

寄稿



高齢者の転倒回避動作とリハビリテーション*

越智 亮

1. はじめに

転倒・転落は65歳以上の高齢者において、外傷の主な原因であり、東京消防庁の調査によると、平成25年中は日常生活の中の事故で救急搬送されている高齢者の約8割が「ころぶ」事故であったとされている¹⁾。転倒の要因は、内的要因と外的要因に大別でき、内的要因には加齢変化による身体諸機能の低下が含まれる²⁾。リハビリテーション分野では、この身体諸機能の低下に対してアプローチし、転ばない身体づくりを目指すことが基本となる。ただし、転ばない身体づくりのために行うトレーニングの目的は、つまづく、ふらつくなどの転倒のきっかけが生じないように姿勢・動作を改善させることが主であり、転倒のきっかけが生じてから起こる転倒回避動作の能力向上に着目することは少ないのではないだろうか。

転倒回避動作の一つは、転倒のきっかけが発生した後の下肢の素早い踏み出し動作（以下、ステップ）である。我々は多くの場合、このステップによって転倒を回避することが可能であるが、高齢者では、ステップが出たとしても実際の転倒へと発展してしまうケースも多い。つまづくことが実際の転倒に発展する原因として、高齢者と若年者との間には転倒のきっかけ（つまづく、滑るなど）が生じてから下肢を前に踏み出して転倒を防止するまでの反応に違いがあることが報告されており³⁾、高齢者の特徴として支持脚と踏み出し脚が衝突する頻度の増大、踏み出し脚の一步長の

減少、前方へ踏み出すにも関わらず、その後側方への踏み出しが発生する、などがある。これらは、通常若年者では見られない現象であり、高齢者では、ステップを円滑に行う機能が低下していることを伺わせる。

本稿では、転倒回避動作の一つであるステップについて、身体機能の観点から高齢者の特徴とトレーニング内容の一端を概説する。

2. Tether-release 法

転倒は、歩行中のつまずきやスリップ、移乗動作や随意運動に伴う重心移動のような日常生活の様々な場面で突発的に生じる⁴⁾。そのため、転倒回避の反応をみるためには、姿勢を崩す突発的な

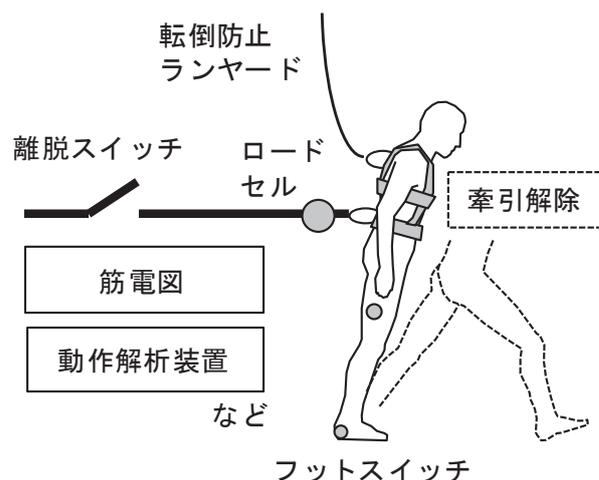


図1. Tether-release 法

対象者の腰部背面をケーブルで牽引した状態で前傾させておき、牽引を解くことでステップを誘発する方法。ケーブルと離脱スイッチの間にロードセルを介在させておくことで、一定量で牽引できるため、定量的な外乱刺激を与えることが可能である。表面筋電計や動作解析装置を用いて運動学的な分析ができる。

* Compensatory movement for fall prevention and rehabilitation in the elderly

星城大学リハビリテーション学部理学療法学専攻
(〒476-8588 愛知県東海市富貴ノ台2-172)

Akira Ochi, PT, MS: Division of Physical Therapy,
Department of Care and Rehabilitation, Seijoh University

E-mail: ochi@seijoh-u.ac.jp

外乱刺激を対象者に加える必要がある。また、外乱刺激は定量的に加えられるものが望ましい。さらに、対象者がもしバランス回復に失敗しても、傷害が発生しないように安全な方法でなければならない。

外乱刺激から前方ステップでバランス回復を調査するための1つの実験的なアプローチはTether-release法⁵⁾であり、それは対象者の腰部背面をケーブルで牽引した状態で身体を前傾させておき、突然の牽引解除を通じてステップを誘発する方法である(図1)。なお、この方法で誘発されたステップと、実際の転倒回避場面で生じるステップには違いがあり、Tether-release法では、対象者があらかじめ外乱が来ることを分かっている点(いつ外乱が生じるかは分からない)、身体質量中心の前方への初速が欠如している点、支持脚の力学的貢献がほとんど必要ない点、等が挙げられる^{5) 6)}。

3. 転倒し易いステップの特徴

Tether-release法によるステップを、牽引解除されてから遊脚側下肢の踵離地が起こるまでの反応時間(以下、Lift-off phase)、遊脚側下肢の踵離地から踏み出して着地するまでの遊脚時間(以下、Stepping phase)、ステップ着地してから遊脚側下肢の膝屈曲角度が最大となり姿勢が安定するまでの時間(以下、Stance phase)の3つの相に分けたとき、それぞれに転倒し易いステップの特徴を分類することができる。Tether-release法を用い、若年者と健常高齢者のステップの特徴を運動学的にみた研究において、高齢者はLift-off phaseの問題として遅延した反応時間^{7) 8)}を持つこと、Stepping phaseの問題として短いステップ長⁷⁻⁹⁾、遅いステップ速度⁷⁻⁹⁾を持つこと、Stance phaseの問題として着地時姿勢の体幹前傾角度が増大¹⁰⁾し、一歩で踏みとどまらずに複数回ステップ戦略をとり易い^{11) 12)}ことなどが分かっている。

1) Lift-off phaseの問題

高齢者が自発的なステップを行う際、他の事象に注意が向けられることのような二重同時課題下では、ステップまでの反応時間が遅延することが明らかにされている¹³⁾。高齢者のステップ反応が二重同時課題下で遅れる要因として、ヒトは環境からの情報を処理できる注意の容量が限られており、高齢者では姿勢制御にも注意の分配が必要となること、加齢変化によって情報処理が延滞し、とっさの判断が遅れることや反応動作が欠如すること、加えて中枢で処理される注意配分が多くな

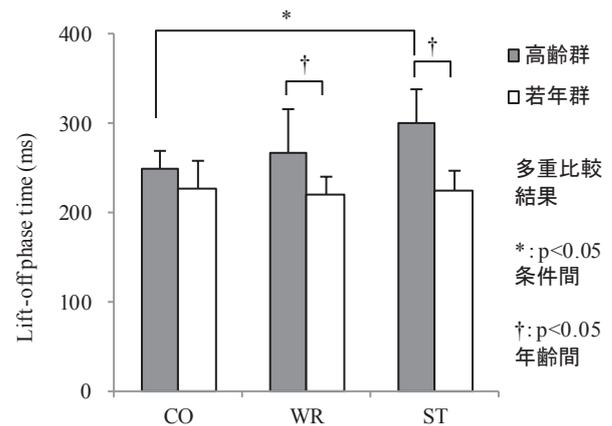


図2. 各条件間における高齢者と若年者のLift-off phase時間の違い

Lift-off phase time: 牽引解除から対象者のステップ側下肢の踵離地までの時間, CO: コントロール条件, WR: ワードリーディング条件(発声課題), ST: ストループ条件(認知課題). (文献17)の表1のデータをグラフ化して改変引用)

ると、その影響が大きくなることなどが考えられている¹⁴⁻¹⁶⁾。このように重心移動を伴う動作や移動動作中に他者と会話したり、他事に注意を向けたりすることは、日常でごくありふれているが、転倒回避の反応にどのような影響を与えるのだろうか。

筆者らは、若年男性と75歳以上の高齢女性を対象に、Tether-release法を用いてステップを誘発する際、身体前傾位から牽引解除までの間に発声課題や認知課題を与え、Lift-off phaseの時間がどのように変化するかを調査した¹⁷⁾。その結果、Lift-off phaseの時間は、若年者において発声課題や認知課題を与えてもほぼ一定の値であったのに対し、高齢者ではコントロール条件に比べ認知課題で反応が遅延した(図2)。このことから、高齢者において、ある動作中に他事象に注意が向けられている環境下では、つまずき等の転倒のきっかけが生じた後、ステップ開始までの反応が遅れることが予想される。ただし、認知課題が付加されたときのステップ反応の遅延は、0.05秒程度でしかなく、このわずかな反応の遅れが実際の転倒場面でバランス回復に対して大きな影響を与えるかどうかは疑問である。

2) Stepping phaseの問題

Tether-release法では対象者が牽引解除前の身体前傾位にある際、ケーブルの牽引力や身体前傾角度を増やすことで外乱刺激量を大きくすることが

できる。どの程度の外乱刺激量まで一步のステップでバランス回復に成功できたかどうかで、その対象者のバランス回復能力をみることができる。Wojcik ら⁸⁾の研究では、ケーブル牽引力を体重の30%に設定した場合、若年男性や若年女性のおよそ9割がバランス回復に成功するのに対し、高齢男性では5割、高齢女性では一人もバランス回復に成功する者がいなかった。このように、バランス回復能力は若年者や高齢男性と比べ、高齢女性で最も低下が著しい。高齢女性の減少したバランス回復能力は、ステップ速度の低下とステップ長の減少と関連している¹⁰⁾。すなわち、ステップによる転倒回避に最も重要なのは、転倒のきっかけが生じた時に下肢を素早く大きく踏み出すことができるかどうかであり、これにはとっさの時に十分な股関節屈曲、膝関節伸展、足関節底屈モーメントやパワーを産出する能力が必要となる¹²⁾。

外乱刺激に対して素早く骨格筋を活動させバランス回復する能力は、加齢によって衰える。それは下肢筋の筋電図パターンに反映され、若年者と比べ高齢者では、より長い反応時間、筋活動潜時の延長、主動筋と拮抗筋の同時活動の増大などの特徴が表れる¹⁸⁻²¹⁾。Thelen らは、Tether-release によるステップ中の下肢筋活動パターンが若年者と健常高齢者でほとんど似通っているが、高齢者の踏み出し脚の膝伸展筋において、わずかだが筋活動の開始の遅れとより長い筋活動の持続を持つことを報告した。ただし、これらの筋電図パターンの年齢による違いは、ステップ長やステップ速度の低下とどのように関係しているのか明らかではなかった。

筆者らは、過去一年以内に2回以上の転倒経験を持つ高齢女性12名と、転倒経験のない高齢女性17名を対象に、Tether-release 法によるステップの運動学的特徴と踏み出し脚の下肢筋電図パターンを比較した²²⁾。結果、転倒群ではバランス回復の際、より遅いステップ速度と短いステップ長がみられた。下肢筋活動の分析では、転倒群において、ステップ脚を踏み出す直前の足関節底屈筋活動が最大に達するまでの時間が遅く、筋活動パターンは非転倒群と似ていたが、遊脚中の膝伸展筋と屈曲筋の同時活動が生じていた(図3)。このことから、過去に転倒経験がある転倒リスクが高い高齢者では、下肢の急峻な筋力発揮が困難で、遊脚中に大腿の同時活動が高くなっていることによって下肢の素早い円滑な振り出しが困難になっていることが予想される。

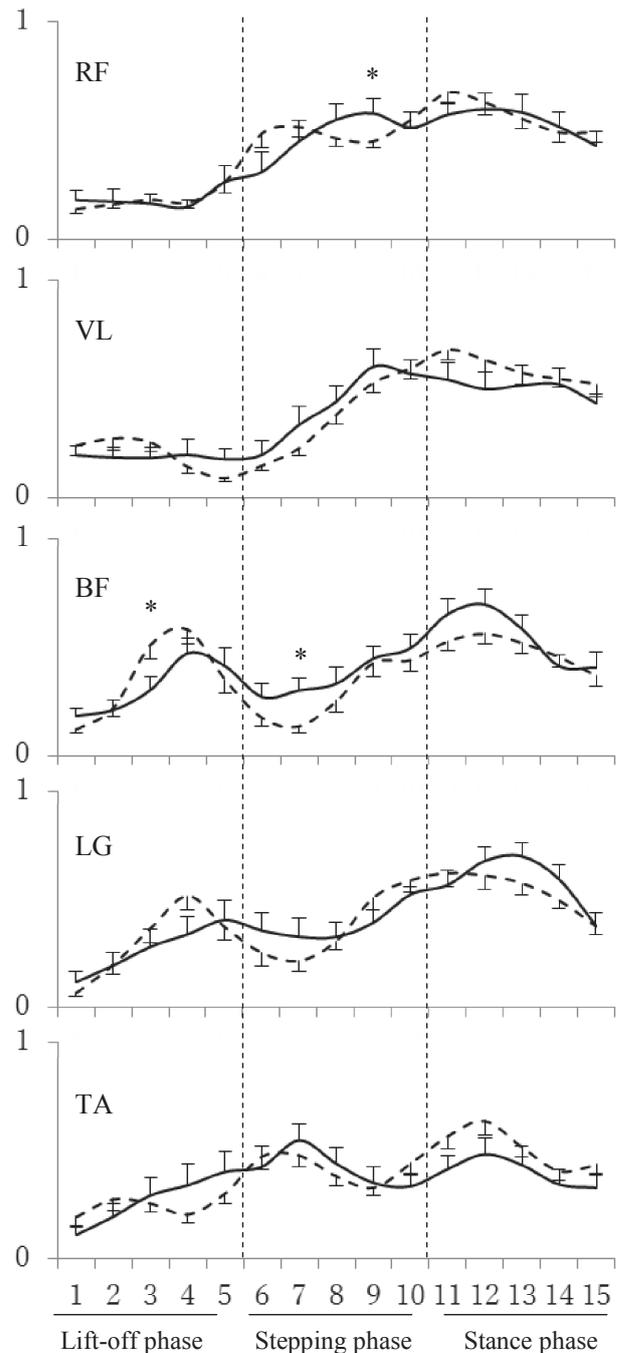


図3. バランス回復ステップ中の転倒群と非転倒群の筋電図加算平均処理波形

RF ; 大腿直筋, VL ; 外側広筋, BF ; 大腿二頭筋, LG ; 腓腹筋外側頭, TA ; 前脛骨筋. 転倒群は実線, 非転倒群は波線で示される. 各フェーズで5ポイントずつの時間的正規化を行った. 筋電図活動量はステップ中の最大筋活動量で除した値とした. エラーバーは各ポイントの標準誤差を示す. アスタリスク (*) は転倒群と非転倒群で統計学的な差が認められた部分を示す. Stepping phase において転倒群の大腿直筋と大腿二頭筋の活動が非転倒群よりも高い部分があり、遊脚中に同時活動が生じていることが伺える. (文献22)より改変引用).

3) Stance phase の問題

同じ外乱刺激量によって誘発されたステップの際に、高齢者は若年者と比べ、ステップ着地後に一歩で踏みとどまらず、しばしば複数回ステップに頼ることが明らかにされている^{11) 12)}。特にバランス回復において複数ステップに頼る者は、シングルステップを使う者と比べて転倒リスクが高いことが明らかにされている²³⁾。ステップ着地後に複数回ステップに頼るかどうかは着地時姿勢が深く関わっている。着地時に一歩長が短く体幹前傾角度が大きくなると、支持脚と踏み出し脚で囲まれた支持基底面から体幹の質量中心が前方へ逸脱するため、第二、第三のステップが生じる(図4)。

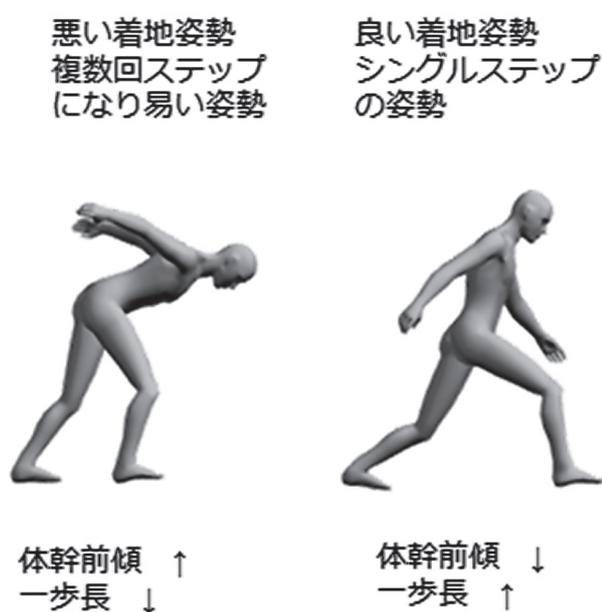


図4. シングルステップと複数回ステップの着地時姿勢

4. ステップの安定性を改善するトレーニング

転倒しやすいステップの特徴から、バランス回復ステップの安定性を強化するための運動介入は、対象者のステップ長とステップ速度を増大させるための内容であること、またこの能力向上にとって必須である下肢筋力や動作速度を含めたパワーの増大に集中する内容であることが必要と考えられる。高齢者の転倒リスクを減らすために効果的なトレーニングは、狭い支持基底面上で行うこと、上肢支持を最小にすること、ステップのような重心移動の要素を含む内容であることが示された²⁴⁾。少数の研究において、高齢者に対する予測不能な外乱を加えるような実験室におけるトレーニングが、転倒リスクにつながるステップ反応を改善させることが報告された^{25) 26)}。しかし、特定の外乱

課題に対してのみ効果の得られるトレーニングは、日常生活の間に生じる転倒回避動作の全ての不安要素に対する効果的な戦略であるとは言い難い。したがって、転倒回避動作であるステップ能力を向上させるためのより一般的な運動介入は、高齢者のプログラムにおいて推奨されるであろう。

Arampatzis ら²⁷⁾ と Aragao ら²⁸⁾ のグループは、狭い支持基底面上での上肢運動、ビームウォーク、ホッピング、ボールや不安定を使用した一般的なバランストレーニングや、トランポリンを使用したエクササイズが、Tether-release によって誘発されるステップのバランス回復能力を向上させ(対象者がトレーニング後により大きな前傾姿勢からバランス回復することができた)、ステップ長に変化がないもののステップ速度を増加させることを報告した。彼らは、介入後にステップ中の踏み出し脚の股関節屈曲や足関節底屈の関節モーメントを素早く発揮する能力(パワーと同意)が向上していたことを観察している。

近年、高齢者における筋力、パワーの向上、バランスコントロールの改善を促進する効果が期待される全身振動刺激(Whole-body vibration; WBV)療法が注目されている^{29) 30)}。WBVを利用したトレーニングは、経済的で、時間をとらず、利便性が高いことから、高齢者医療施設の運動療法に最適である。WBVの使用が下肢筋力とパワーを促進する正確なメカニズムは不明であるが、振動刺激に対する反射によって誘発された筋収縮を通じて下肢の筋活動を増加させ、垂直跳び等で要求される下肢のパワーを向上させる^{31) 32)}。したがって、バランストレーニングにWBVを加えることで、ステップ能力をより良く向上させ、それがステップ動作中の筋活動パターンの変化に反映されるかもしれない。そこで我々は、ケアハウス在住の女性高齢者に対し、Tether-release法をステップの評価として用い、WBVを加えたバランストレーニングの3か月の介入を行った³³⁾。その結果、対象者のステップ長とステップ速度を改善させることに成功した。さらに、このステップの機能強化は、ステップ中の踏み出し脚の筋活動タイミングの変化ではなく、膝伸展筋や足関節底屈筋の筋活動量の増大に反映されていた。

特殊な機器や高価な筋力トレーニングマシンを使用しなくても、伝統的なバランストレーニングによって高齢者の転倒回避ステップの機能を向上させることは十分に可能であると思われる。一般的な転倒予防トレーニングにおいて、どのような対象者に対し、どんな介入が有効であるか、表1

表 1. 転倒予防介入の有効性（文献 24）より改変引用）

	相対リスク	95% 信頼区間
多角的な介入		
◎在宅高齢者の多角的評価・介入	0.73	0.63 — 0.85
○転倒リスクの高い在宅高齢者	0.86	0.76 — 0.98
×転倒リスクの高い施設入所高齢者	0.97	0.84 — 1.11
運動トレーニング		
○個別に処方した複合トレーニング（在宅高齢者）	0.80	0.66 — 0.98
×個別に処方した筋力トレーニング（在宅高齢者）	0.92	0.73 — 1.16
×施設入所高齢者に個別に処方した理学療法	1.02	0.74 — 1.41
環境評価および調整		
◎転倒者に対する環境調整	0.66	0.54 — 0.81
×転倒経験のない者に対する環境調整	1.03	0.75 — 1.41
運動介入の種類と強度		
×中～高強度の筋力トレーニング	1.09	0.87 — 1.36
◎中～高い難易度のバランストレーニング	0.75	0.60 — 0.94
×中～高強度の持久力トレーニング	0.94	0.75 — 1.18
×ストレッチ	0.89	0.69 — 1.15
×歩行プログラム	1.19	0.96 — 1.46
多変量調整の結果		
○高い難易度のバランストレーニング	0.79	0.66 — 0.95
○全体の運動量（50 時間以上の介入）	0.80	0.67 — 0.96
×歩行プログラム	1.32	1.11 — 1.58

に示す²⁴⁾。これをみると、多角的な介入が必要で、在宅高齢者、つまり ADL がある程度自立している対象者への介入は有効であるが、施設入所者のような介護が必要となる虚弱高齢者には、十分な効果が保証されていないようである。また、運動介入の内容は、高い難易度のバランストレーニングが必要で、全体の運動量は高い方がよい。このデータでは、持久力トレーニングや歩行プログラムが転倒リスクを減らすことに効果がないと示されているが、転倒予防トレーニングを処方する対象者は高齢者であることから、日常の活動量を向上させる意味でも持久力向上や歩行運動をプログラムに加えることが望ましい。

5. おわりに

高齢者の転倒リスクを減らすために、まず筋力、バランス能力、機動性などの運動機能を向上させ、転倒のきっかけとなるつまずき、スリップ、踏み外しを起こしにくい身体づくりが必要であると考えられる。また万が一、転倒しそうになっても、素早

く転倒回避反応を出せるように、とっさのときに素早く全身の筋力を発揮できる能力を向上させることも重要である。虚弱な高齢者の運動療法には、最大筋力を高めるプログラムは必須であるが、転倒回避動作を機能向上させるには、医学的管理の下でパワートレーニングやスピードトレーニングも加えることが必要ではないかと筆者は考えている。

【引用・参考文献】

- 1) http://www.tfd.metro.tokyo.jp/lfe/topics/stop/old_02.pdf (参照 2015-12-10)
- 2) 鈴木隆雄：転倒の疫学。日本老年医学会雑誌。2003; 40: 85-94.
- 3) Maki BE, McIlroy WM: Control of rapid limb movements for balance recovery: age-related changes and implications for fall prevention. Age Ageing. 2006; 35: 12-18.
- 4) Robinovitch SN, Feldman F, et al.: Video capture of the circumstances of falls in elderly people

- residing in long-term care: an observational study. *Lancet*. 2013; 381: 47-54.
- 5) Hsiao-Wecksler ET: Biomechanical and age-related differences in balance recovery using the tether-release method. *J Electromyogr Kinesiol*. 2008; 18: 179-187.
 - 6) Grabiner MD, Donovan S, et al.: Trunk kinematics and fall risk of older adults: translating biomechanical results to the clinic. *J Electromyogr Kinesiol*. 2008; 18: 197-204.
 - 7) Thelen DG, Wojcik LA, et al.: Age differences in using a rapid step to regain balance during a forward fall. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 1997; 52: M8-13.
 - 8) Wojcik LA, Thelen DG, et al.: Age and gender differences in single-step recovery from a forward fall. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 1999; 54: M44-50.
 - 9) Karamanidis K, Arampatzis A, et al.: Age-related deficit in dynamic stability control after forward falls is affected by muscle strength and tendon stiffness. *J Electromyogr Kinesiol*. 2008; 18: 980-989.
 - 10) Hsiao-Wecksler ET, Robinovitch SN: The effect of step length on young and elderly women's ability to recover balance. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2007; 22: 574-580.
 - 11) Carty CP, Barrett RS, et al.: Lower limb muscle weakness predicts use of a multiple- versus single-step strategy to recover from forward loss of balance in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2012; 67: 1246-1252.
 - 12) Carty CP, Cronin NJ, et al.: Lower limb muscle moments and power during recovery from forward loss of balance in male and female single and multiple steppers. *Clin Biomech*. 2012; 27: 1031-1037.
 - 13) Melzer I, Oddsson LI: The effect of a cognitive task on voluntary step execution in healthy elderly and young individuals. *J Am Geriatr Soc*. 2004; 52: 1255-1262.
 - 14) Huxhold O, Li SC, et al.: Dual-tasking postural control: aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention. *Brain Res Bull*. 2006; 69: 294-305.
 - 15) Melzer I, Kurz I, et al.: Application of the voluntary step execution test to identify elderly fallers. *Age Ageing*. 2007; 36: 532-537.
 - 16) Teasdale N, Bard C, et al.: On the cognitive penetrability of posture control. *Exp Aging Res*. 1993; 19: 1-13.
 - 17) 越智亮, 大竹卓実・他: 注意干渉が高齢者の転倒防止時前方ステップ動作に与える影響. *理学療法学*. 2012; 39: 351-358.
 - 18) Tang PF, Woollacott MH: Inefficient postural responses to unexpected slips during walking in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 1998; 53: M471-480.
 - 19) Okada S, Hirakawa K, et al.: Age-related differences in postural control in humans in response to a sudden deceleration generated by postural disturbance. *Eur J Appl Physiol*. 2001; 85: 10-18.
 - 20) Lin SI, Woollacott MH: Postural muscle responses following changing balance threats in young, stable older, and unstable older adults. *J Motor Behav*. 2002; 34: 37-44.
 - 21) Laughton CA, Slavin M, et al.: Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. *Gait Posture*. 2003; 18: 101-108.
 - 22) Ochi A, Yokoyama S, et al.: Differences in muscle activation patterns during step recovery in elderly women with and without a history of falls. *Aging Clin Exp Res*. 2014; 26: 213-220.
 - 23) Carty CP, Cronin NJ, et al.: Reactive stepping behaviour in response to forward loss of balance predicts future falls in community-dwelling older adults. *Age Ageing*. 2015; 44: 109-115.
 - 24) Sherrington C, Whitney JC, et al.: Effective exercise for the prevention of falls: a systematic review and meta-analysis. *J Am Geriatr Soc*. 2008; 56: 2234-2243.
 - 25) Rogers MW, Johnson ME, et al.: Step training improves the speed of voluntary step initiation in aging. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2003; 58: 46-51.
 - 26) Mansfield A, Peters AL, et al.: Effect of a perturbation-based balance training program on compensatory stepping and grasping reactions in older adults: a randomized controlled trial. *Phys Ther*. 2010; 90: 476-91.
 - 27) Arampatzis A, Peper A, et al.: Exercise of mechanisms for dynamic stability control increases stability performance in the elderly. *J Biomech*. 2011; 44: 52-58.

-
- 28) Aragão FA, Karamanidis K, et al.: Mini-trampoline exercise related to mechanisms of dynamic stability improves the ability to regain balance in elderly. *J Electromyogr Kinesiol.* 2011; 21: 512-518.
- 29) Sitjà-Rabert M, Rigau D, et al.: Efficacy of whole body vibration exercise in older people: a systematic review. *Disabil Rehabil.* 2012; 34: 883-893.
- 30) Osawa Y, Oguma Y, et al.: The effects of whole-body vibration on muscle strength and power: a meta-analysis. *J Musculoskelet Neuronal Interact.* 2013; 13: 342-352.
- 31) Russo CR, Lauretani F, et al.: High-frequency vibration training increases muscle power in postmenopausal women. *Arch Phys Med Rehabil.* 2003; 84: 1854-1857.
- 32) Raimundo AM, Gusi N, et al.: Fitness efficacy of vibratory exercise compared to walking in postmenopausal women. *Eur J Appl Physiol.* 2009; 106: 741-748.
- 33) Ochi A, Abe T, et al.: Effect of balance exercise in combination with whole-body vibration on muscle activity of the stepping limb during a forward fall in older women: a randomized controlled pilot study. *Arch Gerontol Geriatr.* 2015; 60: 244-251.