3次元加速度計による重心動揺評価

Evaluation of Postural Sway Using a Triaxial Accelerometer

柊 幸伸^{1,2)}

YUKINOBU HIIRAGI, RPT, MS^{1,2)}

¹⁾ Department of Physical Therapy, Saitama Medical Welfare College: 2-2-1 Idogi, Ageo City, Saitama 362-0071, Japan.
TEL +81 48-786-0077

²⁾ Physical Therapy Section, Health Sciences Program, Health and Welfare Sciences Course, Graduate School of International University of Health and Welfare

Rigakuryoho Kagaku 19(4): 305-309, 2004. Submitted May 10, 2004. Accepted Jul. 8, 2004.

ABSTRACT: The purpose of this study was to elucidate the postural sway control mechanism which cannot be evaluated by a traditional gravicorder alone. The sway of center-of-gravity by a gravicorder and the sway of body by a triaxial accelerometer in static standing, were measured simultaneously, and relationships among the measured items were considered. In the results, there was a significant correlation between the total length of sway path measured by a gravicorder and accelerations measured by a triaxial accelerometer. This result certified the appropriateness of evaluation of postural sway measured by a triaxial accelerometer. Until now, we have studied the characteristics of the sway of center-of-gravity that was drawn in a 2-dimensional plane. The results suggest that the characteristics of way center-of-gravity can be elucidated in 3-dimensional space using these apparatus. Therefore, the possibility that the physical characteristics of the sway of body connected with center-of-gravity control can be elucidated and the possibility that the center-of-gravity control mechanism, which has been studied by a gravicorder alone, can be elucidated were shown.

Key words: gravicorder, triaxial accelerometer, postural sway

要旨: 従来の重心動揺計のみでは評価できない重心制御機構の解明を目的とし、静止立位時における重心動揺および身体動揺を、重心動揺計と3次元加速度計を用いて同時に計測し、計測項目間の関係を検討した。重心動揺計で計測された総軌跡長と3次元加速度計で計測された加速度との間には有意な相関を認め、3次元加速度計での重心動揺評価の妥当性を証明するものであった。また、両機器の計測結果を併せて分析することで、今まで2次元平面上でしか解明できなかった重心動揺の特性を、鉛直方向も加えた3次元空間で捉えることが可能となると考えた。このことにより、重心制御にかかわる身体動揺の物理的特性や、重心動揺計のみでは分からなかった重心制御機構も解明できる可能性が示された。

キーワード: 重心動揺計, 3次元加速度計, 身体動揺

¹⁾ 埼玉医療福祉専門学校 理学療法学科: 埼玉県上尾市井戸木2-2-1 (〒362-0071) TEL 048-786-0077

²⁾ 国際医療福祉大学大学院 医療福祉学研究科保健医療学専攻理学療法学分野

受付日 2004年5月10日 受理日 2004年7月8日

I. はじめに

重心動揺計による立位の重心動揺検査は、耳鼻科領域の疾患、小脳や脳幹部に病巣をもつ中枢疾患、パーキンソン病、脊髄疾患等で有用な評価の一つ^{1, 2)}であり、1993年に重心動揺計測に対する診療報酬が認められて以来、臨床領域で重心動揺計が急速に普及してきた。また、理学療法分野における過去の研究でも重心動揺計を計測機器として使っているものは多く認められる。

重心動揺計は足圧中心が床面に投影された点を圧中心として、その移動軌跡を重心動揺としてとらえるものである。従って床面に描かれる2次元平面上での重心動揺をとらえることとなる。ヒトの静止立位での重心動揺は水平方向の変化に比べて鉛直方向の変化は少ない³⁾とされ、今まで鉛直方向の重心動揺に着目した研究は見あたらない。

静止立位時の重心制御は、下肢の各関節運動や体幹の運動、身体各部位の位置関係の変化によってなされると考えられる。それらの運動によって、静止立位中も身体の重心中心は前後左右を含む2次元平面上だけでなく、上下方向も含んだ3次元空間で移動していると考え、その移動の特徴を捉えることは、重心制御機構の特徴を解明することに繋がると考える。

一方、身体動揺を観察する手法として、3次元動作解析装置あるいはビデオレコーダーにより記録解析する手法が用いられている。先行研究の中に、重心動揺と同様に身体動揺による自然立位の評価に関する研究があり、身体動揺もヒトの直立能力を表す指標として有用であることが報告されている⁴⁾。また、身体動揺と重心動揺の間に相関を認め、身体動揺より重心動揺を求めることは可能とも報告されている⁵⁾。

3次元加速度計は身体活動により発生する加速度を、X, Y, Zの3方向に分け電気信号変化として出力する加速度記録装置であり、コンパクトで活動の制限は少ない。その特長を生かし、今まで、歩行や走行時の活動量や日常生活における活動量モニター機器として利用した研究が行われてきた⁶⁻⁸⁾。

今回、この3次元加速度計を身体動揺の評価機器として採用することで、従来、足圧中心が投影された床面という2次元平面上でしかとらえられなかった重心動揺が、鉛直方向も加えた3次元の身体動揺として捉えられるものと考えた。また、3次元加速度計で身体動揺のメカニズムを解析することにより、身体の重心制御機構がより明らかにされるものと考えた。本研究では、3次元加速度計を用いて静止立位時の身体動揺評価を行い、従来の重心動

図1 3次元加速度計
(Activetracer AC-301mk II)

揺計での重心動揺評価結果と比較検討を行った。また、同時に計測された鉛直方向の加速度の持つ意味を考察した。

II. 対象と方法

1. 対象

被験者は専門学校理学療法学科に籍を置く男性19名、女性18名の計37名。すべて健常者であり、整形外科、神経内科、内科、耳鼻科領域等の平衡感覚に影響を与える疾患を有さないものであった。平均年齢は21歳、平均身長は164.9 (±8.01) cmであった。被験者には事前に研究目的、実験内容、実験に際するリスクを説明し、実験参加の同意を得たのち計測を行った。

2. 計測機器

(1) 重心動揺計

重心動揺計はSTABILO METER FGX-01C (第一医科株式会社) を使用し、検査台に被験者が立位姿勢をとった際、2 m前方に壁面がくるように配置した。壁面には被験者の目の高さにマーカーを貼付した。

(2) 3次元加速度計

3次元加速度計はActivetracer AC301-mk II (株式会社ジー・エム・エス) を使用した (図1)。計測モードは、左右・上下・前後の3方向の加速度、および3方向の合成加速度が0.2秒単位で記録できるモードに設定した。

3. 計測方法

3次元加速度計は被験者の前額部に面ファスナー付きベルトで固定し、装着後側面より観察し、45°以上傾斜していないことを確認した。

計測途中で指示が必要とならないように、被験者には計測の流れを説明した後、裸足での閉足直立、前方2 mの

図2 前額部に3次元加速度計を装着して重心動揺検査

指標の注視を指示した（図2）。

計測は開眼静止立位を60秒間、閉眼静止立位を60秒間の2種類とし、開眼静止立位と閉眼静止立位の計測の間には1分以上の休憩を挟んだ。

4. データ分析手法

重心動揺計で計測された項目のうち、総軌跡長、外周面積を、3次元加速度計で計測された項目のうち、合成加速度、左右方向加速度（X）、上下方向加速度（Y）、前後方向加速度（Z）、および計算による水平面加速度（X+Z）を分析項目とした。

開眼静止立位、閉眼静止立位各々の計測が終了した時点で3次元加速度計を取り外し、RS-232Cインターフェイスを介し、パソコンに取り込んだ。取り込んだデータは付属のソフトでEXCEL形式のファイルに変換し、集計した。統計手法は、EXCELを用いて、対応する2組の差の

検定（t検定）、ピアソンの相関係数および相関係数の検定を用いて分析した。有意水準はすべて5%未満とした。

III. 結 果

1. 被験者個人データの結果分析

重心動揺計による総軌跡長は、開眼静止立位時に比較して閉眼静止立位時にはすべての被験者において増加していた。また、その増加率は平均で35.2%であった。閉眼時の総軌跡長が開眼時の2倍を超えた被験者は1人（2.7%）のみであった。閉眼静止立位時に外周面積の増加を認めたのは37名中30名（81.1%）であり、7名（18.9%）の被験者では外周面積の減少を認めた。

3次元加速度計による加速度計測結果では、開眼静止立位時に比較して閉眼静止立位時で発生加速度が減少した被験者が目立つ結果となった。全被験者平均では加速度計測の全項目で閉眼において発生加速度の増加を認めたが、個々の被験者で見ると、合成加速度で11名（29.7%）、左右加速度（X）で13名（35.1%）、上下加速度（Y）で11名（29.7%）、前後加速度（Z）で10名（27.0%）の被験者に閉眼静止立位時の発生加速度の減少を認めた。すべての方向の加速度が減少した被験者が9名（24.3%）存在した。

2. 被験者平均による結果分析

重心動揺計で計測された各項目の男女別平均値は、アニマ株式会社による先行研究⁹⁾の同年齢層の全国平均値と比較すると、すべて平均±1標準偏差内におさまっていた。

重心動揺計で計測された各項目の開眼静止立位と閉眼静止立位の計測値は、すべての項目において開眼時より閉眼時のほうが有意に大きな値を示した。

表1 開眼時と閉眼時の重心動揺計測値および3次元加速度計計測値

	開眼	閉眼
総軌跡長（cm）	59.48 ± 13.61	80.34 ± 22.91*
外周面積（cm ² ）	2.62 ± 1.33	3.94 ± 2.07*
単位時間軌跡長（cm/s）	0.99 ± 0.23	1.33 ± 0.38*
合成加速度（mG）	912.54 ± 362.67	1078.97 ± 414.32*
左右方向加速度（mG）	278.59 ± 169.03	335.68 ± 176.37*
上下方向加速度（mG）	158.49 ± 115.22	192.38 ± 150.37*
前後方向加速度（mG）	149.19 ± 105.99	206.76 ± 124.53*

mean ± SD. *p<0.05.

また、3次元加速度計で計測された各項目の計測地も、すべての項目において開眼時より閉眼時の方が有意に大きな値を示した(表1)。

開眼時の重心動揺計で計測された総軌跡長と、3次元加速度計で計測された3方向の合成加速度との間には有意な相関を認めた($r=0.62$, $p<0.05$)。閉眼時も同様に有意な相関を認めた($r=0.87$, $p<0.05$)。

開眼時の重心動揺計で計測された総軌跡長と、3次元加速度計で計測された左右方向(X)、と前後方向(Z)の加速度を合計(加算)した水平面加速度との間には有意な相関を認めた($r=0.55$, $p<0.05$)。閉眼時も同様に有意な相関を認めた($r=0.87$, $p<0.05$)(図3, 4)。

IV. 考 察

3次元加速度計は動作時の左右方向(X)、上下方向(Y)、前後方向(Z)に発生する加速度を計測する機器である。今回採用したAC-301mk IIは比較的コンパクトな機器(51×77×15 mm, 87 g)であり、分解能も0.002Gあり、動作分析や運動負荷量の評価機器として応用されている。先行研究では、運動負荷中の酸素消費量と運動時に発生する加速度との間には相関があると報告されている¹⁰⁾。また、本邦においても運動の種類による3次元加速度計での加速度評価の研究が行われ、平地歩行・走行での活動量評価機器として利用できることが報告されている¹¹⁾。更に、厳密には重心動揺と身体動揺は同様のものとはいえないが、静止立位時においては、先行研究でそれらの相関性が示されている⁵⁾。

これら先行研究で示された機器の特性を活かし、3次元加速度計を用いることで静止立位時の重心動揺で発生する加速度が記録できるものと考え、すでに臨床で使用されている重心動揺計との関係を研究し、3次元加速度計の今後の臨床応用の可能性を検討した。

今回の重心動揺計による計測値は、先行研究による同年齢層の全国平均値と比較しても大差なく、信頼できるものであった⁹⁾。

結果に示したとおり、静止立位時に発生する3次元加速度計で計測された加速度と重心動揺計で計測された総軌跡長の間には有意な相関を認めた。特に、合成加速度および水平面での加速度との間に相関を持つことは、3次元加速度計が重心動揺評価の評価機器として利用できる可能性を示すものと考えた。

重心動揺計による計測結果で見える限りでは、すべての被験者の総軌跡長は開眼静止立位時より閉眼静止立位時の方が長くなっている。しかし、3次元加速度計による計

図3 重心動揺検査における総軌跡長と水平面加速度の関係(開眼)

図4 重心動揺検査における総軌跡長と水平面加速度の関係(閉眼)

測結果から見ると、閉眼静止立位時の方が増加していた被験者は、合成加速度では70.3%、水平面での加速度では67.6%であった。60秒間という限られた検査時間の中で、総軌跡長が長くなることは動揺の速度が速くなることを示している。しかし、その間に発生した加速度から見ると、その変化は少なく、動揺パターンの中には等速運動の要素が多く含まれていることが予想できた。

健康人の外力や随意運動に伴う身体重心の制御機構としては、立ち直り反応や平衡反応、併せて随意運動の要素が複雑に絡み合っている¹²⁾。運動学的に見るとその制御機構を内山は、股関節回りの方略(Hip strategy)と足関節回りの方略(Ankle strategy)に大別して考えている。静止立位時の体重心制御に関わる方略も同様に考えられ、加えて、立位維持に関わる脊柱起立筋群の活動による体幹回りの方略、大腿部の筋や下腿部の筋による膝関節回りの方略が考えられる。

予備実験の中で、足関節が底屈位となるハイヒール靴を履いた状態で重心動揺計測と加速度計測を行ってみ

た。開眼静止立位時と閉眼静止立位時の関係は、今回の結果と同様の傾向を示したが、鉛直方向の加速度に関しては、ハイヒール靴を履いている時の方が減少するという結果を得た。これは、身体重心の制御機構として足関節回りの方略が使用しづらくなった状態と考え、鉛直方向の身体動揺は足関節回りの方略の利用度合いを反映すると予想できた。

今回の結果を個々の被験者で眺めてみると、重心動揺計での総軌跡長および外周面積の計測データに比較して、3次元加速度計での3方向の加速度データのばらつきが大きかった。また、前述のように開眼静止立位時に比べ閉眼静止立位時で総軌跡長は全被験者で増加しているにもかかわらず、加速度の個々の成分は30%前後の被験者で減少していた。

閉眼静止立位による総軌跡長の増加率は被検者ごとに見ると1.03~2.13倍の増加率を示した。それに比較して、加速度の個々の成分は、0.29~6.60倍とその変動幅は非常に大きくなり、さまざまなバリエーションを認めた。

これらより、重心制御の手法には個人差が存在し、また、同一被験者においても開眼静止立位時と閉眼静止立位時では選択される方略に違いがあることが想像できた。

重心動揺計での計測結果のみでは軌跡の追跡と軌跡の移動速度の把握が中心であり、これら方略を特定することは難しい。3次元加速度計での計測結果には鉛直方向の加速度計測も含まれており、重心動揺計の計測結果と併せて分析することで、各関節を中心とした方略の特徴が見いだされ、臨床での評価機器、あるいは治療アプローチの目標設定に期待できる機器と考えた。

今回は、3次元加速度計の重心動揺あるいは身体動揺評価機器としての可能性を探ることを主としたため、その装着場所は身体重心から最も遠いと考えられる前額部を選択した。予備実験の中で身体重心に近い臍部に装着した実験も行ってみたが、発生する加速度は小さく、機器の解像度による制限があった。今回の被験者は全員健康者であり、重心動揺に影響する疾患を有さず、頭頸部の不随意運動等も考慮する必要が無かったため、前額部に装着した。しかし、臨床応用にあたっては、頭部の振戦、頭頸部の立ち直り反応や反射の影響を考え、体幹のもっとも遠位である胸骨部等を考えるべきであろう。あるいはより以上に分解能の向上した機器が必要となるであろう。

重心動揺は高齢者の転倒との関連性も研究されてお

り、3次元加速度計による研究分野は広がることが予想される。

V. 結語

重心動揺計による重心動揺検査と3次元加速度計による身体動揺検査を比較検討した結果、3次元加速度計による重心動揺の評価は可能であると考えた。開眼静止立位と閉眼静止立位で発生する加速度の違い、鉛直方向の加速度より、重心動揺計のみでは分からなかった身体重心制御時にとる方略の相違が解明される可能性が示された。

引用文献

- 1) 井上隆三：パーキンソン病及びパーキンソン症候群患者の重心位置、重心移動、重心動揺の変化。理学療法学、1992、19(6)：546-550。
- 2) 森 充広、時田 喬、大川 剛・他：パーキンソン病の重心動揺。Equilibrium Research、1998、57(3)：271-279。
- 3) 内山 靖：理学療法機器(14) 重心動揺計。理学療法、1994、11(6)：459-466。
- 4) Allum JHJ, Adkin AL, Carpenter MG, et al.: Trunk sway measures of postural stability during clinical balance tests: effects of a unilateral vestibular deficit. Gait Posture、2001、14: 227-237。
- 5) 江 依法、長崎幸雄、松岡敏男・他：自然立位姿勢時の身体動揺と重心動揺間の関係。体力科学、2003、52(5)：533-542。
- 6) Bouten CV, Westerterp KR, Verduin M, et al.: Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer. Official Journal of the American college of Sports Medicine、1994: 1516-1523。
- 7) 谷川智宏、品川佳満、藤谷恭信・他：携帯型加速度計を用いた運動強度の計測。川崎医療福祉学会誌、2001、11(1)：99-105。
- 8) 長山雅俊、武山純一郎、岡林宏明・他：携帯型加速度測定器による身体活動量の評価。心臓リハビリテーション、1996、1(1)：93-98。
- 9) アニマ株式会社編：重心動揺検査における健康者データの集計 第1集。アニマ株式会社、東京、1996、pp11-34。
- 10) Fehling PC, Smith DL, Warner SE, et al.: Comparison of accelerometers with oxygen consumption in older adults during exercise. Official Journal of the American college of Sports Medicine、1998: 171-175。
- 11) 小熊祐子、山本哲史、木下訓光・他：心拍同時期録3次元加速度計を用いた活動強度と身体活動量の評価。慶應義塾大学スポーツ医学研究センター紀要、1999：25-31。
- 12) 内山 靖：バランスと姿勢・活動。PTジャーナル、2002、36(4)：223-232。