転倒歴の有る腰部脊椎疾患後期高齢者への筋紡錘に対する局所振動刺激による固有受容加重比率

Relative Proprioceptive Weighting Ratio of the Muscle Spindles in Old-old Lumbar Spinal Disease Patients with a History of Falls Assessed by Local Vibratory Stimulus

伊藤 忠^{1,2)} 酒井 義人³⁾ 久保 晃¹⁾ 山崎 一徳⁴⁾
大野 泰生⁵⁾ 中村 英士⁵⁾ 佐藤 孝徳⁵⁾ 森田 良文⁵⁾

TADASHI ITO, PT, MSc^{1,2)}, YOSHIHITO SAKAI, MD, PhD³⁾, AKIRA KUBO, PT, PhD¹⁾, KAZUNORI YAMAZAKI, PhD⁴⁾,
YASUO OHNO, MSc⁵⁾, EISHI NAKAMURA, BSc⁵⁾, NORITAKA SATO, PhD⁵⁾, YOSHIFUMI MORITA, PhD⁵⁾

¹⁾ Division of Physical Therapy, Department of Health Science, Graduate School of International University of Health and Welfare: 2600-1 Kitakanemaru, Otawara-shi, Tochigi 324-8501, Japan. TEL+81 287-24-3200 E-mail: tada-ito@ncgg.go.jp

²⁾ Section for Health Promotion, National Center for Geriatrics and Gerontology

³⁾ Spinal Surgery, National Center for Geriatrics and Gerontology

⁴⁾ School of Health Sciences, Fujita Health University Faculty of Clinical Engineering

⁵⁾ Nagoya Institute of Technology

Rigakuryoho Kagaku 29(4): 633–638, 2014. Submitted Mar. 3, 2014. Accepted Apr. 6, 2014.

ABSTRACT: [Purpose] We investigated the relationship between fall history and center of gravity sway when vibratory stimulus was applied to the multifidus and triceps surae. [Subjects] The subjects were 17 old-old lumbar spinal disease inpatients (9 males, 8 females; average age 79.4 ± 3.1 years). [Methods] A vibratory stimulus of 60 Hz was alternately applied to the multifidus and triceps surae while the subjects stood with their eyes closed. We divided the subjects into fall and no-fall groups and compared the relative proprioceptive weighting ratios (RPW), number of falls, cross-sectional areas of the lumbar spine muscles, skeletal muscle volume, and the abdominal and spinal muscle strengths. We also determined whether or not there was a correlation between RPW and the number of falls. [Results] The RPW of the fall group showed a decline in lumbar proprioception, and a postural strategy prioritizing the lower leg. A correlation was found between RPW and the number of falls. [Conclusion] Our results suggest RPW is an assessment index which is related to falls.

Key words: fall history, relative proprioception weighting ratio, old-old elderly

要旨:〔目的〕腰部多裂筋と下腿三頭筋への振動刺激時の重心動揺と転倒との関係を検証した。〔対象〕腰部脊椎疾患と診断され入院中の後期高齢者17名（男性9名、女性8名、年齢 79.4 ± 3.1 歳）を対象とした。〔方法〕下腿三頭筋および腰部多裂筋に対して閉眼立位で交互に60 Hzの振動刺激を与えた。転倒経験者と未経験者の2群間で、固有受容加重比率（RPW）、転倒スコア、腰背筋断面積、骨格筋量、腹筋力、背筋力を比較した。さらにRPWと転倒スコアとの相関の有無を検証した。〔結果〕転倒経験者のRPWは腰部の固有感覚が低下し、下腿優位の姿勢制御を示した。RPWと転倒スコアの間に相関を認めた。〔結語〕RPWが転倒との関連性に対する評価指標となることが示唆される。

キーワード: 転倒歴, 固有受容加重比率, 後期高齢者

¹⁾ 国際医療福祉大学大学院 保健医療学専攻 理学療法学分野: 栃木県大田原市北金丸2600-1 (〒324-8501)
TEL 0287-24-3200

²⁾ 国立長寿医療研究センター 自立支援システム開発室

³⁾ 国立長寿医療研究センター 先端診療部 脊椎外科

⁴⁾ 藤田保健衛生大学 医療科学部 臨床工学科

⁵⁾ 名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

I. はじめに

局所筋群や腱に存在する固有受容器より発せられた固有感覚の低下が、バランス機能低下の原因となり、転倒リスクを著しく上昇させると指摘されている¹⁾。転倒の主な原因の1つは、バランス機能の低下であり、転倒事故防止のためには、バランス機能の向上が必要であると思われる。また、腰痛を有する高齢者の場合においても、バランス機能低下や固有感覚の低下が報告されており²⁻⁴⁾、腰部脊椎疾患に罹患した高齢者は転倒リスクが高い可能性が考えられる。

近年、固有感覚と腰痛の関係性について報告が散見される²⁻⁶⁾。固有感覚は、関節位置覚・運動覚・筋収縮・知覚などを含む姿勢制御において重要な感覚であり、姿勢制御は腰痛患者で悪化すると報告されている^{5,6)}。固有感覚は、外部刺激の感知、動作や姿勢の把握という二つの機能を有している感覚機能であり、振動覚と位置覚に分類される。一方、加齢に伴い固有感覚は低下していくと報告されている⁷⁾。固有感覚を提供する器官は筋や腱に多数存在しており、固有受容器と呼ばれている。代表的な固有受容器には、筋紡錘(60 Hz)がある。固有受容器は、応答周波数に応じた外部からの振動刺激に対して高い反応を示すことで知られている⁸⁾。腰部脊椎疾患患者の中樞神経系は、股関節や体幹からの固有感覚のシグナルに頼らず、足関節部の入力シグナルに頼っている⁹⁾。腰部脊椎疾患患者と健康人での比較対照試験においても、腰部脊椎疾患患者では腰部多裂筋でのバランス制御機能が低下し、下腿三頭筋優位の制御をしていることが実験的に示されている^{10,11)}。

これらのことから、我々は腰部脊椎疾患の患者の局所振動刺激に対する姿勢バランスの変化と、転倒リスクの高さの間には相関があり、また、制御に反応する周波数は筋紡錘(60 Hz)であるとの仮説を立てた。特に転倒リスクの高い後期高齢者に対して、固有感覚の低下による姿勢バランスの変化を評価することは、転倒予防の一助となるかもしれない。また、固有感覚の低下が、筋量や筋力低下よりも転倒リスクと関係していることを示すことができれば、固有感覚の低下に着目したバランス機能評価が重要になってくる可能性があるだろう。

そこで、本研究の目的は、固有感覚が低下している可能性があり、転倒リスクの高い腰部脊椎疾患を有する後期高齢者を対象とし、転倒経験者と未経験者の筋紡錘に対する局所振動刺激時の重心動揺および転倒との関係性を検証することとした。

II. 対象と方法

1. 対象

腰部脊椎疾患を有し、腰部脊柱管狭窄症および変形性

脊椎症と診断され入院中の75歳以上の高齢者17名(男性9名、女性8名、年齢 79.4 ± 3.1 歳)を対象とした。疼痛または麻痺により起立保持不可能な者、重篤な筋疾患を伴う者、全身状態不良により試験遂行の不可能な者、意思疎通に難渋しアンケート評価が困難な者、進行性の重篤な麻痺のため早急に手術が必要な者は分析対象から除外した。また、すべての測定を完遂できなかった者も今回の分析対象には含めなかった。すべての対象者に対して事前に調査内容を説明し、書面による同意を得た。また、国立長寿医療研究センター倫理・利益相反委員会と名古屋工業大学生命倫理審査委員会の承認を受けて実施した。

2. 方法

対象者には、偏位・振動デバイス(以下、振動デバイス)を用いて、振動刺激を与えた。刺激の部位を左右の下腿三頭筋および腰部多裂筋とし、振動刺激の振動数を筋紡錘が反応する60 Hzとした。振動刺激の偏位は振動数によらず1.6 mmである。振動デバイスの構成は、ノート型パーソナルコンピュータ(東芝社)、オーディオアンプ(アイワ社)、ロータリースイッチ、ボイスコイル型振動子で構成されている。振動子の振動刺激は前後方向のみであり、振動子の振動刺激が重心動揺計の波形に影響を与えないことを周波数解析で確認した。また、同時に2箇所に対し同一刺激を体表から触知可能な筋に与えることができるよう製作した。本デバイスの振動子部分は、ゴムバンドで取り付け、ゴムバンドの長さによって、固定力が異なるため、下腿と腹囲の周径を測定して、振動デバイスの着用バンドの長さを調整し、固定力が一定となるようにした。

重心動揺計には、ノート型パーソナルコンピュータ(ASUS JAPAN社)およびWii Balance Board(任天堂社)を用いた。Wii Balance Boardは、臨床現場で用いられている専用の重心動揺計と同様に動作原理に歪みゲージセンサを用いており、その計測結果と高い相関があるとの報告がある¹²⁻¹⁵⁾。Wii Balance BoardにBluetooth規格で配線接続されたコンピュータで、制作した専用のソフトにより、重心動揺計のデータを取得した。このソフトウェアは、足圧中心(CoP)の座標(軌跡長)の時系列データを100 Hzのサンプリング周波数で取得可能である。専用のソフトを用いることで、時系列に連続した計測データを複数区間に分割して解析することができる。計測データは、測定と、振動刺激の開始と終了を示すフラグが含まれており、振動前、振動中のデータを連続して計測し、各条件での計測データを分割して解析可能である。また、振動デバイスより出力される振動周波数が重心動揺計の波形に影響を及ぼさないことを確認した。

計測の手順を示す。振動刺激を下腿三頭筋と腰部多裂

筋に交互に与え、合計2セットの計測を行った。計測条件は閉足、閉眼とした。計測時間は(1回30秒間)を、15秒ごとの2区間に分けて解析を行った。区間の条件を前半の15秒に対して振動刺激なし(Pre)、後半の15秒に対して振動刺激あり(during)とし、pre-duringの間で振動刺激を計測した。各計測後に、60秒間の座位休息を設けた。

重心動揺の分析で、振動刺激による前後方向の動揺における平均位置の変化量を算出した。この変化量を dy とし、 $dy = \bar{Y}d - \bar{Y}pre$ で求めた。ここで $\bar{Y}d$ はduring間における前後方向(以下CoPy)の平均位置、 $\bar{Y}pre$ はPre間のCoPyの平均位置を表す。対象者に振動刺激を与えた際に、 dy が正であればCoPが前方に移動、負であれば後方へ移動したことを示している。固有受容優位に関する追加情報を得るために、相対的な固有受容加重比率(relative proprioceptive weighting ratio: RPW)を次の式により計算した¹⁶⁾。

$$RPW = \frac{(\text{abs LM})}{(\text{abs GM}) + (\text{abs LM})} \times 100 [\%]$$

ここでabs GMは、下腿三頭筋刺激の、abs LMは腰部多裂筋刺激時の平均CoPの偏位(dy)の絶対値である。この計算式によって、下腿三頭筋と腰部多裂筋のどちらを優位にして姿勢制御を行っているかを算出した。RPWが100%に近づく程、下腿三頭筋の固有受容器優位の姿勢制御に、0%に近づく程、腰部多裂筋の固有受容器優位の姿勢制御に相当する。

転倒スコアに対して¹⁷⁾、自己記入方式での調査を行った。転倒スコアは、過去の転倒歴と、その他、(1)過去1年に転んだことがありますか(転倒回数)、(2)つまづくことがありますか、(3)手すりにつかまらず、階段の上り下りができますか、(4)歩く速度が遅くなってきましたか、(5)横断歩道を青のうちに渡り切れますか、(6)1キロメートルぐらい続けて歩けますか、(7)片足で5秒くらい立っていられますか、(8)杖を使っていますか、(9)タオルを固く絞れますか、(10)めまい、ふらつきがありますか、(11)背中が丸くなってきましたか、(12)膝が痛みますか、(13)目が見えにくいですか、(14)耳が聞こえにくいですか、(15)もの忘れが気になりますか、(16)転ばないかと不安になりますか、(17)毎日お薬を5種類以上飲んでいますが、(18)家の中で歩くとき暗く感じますか、(19)廊下、居間、玄関によけて通るものが置いてありますか、(20)家の中に段差がありますか、(21)階段を使わなくてはなりませんか、(22)生活上、家の近くの急な坂道を歩きますか、の22項目の質問に対する、「はい」、「いいえ」の二者択一形式での回答からなる。質問は項目「3, 5, 6, 7, 9」は「いいえ」を1点、それ以外は「はい」を1点とし、項目「1」は点数として加算せず合計21点で

評価した。

画像による評価としてMRIでL1/L2およびL4/L5高位での脊柱起立筋と腰部多裂筋断面積(腰背筋)の計測を面積計算ソフトウェア(SYNAPSE[®]、富士フイルムメディカル社)を用いて行った。全身筋量の評価として、Dual X-ray absorptiometry (DXA: Lunar DPX-NT[®]、GEヘルスケア・ジャパン社)法により計測される四肢筋量を、身長²で除したものを骨格筋量(appendicular skeletal mass index: ASMI)とした。

筋力評価として、腹筋力は背臥位で体幹を屈曲させ、背筋力は腹臥位で腰椎を後方に伸展させ、ハンドヘルドダイナモメーター(Isoforce GT-300, 310、オージー技研社)を使用して等尺性最大筋力を測定した。

過去1年間の転倒歴から転倒経験者と未経験者に対象者を分類し、RPW、転倒スコア、腰背筋断面積、ASMI、腹筋力、背筋力について群間比較を行った。対象者が、後期高齢者で患者であることにより測定値のバラつきが大きいためMann-WhitneyのU検定を用いた。RPWの結果と、転倒スコアの結果との関連はSpearmanの順位相関係数を用いた。解析にはIBM SPSS statistics ver. 19(日本アイ・ビー・エム社)を用い有意水準は5%とした。

III. 結果

RPWの振動刺激での比較結果を表1に示す。RPWについて転倒経験者と未経験者で比較したところ、転倒経験者が下腿優位の姿勢制御を示すことが認められた(RPW: 転倒経験者 = 86.1 (55.9-95.6)%, 転倒未経験者 = 54.0 (15.8-94.0)%) ($p < 0.05$)。転倒スコアは、転倒経験者(11.0 (8.0-13)点)が未経験者(4.0 (2.0-6.0)点)よりも有意に点数が高かった($p < 0.01$) (表1)。腰背筋断面積、ASMI、腹筋力、背筋力は転倒経験者と未経験者の間で有意な差は認められなかった(表1)。

転倒スコアとの関連は、RPWが有意な相関($r = 0.52$)を示したものの($p < 0.05$)腰背筋断面積($r = -0.28$)、ASMI($r = -0.32$)、腹筋力($r = -0.36$)、背筋力($r = -0.32$)は有意な相関を認めなかった(表2)。

IV. 考察

本研究では、脊椎疾患後期高齢者を対象に転倒経験者と未経験者に分類し、局所振動刺激時のRPWと転倒との関係性、腰背筋、骨格筋量、体幹筋力の違いを検証した。その結果、RPWは転倒経験者で腰部多裂筋の固有感覚の低下から下腿優位の姿勢制御を示し、転倒スコアの得点も高く、相関においても $r = 0.52$ と関連性があることが認められた。このRPWと転倒スコアとの関連性は、振動刺激による姿勢バランスの評価が転倒予防の評

表1 腰部脊椎疾患後期高齢者の転倒経験者と未経験者のRPW およびその他の測定項目 (n=17)

	転倒経験者 (n=5)	未経験者 (n=12)
RPW (%)	86.1 (55.9-95.6) *	54.0 (15.8-94.0)
転倒スコア (点)	11.0 (8.0-13) **	4.0 (2.0-6.0)
腰背筋断面積 (mm ²)	5324.2 (2851.5-5994.6)	5602.7 (2851.5-7997.0)
ASMI (kg/m ²)	5.56 (4.88-6.07)	6.69 (5.23-8.24)
腹筋力 (N)	78.0 (75.0-195.0)	117.0 (80.0-190.0)
背筋力 (N)	134.0 (121.0-179.0)	192.0 (92.0-284.0)

中央値 (最小-最大). 転倒経験者・未経験者 * (p<0.05) ** (p<0.01).

relative proprioceptive weighting ratio (固有受容加重比率): RPW.

appendicular skeletal mass index (骨格筋量): ASMI.

Mann-Whitney の U 検定.

表2 転倒スコアとRPW およびその他の各測定項目との相関 (n=17)

	相関係数 (r)
RPW	0.52*
腰背筋断面積	-0.28
ASMI	-0.32
腹筋力	-0.36
背筋力	-0.32

Spearman の相関係数 * (p<0.05).

relative proprioceptive weighting ratio (固有受容加重比率): RPW.

appendicular skeletal mass index (骨格筋量): ASMI.

価に有益であることを示唆するものである。

本研究では、腰部脊椎疾患後期高齢者において下腿三頭筋が腰部多裂筋よりも筋肉振動に影響されることが認められた。Brumagne ら⁹⁾は、CoPの平均偏位には、下腿三頭筋の振動で後方に変化する感受性が認められたとしている。一方で、高齢者の身体動揺は、前後の動揺に依存しており、体性感覚系と抗重力筋との力学的特性を反映しているといわれている¹⁸⁾。転倒経験者は未経験者と比較して腰部多裂筋の固有感覚が低下していることから、下腿三頭筋により影響を与えており、腰部脊椎疾患後期高齢者の固有感覚は下腿の筋紡錘に依存していることが示された。Capiciková ら¹⁹⁾は、下腿三頭筋に対して 60 Hz の振動刺激を与えると後方へ CoP の変動が起きると報告している。振動刺激に対する筋紡錘の感受性は、強度、移動、周波数や刺激など力学的な特徴に依存している^{20,21)}。これまで多くの研究が、主に振動刺激が Ia 求心性線維を活動させると報告している^{22,23)}。今回の結果も、下腿三頭筋の振動刺激によって、環らせん終末に変形が起き、受容器電位が発生し、Ia 線維に放電が起こり、脊髄での運動ニューロンが活性化され、姿勢制御を下腿に依存させた可能性を推察させるものである^{24,25)}。また、転倒経験者の腰部多裂筋の振動に対する感度の低下は、腰部多裂筋の筋紡錘の求心性情報の

感受性が低下していることが考えられた²⁶⁾。

このことから、腰部脊椎疾患後期高齢者は、腰部多裂筋の筋紡錘の固有感覚が低下することで転倒しやすくなる可能性があると考えられる。また、転倒経験者は未経験者よりも下腿優位となる姿勢制御の戦略を利用し、不安定な場所での活動時に腰部の固有感覚の入力が弱いいため、転倒しやすくなるといえる。腰部脊椎疾患後期高齢者において筋紡錘の固有感覚入力低下が、姿勢安定性の低下の原因になる可能性がある。これらの結果は、腰部脊椎疾患に罹患した後期高齢者の姿勢制御に関与する可能性のある感覚のメカニズムと転倒リスクの予防戦略に若干の知見を与えるものである。

Ivanenko ら²⁷⁾によれば、健常者は感覚情報を理解しながら現在の姿勢を内部表現に従って変更できる。しかし、別に、腰痛患者における感覚障害は病理学的因子および正常な加齢によって生じる²⁴⁾との報告から、特に転倒経験者は感覚情報を理解して姿勢を変更することが困難となっている可能性もあるともいえる。過去の研究では、腰痛を再発させた若年者と健常若年者において 60 Hz の振動刺激を下腿三頭筋、前脛骨筋、傍脊柱筋に与えたとき、傍脊柱筋ではなく足関節筋群の固有受容コントロール優位の姿勢制御戦略が示されている²⁸⁾。また、腰痛を再発した者に限って、不安定な支持面での立位も同様の固有感覚による姿勢制御を示す²⁸⁾。一方、高齢者は下腿に振動刺激を与えられると感覚入力を再度行うことが上手くできず、急速な姿勢制御ができないともいわれている²⁹⁾。本研究の転倒経験者も、下腿優位の姿勢制御を示すが、急速な姿勢制御はできない可能性が考えられ、このことも転倒につながる要因となると推察される。

これらの固有感覚低下を代償し、姿勢制御を適切に維持するには、視覚情報などの他の感覚系の入力を増加させることが必要であるかもしれない^{2,30)}。また、腰部多裂筋と下腿三頭筋へ振動刺激を与え、筋紡錘の固有感覚に刺激入力をさせながら姿勢制御を調節するバランス練習も有効であろう。

本研究では、固有感覚低下と転倒の関連を調べた。本研究の対象者の転倒スコアは、転倒経験者が未経験者より有意に点数が高く、RPWとの間に相関を示した。一方で、この転倒スコアと腰背筋断面積、ASMI、腹筋力、背筋力との相関は低かった。これは、腰部脊椎疾患後期高齢者の転倒リスクの要因が、筋量や筋力よりも筋紡錘の固有感覚低下に関連している可能性が高いことを意味している。転倒スコアは、10点以上が転倒のハイリスクとされ、本研究の転倒経験者における転倒スコアが、ハイリスクとされる10点以上であることには、腰部多裂筋の固有感覚低下と下腿優位の姿勢制御によるバランスの不安定性が影響しているのかもしれない。

本研究の転倒経験者では、未経験者と比べて腰背筋の厚さや骨格筋量、体幹筋力が低下していると予測されたが、有意な差は認められなかった。このことから、腰部脊椎疾患後期高齢者の場合、筋機能が転倒に与える影響が小さいことが示唆される。また、バランス機能低下には、腰背筋断面積や、ASMI、腹筋力、背筋力よりも先に、腰部多裂筋の筋紡錘の固有感覚が低下していくことが要因となっていると考えられる。

本研究にはいくつかの限界が含まれている。局所振動刺激の転倒への影響と関連性のある固有受容周波数が60 Hzであることは確認できたが、妥当性については検討ができていない。また、本研究では腰部脊柱管狭窄症および変形性脊椎症と診断された後期高齢者を対象としており、前期高齢者や地域在住高齢者などの腰部脊椎疾患に罹患した対象者での検証を行っていないため、これらの対象者における局所振動刺激の固有感覚評価は慎重に検討するべきと思われる。また、対象者数を増大させた検証や縦断データによる妥当性の検証が必要である。しかし、このような制約はあるものの、今回の結果より腰部脊椎疾患後期高齢者において、腰部多裂筋の筋紡錘の固有感覚の低下が、下腿優位の姿勢制御に関与し、これが転倒につながるものといえる。

以上のことから、腰部脊椎疾患に罹患した高齢者を対象とした転倒予防評価において、重心動揺計で測定されるCoPの偏位やロンベルグ率、片脚立位の評価のみならず、筋紡錘への局所振動刺激によるRPWが転倒予防の効果を検証する指標のひとつとして活用できるといえる。

引用文献

- 小西 優：転倒歴を持つ高齢者の下肢筋内の固有受容感覚器の機能評価。健康医科学, 2005, 21: 40-46.
- Pyykko I, Jantti P, Aalto H: Postural control in elderly subjects. Age Ageing, 1990, 19(3): 215-221.
- Quoniaru C, Hay L, Roll JP, et al.: Age effects on reflex and postural responses to propriomuscular inputs generated by tendon vibration. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 1995, 50(3): 155-165.
- Parkhurst T, Burnett C: Injury and proprioception in the lower back. J Orthop Sports Phys Ther, 1994, 19(5): 282-295.
- Luoto S, Aalto H, Taimela S, et al.: One-footed and externally disturbed two-footed postural control in patients with chronic low back pain and healthy control subjects. A controlled study with follow-up. Spine, 1998, 23(19): 2081-2089.
- Radebolt A, Cholewicki J, Polzhofer GK, et al.: Impaired postural control of the lumbar spine is associated with delayed muscle response times in patients with chronic idiopathic low back pain. Spine, 2001, 26(7): 724-730.
- Abrahámová D, Mancini M, Hlavacka F, et al.: The age-related changes of trunk responses to Achilles tendon vibration. Neurosci Lett, 2009, 467(3): 220-224.
- 松丸隆文：生体機能工学。東京電機大学出版局，東京，2008, p29.
- Brumagne S, Cordo P, Verschueren S: Proprioceptive weight changes in persons with low back pain and elderly persons during upright standing. Neurosci Lett, 2004, 366(1): 63-66.
- Claeys K, Brumagne S, Dankaerts W, et al.: Decreased variability in postural control strategies in young people with non-specific low back pain is associated with altered proprioceptive reweighting. Eur J Appl Physiol, 2011, 111(1): 115-123.
- Johanson E, Brumagne S, Janssens L, et al.: The effect of acute back muscle fatigue on postural control strategy on people with and without recurrent low back pain. Eur Spine J, 2011, 20(12): 2152-2159.
- Clark RA, Bryant AL, Pua Y, et al.: Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board for assessment of standing balance. Gait Posture, 2010, 31(3): 307-310.
- Young W, Ferguson S, Brault S, et al.: Assessing and training standing balance in older adults: a novel approach using the 'Nintendo Wii' Balance Board. Gait Posture, 2011, 33(2): 303-305.
- Holmes JD, Jenkins ME, Johnson AM, et al.: Validity of the Nintendo Wii® balance board for the assessment of standing balance in Parkinson's disease. Clin Rehabil, 2013, 27(4): 361-366.
- Bartlett H, Bingham J, Ting LH: Validation and calibration of the Wii Balance Board as an inexpensive force plate. American Society of Biomechanics, 2012, 1(2): 3-4.
- Janssens L, Brumagne S, McConnell AK, et al.: Proprioceptive changes impair balance control in individuals with chronic obstructive pulmonary disease. PLoS One, 2013, 8(3): e57949.
- 鳥羽研二, 大河内二郎, 高橋 泰・他：転倒リスク予測のための「転倒スコア」の開発と妥当性の検証。日本老年医学会雑誌, 2005, 42 (3): 346-352.
- Brocklehurst JC, Robertson D, James-Groom P: Clinical correlates of sway in the old age. Age Ageing, 1982, 11(1): 1-10.
- Capiciková N, Rocchi L, Hlavacka F, et al.: Human postural response to lower leg muscle vibration of different duration. Physiol Res, 2006, 55(1): S129-S134.
- Cordo P, Gandevia SC, Hales JP, et al.: Force and displacement-controlled tendon vibration in humans. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1993, 89(1): 45-53.

-
- 21) Wierzbicka MM, Gilhodes JC, Roll JP: Vibration-induced postural post effects. *J Neurophysiol*, 1988, 79(1): 143-150.
 - 22) Roll JP, Vedel JP, Ribot E: Alternation of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res*, 1989, 76(1): 213-222.
 - 23) Gilhodes JC, Gurfinkel VS, Roll JP: Role of Ia muscle spindles afferents in post-contraction and postvibration motor effects genesis. *Neurosci Lett*, 1992, 135(2): 247-251.
 - 24) Pyykko I, Aalto H, Seidel H, et al.: Hierarchy of different muscles in postural control. *Acta Otolaryngol Suppl*, 1989, 468(15): 175-180.
 - 25) Magnusson M, Enbom H, Johansson R, et al.: Significance of pressor input from the human feet in anterior-posterior postural control. The effect of hypothermia on vibration-induced body-sway. *Acta Otolaryngol*, 1990, 110(3-4): 182-188.
 - 26) Brumagne S, Cordo P, Lysens R, et al.: The role of paraspinal muscle spindles in lumbosacral position sense in individuals with and without low back pain. *Spine*, 2000, 25 (8): 989-994.
 - 27) Ivanenko YP, Solopova IA, Levik YS: The direction of postural instability affects postural reactions to ankle muscle vibration in humans. *Neurosci. Lett*, 2000, 292 (2): 103-106.
 - 28) Brumagne S, Janssens L, Knapen S, et al.: Persons with recurrent low back pain exhibit a rigid postural control strategy. *Eur Spine J*, 2008, 17(9): 1177-1184.
 - 29) Hay L, Bard C, Fleury M, et al.: Availability of visual and proprioceptive afferent messages and postural control in elderly adults. *Exp Brain Res*, 1996, 108(1): 129-139.
 - 30) Jones KE, Wessberg J, Vallbo A: Proprioceptive feedback is reduced during adaptation to a visuomotor transformation: preliminary findings. *Neuroreport*, 2001, 12 (18): 4029-4033.