

原著

視覚的フィードバックを用いた膝関節動揺の 能動的制御が片脚立位姿勢制御における 下肢関節作用に及ぼす影響

平田紗椰^{*1} 小原謙一^{*2} 大坂裕^{*2} 黒住千春^{*3}

要 約

転倒予防を目的とした運動として片脚立位の効果が知られている。本研究の目的は、視覚的フィードバックによって膝部の動揺を捉えたうえで能動的に制御することが、片脚立位中の下肢関節作用に及ぼす影響について明確にすることであった。若年健常成人女性25名(20.4±0.5歳)を対象とした。重心動揺計と三軸加速度計を用いて、30秒間の片脚立位時の足圧中心と骨盤部、膝部の動揺を測定した。実験条件は、視覚的フィードバックを用いて膝関節を能動的に制御して片脚立位保持を行う能動的制御条件と、視覚的フィードバックを用いず片脚立位保持を行うコントロール条件の2条件とした。能動的制御条件では、任意の身体部位からレーザーを壁面に照射することでその身体部位の位置を視覚的に捉えやすくすることができる身体部位フィードバック器を用いた。2m離れた壁に貼付した直径10cmの円内に、膝部に装着したフィードバック器からのレーザー光を留めるように指示した。条件間比較にはWilcoxonの符号付き順位検定を用いた(p<0.05)。骨盤部動揺(RMS, 中央値(四分位範囲))では、能動的制御条件が63.3(35.5-94.5)、コントロール条件が44.6(34.4-54.0)であり、能動的制御条件が有意に高値を示した。その他の測定項目に有意差は認められなかった。本結果から、片脚立位中に視覚的フィードバックを用いて膝部の動揺を能動的に制御することで、股関節戦略を賦活させ得ることが示唆された。

1. 緒言

日本は世界有数の長寿国として知られている。総務省の統計によると現在、総人口に占める高齢者の人口は3,617万人となり、65歳以上の高齢者の割合は28.7%、75歳以上の高齢者の割合は14.9%となっている。そして、数年後には2025年問題といった団塊の世代を含む70歳以上の人々が75歳以上となり約4人に1人は後期高齢者となると予想されている¹⁾。高齢者の人口増加により、介護保険制度における要介護または要支援の認定を受ける人は増加することが予測されており、その結果として医療費や介護費の高騰、年金の給付額減少などの問題がより深刻化すると思われる。また介護が必要な「要介護者」に認定されているにもかかわらず、施設に入所できな

い、適切な介護サービスを受けられないといったいわゆる「介護難民」が急増することが容易に予測される。そこで、超高齢社会を支える制度づくりが急務となっている。

0歳の子どもの平均してあと何年生きられるかを示すのが平均寿命であり、健康上の問題で日常生活が制限されることなく生活することができる期間を健康寿命という。平均寿命と健康寿命を比較したところ、健康寿命は平均寿命より約10年も短い。このことから、現状では多くの高齢者が介護を必要としていることが示唆され、実際に要介護状態になる高齢者の増加が社会問題になっている²⁾。要介護状態になる主な原因として、脳血管疾患、認知症、加齢による衰弱に続いて、転倒が挙げられる。高齢者の

*1 医療法人協和会 千里中央病院 リハビリテーション科

*2 川崎医療福祉大学 リハビリテーション学部 理学療法学科

*3 川崎医療福祉大学 リハビリテーション学部 作業療法学科

(連絡先) 小原謙一 〒701-0193 倉敷市松島288 川崎医療福祉大学

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

転倒は、加齢による姿勢制御能力の低下が主な原因の一つであり、転倒によって骨折発生の危険性が高くなる。さらに、高齢者は一度転倒を経験すると、その後の転倒恐怖感により日常生活活動能力の低下や社会への参加制限によって、生活活動量や健康関連 quality of life に大きな影響を与えることが指摘されている³⁾。したがって、要介護状態の高齢者の増加を防ぐことを目的とした転倒予防対策は、医療費、介護費といった経済面および身体機能面の両側面から急務であると言える。

転倒予防を目的とした姿勢制御練習としてダイナミックフラミング運動の有効性が報告されている⁴⁾。この運動は、片脚立位姿勢を1分間保持することで股関節周囲筋群の筋力強化や立位姿勢制御能力の向上による転倒予防効果に加えて、自身の体重をメカニカルストレスとして片脚立位時の支持側大腿骨頭に加え、骨密度を骨折閾値以上に改善させることで大腿骨頸部骨折を予防することを図る簡便な運動である。そして、このダイナミックフラミング運動の発展型と言える運動について廣田ら⁵⁾から報告されている。廣田らは、レーザーポインターで身体の動揺を視覚的に捉えることを可能にした身体部位フィードバック器を用いて、膝関節の動きを能動的に制限した片脚立位での姿勢制御練習の効果を検証している。この片脚立位での姿勢制御練習を2週間継続した後であれば、膝関節の能動的な制御を行わない状態でも片脚立位時の足圧中心動揺が有意に減少したと報告されている。このことから、視覚的フィードバックを用いて膝関節を能動的に制御したうえでの片脚姿勢制御練習は、姿勢制御能力を向上させるのに効果的であると示唆される。

ヒトが姿勢制御をするにあたって主に用いられる運動戦略は3つある。足関節の運動によって重心を支持基底面内に留める足関節戦略、股関節の運動によって重心を支持基底面内に留める股関節戦略、片脚を踏み出す運動で支持基底面を広げるステップング戦略である。ヒトは、運動の難易度によって足関節から股関節、そしてステップングへと運動戦略を変更し姿勢制御を行う⁶⁾。しかしながら、廣田らのこの研究では、片脚立位姿勢制御練習中の股関節や膝関節、そして足関節がどのように作用しているのか、つまり下肢関節の運動戦略をどのように使用して片脚立位姿勢を制御しているのかが明らかになっていない。下肢における運動連鎖については、骨盤から遠位へと下行性に波及する運動連鎖と、足部から近位へと上行性に波及する運動連鎖の2つがある⁷⁾。このことから、片脚立位を保持するために、それぞれの下肢関節が補い合っていると考えられ

る。そして、股関節と足関節の間に位置する膝関節は、上行性および下行性の両方の運動連鎖に影響を与え、股関節、足関節の作用に何らかの影響を及ぼすことが考えられる。大きな重心移動が伴わない片脚立位姿勢保持という課題では、膝関節の動揺を制御することで特に足関節の作用に大きな影響を及ぼすことが予測される。

そこで本研究では、加速度計と重心動揺計を用いて、視覚によって膝部の動揺を捉えながら膝関節を能動的に制御する片脚立位姿勢制御練習中に起きている下肢関節の作用について明確にすることを目的とした。そして、「視覚的フィードバックを用いて膝関節を能動的に制御することで足関節戦略が賦活された結果、足圧中心動揺が増大する」との仮説を立案し、その点について検証した。

2. 方法

2.1 対象

普段から週1回以上のクラブ活動等の運動習慣がなく、整形外科的及び神経学的疾患の既往のない健康成人女子学生25名（年齢 20.4 ± 0.5 歳、身長 157.0 ± 4.5 cm、体重 51.8 ± 7.2 kg）を対象とした。女性は男性と比較して筋力が少なく、片脚立位姿勢制御中の下肢関節の運動戦略、作用を検討することに適しているため、女子学生を対象とした。

2.2 測定方法

本研究では、任意の身体部位の動揺を視覚的に認識しやすくするために、廣田ら⁵⁾の先行研究で使用されていたものと同様の身体部位フィードバック器を用いた（図1）。このフィードバック器は、任意の身体部位に伸縮ベルトを巻き、マジックテープによってレーザー照射部を貼付するように装着するものである。装着した身体部位からレーザーを壁面に照射するため、照射部のわずかな向きの変化がレーザーの照射先である壁面にて大きく反映し、身体部位の動揺がより詳細に検知可能となる（特許出願中、特開2019-051059、出願人：川崎学園、発明者：小原謙一）。

片脚立位姿勢制御中の股関節及び膝関節の作用の指標として、第2仙椎棘突起部と支持脚の腓骨頭部に貼付した三軸加速度計（共和電業社製 AA-5TG）を用いて骨盤部と膝部の動揺時の加速度を測定した（サンプリング周波数：100Hz）。三軸加速度計から得られた鉛直、前後、左右方向の加速度値（ m/s^2 ）を三平方の定理を用いて合成した。この値から Root Mean Square（以下、RMS）を算出した。RMSは信号波形の二乗平方根であり、加速度のRMSは加速度信号の平均振幅を示すことから、

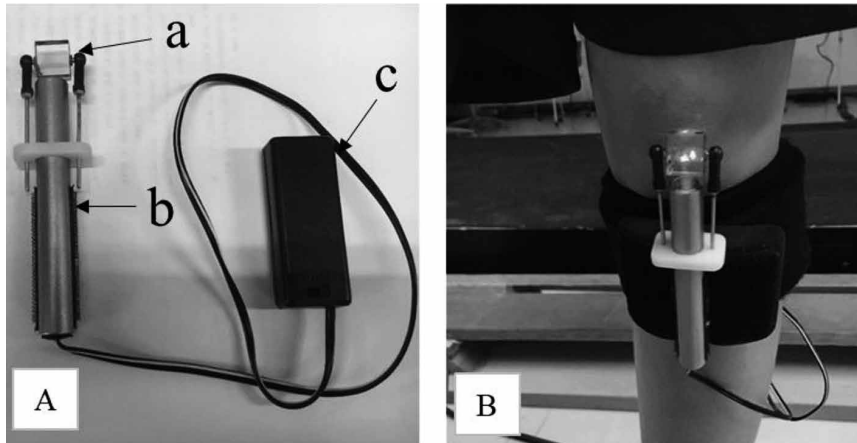


図1 身体部位フィードバック機器

A. 機器の構成パーツ, B. 装着イメージ.

a. レーザー照射部 (プリズムレンズで照射方向調節可能),
b. レーザー機器本体, c. 電源ボックス

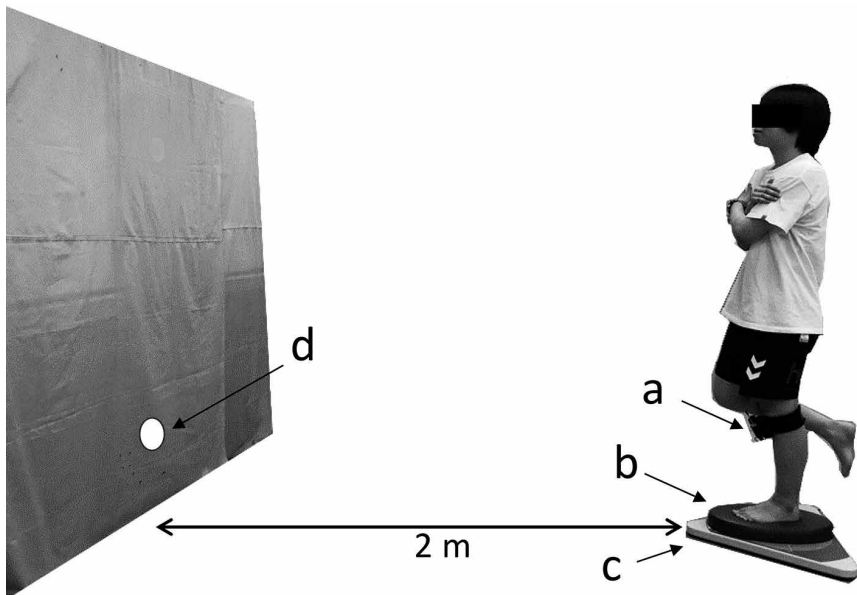


図2 測定風景 (能動的制御条件)

a. 身体部位フィードバック機器, b. バランスパッド, c. 重心動揺計, d. 的
2m 前方の壁面に貼付した直径10cm の的の範囲内に膝部から照射されたレーザーを留めるように指示
その際の足圧中心動揺と, 骨盤部, 膝部の加速度を測定

本研究では骨盤部及び膝関節の動揺を示す指標とした。RMSは、値が大きいほど動揺が大きいことを意味するものである。さらに、足関節の作用の指標として、重心動揺計(アニマ社製グラビコーダGP-7)を用いて足圧中心動揺を測定し、矩形面積(cm^2)と総軌跡長(cm)を検討項目として採用した。

測定肢位は、バランスパッド(There band社製スタビリティートレーナー, ソフトタイプ)上での片脚立位とし、裸足で上肢による姿勢制御を防止するために両上肢は胸の前で交差するよう指示した。

対象者が健常者であるため安定面であると容易に立位姿勢保持が可能である。したがって、姿勢制御課題の難易度を上げる目的で不安定面としてバランスパッドを用いた。足部の位置は、足部が壁面に対して直角になるように設定した。曾我部らは⁸⁾、視覚的フィードバックを用いた片脚立位姿勢制御練習の際は膝部の動揺を視覚的に捉えることが最も効率が良い練習方法であると報告している。したがって、膝蓋骨中央部に上述のフィードバック器を装着して、視覚的フィードバックにて膝関節を能動的

に制御した片脚立位姿勢を保持する能動的制御条件と、視覚的フィードバックを用いず片脚立位姿勢を保持するコントロール条件の2条件を実験条件とした。片脚立位姿勢保持中の足圧中心動揺を測定するために、バランスパッドの下に重心動揺計を設置した。片脚立位を40秒間保持させ、開始から10秒後に足圧中心動揺と骨盤および膝部の加速度の測定を始め、30秒間測定した。2m離れた壁に直径10cm円の描かれた紙を貼り、その円内をターゲットとしてフィードバック器からのレーザー光を留めるようにすることで能動的に膝関節を制限することとした。この際の円の高さは、レーザーを床面に対して平行に照射できるように、対象者のフィードバック器から足底までの長さと同様にバランスパッド、および重心動揺計の厚さの和とした。測定順序はくじを用いて無作為とし、学習効果を除くために一方の条件の測定後に1週間以上空けて、もう一方の条件を測定した(図2)。

2.3 統計学的解析

正規性の確認のために Shapiro-Wilk 検定を行った。その結果、全ての項目で正規性が認められなかったため、Wilcoxon の符号付き順位検定によって2条件間の比較を行った。危険率は5%未満をもって有意とした ($p < 0.05$)。なお、解析ソフトウェアは IBM SPSS Statistic 24 (IBM 社製) を使用した。

3. 結果

表1に、骨盤部および膝部動揺と足圧中心動揺の結果を示す。

股関節作用の視標である骨盤部動揺は、能動的制御条件がコントロール条件と比較して有意に高値を示していた ($p < 0.05$)。膝関節作用の視標である膝部動揺については、有意差は認められなかった。足関節作用の視標としての足圧中心動揺の測定項目である矩形面積、総軌跡長については、2条件間で有

意差は認められなかった。

4. 考察

本研究では、視覚的フィードバックを用いて膝部の動揺を能動的に制御することが、片脚立位姿勢制御中の下肢関節作用に与える影響について明確にすることを目的として実験を行った。本研究結果より、足圧中心動揺の指標である矩形面積、総軌跡長と、膝部動揺で有意差は認められなかった。しかしながら、股関節作用の指標としての骨盤部動揺は膝関節の能動的制御によって有意に高値を示していた。これは、「膝関節動揺を能動的に制御することで足関節戦略が賦活された結果、足圧中心動揺が増大する」という仮説に反する結果であった。さらに、股関節の作用は、下行性運動連鎖により足関節の作用へ影響を与えることから⁷⁾、能動的制御条件で骨盤部動揺が高値を示したのと同様に足圧中心動揺も能動的制御条件で高値を示すと推測していた。しかしながら、このことについても推測に反する結果となった。

膝関節の能動的制御によって骨盤部動揺が有意に増大したことについて、バランスパッド上での片脚立位保持という課題に加えて、膝部から照射されたレーザーを直径10cmのターゲット内に留めるという課題の遂行が指示されたことによって膝関節が能動的に制御されたことで、足関節のみでの対応では片脚立位姿勢を保持しきれなかったと考える。そのため、股関節での対応、いわゆる股関節戦略を足関節戦略と併用せざるを得ない状況となったと考える。竹内⁹⁾は、3次元解析装置を用いて静止立位中の頭部、胸郭部、骨盤部の重心位置を算出し、床反力計を用いて足圧中心を測定したところ、骨盤の動揺と足圧中心動揺間での相互相関関数のピーク値に差異が認められたことから、骨盤部の動揺は足圧中心動揺に直接的な関与しないと述べている。さらに、股関節を主に用いた姿勢制御では、骨盤と上半身を

表1 骨盤部および膝部動揺と足圧中心動揺測定値

	n=25		
	能動的制御条件	コントロール条件	p値
骨盤部動揺 (RMS)	63.3 (35.5-94.5)	44.6 (34.4-54.0)	0.048*
膝部動揺 (RMS)	55.6 (46.5-80.9)	62.9 (40.5-82.3)	0.353
矩形面積 (cm ²)	17.4 (11.8-21.7)	15.2 (13.0-21.0)	0.657
総軌跡長 (cm)	128.2 (112.8-151.0)	116.2 (102.9-133.0)	0.276

Median (Interquartile range)
Wilcoxon rank test, *: $p < 0.05$

逆方向に動かすように重心位置を制御するために足圧中心の動揺は小さくなることが推察される。したがって、本研究で行った視覚的フィードバックを用いた膝関節の能動的制御下での片脚立位保持という課題では、主に股関節戦略での姿勢制御を行っているため、足圧中心動揺は変化しなかったと考えられる。

本研究では1回の片脚立位姿勢保持中における下肢関節の作用を検討している。それに対して、廣田ら⁵⁾の先行研究では、本研究と同様の姿勢制御練習を2週間という期間に継続的に行い、その効果を検証している。その結果、視覚にて膝部の動揺を捉えながら膝関節を能動的に制御する片脚立位姿勢制御練習によって足圧中心動揺は有意に減少したと報告している。Bernstein¹⁰⁾の運動制御システム理論では、若年者の安定した運動成績は、多様性の中から統制された運動制御によりなされるものであると述べている。加えてLin & Liao¹¹⁾は、高齢者に比べ若年者はより多様な運動戦略を持っていることを報告している。さらに大畑ら¹²⁾は、リーチ課題での手関節、膝関節、股関節の移動距離と重心動揺面積と重心移動距離の変化を検討している。その結果、股関節の移動距離については、初回試行と比べ最終試行ではリーチ方向と反対方向への移動距離の減少がみられた。そして、重心動揺面積は課題の反復に伴って減少し、重心移動距離は最終試行で有意な増加を示したと報告している。これらの結果から、同一課題の反復により姿勢制御の足関節戦略は変更される

ことで、姿勢の安定性や筋活動の効率を高められる可能性があることが示される。以上のことから、若年者では課題に対する習熟度に応じて、姿勢制御戦略が変化することが示唆される。したがって、姿勢制御練習を一定期間継続することで、重心の動揺に対する身体適応が容易となり、股関節戦略から足関節戦略へ移行する、あるいは、股関節戦略がより習熟して効率の良いもの変化していくのではないかと考えられるが、本研究ではその検証に至っていない。以上の理由から、視覚的フィードバックを用いた膝関節の能動的制御下での姿勢制御練習が高齢者の転倒予防に有効か否かについて検証が必要である。

本研究結果から、片脚立位姿勢保持の際に対象者自身の膝関節の動きを視覚的に捉えて、その動きを能動的に制御することは、3つの姿勢制御のうち股関節戦略を賦活させる可能性があることが示唆された。本研究の限界として、本研究では一定期間の継続した姿勢制御練習による下肢関節作用の変化について検討していない。そのため、継続的な姿勢制御練習による各関節における作用の変化について検討することが今後の課題である。また、Kasaharaら¹³⁾は、若年者と高齢者は姿勢制御戦略が異なると述べている。本研究の対象者は若年健康成人女性であるため、本研究結果を転倒予防への対策が必要な高齢者にそのまま適応することは難しい。よって、高齢者を対象とした姿勢制御機能としての下肢運動戦略の経時的変化についての検証が今後の課題として残される。

倫理的配慮

本研究を開始するにあたり、対象者には倫理的配慮として研究の目的および方法、個人情報の保護に関して十分に説明し同意を得た。なお、本研究は川崎医療福祉大学倫理委員会の承認後に実施した（承認番号：20-112）。

文 献

- 1) 総務省統計局：高齢者の人口，統計からみた我が国の高齢者—「敬老の日」にちなんで—（2020年9月15日現在推計）。<http://www.stat.go.jp/data/topics/topi1261.html>, 2020. (2022.1.27確認)
- 2) 内閣府：高齢期の暮らしの動向，高齢化の状況，令和3年版高齢者社会白書（概要版）https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2021/html/gaiyou/s1_2.html, 2022. (2022.4.14確認)
- 3) 中越竜馬，武政誠一，中山宏之，森勇介：整形外科に通院している地域在住高齢者の転倒の有無と生活活動量および健康関連 QOL との関係。理学療法科学，31，189-193，2016.
- 4) Sakamoto K, Sugimoto F, Sato Y, Fujimaki E and Tashiro Y : Dynamic flamingo therapy for prevention of femoral neck osteoporosis and fractures-Part I: Theoretical background-. *The Showa University Journal of Medical Sciences*, 11, 247-254, 1999.
- 5) 廣田真由，種谷菜晶，大坂裕，小原謙一：視覚フィードバックが不安定面で片脚立位に及ぼす影響。川崎医療福祉学会誌，28，433-439，2019.
- 6) 中村隆一，斎藤宏，長崎浩：基礎運動学。第6版補訂，医歯薬出版，東京，2003.
- 7) 市橋則明編：運動療法学—障害別アプローチの理論と実際—第2版。文光堂，東京，2014.
- 8) 曾我部莉帆，小原謙一，大坂裕：視覚情報フィードバックを用いた片脚立位練習の効果的な視標としての身体部位の検討。川崎医療福祉学会誌，30，513-518，2021.

- 9) 竹内弥彦：足圧中心と動揺の相互相関解析に基づく高齢者の静止立位制御特性. 理学療法科学, 30, 99-103, 2015.
- 10) Bernstein NA : The co-ordination and regulation of movements. Pergamon Press, Oxford, 1967.
- 11) Lin SI and Liao CF : Age-related changes in the performance of forward reach. *Gait & Posture*, 33, 18-22, 2011.
- 12) 大畑光司, 市橋則明, 建内宏重, 秋本善英, 元村直靖 : リーチ課題の反復による姿勢制御の変化. 理学療法学, 30, 1-7, 2003.
- 13) Kasahara S, Saito H, Anjiki T and Osanai H : The effect of aging on vertical postural control during the forward and backward shift of the center of pressure. *Gait & Posture*, 42, 448-454, 2015.

(2022年4月18日受理)

Effect of Active Control of Knee Joint Sway Using Visual Feedback on Lower Extremity Joints Action on One-leg Standing Posture Control

Saya HIRATA, Kenichi KOBARA, Hiroshi OSAKA and Chiharu KUROZUMI

(Accepted Apr. 18, 2022)

Key words : posture control, visual feedback, lower extremity joints action

Abstract

It is known that one-leg standing exercise is effective in preventing falls. The purpose of this study was to investigate the effect of active control of knee joint sway using visual feedback on lower extremity joints action on one-leg standing posture control. Participants were 25 young adult healthy females (20.4 ± 0.5 years). During one-leg standing for 30 seconds, the center of foot pressure sway was measured by a stabilometer, and concurrently, the pelvis and knee joint sway were measured by two triaxle accelerometers. Two experimental conditions were tested in the active control of the knee joint using visual feedback and without visual feedback as the control condition. A body parts position feedback device was used in the visual feedback condition. Participants were instructed to keep a laser beam from the feedback device attached to the knee within a circle with a diameter of 10 cm which was attached to a wall 2 meters away. The Wilcoxon rank test was used to compare the two conditions. Regarding the pelvis sway (root mean square), the median values (interquartile range) were 63.3 (35.5 - 94.5) and 44.6 (34.4 - 54.0) in the visual feedback and the control condition, respectively. There were significant differences between the two conditions ($p < 0.05$). This result suggested that the hip joint action as a postural control strategy may be activated by active control of the knee joint using visual feedback while standing on one-leg exercise.

Correspondence to : Kenichi KOBARA

Department of Physical Therapist

Faculty of Rehabilitation

Kawasaki University of Medical Welfare

288 Matsushima, Kurashiki, 701-0193, Japan

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

(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.32, No.1, 2022 77 - 82)