石川県理学療法学雑誌　Vol. 22 No. 1（2023年）1～5頁

原　著

若年者および地域在住高齢者の二重課題歩行における toe clearanceの最小値のバラツキと認知機能との関連性

大泉真一[1)]　浅野慶祐[2)]　東　利紀[3)]

要旨

〔目的〕二重課題（dual task: DT）歩行でのtoe clearanceの最小値（minimum toe clearance: MTC）を抽出して，若年者および高齢者のMTCのバラツキの特性について検討し，認知機能との関連性についても明らかにすることを目的とした．〔方法〕対象者は地域在住高齢者16人，若年者16人とした．計測は快適歩行（single-task: ST）と，歩行しながら認知課題（記憶課題）に回答するDT歩行を実施した．計測項目は非利き足の遊脚期中のMTCのバラツキを示す標準偏差を抽出した．また，高齢者には認知機能検査（HDS-R，digit symbol substitution test: DSST）を実施した．〔結果〕MTCのバラツキは高齢者と若年者の間には有意な差は認めず，STとDTの間にも有意な差は認めなかった．一方で，相関分析の結果では高齢者のMTCのバラツキはDSSTにのみ有意な負の相関関係を認めた．〔結論〕高齢者の転倒リスクの指標としては認知機能の中でも遂行機能を反映する検査が有用であると考えられた．

キーワード　転倒，二重課題歩行，遂行機能

Ⅰ．はじめに（序論，緒言）

転倒の最多要因は平坦な道での「つまずき」である[1)]．厚生労働省の人口動態調査によると不慮の事故死の原因は交通事故よりも転倒事故による死亡が多いことが分かっている[2)]．日常生活ではわずかな段差や障害物に対する危険認識，安全に動作を遂行するためのプランニングといった認知機能が深く関わっているため，「つまずき」による転倒予防には日常生活を想定した場面で認知機能も考慮して歩行能力の評価が肝要であると考える．

「つまずき」をバイオメカニカルな観点から研究したものでは，遊脚期中のつま先の高さ（minimum toe clearance: MTC）に焦点を当てた研究が多く行われており，転倒者のMTCの特徴にはMTCを迎える時期の早期化[3)]，バラツキ（標準偏差，四分位数）の増大[4)]など時間的・空間的側面からの知見が得られている．これを受けてBeggら[5)]は「つまずき」に対する転倒予防にはMTCの中心傾向（平均値，中央値）を高めるために足を高く上げる（股関節屈曲）代償動作を獲得する必要があると指摘している．しかし，「つまずき」の多くが無意識な状態で突発的に起こることから，単純に足を上げるだけの指導ではその予防は難しい．そこで，歩きながら認知的な負荷を加える二重課題（dual-task: DT）歩行は日常生活に近い場面で歩行能力を評価できるため「つまずき」による転倒のリスクを評価する方法として適していると考えられている[6, 7)]．

MTCに着目したDT歩行の研究を渉猟すると高齢者はMTCのバラツキが増加し[8)]，特に非利き足（左足）で顕著である[9)]ことが確認されている．また，DT歩行時の脳活動を調査した報告では高齢者は大脳皮質の中でも特に前頭葉の背外側前頭前野（dorsolateral prefrontal cortex: DLPFC）の活動が高いことが示されている[10)]．DT歩行は個人の認知機能に依存していることから[11)]，認知機能の中でも前頭葉機能の低下はDT歩行時の非利き足のMTCのバラツキを強調させるため，「つまずき」による転倒の可能性を高めると推察する．過去の研究を整理すると「つまずき」による転倒を予防するためには認知機能の中でも前頭葉機能に関連する評価も有用であると考えられるが，MTCと認知機能との関連性は報告されていない．MTCと認知機能との関連性を明らかにすることは，高齢者の転倒予防に対する新たな指標の1つになると考える．本研究ではまず，若年者と地域在住高齢者のDT歩行時のMTCのバラツキの特性について明らかにすることとし，MTCのバラツキと認知機能との関連性についても検討す

1）加賀市医療センター
（〒922-8511　石川県加賀市作見町リ36　0761-72-1188）
2）恵寿金沢病院　理学療法課
（〒920-0910　石川県金沢市下新町6-26　076-220-9137）
3）やわたメディカルセンター　リハビリテーション技術部
（〒923-8551　石川県小松市八幡イ12-7　0761-47-7575）
責任著者連絡先：zrjdyzhs@gmail.com
（投稿日：2022年7月25日　受理日：2022年9月27日）

ることで地域在住高齢者の転倒予防の一助とすることを目的とした．

Ⅱ．対象および方法

1．対象者

対象者は地域在住高齢者16人（男性9人，女性7人，72.8 ± 4.6歳，右利き13人，左利き3人），若年者16人（男性10人，女性6人，20.5 ± 0.5歳，右利き：15人，左利き1人）であった．地域在住高齢者の募集は地域で開催されているクラブ，ふれあいサロンの参加者へ研究概要を配布し，研究への参加を募った．若年者は金城大学のゼミナールに所属する学生に研究概要を説明し研究への参加を募った．参加希望者には後日，研究案内書を郵送し計測日を決定した．利き足の定義は過去の研究[12]と同様に利き手と同側の下肢を利き足とした．本研究は倫理委員会の承認を得て行い，対象者には本研究の趣旨を理解していただき紙面による同意を得て行った（研究倫理通知番号第29-04号）．

高齢者の適格基準として，年齢が65歳以上，歩行補助具を使用せず独歩が可能，地域で自立して自宅生活を送っている（自立の判断基準は家族，あるいは他者からの補助がなくても基本動作，日常生活動作を遂行できること），要介護認定を受けていない，運動器疾患，神経疾患，平衡機能の障害等により通院していないこととした．本研究の対象者の運動機能が維持されていることを評価するため，運動器不安定症の診断基準（運動機能）[13]に基づき，開眼片脚立位が15秒以上，3m timed up-and-go testが11秒未満であることを確認した．

2．計測方法

計測環境として，3次元動作解析装置（VICON MX, Oxford Metrics 社製）を使用し，カメラ9台を使用してマーカーの3次元空間座標をサンプリング周波数100Hzで計測を行った．使用する反射マーカー（直径: 14mm）はPlug-In Gait full body model[14]に従って貼付し，MTCの運動軌跡を抽出するために両母趾の爪上にマーカーを追加貼付した．

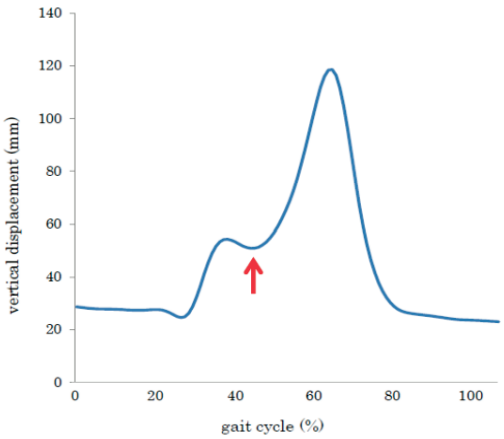

図1　歩行中の母趾爪上マーカーの推移

計測肢は非利き足とした．計測環境は10mの平坦な歩行路を設けて，その前後に2mの助走路を設けた計14mの歩行路を参加者には快適速度で歩行してもらった．遊脚期における母趾爪上マーカーの矢状面における軌跡は2峰性を描くため（**図1**），この軌跡の凹みの最低点の高さを採用し，安静立位時の非利き足母趾爪上マーカーの垂直距離で差し引いた値をMTCとした．母趾爪上マーカーの軌跡においてfirst peakとsecond peakの間に凹みが認められない場合はデータとして採用しなかった．

課題条件は10mの平坦な歩行路を快適速度で歩く（single-task: ST）課題と，快適歩行中に認知課題（記憶課題）に回答するDTの2条件を設定した．記憶課題は検査紙に描かれた物品名を思い出し口頭で回答しながら歩く課題とした．まず，歩行開始直前に検査者が10個の物品が描かれた検査紙（**図2**）を呈示し，1つずつ物品名を参加者と確認した後に10秒間で記憶するように指示した．10秒経過直後に覚えた物品名を呼称しながら歩行してもらい，回答中に立ち止まらないように教示した．検査者は課題回答数と正答数を記録し，正答率を算出した．実施順序は認知課題が通常の歩容に及ぼす影響を可能な限り排除するためSTから実施し，次いでDT歩行を実施した．過去の地域在住高齢者を対象者とした計測経験[11]より1試行で計測できる歩行周期は2～3ストライドであることから，最低10ストライドの計測を担保するために計測はSTとDTともに6試行とした．認知課題に使用する検査紙は各試行で異なる物品が描かれた用紙を使用した．

認知機能検査は長谷川式簡易知能検査（HDS-R），digit symbol substitution test: DSSTを実施した．DSSTは前頭葉機能の1つである遂行機能，精神運動速度（思考，反応，動作などのスピード）を評価する検査である[15]．この検査は数字に対応する符号を空欄に書き写す課題であり，120秒間の制限時間内で正しく書き写した回答数を用いた．実施前に検査者は練習欄を用いて説明し，内容に理解が得られてから開始した．符号の書き写しは途中で飛ばすことを禁止し，できるだけ早く行うように指示した．書き写してもらった回答数から誤答数を引いた正当数のみを本研究の点数として採用した．上記の認知機能検査は，歩行計測への影響を考慮し，机上での検査を行った後に歩行計測となるように検査の順序を配慮した．

図2　記憶課題の内容例と計測肢の反射マーカーの貼付位置

表1　高齢者と若年者の身体的特性および認知機能の比較

		高齢者16 人	若年者16人	P値
身体的特性	年齢(歳)	72.8 ± 4.6	20.5 ± 0.5	0.00
	性別(男性/女性)	9 / 7	10 / 6	n.s
	身長(cm)	158.9 ± 9.4	165.8 ± 6.6	0.02
	体重(kg)	60.5 ± 6.4	56.2 ± 5.9	0.03
	BMI(kg/m²)	24.1 ± 2.9	20.3 ± 1.3	0.00
認知機能検査	HDS-R(点)	28.3 ± 2.3	－	－
	DSST(点)	68.2 ± 12.7	97.3 ± 14.3	0.00

平均値 ± 標準偏差　　DSST：digit symbol substitution test

表2　高齢者と若年者の課題間における二元配置分散分析の結果

		高齢者	若年者	二元配置分散分析(F値)			Bonferroni法による下位検定(F値)
				群	条件(ST,DT)	群×条件	
MTC(mm)	ST(n=16)	3.9 ± 1.9	3.6 ± 0.9	1.39	0.82	0.02	0.24
	DT(n=16)	3.5 ± 1.8	3.2 ± 0.7				0.37

MTC：minimum toe clearance, ST：single task group, DT：dual task group　　n.s

3．統計学的検討

若年者と地域在住高齢者の身体的特性および認知機能検査，MTCのバラツキについて検討を行った．Shapiro-wilk検定を行い正規性の検定の後に，若年者と地域在住高齢者の比較についてはFisherの正確検定，Mann-WhiteneyのU検定を用いて検討した．MTCのバラツキ（標準偏差）に関しては群（高齢者，若年者）と条件（ST, DT）を要因とする二元配置分散分析（一般線形モデル）を行った．さらに，単純主効果を検証するためにBonferroni法による下位検定を行った．高齢者のMTCのバラツキ（標準偏差）とHDS-R，DSSTの関連性を検討するのにPearsonの積率相関係数を使用した．統計学的処理としてフリーソフトEZR（Ver 1.35）を使用してすべて5%水準にて有意判定を行った．

Ⅲ．結　　果

参加してもらった高齢者は全例が適格基準を満たしており除外した高齢者は認めなかった．身体的特性および認知機能の比較結果を**表1**に示す．高齢者は若年者と比して年齢，身長，体重，認知機能に有意な差を認めた．次に，MTCのバラツキには群（高齢者，若年者）と条件（ST, DT）を要因とする二元配置分散分析の結果を**表2**に示す．MTCのバラツキは群および条件のいずれにおいても有意な主効果は認めず，群×条件においても交互作用も認めなかった．次に，課題回答率を**表3**に示す．高齢者は50.2 ± 9.3%，若年者で57.2 ± 9.9%であり，高齢者は課題回答率が有意に低値であった（p= 0.03）．高齢者のMTCのバラツキと認知機能検査の関連性を**表4**に示す．STでのMTCのバラツキとHDS-R（r: 0.23, p= 0.32）, DSST（r: －0.34, p= 0.21）は有意な関連性は認められなかった．一方で，DT歩行ではMTCのバラツキとHDS-R（r: －0.27, p= 0.63）には関連性は認められなかったが，DSST（r: －0.63, p= 0.03）にのみ有意な関連性を認めた．

表3　高齢者と若年者の課題回答率の比較

	高齢者	若年者	P値
正答率 (%)	50.2 ± 9.3	57.2 ± 9.9	0.03

平均値 ± 標準偏差

表4　高齢者のSTとDTにおけるMTCのバラツキ（標準偏差）と認知機能の関連性

		HDS-R	DSST
MTC(mm)	ST	－0.23	－0.34
	DT	－0.27	－0.63*

相関係数　　*: p<0.05

Ⅳ．考　　察

本結果では高齢者と若年者のMTCのバラツキは群（高齢者，若年者）条件（ST, DT）を比較しても有意な主効果は認めず，群×条件においても有意な交互作用は認めなかった．本結果でDT歩行におけるMTCのバラツキの増加は確認できなかったが，高齢者においてはMTCのバラツキと認知機能（DSST）は有意な負の相関を認めたことからMTCは認知機能の影響をうけやすく，特に遂行機能が重要である可能性が示された．本研究の適格基準では高

齢者はTUGや片脚立位テストで運動器不安定症に該当していないことから，施設に入所するような虚弱な高齢者を排除して検討できたと考える．このことから，地域で自立した生活を送っている高齢者の「つまずき」による転倒を予防するには認知機能の中でも遂行機能に焦点を当てた評価が有用である可能性があると考えられた．

過去の研究[4, 16]では若年者よりも高齢者はMTCのバラツキは有意に増加しており，STに比べてDT歩行でMTCのバラツキが増加することが報告されている[17]．MTCを指標にした転倒に関するsystematic review[18]でもMTCのバラツキの増加は転倒の兆しであることが明らかにされていることから，MTCのバラツキに着目してDT歩行による歩容の変化を検討することは転倒予防の試みとしては妥当であると考える．歩容変化のメカニズム[19]はDT干渉（cognitive-motor interference）で説明が可能であり，脳内にある限られた処理資源の配分を巡って2つの課題が競合するために起こると考えられている．特に，高齢者は加齢に伴い注意資源の容量が減少するためDT干渉によってMTCのバラツキが強調されると考えられるが，本結果は過去の研究結果と異なるものであった．その理由としては本研究の対象者は過去の研究[4, 16, 17]で対象とされている高齢者よりも運動機能が高い壮健な高齢者であったことが起因したと考える．さらに，MTCは「つまずき」に直接関与するため歩行パラメータの中でも制御すべき優先順位が高いことも一因として考えられる．この仮説を裏付ける研究としてはHamcher[20]の研究が挙げられる．彼ら[20]は本研究と同様に地域在住高齢者を対象にDT歩行を行っており，ストライド時間やストライド長のバラツキは増加したがMTCのバラツキには変化が見られなかったと報告している．彼らの考察も“高齢者は「つまずき」を回避するためにMTCは他の歩行パラメータよりも優先的に制御されている”と報告している．このように，MTCは「つまずき」に直接関与することから歩行パラメータの中でも制御すべき優先順位が高いと推察する．これらのことから，本研究では地域在住高齢者と若年者を比較しても，STとDT歩行を比較してもMTCのバラツキには有意な差が生じなかった可能性が考えられた．

一方で，相関分析の結果を見てみると高齢者のMTCのバラツキとDSSTには有意な負の相関関係が認められた．この関連性については高齢者の歩行中における姿勢戦略が影響していると考える．高齢者はDTでは姿勢調整を優先し[21]，特につま先の高さをあえて高くあげる代償動作（safety margin）をとることが知られている[22]．これは，非利き足（左足）で顕著[9, 12]であり，つまずきによる転倒を回避するための姿勢戦略であると解釈できる．このような代償動作は転倒に対する危険認識，注意心の存在を示しており歩行中の障害物に対する警戒心から次の行動のプランニングといった一連の動作を制御する認知機能，とりわけ遂行機能が重要となることを示唆している．Mirelmanら[23]も遂行機能の低下が将来の転倒予測の指標であることを示しており，彼らは高齢者の運動機能に低下があったとしても，遂行機能が保たれていれば転倒を回避することができると考察している．本研究結果は，遂行機能が低下した者は転倒のリスクが増加するという過去の報告[24]を支持するものであり，運動器に問題が認められないような地域在住高齢者の転倒リスクを評価するには遂行機能の評価が必要であると考えられた．

以上のことから，「つまずき」による転倒を予防するには認知機能の中でも遂行機能が重要である可能性が示された．遂行機能は行動の計画を立て，立てた行動が計画通り行えているかをモニタリングし，フィードバック機能を用いて行動の修正・不要な情報を排除するという一連の行為を監視する機能である[25]．この機能は認知機能の中でも高位の存在であり，転倒との関連性が高く[7]，加齢による影響を受けやすい[26]．本結果では遂行機能がDT歩行中のMTCの制御に関連していたことから，日常生活場面では歩行中の姿勢制御の優先度を誤ると「つまずき」による転倒の可能性が高くなる可能性が示唆された．

本研究にはいくつかの限界がある．まず，本研究の対象者が地域在住高齢者の中でも過去1年間で転倒歴のない者を対象とした横断研究であるためDT歩行中のMTCのバラツキと遂行機能との関連性が将来の転倒と直接的な関係を示すものではない．また，転倒に関連する認知機能には遂行機能の他にも認知処理速度，視空間認知[27]など多岐にわたるため，今回の認知機能検査だけでは不十分な点が挙げられる．さらに，地域在住高齢者の転倒は屋外で多い[28]ことが報告されており，室内で計測した本結果が屋外歩行と同環境でないことが課題として挙げられる．最後に，屋外での転倒を想定すると履物の影響を受けることが予想されるが，今回はMTCの軌跡を計測するために裸足で行った点が限界である．今後は履物の違いや路面環境を考慮して屋外を想定した環境でも検討していきたい．

V．結　　論

DT歩行ではMTCは認知機能の中でも遂行機能の影響を受けやすく，転倒リスクの評価には運動機能の評価だけでなく遂行機能の検査も有用である可能性が示唆された．

謝　　辞

本研究に参加してくださった地域高齢者の皆様に感謝の意を示します．また，本研究対象者のリクルートメント，研究デザインの構成に協力してくださった金城大学の佐々木賢太郎教授に深く感謝を申し上げます．

利 益 相 反

・本論文に関して，開示すべき利益相反関連事項はありません．

文　　献

1) Blake AJ, Morgan K, et al.: Falls by elderly people at home: prevalence and associated factors. Age Ageing. 1988; 17: 365-372.
2) 厚生労働省ホームページ．人口動態調査https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei19/index.html（令和3年4月30日 引用）
3) 小林吉之, 高柳直人, 他: 高齢転倒経験者における歩行中のつま先高さの軌跡の特徴．日転倒予会誌．2017; 4: 33-42.
4) Khandoker AH, Palaniswami M, et al.: A comparative study on approximate entropy measure and pointcaré plot indexes of minimum foot clearance variability in the elderly during walking. J Neuroeng Rehabil. 2008; 5: 4.
5) Begg R, Best R, et al.: Minimum foot clearance during walking: strategies for the minimisation of trip-related falls. Gait Posture. 2007; 25: 191-198.
6) Holtzer R, Mahoney JR, et al.: fNIRS study of walking and walking while talking in young and old individuals. J Gerontol Biol Sci Med Sci. 2016; 66: 879-887.
7) Segev-Jacubovskil O, Herman T, et al.: The interplay between gait, falls and cognition: can cognitive therapy reduce fall risk?. Expert Rev Neurother. 2011; 11: 1057-1075.
8) Muir-Hunter SW, Winter JE, et al.: Dual-task testing to predict falls in community-dwelling older adults: a systematic review. Physiotherapy. 2016; 102: 29-40.
9) Sparrow AW, Begg RK, et al.: 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.
10) Stelzel C, Bohle H, et al.: Contribution of the lateral prefrontal cortex to cognitive-postural multitasking. Front Psychol. 2018; 9: 1075.
11) 大泉真一, 木村剛, 他: 付加課題の違いによる歩容の検討．石川理雑誌．2021；20：19-22.
12) 大泉真一, 佐々木賢太郎, 他: 二重課題条件による歩行の矢状面上の左右非対称性の検討．石川理雑誌. 2020; 19: 11-14.
13) Plug-in-Gait Marker Placement. http://www.idmil.org/mocap/Plug-in-Gait+Marker+Placement.pdf（令和3年4月21日引用）
14) 公益社団法人日本整形外科学会．https://www.joa.or.jp/public/locomo/mads.html（令和3年11月15日引用）
15) Nilsson J, Thomas AJ, et al.: White matter and cognitive decline in aging: a focus on processing speed and variability. J Int Neuropsychol Soc. 2014; 20: 262-267.
16) Peter M, Barrett RS,et al.: Toe clearance variability during in young and elderly men. Gait Posture, 2007, 28: 101-107.
17) Braveena KS, Daniel TH, et al .: Minimum toe clearance events in divided attention treadmill walking in older and young adults: a cross-sectional study. J Nero Eng Reh. 2015; 12: 1-9.
18) Barrett RS, Mills PM, et al.: A systematic review of the effect of ageing and falls history on minimum foot clearance characteristics during level walking. Gait Posture. 2010; 32: 429-435.
19) Watanabe K, Funahashi S.: Neural mechanisms of dual-task interference and cognitive capacity limitation in prefrontal cortex. Nat Neurosci. 2014; 17: 601-611.
20) Hamacher D, Schega L, et al.: Towards the importance of minimum toe clearance in level ground walking in a healthy elderly population. Gait Posture. 2014; 40: 727-729.
21) Shumway-cook A, Woollacott M, et al.: The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. J Gerontol Med Sci. 1997; 52: M232-M240.
22) Suhilz BW.: Healthy younger and older adults control foot placement to avoid small objecles during gait primarily by modulating step width. J Neuroeng Rehabil. 2012; 9: 69.
23) Mirelman A, Herman T, et al.: Executive function and falls in older adults : new findings from a five-year prospective study link fall risk to cognition. PloS One. 2012; 7: e40297.
24) Holtzer R, Friedman R.: The relationship between specific cognitive function and falls in aging. Neuropsychology. 2007; 21: 540-548.
25) Weber P, Lutschg J, et al.: Attention-induced frontal brain activation measured by near-infared spectroscopy. Pediatr Neurol. 2004; 31: 96-100.
26) Amboni M, Barone P,et al.: Cognitive contributions to gait and falls: evidence and implications. Mov Disord. 2013; 28: 1520-1533.
27) Martin KL, Blizzard L, et al.: Cognitive function modifies the effect of physiological function on the risk of multiple falls-a population-based study. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2010; 68: 1091-1097.
28) Kelsey JL, Berry SD, et al.: Indoor and Outdoor Falls in Older Adults are Different: The MOBILIZE Boston Study. J Am Geriatr Soc. 2010; 58: 2135-2141.