

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：33305

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23300238

研究課題名(和文)高齢者における足関節運動に限定した動的姿勢制御に対する下腿筋力トレーニング効果

研究課題名(英文) Training effects of lower leg muscle to dynamic postural control focused the ankle movement in the elderly.

研究代表者

藤原 勝夫 (Fujiwara, Katsuo)

金沢学院大学・公立大学の部局等・教授

研究者番号：60190089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：足関節を主軸とした姿勢制御となるようにギブスにより足関節以外の関節を固定した場合、下腿筋に明確な予測活動が認められるようになり、下腿筋からの筋感覚情報に注意が強く向けられるようになった。高齢者では、足関節を基軸とした姿勢調節能、特に後方バランス機能が顕著に低下すること、それが位置知覚能の低下によるものと推察された。それが、バランスボードを用いたバランストレーニングによって改善されることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The postural control pivoting at the ankle with the leg and trunk fixed using a cast brace was investigated. In the young adults, anticipatory activation of the triceps surae was clearly recognized, and anticipatory attention was strongly directed to the sensory information from the triceps surae. In the elderly, postural controllability pivoting at the ankle, especially backward balance, was markedly declined, which would be caused by the decrease in the position perceptibility. The postural controllability and the perceptibility in the elderly were improved by the balance training using a balance board.

研究分野：運動生理学

キーワード：予測的姿勢制御者 位置知覚能 バランスボード バランストレーニング 下腿筋力トレーニング ギブス固定 高齢

1. 研究開始当初の背景

動的姿勢制御の研究では、主に上肢屈曲運動(Belen'kii et al., 1967; Woollacott et al., 1986; Fujiwara et al., 2003)、一過性床移動(Cordo and Nashner, 1982; Maki et al., 1994; Horak et al., 2002; Jacobs et al., 2008; Fujiwara et al., 2011)、床振動(Berger et al., 1992; Nardone et al., 2000; Fujiwara et al., 2007)が用いられてきた。上肢屈曲運動では、随意運動に付随する姿勢制御が、一過性床移動では運動準備に基づく姿勢応答が、床振動では周期的姿勢制御が検討されてきた。それらの多くの研究では、姿勢筋活動様式が主に検討されてきた。これらの姿勢制御はいずれも予測的になされるがゆえに、外乱に対する準備脳活動と姿勢筋の活動様式との関係が、重要な研究課題であろう。そこで、我々は姿勢制御様式に深く関わる準備脳活動について、比較的動的な状態で測定できる事象関連脳電位(標的刺激に向けて陰性電位が増加する随伴陰性変動: CNV)を指標として検討してきた(Maeda and Fujiwara, 2007; Fujiwara et al., 2009, 2011)。CNVには、標的刺激に向けての予測的注意と運動準備の状態が反映される(Gemba et al., 1990; Brunia and Van Boxtel, 2001)。その研究中に、姿勢運動が股関節、膝関節および足関節の運動が複雑に混在するとともに、姿勢運動様式に大きな個体差が存在し、制御対象筋を絞り切れなかった(Horak and Nashner, 1986; Fujiwara et al., 2001)。そこで、股関節と膝関節を固定することによって、足関節運動戦略を用いた姿勢制御に焦点を当てて、準備脳活動と姿勢筋活動様式との関連性について検討することにした。

一方、加齢に伴って転倒が多くなるが、その原因は下腿筋力の減少による動的姿勢制御能の低下であると推察されている(Horak et al., 1989)。下肢筋の筋力トレーニングによって、動的バランス機能が改善されることは確認されている(Cao et al., 2007; Persch et al., 2009; Pijnapples et al., 2008; Ribeiro et al., 2009)が、準備脳活動および姿勢筋活動様式の詳細な検討はなされていない。高齢者の動的姿勢制御では、足関節戦略を用いることが困難となり、主に股関節戦略を用いることが多くなると報告されている(Bleuse et al., 2006; Ai, Fujiwara et al., 2007)。我々は姿勢保持時の筋活動様式と筋組成を考慮して(Henneman et al., 1965; Okada, 1970; Saltin et al., 1977)、姿勢保持において重要な働きをなすヒラメ筋の筋力強化に焦点を当てた踵拳上筋力トレーニングを実施し、上肢運動時の姿勢制御様式の改善効果を検証した(Fujiwara, Toyama et al., 2011)。しかし、姿勢制御を下腿筋に特化して解析できなかった。加えて準備脳活動についても測定していなかった。そこで、本研究では、高齢者を対象に、ヒラメ筋に焦点を当てた踵拳上筋力トレーニングを行い、股関節と膝関節を固定

しての動的姿勢制御における準備脳活動と姿勢筋活動様式に及ぼす影響について検討することにした。加えて、高齢者では、足関節運動を主とした姿勢制御に強制的に変えた場合には、試行を重ねることによる適応現象が速度は遅いが生じるであろう(Woollacott et al., 1986; Bronstein et al., 1990; Ooteghem et al., 2009)。それに関連して、準備脳活動と姿勢筋活動様式との関係にも、適応的变化が生じることも十分予想される。

2. 研究の目的

動的姿勢制御には、上肢などの随意動作に付随する姿勢制御、一過性の外乱に対する姿勢制御、および周期的な外乱に対する連続的姿勢制御がある。これらの姿勢制御はいずれも予測的になされるがゆえに、外乱に対する準備脳活動と姿勢筋の活動様式との関係が、重要な研究課題となる。しかし、動的姿勢制御における準備脳活動については十分な検討がなされていない。加えて、いずれの姿勢筋の活動様式にも顕著な個体差が存在している。それゆえ、両者の関係を明確にとらえることができなかった。そこで、本研究では、股関節と膝関節を固定することで、動的姿勢制御の姿勢運動様式を単純化し、制御対象となる筋を下腿筋に限定した。前頭葉を中心とした準備脳活動は、事象関連脳電位(随伴陰性変動: CNV)を用いて測定した。一方、転倒が多くなる高齢者では、動的姿勢制御において足関節運動(足関節戦略)を主とした姿勢制御が困難になるとして、下腿筋トレーニングの重要性が指摘されている。しかし、股関節、膝関節、および足関節の運動は相互に関連しているため、高齢者の動的姿勢制御における足関節戦略の困難さについての検証は不十分である。本研究では、姿勢保持に強く関与する遅筋線維を多く含むヒラメ筋に焦点を当てたトレーニングを行い、上記の関節固定による足関節戦略を用いた動的姿勢制御に及ぼす影響について検討した。

3. 研究の方法

平成 23 年度は若年成人を対象に、股関節と膝関節を固定することで動的姿勢制御の対象となる筋を下腿筋に限定し、動的姿勢制御における準備脳活動と姿勢筋活動様式との関係について検討した。姿勢制御課題別に、次の仮説について検証した。

上肢屈曲運動: 関節固定において、CNVの陰性電位ピークの振幅が高くなり、潜時が早期化する。それに対応した下腿筋の予備緊張の増加が認められる。加えて、三角筋に対する下腿筋の先行活動が顕著になる。これらの現象は、適応に伴ってより顕著になる。

一過性床移動: 関節固定において、CNVの陰性電位ピークの振幅が高くなり、潜時が早期化する。それに対応した下腿筋の予備緊張の増加が認められる。加えて、床移動後の下

腿筋のバースト活動の潜時が短縮する。これらの現象は、適応に伴ってより顕著になる。床振動：関節固定において、床の前方変曲点付近に、より大きいCNVの陰性電位と下腿筋の活動のピークが認められる。この現象は、適応に伴って減少する。

平成24年度は高齢者を対象に、平成23年度と同じ項目について検討した。若年者と異なる次の仮説について検証した。(1)予測的準備機能が劣っているため、顕著なCNV陰性電位のピークが認められない。(2)姿勢筋の活動様式に衰退現象が認められる。(3)姿勢制御課題によっては、準備脳活動と姿勢筋活動様式との間にパラレルな関係が認められない。(4)若年者に比べて適応が遅く、かつ到達できる適応水準が低い。

平成25-27年度は高齢者を対象に、踵挙上による下腿筋の筋力トレーニングを実施し、上記の姿勢制御課題に対する効果について検討した。次の仮説について検証した。(1)ヒラメ筋の筋厚に顕著なトレーニング効果が得られる。(2)準備脳活動および姿勢筋活動様式が、若年者に近づく。(3)準備脳活動と姿勢筋活動様式との関係に変化が生じる。(4)適応の早期化が認められる。(5)後傾姿勢での位置感覚能が、バランスボードを利用したバランストレーニングによって改善する。

関節固定具：キャスト材を用いて被験者毎に作成した。固定具の作成には、一人につき約1時間を要した。固定する関節は、両側の股関節と膝関節とし、固定姿勢は安静立位とした。被験者には、Tシャツとスパッツを着用させ、綿様のキャスト緩衝材を胸骨剣状突起部端から内側腓腹筋の筋腹下端部まで巻いた。キャスト材は、第8肋骨から内側腓腹筋の筋腹まで巻きつけた。大腿内側部でのキャスト材の上端は股下10cmの高さとした。キャスト材が硬化した後に、ギブスカッター等でキャスト材を前面と後面に2分割するように側面を切断した。切断された前面と後面のキャスト材には、筋電図電極からのリード線を導出するための開口部を設けた。研究の後半では、同様の機能を有する固定具を、アルミ棒を用いて作成した。

バランストレーニングは、平板(縦52cm、横30cm、厚さ1.5cm)の縦辺中央に横辺と平行な二軸(幅2cm)を形成するアタッチメントを取り付けたバランスボードを使用して実施した。バランスボードは、このアタッチメントにより、足圧中心が二軸内に存在する場合には水平位を、それ以外の場合には5度傾斜する。バランストレーニングでは、二軸の中央に中足骨骨頭ないし内果下端を合わせ、身体の前傾ないし後傾によって、水平なボード上で立位姿勢を保持させた。姿勢保持時間を2秒間とし、1日に各姿勢を100回ずつ、両上肢の支持がない状態で保持した。

筋力トレーニングは、爪先立ち運動と踵立ち運動を、両上肢で支持し、それぞれ100回課した。

いずれのトレーニングも、約1ヶ月間実施した。

4. 研究成果

(1)上肢屈曲運動においては、固定により、三角筋に対する腓腹筋の先行活動が明確になった。CNVは、固定により、振幅が有意に増加し、そのピーク潜時は減少傾向を示した。

一過性床移動においては、固定により、CNVのピーク振幅が有意に増大した。その潜時には固定の影響が認められなかった。腓腹筋の活動開始は、CNVピークに対して固定前が132ms、固定中が158ms、それぞれ先行した。CNVと腓腹筋の潜時の相関は、固定中に特に高かった($r=0.94$)。

床振動においては、適応後における事象関連脳電位(ERP)の陰性ピークは、床の前方変曲点に対して、固定前では68ms、固定中では77msの遅れを示した。ERP陰性ピークは、腓腹筋の活動ピークに対して、固定前では42ms、固定中には57ms遅れて生じた。ERP陰性ピーク時点は、腓腹筋の活動ピーク時点と、特に固定中に高い相関($r=0.83$)を示した。

(2)高齢者を対象に、上肢屈曲運動、一過性床後方移動、および床振動時の姿勢制御における準備脳活動と姿勢筋活動様式との関係について検討した。いずれの課題でも、姿勢制御様式の適応的変化の速度は若年者に比べて著しく遅かった。上肢屈曲運動では、固定により、下腿三頭筋の活動開始は固定無よりも有意に早くなり、三角筋のバースト開始との間に有意差がなくなった。ただし、若年者と異なって、下腿三頭筋の先行活動は認められなかった。一過性床移動では、床移動後のCoPapの移動位置は、固定により有意に後方になった。下腿三頭筋を含む背面筋のバースト活動開始時間は、固定により有意に早くなった。CNVピークの振幅は、若年者では固定により増加するのに対して、高齢者では有意な変化を示さなかった。床振動では、事象関連脳電位(ERP)の陰性ピークは、固定により振幅が増加し、潜時が延長した。ただし、この変化は、若年者に比べて小さかった。また、ERP陰性ピーク時点と腓腹筋の活動ピーク時点との相関は、固定により有意に高くなった。

(3)高齢者を対象に、立位位置を規定できるバランスボードを用いて、前・後傾姿勢を保持するトレーニングを行い、上肢屈曲運動における足関節戦略を用いた動的姿勢制御能の改善について検討した。

トレーニング群に特異的に、次の項目で有意な効果が認められた。安静立位位置の前方移動、最前傾位置および最後傾位置の前・後方への拡大、底・背屈力の増加、CNVが後半でピーク振幅を示し、およびGcMの開始タイミングの早期化である。これらの結果は、高

高齢者においても、バランスボードトレーニングによって、足関節周りの筋が、姿勢制御に参加するようになったことを示す。

(4)高齢者を対象に、股・膝関節および体幹を固定しての周期的床振動（周波数 0.5Hz、振幅 2.5cm）時の姿勢制御課題に対する、種々の筋力トレーニング効果について検討した。24 名の高齢者を以下の 2 群に分けた：上肢の支持ありでの下肢筋力トレーニング群（筋トレ群）、バランスボードを用いた下肢筋力トレーニング群（バランスボード群）、筋トレ群およびバランスボード群のいずれにおいても、底屈力・背屈力ともに増大した。特に背屈力の増大が顕著であった。筋厚の増加率（約 10%）は、筋間および被験者群間で有意な違いが認められなかった。床振動の初期では、前方よりも後方に転倒する回数が多かった。床振動の試行を重ねるにつれ、その転倒回数は減少し、両群ともにトレーニング後の値には試行を重ねることによる変化は認められなかった。しかし、バランスボード群においてのみ、トレーニング後に後方への CoP の移動幅が顕著に減少した。床振動の ERP は、トレーニング前には前方および後方変曲点付近に二峰性の陰性ピークが認められたが、トレーニング後には、バランスボード群においてのみ、後方のピークが減少し、前方により高い陰性ピークが認められるようになった。これらのことから、バランストレーニングにより、床振動時の注意が前方変曲点付近に焦点化される傾向が認められた。

(5)これまでに、高齢者を対象とした動的平衡機能の研究で、次のことが明らかになっている。閉眼での水平床振動時に後方への転倒が多い。上肢運動時に足関節を基軸とした姿勢制御能が低下している。下腿筋力の増加が平衡機能の向上に結びつかない。このことから、高齢者では、足関節を基軸とした特に後方位置知覚能が低下しているのではないかと予想した。足関節を基軸とするように、足関節よりも上部の下肢と体幹の関節をギブスにより固定し、前・後傾の位置知覚能を測定した。位置知覚能のトレーニングを行うために、目標位置に達すると床が水平となるバランスボードを使用した。被験者は 61 歳から 75 歳の健康な在宅老人 20 名（男 10 名、女 10 名）とし、バランストレーニングと下腿筋力トレーニングを課した。足関節を基軸とした立位姿勢の位置知覚能を、トレーニング期間の前・後日に測定した。測定は平らな床反力計で、目標位置を中足骨骨頭と内踝下端とした。目標位置には、安静立位から前・後傾により、閉眼にてブザー音を頼りに確認した後（2 秒間保持）、ブザー音を無くし、体性感覚を頼りに再現（2 秒間保持）した。この試行を前・後傾 10 回ずつ繰り返した。その再現絶対誤差により、位置知覚能を評価した。加えて、底・背屈力およびヒラメ筋、

腓腹筋および前脛骨の筋厚を、超音波計を用いて測定した。

トレーニング前の前・後半の 5 試行ずつの再現絶対誤差を比較したところ、有意差が認められなかった。トレーニング前の再現誤差は、前傾条件よりも後傾条件の方が有意に大きかった。トレーニングによってその差は有意でなくなった。再現絶対誤差は、前傾条件では、トレーニング前後に有意差が認められなかった。それに対して後傾条件では、トレーニング前に比べてトレーニング後で有意に小さかった（ $P < 0.01$ ）。底屈力および背屈力は、トレーニング前に比べてトレーニング後に有意に増大した（ $P < 0.01$ ）。前脛骨筋およびヒラメ筋・腓腹筋の筋厚は、いずれもトレーニング前に比べてトレーニング後に有意に増加した（ $P < 0.01$ ）。筋力と再現絶対誤差との間には、いずれも有意な相関が認められなかった（ $r < 0.3$ ）。

以上の結果から次のことが推察された。前傾よりも後傾の位置知覚能が低い。バランスボードを用いた位置知覚能のトレーニング効果が後傾に認められた。位置知覚能の向上には筋力の増加がほとんど関与していない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Katsuo Fujiwara, Hiroshi Toyama, Hitoshi Asai, Chie Yaguchi, Mariko Irei, Masami Naka and Chizuru Kaida. Effects of regular heel-raise training aimed at the soleus muscle on dynamic balance associated with arm movement in elderly women. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 査読有, 25(9): 2605-2615, 2011.

DOI: 10.1519/JSC.0b013e3181fb4947.

Katsuo Fujiwara, Maki Maekawa, Naoe Kiyota and Chie Yaguchi. Adaptation changes in dynamic postural control and contingent negative variation during backward disturbance by transient floor translation in the elderly. *Journal of Physiological Anthropology*, 査読有, 31(12), 2012.

DOI: 10.1186/1880-6805-31-12.

Katsuo Fujiwara, Kaoru Maeda, Mariko Irei, Aida Mammadova and Naoe Kiyota. Changes in event-related potentials associated with postural adaptation during floor oscillation. *Neuroscience*, 査読有, 213: 122-132, 2012.

DOI: 10.1016/j.neuroscience.2012.03.027.

Maki Maekawa, Katsuo Fujiwara, Naoe Kiyota and Chie Yaguchi. Adaptation changes in dynamic postural control and contingent negative variation during

repeated transient forward translation in the elderly. *Journal of Physiological Anthropology*, 査読有, 32:24, 2013.

DOI: 10.1186/1880-6805-32-24

Hiroshi Toyama, Katsuo Fujiwara and Fumiaki Sato. Changes in body sway and muscle activity with adaptation while standing on an oscillating floor. *Health and Behavior Sciences*, 査読有, 13(1): 1-8, 2014.

Katsuo Fujiwara, Naoe Kiyota, Maki Maekawa, Semen V Prokopenko and Abroskina M Vasilyevna. Postural control during transient floor translation while standing with the leg and trunk fixed. *Neuroscience Letters*, 査読有, 594:93-98, 2015.

DOI: 10.1016/j.neulet.2015.03.033.

Kaoru Maeda, Katsuo Fujiwara, Naoe Kiyota and Chie Yaguchi. Adaptive changes of postural control and blood flow in regional brain areas of cerebral cortex during periodic floor oscillation. *Health and Behavior Sciences*, 査読有, 14(1): 17-27, 2015.

Katsuo Fujiwara, Mariko Irei, Naoe Kiyota, Chie Yaguchi and Kaoru Maeda. Event-related brain potential and postural muscle activity during standing on an oscillating table while the knee, hip, and trunk are fixed. *Journal of Physiological Anthropology*, 査読有, 35(1): 6, 2016. 35:6.

DOI: 10.1186/s40101-016-0088-4.

[学会発表](計 12 件)

藤原勝夫: 高齢者における床移動外乱に対する姿勢制御適応能と随伴陰性変動. 日本健康行動科学会第 10 回学術大会、神奈川、2011 年

Katsuo Fujiwara, Kaoru Maeda, Mariko Irei and Aida Mammadova. Changes in event-related potentials associated with postural adaptation during floor oscillation. Society for Neuroscience 41th Annual Meeting, Washington, America, 2011.

藤原勝夫, 清田直恵, 前川真姫. 下肢および体幹をギブス固定しての一過性床振動時の姿勢制御. 日本健康行動科学会第 11 回学術大会、東京、2012.

前川真姫, 藤原勝夫. 高齢者における一過性前方床移動課題を繰り返し負荷した場合の動的姿勢制御および随伴陰性変動の適応的变化. 日本生理人類学会第 68 回大会、金沢、2013.

清田直恵, 藤原勝夫, 前川真姫. 下肢および体幹をギブス固定しての一過性後方床移動時の随伴陰性変動および姿勢筋活動の適応的变化. 日本健康行動科学会第 12

回学術大会、札幌、2013.

Naoe Kiyota, Katsuo Fujiwara, Maki Maekawa and Mariko Irei. Postural control during transient floor translation while standing with the leg and trunk fixed. Society for Neuroscience 2013, San Diego, America, 2013.

Katsuo Fujiwara, Chie Yaguchi, Mariko Irei and Maki Maekawa. Effects of joint fixation in the leg and trunk on anticipatory postural control during bilateral shoulder flexion in the elderly. Society for Neuroscience 2013, San Diego, America, 2013.

藤原勝夫, 伊禮まり子. 膝・腰・体幹の関節固定での床振動台上での立位保持時の事象関連脳電位. 日本生理人類学会第 70 回大会、福岡、2014.

Katsuo Fujiwara, Mariko Irei, Naoe Kiyota and Chie Yaguchi. Event-related brain potential and postural muscle activity during standing on oscillation floor with fixing the knee, hip and trunk. Society for Neuroscience 2014, Washington DC, America, 2014.

Maki Maekawa, Katsuo Fujiwara, Naoe Kiyota and Chie Yaguchi. Adaptation changes in dynamic postural control and contingent negative variation during repeated transient forward translation in the elderly. Society for Neuroscience 2014, Washington DC, America, 2014.

Katsuo Fujiwara, Naoe Kiyota, Mariko Irei, Chie Yaguchi, Hiroshi Toyama. Effects of lower leg muscle and balance training on periodic floor oscillation task with fixing the knee, hip and trunk in the elderly. Society for Neuroscience 2015, Chicago, America, 2015.

藤原勝夫, 外山寛, 兵頭彩, 佐藤文亮, 日比野豪, 山田美華子. 高齢者のバランスボードによる前・後傾姿勢の位置知覚能のトレーニング効果. 日本生理人類学会第 73 回大会、大阪、2016.

[図書](計 3 件)

藤原勝夫(編著)、杏林書院、姿勢制御の神経生理機構、2011、258

藤原勝夫(日本生理人類学会 編)、丸善出版、人間科学の百科事典、2014、782

藤原勝夫(宮村実晴 編集)、真興交易、ニュー運動生理学 I、2014、374

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: バランス及び歩行機能のトレーニング器具

発明者：藤原勝夫

プロコペンコ，セミヨン，ヴラ
ジーミロヴィッチ
アプロシキナ，マリア，ヴァシリ
エヴナ
オンドール，ヴェーラ，セミュー
ノヴナ
ペトローバ，マリーナ，ミハイロ
ヴナ

権利者：国立大学法人金沢大学

種類：特許

番号：特許願 2014-239132

出願年月日：2014年11月26日

国内外の別：国外

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤原 勝夫 (FUJIWARA, Katsuo)
金沢学院大学・人間健康学部・教授
研究者番号：60190089

(2)研究分担者

前田 薫 (MAEDA, Kaoru)
森ノ宮医療大学・保健医療学部・准教授
研究者番号：00454687

外山 寛 (TOYAMA, Hiroshi)
金沢学院大学・人間健康学部・教授
研究者番号：10172206

国田 賢治 (KUNITA, Kenji)
札幌国際大学・スポーツ人間学部・教授
研究者番号：20316003

清田 岳臣 (KIYOTA, Takeo)
札幌国際大学・スポーツ人間学部・准教授
研究者番号：40434956

清田 直恵 (KIYOTA, Naoe)
日本医療大学・保健医療学部・講師
研究者番号：90559189

(3)研究協力者

矢口 智恵 (YAGUCHI, Chie)
北海道文教大学・人間科学部・助教

伊禮 まり子 (IREI, Mariko)
大阪保健医療大学・保健医療学部・講師

前川 真姫 (MAEKAWA, Maki)
IPU・環太平洋大学・体育学部・講師

PROKOPENKO, Semyon
Krasnoyarsk State Medical University
(RUS)・Neurology Department・Professor