母趾末節底部の触圧覚刺激が 足圧中心トラッキング動作に及ぼす影響

The Effect of Stimulation of the Mechanoreceptors in the Big Toe Sole on Tracking Movement of the Center of Foot Pressure

竹内 弥彦¹⁾ 武村 珠里¹⁾ 櫻井 健弘¹⁾ 山田 雅子¹⁾ 吉村実千晴¹⁾

YAHIKO TAKEUCHI, RPT, PhD¹⁾, SHURI TAKEMURA, PTS¹⁾, TAKEHIRO SAKURAI, PTS¹⁾,
MASAKO YAMADA, PTS¹⁾, MICHIHARU YOSHIMURA, PTS¹⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Chiba Prefectural College of Allied Medical Science: 111 Hanawa, Chuo-ku, Chiba-shi,
Chiba 260-8702, Japan. TEL +81 43-266-9002

Rigakuryoho Kagaku 23(1): 91-95, 2008. Submitted Aug. 8, 2007. Accepted Sep. 4, 2007.

ABSTRACT: The purpose of this study was to investigate the effect of the stimulation of mechanoreceptors in the sole of the big toe on tracking movement of the center of foot pressure. The subjects were 15 healthy students. We set 2 conditions, namely, no stimulation of the bare foot and stimulation of the sole of the big toe using rubber balls. On the force plate, we set the tracking movement such that the center of foot pressure corresponded with the target point projected on a monitor at the front for the task. The items evaluated in the task were rise time, positional error of the target point, improvement rate of the error, deflection velocity of the center of foot pressure, and deflection acceleration value. According to the results, under the condition in which the sole of the first toe was stimulated, the improvement rate of the positional error significantly increased. Furthermore, the deflection velocity and the acceleration of the center of foot pressure significantly decreased. These results demonstrate that an increase in the information transmitted from the mechanoreceptors of the sole of the big toe on the tracking movement of the center of foot pressure contributes to correction of the positional error of the target point and the stability of the deflection of the center of foot pressure.

Key words: the big toe sole, the mechanoreceptor, tracking movement of the center to foot pressure

要旨: 本研究の目的は、母趾末節底部の触圧覚刺激が足圧中心トラッキング動作（動的バランス）に与える影響を明らかにすることである。対象は健康学生15名とした。刺激条件は裸足での刺激なしと母趾末節底部をゴム球で刺激する2条件とした。フォースプレート上で、前方のモニターに映しだされる目標点に足圧中心を一致させるトラッキング動作を課題とした。課題における評価項目は、立ち上がり時間、目標点との誤差、誤差の改善率、足圧中心の動揺速度および動揺加速度とした。結果は、母趾末節底部に刺激を負荷した条件で、誤差の改善率が有意に高くなり、さらに、足圧中心動揺速度と加速度が有意に低下した。本研究の結果から、トラッキング動作における母趾末節底部の触圧感覚情報の増加は、目標点との位置誤差の修正と足圧中心動揺の安定性に関与していることが明らかとなった。

キーワード: 母趾末節底部, 触圧感覚, 足圧中心トラッキング動作

1) 千葉県医療技術大学校 理学療法学科: 千葉県千葉市中央区花輪111 (〒260-8702) TEL 043-266-9002

受付日 2007年8月8日 受理日 2007年9月4日

I. 緒 言

体性感覚、ことに足底部の触圧感覚からのフィードバック情報は、ヒトの立位姿勢調節機構において、重要な役割を担っている。立位姿勢調節における足底感覚情報については、足底の部位別に異なる役割を有する可能性が先行研究により示されている¹⁻⁵⁾。加えて、本部⁶⁾は足底部軟部組織における知覚神経終末の分布について、マيسナー小体を含む乳頭が第一中足骨頭部で最も発達し、次いで母趾末節底側中央部で発達していることを報告しており、井原ら⁷⁾も母趾末節底部に触圧感覚受容器の分布密度が高いことを報告している。さらに浅井ら¹⁾の報告では、足底部位別での二点閾値を測定した結果、母趾部が最も小さく、母趾部の表在感覚能が高いことが明らかにされている。

藤原ら^{8,9)}は足圧中心を指標とした立位姿勢の安定性と足趾圧、足部周囲筋活動の関係について、踵から足長の60%より前方の位置で足趾圧が急増し、さらに75%より前方では母趾屈筋である母趾外転筋の活動量と安定性に高い相関を認めている。このように、足圧中心の前方移動動作には、足趾、特に母趾の支持機構としての関与が大きいことが推測される。

以上のことから、母趾末節底部は他の足底部位に比較して接地面からの情報をより多く知覚できる可能性があり、それに加え、足圧中心前方移動時の姿勢の安定性に関与していることが示唆される。足底感覚を刺激した際の立位バランスへの影響に関する先行研究は静的バランスとの関係について検討しているものが多く^{3,10,11)}、刺激部位も中足骨頭部をふくめた前足部や足底部全体を対象としている。さらに、冷却や局所麻酔により足底感覚情報を減少させる方法を用いて、動的バランスとの関係について報告している研究も散見されるが¹²⁻¹⁴⁾、足底部位別での機能を確認するには、刺激の持続や操作の簡易性などの観点から、足底感覚情報を増加させる方法が適していると考えられ、先行研究¹⁰⁾においても、足底部の受容器刺激は求心性のインパルスを増加させることが明らかにされている。しかし、前述した母趾末節部の特性を踏まえ、動的バランスとの関連について報告している研究は見当たらない。足底部位別に触圧感覚情報を増加させた際の動的バランスへの影響を評価し、足底各部位の役割を明らかにしていくことで、理学療法アプローチへの応用範囲も広がることが予想される。

本研究では、動的バランスの評価に視覚、触圧感覚からのフィードバックを必要とする足圧中心のトラッキ

ング動作を用い、母趾末節底部の触圧感覚を刺激した際の動的バランスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

II. 対象と方法

対象は、千葉県医療技術大学校に在学している健常学生15名（男性8名、女性7名）とした。平均年齢 22.3 ± 4.2 歳、身長 165.7 ± 6.5 cm、体重 58.9 ± 9.0 kgであった。被験者には、実験の趣旨を十分に説明し、書面にて同意を得た後に実験を行った。

トラッキング課題における目標点を設定するため、トラッキング動作の測定に先立ち、足圧中心の前方最大移動距離を計測した。被験者は左右分離型フォースプレート（Anima製 G-6100、サンプリング周期5 ms）上で、裸足にて両足内側縁を10 cm離し、左右のプレートにそれぞれの足を位置した。測定肢位は上肢を胸部の前方で軽く組み、股関節と膝関節は伸展位を保持し、足関節を軸に重心を前方移動させる運動方略を指示した。計測ソフト（Anima製 動的重心動揺解析ソフト）にて、安静立位時の足圧中心位置をフォースプレートの原点に設定し、前方最大移動距離の90%の位置をトラッキング課題における目標点とした。

フォースプレート上の被験者の前方150 cmの位置、および視線の高さに17インチ液晶ディスプレイ（Liquid Crystal Display ; LCD, I-O DATA製）を設置し、被験者の足圧中心と目標点を同時に表示した（図1）。

被験者には「目標点の位置に自己の足圧中心を、できるだけ早く、しかも正確に一致させるように移動する」

図1 目標点と足圧中心を表示したLCD画面

という課題を与えた。この際の上肢の位置と運動方略は、前述した足圧中心の前方最大移動距離の測定時と同様とし、被験者が通常使用している眼鏡、コンタクトレンズなどはそのままの装用とした。

計測は被験者ごとに裸足（刺激なし）と両側の母趾末節底部を刺激した状態（刺激あり）の2条件をランダムに施行した。さらに、トラッキング動作の学習効果に配慮し、健常被験者におけるトラッキング動作の再現性が4回目以降に安定するとの小堀ら¹⁵⁾の報告に基づき、4回の課題動作試行後、5回目の記録データを採用した。

母趾末節底部の刺激素材は、高さ1 mm、幅2 mmのゴム球を2 mm間隔で木綿素材に敷き詰めたものを用い、被験者には痛みのないことを確認した。足底刺激と脛骨神経のインパルス発射頻度に関して、大久保¹⁰⁾は直径2 mmの鉄球を2 cm間隔で敷き詰めた刺激板よりも1 cm間隔での刺激時、すなわち刺激材の間隔が狭い方が、より神経発射が増大することを報告している。本研究の刺激部位は母趾末節底部であるため、その接地面積の大きさも考慮し、刺激材を2 mm間隔で配置し、さらに被験者の内省報告で、ゴム球を別々に知覚できることを確認した。

刺激の負荷方法は、各被験者の母趾末節底部の広さにカットした刺激材を母趾末節底部に敷いた状態で、前述のトラッキング課題を実施した。よって、刺激強度は被験者の自重とし、刺激時間は課題動作施行時間とした。

トラッキング動作の制御成績の評価は、先行研究^{15,16)}で用いられている手法を参考に、以下の項目について算出した（図2）。

- ・ 立ち上がり時間（Rise Time ; RT）：動作開始後、足圧中心の位置が目標値の90%に到達するまでの時間。

図2 トラッキング動作の評価項目の定義

- ・ 誤差（Error ; ER1・ER2）：目標値の90%に到達してからの、2秒間ずつの目標値と足圧中心位置との誤差の平均値。
- ・ 誤差の改善率（Improvement rate ; IMP）：ER1をER2で除した値（次式）。誤差の減衰率を表す指標。

$$IMP = ER1/ER2 \quad (\text{式})$$

さらに、ER1とER2の区間における足圧中心の

- ・ 動揺速度（左右方向：Vel X, 前後方向：Vel Y）
- ・ 動揺加速度（左右方向：Acc X, 前後方向：Acc Y）

これらの項目について、刺激なしと刺激ありの2条件間の平均値の差を比較した。統計処理には対応のあるt検定を用い、有意水準は1%未満とした。

加えて、先行研究¹⁵⁾によりRTとER1の間には相関関係があることが認められているので、RTとER1、ER2との相関関係をPearsonの積率相関係数を用いて分析した。

III. 結 果

トラッキング動作の評価値の結果を表1に示す。ER2は、刺激なし条件 0.69 ± 0.42 cm, 刺激あり条件 0.38 ± 0.29 cmであり、刺激あり条件で有意な減少を認めた ($p < 0.01$)。IMPは、刺激なし $94.1 \pm 41.0\%$, 刺激あり $226.4 \pm 149.1\%$ であり、刺激あり条件で有意な改善を認めた ($p < 0.01$)。RT, ER1は、条件間で有意な差は認めなかった。

足圧中心動揺の速度と加速度の結果を表2に示す。ER1では、各項目において条件間に有意な差は認めなかった。ER2において、Vel Yでは刺激なし 2.51 ± 1.1 cm/s, 刺激あり 1.37 ± 0.47 cm/sで、刺激あり条件で有意に動揺速度の低下を認めた ($p < 0.001$)。Acc Yでは、刺激なし 33.7 ± 10.2 cm/s², 刺激あり 22.2 ± 8.0 cm/s²で、刺激あり条件で有意に動揺加速度の低下を認めた ($p < 0.001$)。Vel X, Acc Xでは、条件間で有意な差は認めなかった。

RTとER1, ER2間の相関分析の結果、両条件ともに各項目間で有意な相関関係は認めなかった。刺激なし条件では、RTとER1との相関係数は0.35, RTとER2の相関係数は0.03であった。刺激あり条件では、RTとER1の相関関係は-0.29, RTとER2の相関係数は-0.16であった。

IV. 考 察

足圧中心トラッキング動作の評価値について、小堀ら¹⁵⁾はRTとER1の間に負の相関関係を認めたことから、RTを小さくしようするとオーバーシュートしてER1が大きくなり、逆にER1を小さくしようするとRTが大き

表1 トラッキング動作における評価値 (mean±SD)

条件	RT (s)	ER1 (cm)	ER2 (cm)	IMP (%)
刺激なし	2.8 ± 0.9	0.53 ± 0.1	0.69 ± 0.4	94.1 ± 41.0
刺激あり	2.5 ± 0.9	0.61 ± 0.3	0.38 ± 0.3	226.4 ± 149.1

* : p<0.01

表2 ER1, ER2区間における足圧中心動揺速度と加速度 (mean±SD)

区間	条件	Vel X (cm/s)	Vel Y (cm/s)	Acc X (cm/s ²)	Acc Y (cm/s ²)
ER1	刺激なし	1.54 ± 0.7	2.80 ± 0.9	14.1 ± 6.8	42.2 ± 15.4
	刺激あり	1.39 ± 0.4	2.93 ± 1.1	13.8 ± 3.4	33.4 ± 8.7
ER2	刺激なし	1.19 ± 0.6	2.51 ± 1.1	12.9 ± 5.5	33.7 ± 10.2
	刺激あり	1.34 ± 0.5	1.37 ± 0.5	13.0 ± 6.5	22.2 ± 8.0

** : p<0.001

くなるという関係を見出し、反応性を見るには両者の指標を同時に検討する必要性があるとしている。さらに、RTとER2との間には有意な相関関係を認めなかったことから、ER2は身体重心を移動してからの安定性を見る独立した評価値であるとしている。

本研究の結果では、両条件ともに、RTとER1, ER2の間に有意な相関関係は認めなかった。加えて、刺激負荷の条件間ではRT, ER1では有意な差は認めず、ER2, IMPにおいて有意な差を認めた。すなわち、母趾末節部の触圧覚刺激により、ER2区間における誤差が有意に減少し、結果、誤差の減衰率が大きくなった。このことは、母趾末節部の触圧覚刺激は、トラッキング動作時の足圧中心移動の運動スピードに与える影響は少なく、目標点に達してからの安定性（正確性）に影響を及ぼしていることが示唆される。さらに、本研究の結果ではRTとER1の間にも有意な相関関係は認めていないものの、前述した小堀ら¹⁶⁾のER2が身体重心移動後の安定性を評価する指標との結論を支持できる結果となった。

中村ら¹⁷⁾は随意運動における運動制御に関して、目標に向かって動いている身体部位からの感覚入力の連続的フィードバックを受けるフィードバック制御（修正運動；corrective movement¹⁸⁾）と、運動が開始してから何の変更もなく終わりまで遂行されるフィードフォワード制御（ballistic movement）の2通りが利用されており、日常動作の過程では、この両者が併用されるとしている。この理論を本研究の結果にあてはめると、目標点までの足圧中心の移動に関与する時間（RT）および目標点に

到達してから2秒間の誤差修正（ER1）はフィードフォワード制御を利用した運動制御を反映しており、ER1から2秒間の誤差修正（ER2）は母趾末節底部の触圧感覚情報からのフィードバックを利用した運動制御を反映していることが考えられる。これらから、刺激あり条件で誤差の減衰率が有意に大きくなったことは、母趾末節底部の触圧感覚からのフィードバック情報が増加したことにより、修正運動であるER2において目標点との誤差が有意に小さくなったことが要因として考えられる。

さらに、ER1とER2区間における足圧中心動揺速度と加速度の結果から、ER2区間の刺激あり条件において、前後方向の速度と加速度が有意に低下している。足圧中心動揺速度の解釈として、Fernieら¹⁹⁾は205例の高齢者を対象に、転倒頻度と足圧中心動揺速度との関連を調べた結果、転倒経験のある者は転倒経験のない者に比較し、動揺速度が有意に速いことを報告している。さらに、迷路障害や小脳障害を有する疾患では、動揺速度の増加を示すとの報告もある²⁰⁾。このように、足圧中心の動揺速度やその時間変化率である加速度は、姿勢の安定性の指標と考えられることから、今回の結果より、母趾末節底部の触圧感覚情報の増加は、目標点到達後の修正運動において、足圧中心の前後方向の安定性に関与していることが推測される。

以上より、前方への足圧中心トラッキング動作における母趾末節底部の触圧感覚情報の増加は、目標点到達後の修正運動時期に関連した位置誤差の修正や安定性に関与する足圧中心の動揺速度と加速度の低下に影響

を及ぼすことが明らかとなった。このことは、人工関節置換術後や下肢骨折後などの部分荷重時などに用いられるtoe touchによる下肢荷重量のコントロール練習や、随意的に身体重心を移動し制御する前方への動的バランストレーニングなどに応用可能と思われる。

引用文献

- 1) 浅井 仁, 藤原勝夫, 奈良 勲・他: 健康人の足底の二点域値の冷却による影響. 金大医短紀要, 1990, **14**: 61-66.
- 2) 片平清昭, 岩崎祥一, 塚原 進・他: 立位姿勢における身体動揺と足底部位圧. 姿勢研究, 1987, **7**: 7-12.
- 3) Kavounoudias A, Roll R, Roll JP: The planter sole is a 'dynamometric map' for human balance control. Neuroreport, 1998, **9**: 3247-3252.
- 4) 竹内弥彦: 足底各部の機械受容感覚刺激が足圧中心移動範囲に及ぼす影響. 理学療法学, 2002, **29**: 250-254.
- 5) Meyer PF, Oddsson LI, De Luca CJ: The role of plantar cutaneous sensation in unperturbed stance. Exp Brain Res, 2004, **4**: 505-512.
- 6) 本部紹一: 足底部軟部組織における知覚神経終末の形態ならびに分布に関する研究. 日整会誌, 1967, **41**: 275-287.
- 7) 井原秀俊, 中山彰一: 関節トレーニング. 協同医書出版, 東京, 1992, pp63-67.
- 8) 藤原勝夫, 池上晴夫, 岡田守彦: 立位姿勢における足圧中心位置およびその規定要因に関する一考察. 姿勢研究, 1984, **4**: 9-16.
- 9) 藤原勝夫, 池上晴夫, 岡田守彦: 立位姿勢の安定性と下肢筋の相対的筋負担度との関係. 筑波大学体育科学系紀要, 1985, **8**: 165-171.
- 10) 大久保仁: 足趾受容器の立ち直りに関する役割について. 耳鼻臨床, 1986, 補7: 26-32.
- 11) 稲村欣作, 河合 学, 青木賢一・他: スタビログラムの低周波成分について—約1分前後の周期をもと周波数成分と機械受容感覚情報との係わり—. 姿勢研究, 1986, **6**: 1-11.
- 12) 浅井 仁, 奈良 勲, 立野勝彦・他: 極低温空気による足底冷却が安静時立位姿勢調節及び有効支持基底面の広さに及ぼす影響. 理学療法学, 1991, **18**: 19-25.
- 13) Fujiwara K, Asai H, Miyaguchi A, et al.: Perceive standing position after reduction of foot-pressure sensation by cooling the sole. Percept Mot Skill, 2003, **96**: 381-399.
- 14) Meyer PF, Oddsson LI, De Luca CJ: Reduced plantar sensitivity alters postural responses to lateral perturbations of balance. Exp Brain Res, 2004, **157**: 526-536.
- 15) 小堀 聡, 米田稔彦, 廣島和夫・他: 床反力作用点のトラッキング動作から見た動的平衡機能の評価. バイオメカニズム, 1988, **9**: 187-194.
- 16) 大西 昇, 土屋和夫, 長井 進・他: 動的立位バランスの測定と評価方法について. 人間工学, 1980, **6**: 253-262.
- 17) 中村隆一, 斉藤 宏, 長崎 浩: 基礎運動学. 医歯薬出版, 東京, 2003, pp128-139.
- 18) 宮本省三, 沖田一彦 (選): 運動制御と運動学習. 協同医書出版, 東京, 1997, pp269-293.
- 19) Fernie GR, Gryfe CI, Holliday PJ, et al.: The relationship of postural sway in standing to the incidence of falls in geriatric subjects. Age Ageing, 1982, **11**: 11-16.
- 20) 時田 喬: 重心動揺検査. アニマ株式会社, 東京, 2006, pp10-13.