片脚膝立ち位保持の姿勢制御に関する研究

——体重心と圧中心の関係——

Postural Control during Single-leg Kneeling: Relationship of COG with COP

川上 真吾^{1,2)} 鈴木 博人^{1,2)} 菊地 明宏³⁾ 田中 直樹²⁾
樋口 朝美¹⁾ 西山 徹⁴⁾ 藤澤 宏幸^{1,2)}

SHINGO KAWAKAMI, MS^{1,2)}, HIROTO SUZUKI, MS^{1,2)}, AKIHIRO KIKUCHI, MS³⁾, NAOKI TANAKA, MS²⁾,
ASAMI HIGUCHI, RPT¹⁾, TORU NISHIYAMA, RPT, RhD⁴⁾, HIROYUKI FUJISAWA, PRT, RhD^{1,2)}

¹⁾ Graduate School of Health and Environment Science, Tohoku Bunka Gakuen University: 6-45-1 Kunimi, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 981-8551, Japan. TEL+81 22-207-3730 E-mail: kawakami@rehab.tbgu.ac.jp

²⁾ Department of Rehabilitation, Faculty of Medical Science & Welfare, Tohoku Bunka Gakuen University

³⁾ Department of Rehabilitation, Miyagi Eastern Cardiology

⁴⁾ Department of Rehabilitation of Installation Preparation Room, Japan Health Care, University

Rigakuryoho Kagaku 30(3): 399-403, 2015. Submitted Dec. 8, 2014. Accepted Jan. 18, 2015.

ABSTRACT: [Purpose] This study was conducted to clarify postural control during single-leg kneeling. [Subjects] The subjects were 28 healthy adults. [Methods] The mean power frequency of the center of pressure was calculated for all subjects. Subjects were divided into possible and not possible groups on the basis of being able to hold a single-leg kneeling position for more or less than 30 s, and the groups' mean power frequencies were calculated for the center of gravity and center of pressure and compared. [Results] The mean power frequency of the center of pressure was about 2.1 Hz. The mean power frequency of the center of gravity showed a tendency to be higher in the possible group. [Conclusion] Control of the center of pressure was found to be important during single-leg kneeling.

Key words: single-leg kneeling, COG, COP

要旨:〔目的〕片脚膝立ち位保持における姿勢調整戦略を明らかにすることである。〔対象〕健康成人28名とした。〔方法〕全対象者における圧中心の平均パワー周波数を算出した。次に片脚膝立ち位保持が30秒可能群（以下、可能群）、30秒未満群（以下、不可群）に割り付け、体重心および圧中心の平均パワー周波数を算出し、比較した。〔結果〕圧中心の平均パワー周波数2.1 Hzであった。体重心の平均パワー周波数において、可能群で高い傾向が認められた。30秒保持可能な対象者と明らかに保持困難である対象者では各指標の平均パワー周波数で明らかな差が観察された。〔結語〕圧中心の制御に着目することが重要であると示唆された。

キーワード: 片脚膝立ち位保持, 体重心, 圧中心

¹⁾ 東北文化学園大学大学院 健康社会システム研究科:宮城県仙台市青葉区国見6丁目45-1 (〒981-8551) TEL 022-207-3730

²⁾ 東北文化学園大学 リハビリテーション学科

³⁾ みやぎ東部循環器科 リハビリテーション科

⁴⁾ 日本医療大学 リハビリテーション学科 設置準備室

I. はじめに

膝立ち位は日常の様々な場面で要求され¹⁾、文化や職業、理学療法における治療との関連が強い。特に中東やアジア諸国では、文化と膝立ち位との結びつきが強いのが特徴である。これは、宗教活動に代表される祈りの姿勢において必要不可欠な能力²⁻⁴⁾とされているからである。一方、日本の生活様式は坐を中心としたもの⁵⁾であることはいうまでもない。床を拭く動作などの目的を達成するための姿勢であると同時に、正座から立位になる際の移行姿勢でもある。つまり、日本文化にとって膝立ち位は切り離すことのできない姿勢といえる。また、職業分野では、整備業、造園業、建設業、配管業、炭鉱業と関連があるとされている。これらの職業では、日常的に膝立ち位を反復している点で共通している。

理学療法分野では、膝立ち位を評価や治療の1つとして用いることが多い。なぜなら、膝立ち位は、足関節によるバランス制御を利用できず、股関節による姿勢制御が中心とならざるを得ない⁶⁾ことから、股関節制御に焦点をあてた評価および、治療が可能であると理解されているからである。しかしながら、これまでに運動学・運動力学的な検討が十分になされてきたとはいえない。特に、難易度の高いバランス課題として知られる膝立ち位から片脚を挙上し、姿勢を保持する片脚膝立ち位保持のデータについては、我々の知る限り見当たらない。それゆえ、根拠に基づいた検査・治療の組み立てがなされていないのが現状である。よって、片脚膝立ち位保持の運動学および運動力学的な説明ができれば、評価や治療の意義を考える上で重要な示唆を与えてくれると考ええる。

これまで、片脚膝立ち位保持における研究を実施してきた⁷⁾。片脚膝立ち位保持におけるバランス制御については、一般的には前額面における股関節運動によって体重心（以下、center of gravity : COG）を制御していると考えられてきたことから股関節外転筋との関係について検証した。その結果、片脚膝立ち位保持課題において、基本的には股関節外転筋によってCOG制御が行われていると示唆された。しかしながら、その説明率⁸⁾は約30%と低いことから、異なる機能が関与している可能性も考えられた。

実験上における観察では、長時間保持が可能な被験者の特徴として下腿の回旋が観察された。身体が平衡を保つためには、COGの作用線と圧中心（以下、center of pressure : COP）の位置関係が一致しているほど安定性が高いこととなる。特に、静止課題においては、COPの制御によりCOGを一定位置に留める戦略が基本となる。つまり、片脚膝立ち位保持のような静止課題では、股関節によるCOGの制御のみならず、COPの制御も作用している可能性があった。以上の論点から、仮説とし

て以下のことが考えられた。片脚膝立ち位保持のような静止課題においては、①COPの制御が関与している。さらに、②保持可能である場合、狭小化した支持基底面内に重心を留めるためには、より素早くCOPを制御する必要があると予測されることからCOPの制御が困難である場合に比し、有意に高い周波数成分を示す。

よって、本研究の目的は、片脚膝立ち位保持でのCOPの制御による姿勢調整の有無を明らかにすることである。さらに、保持可能群と不可群との2群間において、COGの平均パワー周波数（以下、mean power frequency : MPF）、COPのMPF、COGおよびCOP両者のMPFの分散を比較し保持を可能にする要因を明らかにすることとした。

II. 対象と方法

1. 対象

健康成人28名（年齢 21.6 ± 3.1 歳、身長 168.9 ± 8.6 cm、体重 62.1 ± 10.6 kg）とした。軸足については、「ボールを蹴る足」の反対側として定義し、全員が左脚であった。なお、片脚膝立ち位を制限する中枢疾患、整形外科疾患、視覚障害や前庭障害等のバランス機能に影響を及ぼす障害とその既往が無いことを事前に確認した。対象者には研究内容を十分に説明したのち、署名を持って承諾を得た。本研究は東北文化学園大学研究倫理委員会にて承諾を受け実施した（承認番号：文大倫第13-07号）。

2. 方法

測定環境に関して、床反力計（MG-1090, ANIMA）2枚上で片脚膝立ち位保持課題を実施する際の膝関節位置から3m前方にターゲットを設置した。加えて、課題遂行状況における三次元座標の計測を可能とするため、三次元動作カメラ（ローカス 3D MA-5000, ANIMA）は6台とした。

開眼片脚膝立ち位保持を計測し、その後、保持時間で2群に割り付けた。開眼片脚膝立ち位保持可能群（以下、可能群）の条件については、30秒保持が可能であると定義した。一方、片脚膝立ち位保持不可群（以下、不可群）の条件については、保持時間が30秒未満であると定義した。この保持時間30秒を境界とした理由については、以下の2点が挙げられる。1つ目は、先行研究において、30秒保持が可能な被験者では、明らかな下腿の回旋が確認できた。2つ目は、片脚立位保持などバランス検査において、30秒をバランス能力の判断基準にしている⁹⁾検査もある。課題については、開眼片脚膝立ち位保持とした。開始肢位は、床反力計上に膝立ち位にて前胸部で腕を組み、股関節中間位、膝関節90°屈曲位、足関節底屈位となる構えとした。片脚膝立ち位保持

は、3 m 先のターゲットを注視し、支持脚の股関節は可能な限り屈曲伸展中間位を保持する方法で統一した。測定開始は、音合図の後、非軸足を挙上しその肢位が床から離れ圧中心が一つとなった時点とした。課題遂行にあたっては3つの中止基準を設け、①身体の一部が床に接地した場合、②前胸部での腕組みが外れた場合、③保持時間が30秒に達した場合とした。

測定条件は、開眼片脚膝立ち位保持の1条件とした。施行は計2回とし、各施行による疲労の影響を排除するため、施行間に十分な休憩を設けた。制御については、特別な指示は与えなかった。課題の実施にあたり、事前に何度か練習を行った。

データ集積には、三次元動作解析装置を用いた。反射マーカーを貼付する骨指標は、頭頂、C7棘突起、両側肩峰、両側上前腸骨棘、両側大転子、両側外側裂隙、軸脚内側裂隙、両側外果、軸脚内果の計14箇所として設定した。反射マーカーの位置をサンプリング周波数150 Hzで計測した。同時に、床反力計2枚を用いて左右下肢それぞれの床反力と圧中心データをサンプリング周波数150 Hzで計測した。本研究では、位置座標については前額面の位置座標データを、床反力データについては鉛直方向成分と左右成分を用いた。体重心位置の計算については、矢状面および前額面に頭部・体幹・上肢(head, arms, and trunk; HAT)、両大腿、両下腿、両足部からなる7つの剛体リンクモデルを仮定し、平滑化された座標データとWinter¹⁰⁾の人体座標データを用いてCOGの座標を求めた。COPについては、床反力の垂直分力の値から、平面座標を算出した。その後、COGおよび、COPの座標変化のデータの内571～1,595個目(2¹⁰個のデータ)の安定したデータを切り出し高速フーリエ変換(FFT)にて平均パワー周波数(mean power frequency: MPF)を算出した。分散については、COGおよび、COPにおけるMPFの標準偏差を用いて算出した。

データ解析に関して、COPにおけるMPFの平均値および標準偏差、中央値を算出した。2群間における各指

標(COGのMPF、COPのMPF)の差の比較には、Mann-Whitney U検定を用いた。2群間におけるCOGのMPFおよびCOPのMPFにおける分散の比較には、Lepage testを用いた。加えて、保維持不可群の内、明らかに保持が困難であった被験者と保持可能群で各項目について比較を行った。ただし、明らかに保持が困難であった被験者は数例のみであったため統計学的処理は実施していない。

統計学的有意水準は危険率5%とし、10%未満は有意差傾向があるとした。各々のデータは平均値と標準偏差および中央値で示した。解析はEZR ver.1.8-1.を用いた。

III. 結 果

片脚膝立ち位保持におけるCOPの平均周波数成分は 2.1 ± 0.3 Hz、中央値は2.1 Hzであった。全被験者においてCOPの周波数成分が確認され、COPが律動的に動いていることが認められた。次いで、片脚膝立ち位保持時間で2群(可能群・不可群)に群分けを行った結果、可能群は15名、不可群は13名であった。不可群の保持時間別割合については、保持時間1～6秒未満が2名、6～11秒未満が1名、11～21秒未満が5名、21～30秒未満が5名となり保持時間に差のある集団となった。2群それぞれのCOGおよび、COPのMPF、COGのMPFおよびCOPのMPFにおける分散について、平均値と標準偏差、中央値を表1に示す。片脚膝立ち位保持における周波数帯域、おおよそCOGは0.6 Hzの周波数帯、COPは2.1 Hzの周波数帯であった。COPにおいては、COGに比し周波数帯域が高い傾向を示した。各項目について、2群間における差の比較を行ったが有意差は認められなかった。ただし、COGのMPFにおいては可能群が不可群に比し周波数帯域が高い傾向を示した。この傾向については、図1に示した散布図からも伺うことができた。明らかに保持困難であるとした保持時間5秒の各データについては、COGのMPFは0.2 Hz、

表1 2群間でのCOGのMPF、COPのMPF、COGおよびCOPのMPF分散の比較

		不可群 (n=13)	可能群 (n=15)	
COG	(Hz)	0.4 ± 0.2	0.5 ± 0.3	*
(中央値)		0.3	0.6	
分散	(cm)	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	
(中央値)		0.1	0.1	
COP	(Hz)	2.1 ± 0.3	2.1 ± 0.3	
(中央値)		2.0	2.1	
分散	(cm)	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	
(中央値)		0.1	0.1	

* $0.05 \leq p < 0.10$.

図1 保持時間とCOGおよびCOPのMPFによる散布図
左：保持時間とCOGのMPFによる散布図 右：保持時間とCOPのMPFによる散布図

COPのMPFは1.8 Hzの周波数帯域であり、可能群で示されたCOGのMPFは0.5 Hz、COPのMPF 2.1 Hzに比し低い周波数であった。

IV. 考 察

先行研究の結果より、片脚膝立ち位保持においては、基本的には股関節外転筋によるCOG制御が関与していることが示唆された。さらに、実験上における観察では、一定時間保持が可能な被験者の特徴として下腿の回旋が観察された。つまり、片脚立位保持における足部の内返し・外返しによる制御¹¹⁻¹⁴⁾と同様に、片脚膝立ち位保持においてもCOPの制御がその保持に関与している可能性があった。そこで、我々は、上記を明らかにするために以下の2つの仮説について検証を行った。①片脚膝立ち位保持のような静止課題においては、COPの制御が関与している。さらに、②保持可能である場合、COPの制御が困難である場合に比し、有意に高い周波数成分を示す。

COPにおけるMPFの結果より、全被験者において 2.1 ± 0.3 Hzの変動が認められ、片脚膝立ち位保持においてCOPの制御が関与していることが示唆された。一方、片脚膝立ち位保持課題における保持要因の検証においては、被験者を可能群と不可群の2群間に割り付け、MPF

および分散について、差の比較を行った。その結果、有意差は認められなかった。本研究では、不可群の保持時間を30秒未満と設定したことから5～29秒までの幅がある集団となった。よって、ほぼ全対象者において一定時間は片脚膝立ち位保持が可能であったことになる。COGとCOPが相互作用を示した時期、すなわち571～1,595番目のデータを切り出し代表値を算出したことから、有意差は認められなかったと考えている。しかしながら、COGのMPFは不可群に比し可能群で高い傾向を示した。この結果は、先行研究の股関節外転筋によるCOG制御が関与しているとした見解と関連している。つまり、片脚膝立ち位保持には、前提条件として一定水準に達したMPFによるCOGの制御が必要である。この制御に股関節外転筋が寄与している可能性があるということになる。

次に、個々で次データを比較した。方法に示した通り、明らかに保持が困難であると判断した保持時間5秒の対象者と、30秒保持が可能であった対象者を比較したものである。比較対象がシングルケースであるため、統計学的処理を行っていない。COGおよびCOPのMPFの比較では、明らかに保持が困難であった対象者の値に比し高い傾向を示し、差が生じていることが確認できた。以上を踏まえると、片脚膝立ち位保持を可能とする条件の1つとして、おおよそCOGは0.6 Hzの周波数帯、COPは2.1 Hzの周波数帯での調整能力を持ち合わせていることが重要であると思われる。この、COPの制御による2.1 Hzは、片脚立位保持において側方安定性に寄与する足部の内返し・外返し運動の周波数2 Hz以上³⁾であるとする報告と類似している。また、それぞれの支持基底面の形状においても、前後方向に比し、左右方向が非常に狭いという点で共通性を認める。よって、片脚膝立ち位保持におけるCOP制御は、片脚立位保持における足部の内返し・外返しと同様の役割を果たしていると考えられる。ただし、片脚膝立ち位保持におけるCOP制御については、下腿の回旋によりそれを実現していることから、2.1 Hzの周波数帯から大きく変動することはないと思われる。

ここで、片脚膝立ち位保持を可能にする条件を整理する。第1に、非支持側の骨盤下制を抑止可能な股関節機能が確保されていることが前提となる。第2に、COG制御により頭部・上肢・体幹(head arm and trunk: HAT)の安定性が担保されている条件下では、COP制御を基本としてバランスを制御している。第3に、COGとCOPの大きなずれに対してすばやく対応可能なCOG制御によってCOGを一定の位置に保持している。つまり、保持を可能にするための階層構造が存在していると推察された。しかしながら、片脚膝立ち位保持が可能であってもCOGのMPFが低い値を示す対象者も存在していた。本研究では、片脚膝立ち位保持が可能で

あっても COG の MPF が低い値を示すことについて明らかにすることができていないことから、その点について慎重に判断する必要がある。

これまで考察してきたように、片脚膝立ち位保持において階層性に注目することで COG 制御および COP 制御の関係を説明できることは、検査・治療の意義を考える上で重要な示唆を与えてくれている。関節運動の調節能を間接的に評価し、それが動作に与える影響を検討できる可能性を示しているからである。今後、COP 制御に注目して運動学および運動力学的な検討を加えることにより、検査・治療としての意義をより明確にできるものと考えている。

引用文献

- 1) Jason K, Ryuichi G, Michelle H, et al.: Effects on tibiofemoral biomechanics from kneeling. Clin Biomech, 2011, 26(6): 605-611.
- 2) Kurosaka M, Yoshiya S, Mizuno K: Maximizing flexion after total knee arthroplasty the need and the pitfalls. J Arthroplasty, 2002, 17(4): 59-62.
- 3) Moon M, Moon J: Range of motion after total knee replacement: a review from the East. Curr Orthopaed, 2000, 14(4): 302-308.
- 4) Mulholland S, Wyss U: Activities of daily living in non-Western cultures: range of motion requirements for hip and knee joint implants. Int J Rehabil Res, 2001, 24(3): 191-198.
- 5) 藤澤宏幸: 姿勢の定義と分類の再考. 理学療法の歩み, 2013, 24(1): 31-34.
- 6) 倉山太一, 影原彰人, 村越大輝・他: 膝立ち運動が脳卒中片麻痺患者の立位バランスに与える即時的効果. 総合リハ, 2011, 39(8): 791-794.
- 7) 川上真吾: 片脚膝立ち位保持時間と股関節外転筋における筋力発揮特性との関係. 理学療法の歩み, 2014, 25(1): 42-46.
- 8) 田中 敏, 山際勇一郎: ユーザーのための教育・心理統計と実験計画法. 教育出版, 東京, 2011, pp188-189.
- 9) Bohannon R, Leary K: Standing balance and function over the course of acute rehabilitation. Arch Phys Med Rehabil, 1995, 76(11): 994-996.
- 10) Winter D: Biomechanics and Motor Control of Human Movement 2nd, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 1990, pp85-88.
- 11) King D, Zatsiorsky V: Periods of extreme ankle displacement during one-legged standing stance. Gait Posture, 2002, 15(2): 172-179.
- 12) Tropp H, Odenrick P: Postural control in single-limb stance. J Orthop Res, 1988, 6(6): 833-839.
- 13) Hoogviet P, Van W, Johan V, et al.: A model for the relation between the displacement of the ankle and the center of pressure in the frontal plane, during one-leg stance. Gait Posture, 1997, 6(1): 39-49.
- 14) Davis B, Grabiner M: Modeling effects of muscle fatigue on unilateral postural control. J Appl Biomech, 1996, 12(2): 173-184.