた最小の加速度は 2.5m/s^2 であったことから⁷⁾, 若年者にとって本実験の刺激は足関節方略あるいは股関節方略によって姿勢を保持できる範囲の刺激であったと推察される。そして, 今回の実験では積極的に足を出してステップするよう指示したため, 若年者の姿勢制御は本来のステップ方略とは異なる変則的な調整がなされた可能性が高い。

ステップ方略は足部を一步踏み出して支持基底面の前後幅を広げ, はじめとは異なった姿勢に移行することである⁴⁹⁾。床面の移動にもなって足部の移動が生じた場合, 頭部および体幹は慣性の法則によって移動前の位置に止まろうとするが, ステップ方略ではその動きを制限せずに足部を踏み出すことになる。すなわち, 刺激によって移動した身体重心の位置は変えずに支持基底面を広げる方略である。その結果, 頭部や体幹上部の変位については, 理論上床面の移動量よりかなり大きくなることが考えられる。一方, 足関節方略として下腿筋に伸張反射が生じた場合, 頭部や体幹は前脛骨筋や腓腹筋の収縮によって強制的に足部の鉛直軸上に引き戻される。その結果, 頭部や体幹の変位は, 床面の移動量と同じ程度に抑えられると考えられる。本実験での若年者については, ステップ時の体幹上部の変位量が小さいこと, 股関節の大きな角度変化が無いこと, 高齢者と比較してもステップ幅が決して大きくないことが認められた。したがって, 2.0m/s^2 の台移動加速度における若年者の姿勢制御は, 足関節方略が優先的に機能し, はじめの姿勢を維持した上での変則的なステップ方略が実行されたものと考えられた。

4.2 床面前方移動における高齢者の姿勢制御

高齢者については, 姿勢制御の3つの方略の関係性について十分なデータが得られていない。若年者に限っても3種類のパタンが存在することから, 身体機能の個人差が大きい高齢者では若年者以上に複雑な姿勢制御の方略パタンが存在することが推察される。しかしながら本実験では個人差を検討するだけの数の被験者を確保できていない。したがって, 本研究では高齢者の平均値と若年者の平均値との比

較から, 高齢者にとって 2.0m/s^2 の台移動加速度にはどのような姿勢調整の方略が必要だったのかについて考察する。

床面前方移動による後方ステップでは, 体幹上部の変位に有意な増大が認められた。また有意差は無かったものの頭部変位も大きい傾向にあった。もし仮に, 床面移動の瞬間に前脛骨筋の伸張反射が即座に反応すれば, 慣性の法則によって床面移動の前の位置に止まろうとする頭部や体幹は, 前脛骨筋の収縮 (足関節背屈) によって強制的に足部の鉛直軸上に引き戻される。この場合の姿勢の乱れは少なく, 頭部ならびに体幹上部の変位量は床面の移動量とほぼ同じ値になるはずである。高齢者で頭部や体幹上部の変位が大きくなったという結果は, 前脛骨筋の伸張反射が十分に機能しなかった, あるいは機能させなかった結果と考えることができる。以上のことから高齢者において足関節方略は使われなかったと考察された。

若年者とのもう一つの大きな違いは股関節の屈曲が認められたことであった。姿勢制御における股関節方略とは, 足関節と股関節を逆の方向へ回転させることで身体重心を支持基底面より逸脱せずにバランスを保持することである。床面が前方へ移動する場合は, 足関節を底屈し股関節を屈曲することが股関節方略を意味する。本実験で股関節が屈曲していた結果と前述の前脛骨筋による足関節背屈がみられなかった結果は, 股関節方略が使われたことを意味している。さらに, ステップ時の足部の滞空時間が長かったのは, 高齢者においては股関節方略とステップ方略が同時に使われた結果であると考えられる。ステップ方略では足部を一步踏み出して支持基底面の前後幅を広げ, 身体重心の逸脱を防ぐためにできるだけ速く足部を踏み出す必要がある。足関節と股関節を逆方向へ回転させる必要のある股関節方略が同時に行われた場合には, 足部の踏み出しに時間がかかることは容易に想像できる。

以上のことから, 加速度 2.0m/s^2 での床面前方移動における高齢者の姿勢制御は, 股関節方略とステップ方略が同時に実行されたものと考察された。

4.3 床面後方移動における高齢者の姿勢制御

床面後方移動による前方ステップでは, 高齢者は体幹上部の変位が大きかった。また, ステップ時の膝関節について若年者は伸展していたが高齢者は屈曲していた。さらに, 股関節角度については若年者と同様に大きな変化は認められなかった。これらの結果は, 床面の移動瞬間には腓腹筋による伸張反射は機能していなかったことと, 股関節の動きが抑制されていたことを示し, 足関節方略および股関節方

略は使われていないと考えられる。以上のことから、加速度 2.0m/s^2 での床面後方移動における高齢者の姿勢制御はステップ方略が実行されたものと考察された。

5. 結語

本研究では、水平外乱刺激により誘発される姿勢保持動作についてバイオメカニクス的手法を用いて解析した結果、高齢者での姿勢制御の方略についての新しい知見が得られた。床面が前方へ移動する外

乱に対しては、転倒予防のより安全な対応のために「股関節方略」と「ステップ方略」の両方の姿勢制御が同時に実行されていた。一方、床面が後方へ移動する外乱に対しては、足部を前方へ踏み出してはじめとは違う姿勢へと移行する「ステップ方略」のみでの姿勢制御が行われていた。これらの知見は、高齢者の生活機能の維持や自立に向けた取り組みに有用な情報となり、高齢者において立位時の姿勢の乱れが転倒へ移行する機序を解明する手がかりになると考えられた。

利益相反

本論文に関連し、著者らに開示すべき利益相反に相当する事項はない。

謝 辞

本研究は平成29年度川崎医療福祉研究費の助成を受けたものです。この研究を遂行するにあたり、被験者として協力をしていただいた倉敷市中老年健康・スポーツ教室に参加された皆さん、ならびに株式会社ナムの皆さんに深謝いたします。

文 献

- 1) 総務省統計局：令和元年（2019）：人口推計（2018年（平成30年）10月1日現在）—全国：年齢（各歳）、男女別人口・都道府県：年齢（5歳階級）、男女別人口—
<https://www.stat.go.jp/data/jinsui/2018np/index.html>, 2019. (2019.8.1確認)
- 2) 鈴木隆雄：転倒の疫学。日本老年医学雑誌, 40(2), 85-94, 2003.
- 3) 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, 30(3), 132-137, 2006.
- 4) 大淵修一：高齢者の転倒と予防。バイオメカニクス学会誌, 27(1), 2-5, 2003.
- 5) 越智亮, 大竹卓実, 山田和政, 阿部友和, 古川公宣, 下野俊哉：注意干渉が高齢者の転倒防止前方ステップ動作に与える影響。理学療法学, 39(6), 351-358, 2012.
- 6) 越智亮：高齢者の転倒回避動作とリハビリテーション。愛知県理学療法学会誌, 27(2), 41-47, 2015.
- 7) 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世：漸増する水平外乱刺激に対する姿勢応答。生体医工学, 47(1), 70-76, 2009.
- 8) 飯島賢一, 柳田純一, 関根正樹, 田村俊世：加速度を用いた水平外乱刺激時の姿勢応答の計測。生体医工学, 45(4), 285-291, 2007.
- 9) 酒井美園, 大淵修一, 柴喜崇, 上出直人：歩行時の外乱刺激適応課題に対する高齢者と若年者の姿勢制御反応の比較。バイオメカニクス学会編, バイオメカニクス<17>—生体機能の解析と医療福祉—, 慶応義塾大学出版会, 東京, 87-98, 2004.

(令和元年12月11日受理)

A Biomechanical Study Regarding the Postural Control for Horizontal Disturbance

Takeshi MIYAKAWA and Akie YOSHIMOTO

(Accepted Dec. 11, 2019)

Key words : postural control, elderly person, stepping strategy, motion analysis

Abstract

In this study, 8 elderly men aged 65 and over and 8 male students were analyzed in a biomechanical manner for posture retention motion against unexpected horizontal movement of the floor. As for the results, quantification of postural changes before and after disturbance stimulation, significant differences were found between elderly and younger : displacement of shoulder peak, hip joint angle, knee joint angle, foot stagnant at the rear step : displacement of shoulder peak, knee joint movement angle at the front step. These results suggested that elderly people can simultaneously control both “hip joint strategy” and “step strategy” in order to prevent falls when the floor moves forward. And when the floor moves backward, it is clear that posture control is performed only with “step strategy”.

Correspondence to : Takeshi MIYAKAWA

Department of Health and Sports Science
Faculty of Health Science and Technology
Kawasaki University of Medical Welfare
Kurashiki, 701-0193, Japan

E-mail : miyaken@mw.kawasaki-m.ac.jp

(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.29, No.2, 2020 341 – 347)

