

座位での上肢バランストレーニングが立位姿勢の重心動揺に与える影響

Effects of Upper Limb Balance Training by Sitting on Standing Postural Control

○ 竹林昌大（香川大大学院） 井上恒（香川大）

Masahiro TAKEBAYASHI, Kagawa University

Koh INOUE, Kagawa University

Abstract: A few studies have reported that training in sitting posture using the upper limbs improved standing postural control. Although these studies suggested that the balance training on the arms effected standing postural control, free motion of the trunk and head were included. Therefore, the mechanism of the improvement remains unclear. The purpose of the present study was to investigate the effects of arm balance training on standing postural control. Ten subjects were assigned into two groups randomly and asked to perform balance exercise on the arm with and without restraint of trunk and neck motion. The position of the center of pressure (COP) on the force platform was measured during standing before and after the four week training. As the result, anterior-posterior range of COP trajectory was decreased in the both groups. The improvements in the both groups would have been derived from internal models constructed by the training.

Key Words: Balance training, Postural Control, Upper limbs

1. 緒言

高齢者は若年成人などと比較すると転倒頻度が高く、高齢者の3割は、年間に1回以上の転倒を経験し、転倒によって生じる怪我などは社会問題となっている。高齢者の転倒の頻度が若年成人よりも高くなる要因として、立位姿勢維持の際の重心動揺の制御が挙げられる。立位姿勢の維持の際の大きな重心動揺や制御の低下などは転倒の頻度と関係があるとされており、これらは、加齢による下肢筋群の最大発揮張力や活動量の低下、感覚系の低下が原因とされている⁽¹⁾。

上記のような問題の原因となる転倒を予防するために、立位姿勢維持の際の重心動揺の減少や制御の向上を目的としたトレーニングやエクササイズは数多く存在する。また、Stelら⁽²⁾は、加齢とともに下肢の筋の最大発揮張力が低下し、65歳以上の3分の1の高齢者が年に少なくとも1回以上の転倒を経験しているという報告から、立位姿勢の重心動揺の制御は下肢関節が重要であると考えられる。さらに、下肢関節と立位姿勢の重心動揺の関係を調査した研究は数多く存在し、足部においては足趾筋、足関節の底屈筋の低下と静止立位のバランスの低下に強い相関がある⁽³⁾と報告されている。膝関節については、膝関節の筋の最大発揮張力の低下も静止立位のバランスの低下に関係がある⁽⁴⁾という報告や、膝関節の伸筋の最大発揮張力の低下も静止立位のバランスの低下に相関がある⁽⁴⁾という報告がある。股関節については、股関節の屈曲筋の最大発揮張力が低下している高齢者は、低下していない高齢者と比較し、立位姿勢での重心動揺が上昇した⁽⁵⁾と報告や、股関節の外転筋の最大発揮張力が低下している被験者は、低下していない被験者と比較し、立位姿勢の重心動揺が上昇した⁽⁶⁾という報告がある。これらのことから、立位姿勢維持の際の重心動揺の減少や制御の向上を目的としたトレーニングやエクササイズの多くは、下肢の曲げ伸ばしなどを行うトレーニングやバランスディスクを用いたエクササイズのように下肢の筋力トレーニングを中心に実施されており、このような下肢の筋力トレーニングが立位姿勢に与える影響を検討する研究が多く行われている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

また、立位姿勢維持の際の重心動揺の減少や制御の向上を目的とした座位姿勢で行うエクササイズも存在し、重心動揺の減少や制御の向上が報告されている⁽⁹⁾。このエクサ

サイズの例として、バランスボールを用いたエクササイズが挙げられる。バランスボールを用いたエクササイズは主に体幹部のトレーニングを行っていることが特徴として挙げられるため、体幹部のトレーニングも立位姿勢の重心動揺の減少に重要な要素であるといえる。しかし、バランスボール上でのエクササイズは支持面が不安定なため、ボールから落ちないようにするために股関節の調節も不可欠であり、下肢トレーニングを含んでいると考えられる。そのため、バランスボールを用いたエクササイズでの、立位姿勢での重心動揺の減少や制御の向上は下肢が影響している可能性もあると考えられる。

しかし、上述の下肢筋力トレーニングが重心動揺の減少という結果をもたらす⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾一方、下肢に直接的な影響をおよぼさない座位で行われるエクササイズが存在する。これらは安定した座位面で行われ、エクササイズ中に下肢を動かさないことから、下肢のトレーニング要素は皆無だと考えられるが、エクササイズ後には、立位姿勢での重心動揺の減少が報告されており、エクササイズの例として、Boswell-Ruysら⁽¹⁰⁾の座位での上肢のリーチ動作を行うエクササイズや、横井ら⁽¹¹⁾の棒を上肢で操作するエクササイズがある。これらのエクササイズの特徴として、エクササイズ中に上肢を用いることが挙げられる。

立位姿勢の維持に重要な要素は、下肢筋群の最大発揮張力や活動量だけでなく、体性感覚、視覚、平衡感覚からの入力を統合した感覚フィードバックによる姿勢の制御も重要だとされている。そのため、下肢のトレーニング要素が皆無だと考えられる上記のエクササイズによって重心動揺の減少が見られた要因として、感覚フィードバックが影響していると考えられ、エクササイズ中に主に上肢を用いることから、上肢の体性感覚が影響しているといえる。また上記のエクササイズは上肢以外にも、体幹と頭部も動くため、体幹部の体性感覚（体幹の運動）、平衡感覚（頭部の運動）、視覚などの感覚フィードバックの要素が含まれていると考えられ、立位姿勢の維持に影響を与える要素は複数存在しているといえる。しかし、上肢の運動を行う座位エクササイズが立位姿勢の重心動揺に効果を与えるメカニズムについては十分に明らかになっていない。そこで本研究では、座位エクササイズにおける上肢の運動が、立位姿勢の重心動揺に与える影響を明らかにすることとした。

2.実験方法

2.1 エクササイズの内容および重心動揺の測定

下肢のトレーニング要素が皆無だと考えられる上肢の運動を行う座位エクササイズは立位姿勢での重心動揺の減少や制御の向上に貢献する要素が複数存在する。考えられる要素として、上肢の体性感覚、体幹の体性感覚、平衡感覚、視覚が挙げられる。本研究では、上肢のみを用いて行うエクササイズが立位姿勢での重心動揺の減少や制御の向上に与える影響を明らかにするため、体幹と頭部を固定して、上肢のみを用いて行うエクササイズ（固定あり：With restraint）と、体幹と頭部の固定なしで、上肢、体幹、頭部を用いて行うエクササイズ（固定なし：Without restraint）の2種類のエクササイズを行うことにした。

エクササイズは横井⁽¹⁰⁾を参考に、手のひらバランス（手のひらに立てた棒（新聞紙を丸めたもの）を倒さないように制御）を「固定なし」と「固定あり」に分けて行い、下肢に影響を与えないようにするため安定した座位面で行った。棒（長さ：594 mm，直径：35 mm，重さ：170 g）は利き手の手のひらに立て、手のひらに立てた棒を倒さないように棒を操作するよう指示した。また、下肢に影響を与えないために、エクササイズ中に下肢をなるべく動かさないよう指示した。エクササイズ中に棒が床に落ちた場合は、エクササイズの観察者が棒を拾い、被験者に手渡した。「固定あり」は上肢のみで棒を操作して行うため、体幹と頭部がエクササイズ中、動かないようにしなければならない。そのため、頸椎固定カラーとベルトを用い、Fig.2.1のように体幹と頸椎を固定し、体幹と頭部が動かないように拘束した。体幹と頸椎を固定し終えたら、棒を利き手の手のひらに立てさせて、手のひらに立てた棒が、床に落ちないように上肢のみで棒を操作するよう指示した。体幹と頭部の動きを完全に固定することはできなかったため、エクササイズ中、なるべく上肢だけを用いて棒を操作することと肢をなるべく動かさないよう指示した。また、「固定なし」では体幹と頭部を拘束せず、上半身全体で棒の操作が可能であった（Fig.2.2 参照）。

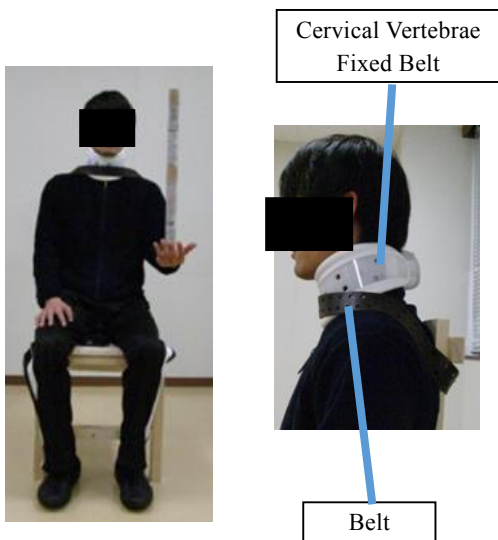


Fig. 2.1 With restraint exercise



Fig. 2.2 Without restraint exercise

立位姿勢での重心動揺を測定には、床反力計（テック技販製）1枚をサンプリング周波数 100 Hz で使用した。重心動揺の測定には、開眼と閉眼を設けて、両足静止立位（30秒）と片足静止立位（20秒）の計4種類を、それぞれ2回ずつ実施した。重心動揺の評価は足圧中心（COP：center of pressure）を用いた。固定なしと固定ありの各群は、1回15分、週3回のエクササイズを4週間（全12回）行った。全12回のエクササイズの前後で、上記の立位姿勢での重心動揺の測定を行った（Fig.2.3 参照）。

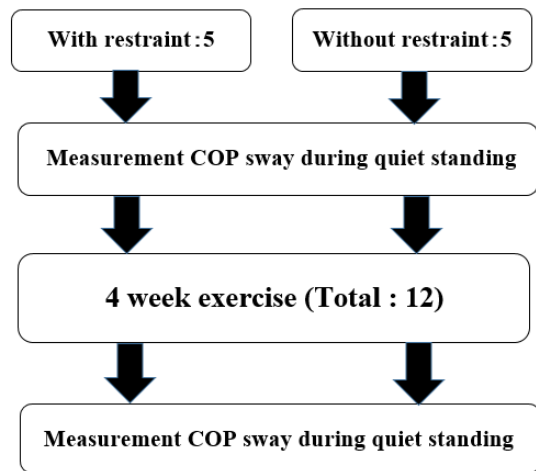


Fig. 2.3 Experiment protocol

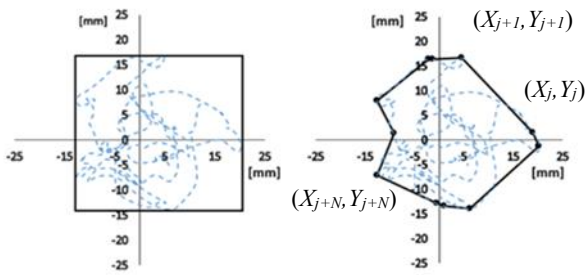
2.2 被験者

被験者は健康な男性 10 名とし、無作為に固定ありのエクササイズを行う群（男性 5 名，身長：171±3.4 cm，体重：56.7±1.9 kg，年齢：22±0.7 歳）と固定なしのエクササイズを行う群（男性 5 名，身長：173±5.7 cm，体重：62.9±6.4 kg，年齢：23±1.0 歳）に分けた。

2.3 データ解析

重心動揺の大きさ、制御を評価するパラメータとして、大きさは、COP の矩形面積、外周面積、左右幅、前後幅を算出し評価した。矩形面積は COP の左右方向の最大値と最小値の差（左右幅）と、前後方向の最大値と最小値の差（前後幅）の積を長方形の面積とした（Fig.2.4(a) 参照）。外周面積は、峰松らの方法⁽¹²⁾と同様に、COP の軌跡の外周を 11 点でプロットし、その各点を式（1）に代入して計算した面

積とした (Fig.2.4 (b) 参照).



(a) Rectangle area (b) Environmental area
Fig. 2.4 COP area

なお，これらの値は各被験者の足部の縦と横の長さで正規化した。

$$\text{外周面積} = \frac{1}{2} \left| \sum_{j=1}^n (x_j - x_{j+1}) \times (y_j + y_{j+1}) \right| \quad (1)$$

重心動揺の制御を評価するにあたり，COP の軌跡を高速フーリエ変換し，左右方向の平均周波数，前後方向の平均パワー周波数を算出した。両脚立位の重心動揺の測定は 30 秒間でサンプリング間隔を 0.01 秒としたため，データ数は 3000 個であり，本研究では 3000 個のデータを全て使用して分析を行った。しかし，本研究では Excel を用いて高速フーリエ変換を行ったため，データ数を 2 の累乗に設定しなければならない。そのため，3000 個のデータに 0 を 1096 個詰め合わせた後にハニング窓を掛け，データ数 4096 個で高速フーリエ変換を行った。また，用いたデータは左右方向の COP の軌跡と前後方向の COP の軌跡とし，それぞれの方向における COP の軌跡の平均パワー周波数を算出した。片脚立位の計測時間は 20 秒なので，データ数は 2000 個である。そのため，2000 個のデータに 0 を 48 個詰め合わせたデータ数 2048 個で高速フーリエ変換を行った。片脚立位も両脚立位と同様の手法を用い，左右方向と前後方向の COP の軌跡の平均パワー周波数を算出した。

算出したパラメータを，要因 A をエクササイズの種類（固定あり，固定なし），要因 B をエクササイズ開始前，終了後として，一要因にのみ対応のある 2 元配置分散分析を行った。有意水準は $\alpha = 0.05$ とした。分散分析の結果，交互作用，主効果が認められた場合，エクササイズの時期については多重比較を Bonferroni 法，エクササイズの種類については対応のない t 検定を行った。

3. 実験結果

両脚立位では重心動揺の大きさ，制御ともに，交互作用および主効果は認められなかった。

片脚立位では閉眼時の前後方向の平均パワー周波数のみで交互作用が認められ，多重比較の結果より，各エクササイズ群の時期について有意差が認められた (Fig.3.1, Table 3.1 参照)。また，開眼時の前後幅で時期についての主効果が認められた (Fig.3.2, Table 3.2 参照)。

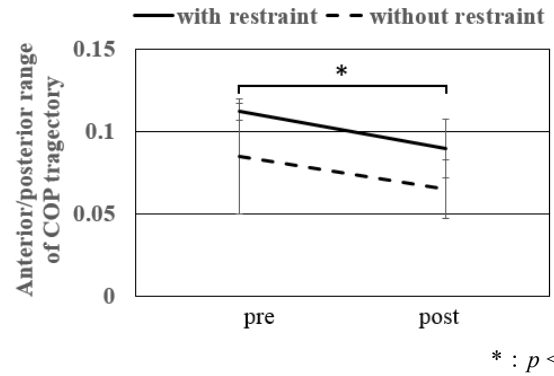


Fig. 3.1 Anterior-posterior range of the COP trajectory during single-leg standing with eyes open.

Table 3.1 Anterior-posterior range of the COP trajectory during single-leg standing with eyes open.

Source	SS	df	MS	F	p	F(0.95)
Exercise	0.003316	1	0.003316	3.71	0.09	5.32
pre-post	0.002252	1	0.002252	8.13	0.02	5.32
Interaction	0.000009	1	0.000009	0.03	0.87	5.32
Error	0.009367	8	0.000894			
Error S (A)	0.007149	8	0.000894			
Error B ×S(A)	0.002218	8	0.000277			

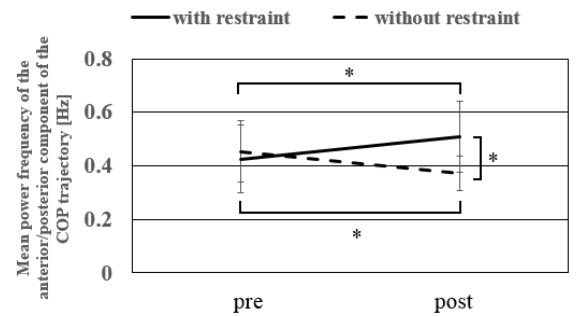


Fig. 3.2 Mean power frequency of the anterior-posterior component of the COP trajectory during single-leg standing with eyes closed.

Table 3.2 Mean power frequency of the anterior-posterior component of the COP trajectory during single-leg standing with eyes closed.

Source	SS	df	MS	F	p	F(0.95)
Exercise	0.014928	1	0.014928	0.52	0.49	5.32
pre-post	0.000004	1	0.000004	0.00	1.00	5.32
Interaction	0.034048	1	0.034048	11.00	0.01	5.32
Error	0.253323	8	0.028580			
Error S (A)	0.228639	8	0.028580			
Error B ×S(A)	0.024685	8	0.003086			

4. 考察

本実験の結果より，固定ありと固定なしの両方のエクササイズにおいて，4 週間のエクササイズ終了後の開眼片脚立位の前後幅はエクササイズ開始前と比較し，有意な減少が認められた。本研究では比較的若い被験者であったが，高齢者を対象にした先行研究においても両脚立位で同様の効果がみられた⁽¹¹⁾。

4.1 エクササイズ終了後の固定ありでの開眼の前後幅減少について

上肢のみの運動を行う固定あり群においても, エクササイズ実施後に開眼片足立位の前後幅が有意に減少した. 重心動揺の制御は体性感覚, 平衡感覚, 視覚からの感覚フィードバックを用いて, 全身の間接運動を調節することで達成される. この点において固定ありの群では, エクササイズ実施期間中は, 視覚と上肢の体性感覚の感覚フィードバックが許されていたと考えられる. これらより, 固定ありエクササイズ実施によって, 視覚と体性感覚を統合して四肢の運動を調整する感覚運動系の内部モデルが構築されたと示唆される. この内部モデルが立位時の下肢の運動の調整にも適用され, 開眼時の前後幅の減少に貢献したと考えられる. 反対に閉眼では, エクササイズ実施によって構築された感覚運動系の内部モデルが機能しなかったか, 効果を発揮しなかったものと推察される.

4.2 エクササイズ終了後の固定ありでの開眼の前後幅減少について

また, 固定なし群においても, 固定あり群同様にエクササイズ実施後に開眼片足立位の前後幅が有意に減少した. そのため, 固定あり群と同じメカニズムで減少した可能性が考えられるが, 別の可能性も考えられる. 固定なしでは, 固定ありが上肢の運動のみを用いたのに対し, 体幹と頭部の運動を用いているため, 視覚と上肢の体性感覚だけでなく, 体幹部の体性感覚と平衡感覚の感覚フィードバックを用いていると考えられることから, 固定なしで構築された内部モデルは固定ありと異なる可能性があると考えられる.

4.3 エクササイズ終了後の閉眼片脚立位の平均パワー周波数の変化

固定ありではエクササイズ実施後の平均パワー周波数が減少したのに対し, 固定なしではエクササイズ実施後の平均パワー周波数が増加した. これは, 上述で述べたように両エクササイズで異なる内部モデルを構築したことが影響したと示唆される. 固定ありの場合, エクササイズ中は上肢の体性感覚と視覚情報を用いて棒を操作するが, 固定なしの場合は, 上肢の体性感覚と視覚情報だけでなく体幹部の体性感覚と平衡感覚の情報を用いて操作する. そのため, 固定ありでは固定なしよりも視覚の貢献度が高い, 視覚フィードバックを中心とした内部モデルを構築したと推察される. また, 平均パワー周波数が大きいほど, 体性感覚, 平衡感覚, 視覚からの情報を基に, 活発に重心動揺の制御を行おうとしている⁽¹³⁾という報告より, 体幹部の体性感覚と平衡感覚の情報を用いる固定なしでは, 閉眼立位において活発な重心動揺の制御を行っているといえる. 視覚の貢献が大きい内部モデルを構築したと考えられる固定ありでは, 視覚情報を用いることのできない閉眼立位においては, 活発に重心動揺の制御を行わないと推察される.

4.4 エクササイズ終了後の両脚立位での重心動揺

両脚立位の重心動揺については, 両群ともに重心動揺の減少は認められなかった. 本研究の被験者は健康な若年成人のため, 感覚運動系の機能が低い状態で維持されているといえる. そのため, 片脚立位よりも比較的簡単な運動課題であるといえる両脚立位では, エクササイズの効果が表れなかったのではないかと考えられる. しかし, 片脚立位においては重心動揺の減少が認められたため, 本研究のエクササイズは, 感覚運動系の機能が低下した高齢者や障害者に対しては効果が大きくなる可能性があると考えられる.

5. 結論

本研究では, 座位エクササイズ中の上肢の運動が立位姿勢の重心動揺に与える影響を検討するため, 体幹と頭部を

固定する固定ありのエクササイズとそれらを固定しない固定なしのエクササイズの2種類を実施した. エクササイズ実施後, 両群とも開眼片脚立位の前後幅が減少した. これは, 固定なしの群では, 視覚と上肢の体性感覚の感覚フィードバックがあることから, エクササイズによって得られた感覚運動系の内部モデルが, 立位姿勢の下肢の運動の調整にも適用されたと示唆された. また, エクササイズ実施後の閉眼片脚立位の平均パワー周波数は, 固定ありが減少したのに対し, 固定ありでは増加した. 固定ありは, 固定なしとは異なり, エクササイズ中に上肢の体性感覚と視覚のみで, 体幹部の体性感覚と平衡感覚の情報を用いていないことから, 視覚優位の内部モデルを構築し, 固定なしでは, 固定ありよりも視覚の貢献が低い内部モデルを構築したと示唆された.

参考文献

- (1) 今本喜久子ら, 高齢者の転倒・骨折発生に関わる身体的リスク要因—骨指標、下肢筋力および重心動揺の経時的变化—, 滋賀医科大学看護学ジャーナル, 3(1), 13-19, 2005
- (2) Stel VS et al, A classification tree for predicting recurrent falling in community-dwelling older persons, *J Am Geriatr Soc* 51(10):pp.1356-1364, 2003
- (3) Benvenuti F et al, Foot pain and disability in older persons: an epidemiologic survey. *J Am Geriatr Soc.* 1995;43:479-484, 1995
- (4) Corriveau H et al.: Postural stability in the elderly: empirical confirmation of a theoretical model. *Arch Gerontol Geriatr*, 2004, 39: 163-177, 2004
- (5) 平瀬達哉ら, 高齢者におけるバランス能力と下肢筋力との関連性について—性差・年齢・老研式活動能力指標別での検討—, *理学療法科学* 23(5): 641-646, 2008
- (6) 青山満喜ら, 高齢な頻回転倒者と非転倒者の歩行速度とバランスおよび下肢筋力の検討, *日本理学療法学会大会* 2011(0), Eb0618-Eb0618, 2012
- (7) 串間敦郎ら, 地域における高齢者の転倒予防をめざす健康づくりプログラムの評価 (1) —地域住民に与えた機能的効果と転倒予防体操の開発—, *宮崎県立看護大学研究紀要* 6 (1): 47~56, 2006
- (8) 出口直樹ら, バランスディスクとバランスパッドを使用したエクササイズが重心動揺に与える影響, *日本理学療法学会大会* 2008(0), C2S1006-C2S1006, 2009
- (9) Urs Granacher et al, Effects of Core Instability Strength Training on Trunk Muscle Strength, Spinal Mobility, Dynamic Balance and Functional Mobility in Older Adults, *Gerontology* 2013;59, 105-113, 2013
- (10) CL Boswell-Ruys et al, Training unsupported sitting in people with chronic spinal cord injuries: a randomized controlled trial, *Spinal Cord* (2010) 48, 138-143, 2010
- (11) 横井賀津志, 地域在住高齢者に対する「棒体操」の転倒予防効果 - 日本作業療法士協会, 2012
- (12) 峯松亮ら, 高齢者に対する足底振動刺激がバランス機能に与える影響, *理学療法科学* 38(2), pp.128-129, 2011
- (13) Ann-Katrin Stensdotter et al, Postural control in quiet standing in patients with psychotic disorders, *Gait & Posture* 38, pp.918-922, 2013