二重課題条件下での歩行時 toe clearance の 最小値と下肢関節角度との関連性

*Relationship between Minimum Toe Clearance and Sagittal Joint Angles of the Lower
Extremity during Walking under Single- and Dual-task Conditions*

大泉 真一¹⁾ 佐々木 賢太郎²⁾ 木村 剛³⁾ 矢代 郷⁴⁾

SHINICHI OIZUMI, RPT¹⁾, KENTARO SASAKI, RPT, MSc²⁾, TSUYOSHI KIMURA, PhD³⁾, GO YADAI, RPT⁴⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Keiju Medical Center: 94 Tomioka-cho, Nanao-shi, Ishikawa 926-8605, Japan
TEL +81 767-52-3211, E-mail: zrjdyzhs@gmail.com

²⁾ Course of Rehabilitation, Graduate School of Rehabilitation, Kinjo University Graduate School

³⁾ Department of Social Welfare, Kinjo University

⁴⁾ Department of Rehabilitation, Toyama University Hospital

Rigakuryoho Kagaku 32(2): 201–205, 2017. Submitted Sep. 26, 2016. Accepted Nov. 9, 2016.

ABSTRACT: [Purpose] The aim of this study was to examine the relationship between minimum toe clearance (MTC) and sagittal joint angles during walking under single- (ST) and dual-task (DT) conditions. [Subjects and Methods] There were 15 older (68.8 ± 4.9 years) and 15 younger (23.2 ± 2.9 years) participants. Gait kinematics (non-dominant side MTC and sagittal angles) were evaluated under the two conditions: walking normally (ST), and walking while performing a calculation (DT). [Results] In the younger group, MTC correlated with knee flexion angles under the ST and DT conditions, while MTC correlated negatively with pelvic anteversion in the older group, especially under the DT condition. [Conclusion] These results suggest that cognitive tasks that tilt the pelvis forward may decrease the MTC, and may lead to falls during walking.

Key words: dual-task, minimum toe clearance, lower limb angle

要旨:〔目的〕二重課題条件 (dual task : DT) での歩行で高齢群と若年群の toe clearance の最小値 (minimum toe clearance : MTC) と下肢関節角度の関連性を検討すること。〔対象と方法〕対象は高齢群 15 名と若年群 15 名とした。測定方法は三次元動作解析装置を用い、通常の歩行と、ディスプレイに映写された 1 桁の足し算を解答しながらの DT 歩行をそれぞれ 2 回実施した。歩行中の MTC, および骨盤、股関節、膝関節、足関節の矢状面上の非利き足の下肢関節角度を抽出した。〔結果〕高齢群の MTC は股関節屈曲、骨盤前傾角度に負の相関関係が認められた。〔結語〕計算課題の付加により高齢者はディスプレイを注視するために骨盤を前傾することで、転倒リスクを高める可能性が示唆された。

キーワード: 二重課題, minimum toe clearance, 下肢関節角度

¹⁾ 社会医療法人財団董仙会 恵寿総合病院 リハビリテーション部 理学療法課: 石川県七尾市富岡町 94 (〒926-8605)
TEL 0767-52-3211

²⁾ 金城大学大学院 リハビリテーション学研究科

³⁾ 金城大学 社会福祉学部

⁴⁾ 富山大学附属病院 リハビリテーション部

I. はじめに

転倒は加齢に伴い急激に増加しており、転倒の発生件数は年ごとに増加している¹⁾。この30年間で、転倒による外傷の発生率が1.3倍まで増加しており、2030年には発生率が2倍以上になることが予想されている¹⁾。それに伴う骨折により医療・介護費用が膨張しており、続発する骨折を防ぐことが重要となる²⁾。転倒の発生状況を調査した報告³⁾では、屋外よりも屋内での転倒発生数が上位を占めており、とくに寝室や居室、台所などの生活の中心となる場所での発生が多く、生活用品や障害物などにつまずくことや滑ることで転倒していることが予想される。この事実は、生活空間における様々な障害物に対して注意・認知力と協調的な運動機能が必要であることを示唆している。転倒を予測するための評価方法として二重課題(dual-task:DT)条件下による歩行テストがある⁴⁾。DT歩行による転倒予測因子として、転倒者は歩行中のつま先の高さのばらつき⁵⁾、非利き足を高く上げる⁶⁾など、つまずきに関連するものが挙げられている。つまずきは転倒の最多要因である⁷⁾ため、転倒予防には「つまずき」をバイオメカニカルな観点から解析していくことが肝要と考える。

歩行中のつまずきは主に遊脚初期から遊脚中期に生じている⁸⁾。遊脚期におけるtoe clearanceの最小値(minimum toe clearance:MTC)がつまずきに影響していることが考えられ、Naganoら⁶⁾は遊脚相開始25%時点でのつま先の高さがMTCに関連しており、遊脚初期、あるいはそれ以前のpush off(前遊脚期)がMTCに影響を与えていると推察している。また、つま先の高さを維持するためには立脚後期の足底筋の働きが重要であり⁶⁾、これは遊脚期でのMTCの維持には立脚後期の足関節の制御が重要であることを示している。以上のことから、遊脚期で生じるつまずきを解析するためには、立脚期後半の関節運動からとらえていく必要がある。

Sadeghiら⁹⁾は、右足と左足では機能差があることを報告しており、右足(利き足)はpush offで強く作用しているのに対し、左足(非利き足)は立脚期の緩衝や体幹制御に関与していると考察している。この非利き足の特性を考慮すると、非利き足の遊脚期での制御が低下していることが想定される。また、加齢に伴い、非利き足は利き足よりも筋力が低下する¹⁰⁾ため、転倒時の姿勢制御が低下していることも予測される。そこで、本研究では非利き足のMTCに焦点を当て、若年者と高齢者のDT条件でつま先の高さに関連する矢状面上の下肢関節角度を明らかにすることで、つまずきに起因する歩行特性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、運動器系、神経系の異常がなく、認知機能が保たれており、日常生活が自立している地域在住高齢者15名(男性8名、女性7名、平均年齢 68.8 ± 4.9 歳、平均BMI 21.3 ± 2.8 kg/m²)とし、対照群は若年者15名(男性8名、女性7名、平均年齢 20.5 ± 1.3 歳、平均BMI 23.2 ± 2.9 kg/m²)とした。本研究はプライバシーおよび尊厳を遵守し、ヘルシンキ宣言に則って実施した。対象者には、研究開始前に研究内容や予測されるリスク、倫理的配慮について口頭と書面にて説明し、実施承諾書による同意を得て実施した。また、本研究は研究開始前に金城大学研究倫理委員会の承認を得た(通知番号26-08号)。

2. 方法

測定には三次元動作解析装置VICON(VICOM MX, Oxford Metrics社製)、65インチのディスプレイ(TH-65PB2J, Panasonic社製)を使用した。カメラ8台を使用し、各マーカーの三次元空間座標をサンプリング周波数100 Hzにて計測し、パーソナルコンピュータに取り込んだ。測定環境として10 mの平坦な直線を設定し、その前方にディスプレイを配備した。何も映されていないディスプレイを注視しながら快適速度での歩行(single-task:ST)とディスプレイに映し出された1桁の足し算を解答しながらの歩行(DT条件下歩行:DT歩行)の2条件で行った。なお、全被検者には歩行開始地点からディスプレイに映る足し算が確実に読み取れることを予め確認し、計測を開始した。なお、本研究で転倒などの有害事象はなかった。

被検側は非利き足として、投球側と同側の下肢を利き足とした。歩行中のMTC、股関節、膝関節、足関節、骨盤の矢状面上の関節角度を抽出した。反射マーカー(14 mm)を、Plug-In Gait全身モデルに従って貼付した。また、MTC測定のため左右母趾爪上に2個の反射マーカーを追加貼付した。測定手順として、測定する歩行周期はランチョ・ロス・アミーゴの歩行周期に沿って相分けた。ST歩行、DT歩行ともに数回の練習の後、ST歩行、DT歩行の順で2回の計測を施行し、2施行の平均値を求めてSTとDTでの下肢関節角度とMTCの相関関係を検討した。

MTCを抽出する歩行周期は立脚後期(terminal stance:TSt)、前遊脚期(pre swing:PSw)、遊脚初期(initial swing:ISw)、遊脚中期(mid swing:MSw)とした。MTCは遊脚期における両母趾爪上のマーカーの垂直方向の軌跡から床面に最も接近した距離を抽出した。MTCとTSt、PSw、ISw、MSwの矢状面上の下肢関節角度の関連性について検討した。角度は正の値を屈

曲（背屈）、骨盤前傾とし、負の値は伸展（底屈）、骨盤後傾で表した。

統計的処理として統計ソフトウェア PASW statistics18.0 を用い ST, DT それぞれの MTC と各期における下肢関節角度の関連性について、Shapiro-Wilk 検定を行い、正規性が認められれば Pearson の積率相関係数を用い、正規性が認められなければ Spearman の順位相関係数を用いて、ST, DT それぞれで検討した。すべて 5%水準にて有意判定を行った。

III. 結 果

両群の MTC と各期における平均関節角度を表 1、MTC と関節角度の関連性を表 2 に示した。

若年者の ST 歩行における MTC では、MSw ($r=0.43$, $p<0.05$), ISw ($r=0.50$, $p<0.01$), PSw ($q=0.56$, $p<0.01$) の膝関節屈曲角度, PSw ($r=0.46$, $p<0.05$) の股関節伸屈曲度, TSt ($q=0.39$, $p<0.05$) の足関節背屈角度と有意な正の相関関係が認められた。DT 歩行では MSw ($q=0.52$, $p<0.05$), ISw ($r=0.43$, $p<0.05$), PSw ($r=0.41$, $p<0.05$) の膝関節屈曲角度と正の相関関係が認められた (表 2)。

一方、高齢群の ST 歩行では ISw ($q=-0.45$, $p<0.05$)

での骨盤前傾にのみ負の相関関係が認められた。DT 歩行では MSw ($q=-0.63$, $p<0.01$), ISw ($q=-0.60$, $p<0.01$), PSw ($r=0.65$, $p<0.01$) まで骨盤前傾に負の相関関係が認められ、TSt では股関節伸展 ($q=-0.45$, $p<0.05$), 骨盤前傾 ($r=-0.66$, $p<0.01$) に負の相関関係が認められた (表 2)。

DT 歩行中の足し算の成績結果では若年者では正答率が $99.3 \pm 2.0\%$ 、高齢者では $97.2 \pm 3.8\%$ で有意な差は認められなかった。

IV. 考 察

本研究結果より、MTC と関連する各期の関節角度は、若年群の ST 歩行では TSt での足関節背屈角度、PSw での股関節屈曲角度、PSw, ISw, MSw の膝関節屈曲角度と中程度の正の相関関係が認められた。一方、高齢群の ST 条件では唯一、ISw の骨盤前傾の増加と MTC は負の相関関係が認められ、DT 条件では本研究で採用したすべての期において骨盤前傾角度は MTC と負の関連性を認めた。

若年群の ST 条件において立脚期後半からの膝関節屈曲角度が MTC と正の相関を認めた。歩行周期の中で膝関節が最も屈曲するのは MSw とされており¹¹⁾、PSw

表 1 各期における平均関節角度

	若年群		高齢群	
	single-task	dual-task	single-task	dual-task
MTC (mm)	68.11 $\pm$ 10.5	60.77 $\pm$ 7.6	64.95 $\pm$ 12.6	70.92 $\pm$ 10.7
遊脚中期 (°)				
骨盤角度	5.01 $\pm$ 5.1	5.40 $\pm$ 5.7	12.48 $\pm$ 4.5	12.41 $\pm$ 3.7
股関節角度	24.04 $\pm$ 7.4	24.01 $\pm$ 7.6	29.12 $\pm$ 6.9	30.69 $\pm$ 6.8
膝関節角度	48.86 $\pm$ 7.1	47.20 $\pm$ 6.9	47.37 $\pm$ 12.9	49.80 $\pm$ 10.3
足関節角度	0.71 $\pm$ 3.8	0.44 $\pm$ 3.8	1.61 $\pm$ 4.6	1.69 $\pm$ 4.0
遊脚初期 (°)				
骨盤角度	4.45 $\pm$ 5.1	4.45 $\pm$ 5.3	12.17 $\pm$ 4.4	12.01 $\pm$ 3.8
股関節角度	9.02 $\pm$ 7.1	7.19 $\pm$ 6.0	16.26 $\pm$ 8.9	17.89 $\pm$ 7.9
膝関節角度	58.62 $\pm$ 6.2	57.40 $\pm$ 5.8	52.81 $\pm$ 13.8	54.55 $\pm$ 12.0
足関節角度	-9.75 $\pm$ 5.3	-10.52 $\pm$ 4.9	-7.77 $\pm$ 6.7	-6.21 $\pm$ 5.1
前遊脚期 (°)				
骨盤角度	4.16 $\pm$ 5.5	4.11 $\pm$ 5.4	12.22 $\pm$ 4.3	11.95 $\pm$ 3.7
股関節角度	-13.74 $\pm$ 7.5	-14.76 $\pm$ 6.9	-2.3 $\pm$ 11.8	-2.59 $\pm$ 10.1
膝関節角度	29.62 $\pm$ 7.1	28.52 $\pm$ 8.0	31.37 $\pm$ 7.4	31.38 $\pm$ 6.9
足関節角度	-17.85 $\pm$ 6.9	-18.81 $\pm$ 6.4	-15.47 $\pm$ 8.4	-13.65 $\pm$ 7.4
立脚後期 (°)				
骨盤角度	4.45 $\pm$ 5.1	3.95 $\pm$ 4.8	12.8 $\pm$ 4.2	12.38 $\pm$ 3.7
股関節角度	-21.1 $\pm$ 6.7	-22.02 $\pm$ 6.3	-12.94 $\pm$ 6.7	-12.99 $\pm$ 5.9
膝関節角度	7.06 $\pm$ 4.2	5.93 $\pm$ 5.4	9.14 $\pm$ 12.1	6.52 $\pm$ 3.6
足関節角度	6.49 $\pm$ 6.5	5.69 $\pm$ 6.8	5.25 $\pm$ 4.1	6.78 $\pm$ 3.8

平均値 $\pm$ 標準偏差。MTC: minimum toe clearance. 正值: 股・膝関節屈曲, 足関節背屈, 骨盤前傾, 負値: 股・膝関節伸展, 足関節底屈, 骨盤後傾。

表2 MTC と下肢関節角度との関連性 (相関係数)

	若年群		高齢群	
	single-task	dual-task	single-task	dual-task
MTC (mm)	68.16 ± 10.5	60.77 ± 7.6	64.95 ± 12.6	70.92 ± 10.7
遊脚中期 (°)				
骨盤角度	0.11	-0.03	-0.37	-0.63**
股関節角度	0.30	0.11	-0.13	-0.38
膝関節角度	0.43*	0.52*	0.32	0.25
足関節角度	0.29	0.05	0.26	0.15
遊脚初期 (°)				
骨盤角度	0.09	-0.15	-0.45*	-0.60**
股関節角度	0.27	0.19	-0.24	0.04
膝関節角度	0.50**	0.43*	0.28	0.02
足関節角度	0.34	0.25	0.01	0.31
前遊脚期 (°)				
骨盤角度	0.08	-0.15	-0.35	-0.65**
股関節角度	0.46*	0.20	-0.33	-0.28
膝関節角度	0.56**	0.41*	-0.24	0.04
足関節角度	0.09	-0.01	-0.15	0.07
立脚後期 (°)				
骨盤角度	0.12	-0.14	-0.32	-0.66**
股関節角度	0.28	0.00	-0.28	-0.45*
膝関節角度	0.20	-0.05	-0.28	-0.15
足関節角度	0.39**	-0.02	0.13	0.19

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$.

の時点で膝関節の受動的な屈曲が MSw での MTC の維持につながる¹²⁾。Nagano ら⁶⁾は遊脚相開始 25% 時点での足部垂直高が MTC に影響を及ぼすことを示しており、MTC の維持には PSw 時点の膝関節屈曲の重要性を示唆している。また、つま先の高さを維持する戦略として TSSt での股関節伸展と、それに後続する足関節底屈が重要で、中でも TSSt での股関節伸展が最も影響を及ぼす⁶⁾。TSSt のいわゆる **trailing position** は遊脚期までの推進力の原動力であり、この期における股関節伸展は遊脚時の股関節を屈曲させるための慣性力をもたらし、**stretch-shortening cycle** によって効率的に下肢の振り出しが可能になる¹³⁾。以上のことから、MTC の維持には TSSt からの下肢の制御が重要であると考えられる。

一方、若年者の DT 条件では、TSSt の足関節背屈、PSw の股関節屈曲との関連性は認められず、PSw、ISw、MSw の膝関節屈曲のみと相関関係を認めた。この要因として、認知課題による脳への干渉効果から、歩行中の運動制御が変化したものとする。DT による脳への干渉効果は 2 つの課題を同時に行うことには限界があり、同時課題の実行では必要な注意資源の容量に制限がある¹⁴⁾。そのため、DT 歩行での MTC と関連するのは膝関節のみとなることは、前述した TSSt での **trailing position** を阻害し MTC を低下させる要因となると考えられる。

高齢群の ST 条件では、ISw の骨盤の前傾角度増加に MTC の低下と関連性が示されたのに対し、DT 条件では、ISw だけでなく、TSSt、PSw、MSw の骨盤の前傾角度と MTC に負の関連性が認められた。転倒経験者は非経験者に比べて、歩行中の体幹の平均前屈角度が有意に大きい¹⁵⁾。骨盤の前傾角度の増加は股関節の伸展を制限することになるが、歩行中の最大股関節伸展角度の減少は、特に転倒経験者で大きいことが明らかにされている¹⁶⁾。Mills ら¹⁷⁾の報告においても、転倒経験者の多くが立脚期での股関節伸展角度の減少と遊脚期での股関節屈曲角度が減少している。TSSt での股関節伸展と足関節背屈の協調的な働きにより遊脚期の MTC が維持されるため⁶⁾、骨盤前傾角度の増加は **trailing position** を阻害することで MTC を低下させるものとする。ST 条件と比べて、DT 条件では骨盤前傾角度と MTC の負の関連性が多期に波及している。本研究で採用した DT 課題はディスプレイに計算問題を提示するものであったため、被験者は課題を注視する結果、注意がディスプレイに多く注がれたため、体幹・骨盤が前傾したものと推測する。そのため、ST 条件よりも DT 条件において、MTC と骨盤前傾角度の負の相関関係が多期に及んだと考える。本結果より、高齢者では、日常生活において、前方の何かに注視した際に体幹・骨盤が前傾することで MTC を低下させやすく、それは、つまずきによる転倒をもたらし可能性

が示唆された。

今後の検討課題として、DT 内容が 1 桁の足し算と比較的容易な課題であったため、今後は課題内容の種類を増やし、難易度を変えることで、MTC や下肢関節角度に与える影響について比較検討していく必要がある。また、測定環境もディスプレイを注視するものではなく、想起課題や聴覚刺激によるものを試行してみることで MTC に与える影響を検討していきたい。

本結果より、MTC に関連する下肢関節角度として、若年群では ST、DT いずれの条件においても膝関節の屈曲が抽出された。一方、高齢群では骨盤の前傾角度が MTC の低下に関連しており、TSt の股関節伸展制限がその要因であると考えられた。このことから、高齢者では前方へ注視した際の体幹・骨盤前傾により、つまづきによる転倒を経験しやすい可能性が示唆された。

引用文献

- 1) World Health Organization : WHO グローバルレポート 高齢者の転倒予防. http://whqlibdoc.who.int/publications/2008/9784904363171_jpn.pdf (閲覧日 2016 年 9 月 13 日).
- 2) 林 泰史 : 高齢者の転倒防止. 日本老年医学会雑誌, 2007, 44: 591-594.
- 3) 川上 治, 加藤雄一郎, 太田嘉城 : 高齢者における転倒・骨折の疫学と予防. 日本老年医学会雑誌, 2006, 43: 7-18.
- 4) Muir-Hunter SW, Wittwer JE: Dual-task testing to predict falls in community-dwelling older adults: a systematic review. *Physiotherapy*, 2016, 102: 29-40.
- 5) Sparrow WA, Begg RK, Parker S: Variability in the foot-ground clearance and step timing of young and older men during single-task and dual-task treadmill walking. *Gait Posture*, 2008, 28: 563-567.
- 6) Nagano H, Begg RK, Sparrow WA, et al.: Ageing and limb dominance effects on foot-ground clearance during treadmill and overground walking. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2011, 26: 962-968.
- 7) Blake AJ, Morgan K, Bendall MJ, et al.: Falls by elderly people at home: prevalence and associated factors. *Age Ageing*, 1988, 17: 365-372.
- 8) Winter DA: Foot trajectory in human gait: a precise and multifactorial motor control task. *Phys Ther*, 1992, 72: 45-53, discussion 54-56.
- 9) Sadeghi H, Allard A, Duhaime M: Functional gait asymmetry in able-bodied subjects. *Hum Mov Sci*, 1997, 16: 243-258.
- 10) Perry MC, Carville SF, Smith IC, et al.: Strength, power output and symmetry of leg muscles: effect of age and history of falling. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 100: 553-561.
- 11) 畠中泰彦 : 姿勢・動作・歩行分析 PT・OT ビジュアルテキスト, 第 1 版. 羊土社, 臨床歩行分析研究会 (監修), 2015, pp15-53.
- 12) Götz-Neumann K: 観察による歩行分析. 月城慶一 (監訳), 医学書院出版, 2005, pp10-80.
- 13) 山本健司 : 装具療法における Gait Judge System で得られる脳卒中片麻痺患者の底屈モーメントと足関節運動の特性—長下肢装具群・短下肢装具群・健常者群の比較. http://www.japanpt.or.jp/conference/jpta50/abstracts/pdf/0235_O-0235.pdf (閲覧日 2016 年 9 月 13 日).
- 14) Watanabe K, Funahashi S: Neural mechanisms of dual-task interference and cognitive capacity limitation in the prefrontal cortex. *Nat Neurosci*, 2014, 17: 601-611.
- 15) 泉キヨ子 : 重心動揺ならびに歩行分析による高齢者における転倒予測因子に関する研究. 金沢大学十全医学会雑誌, 1996, 105: 603-616.
- 16) Kerrigan DC, Lee LW, Collins JJ, et al.: Reduced hip extension during walking: healthy elderly and fallers versus young adults. *Arch Phys Med Rehabil*, 2001, 82: 26-30.
- 17) Mills PM, Barrett RS, Morrison S: Toe clearance variability during walking in young and elderly men. *Gait Posture*, 2008, 28: 101-107.