

Title	姿勢調節のメカニズムを末梢感覚神経活動から解明する
Sub Title	Examination of the human postural control mechanism from the viewpoint of the peripheral afferent activity
Author	牛山, 潤一(USHIYAMA, JUNICHI) 政二, 慶(MASANI, KEI)
Publisher	
Publication year	2009
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2008. )
JaLC DOI	
Abstract	普段我々人間は、二足での立位姿勢をどのように遂行し、また制御しているのか? 本研究はそのメカニズムを解明すべく、執り行われたものである。本研究では、実験でデータおよび過去のシミュレーション研究との対比などから、1) 高齢者のみならず、若齢者にとっても、十分な脚部の筋量を有することが、優れたバランス能力を持つためには必要であること、2) 身体動揺の速度を検知する感覚神経の活動が、立位姿勢の制御には不可欠なものであること、などが示唆された。
Notes	研究種目：若手研究(B)  研究期間：2006～2008  課題番号：18700490  研究分野：総合領域  科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学，身体教育学
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18700490seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18700490seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18700490  
 研究課題名（和文） 姿勢調節のメカニズムを末梢感覚神経活動から解明する  
 研究課題名（英文） Examination of the human postural control mechanism  
 from the viewpoint of the peripheral afferent activity  
 研究代表者  
 牛山 潤一（USHIYAMA JUNICHI）  
 慶應義塾大学・体育研究所・助教  
 研究者番号：60407137

研究成果の概要：普段我々人間は、二足での立位姿勢をどのように遂行し、また制御しているのか？本研究はそのメカニズムを解明すべく、執り行われたものである。本研究では、実験でデータおよび過去のシミュレーション研究との対比などから、1) 高齢者のみならず、若齢者にとっても、十分な脚部の筋量を有することが、優れたバランス能力を持つためには必要であること、2) 身体動揺の速度を検知する感覚神経の活動が、立位姿勢の制御には不可欠なものであること、などが示唆された。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,300,000	0	1,300,000
2007 年度	1,200,000	0	1,200,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	300,000	3,800,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学，身体教育学

キーワード：床反力，足底中心動揺，Ia 求心性神経，振動刺激，筋電図，H反射

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトは生まれながらに立つことは出来ない。二足で立てるようになるためには、生後 1 年程度の歳月をかけて、様々な運動機能を獲得していく必要がある。そして「二足で立つこと」は多くの人々にとって、最も基本的かつ中心的な運動であり続ける。ところが、近年、加齢に伴う姿勢保持能力の減退が直接的あるいは転倒などを介して間接的に関与してか、「高齢者の寝たきり」が社会的問題となっている。このような問題に対し、立位姿勢制御のメカニズムの本質に切り込んだ研究を展開し、医療・介護の現場に有用な情報を提供することは、我々健康・スポーツ科学の世界に生きる科学者が果たすべき重要な

役割のひとつであろう。

ヒトの静的立位保持は、重心が高い位置に存在するうえに、支持面が大変狭いため、実は非常に不安定なものである。よく知られているように、静的立位保持時には我々の身体は微少かつ複雑な動揺を繰り返す。この身体動揺は、様々な感覚情報を統合し、筋出力を適切に調節する運動制御が働いた結果であると考えられている（政二ら バイオメカニクス研究 2005）。姿勢調節系には、前庭系、視覚、および固有感覚系からの感覚情報が重要とされており、その機能的意義に関しては古くから議論されてきており、健康・スポーツ科学領域のみならず、神経科学、リハビリテーション医学などの領域の研究者にとつ

ても、学術的意義の高い研究テーマであるといえる。

## 2. 研究の目的

従来、立位の運動制御は、疾患や加齢に伴う身体動揺の量的変化を検討することで議論されてきたが、近年、測定機器の精度の向上により、バイオメカニクスの手法を用いて制御機構により深く切り込んだ研究が増えている (e.g. Winter et al. *J Neurophysiol* 2001; Gatev et al. *J Physiol* 1999)。

本研究では、床反力計・筋電図・機械的振動刺激・超音波など、バイオメカニクス・筋生理学・神経生理学といった様々な分野で用いられている実験手法を有機的に連関させることで、静的立位姿勢の主働筋群と考えられている下腿三頭筋の筋量、およびこの筋群由来の固有感覚フィードバック、とりわけ筋の長さ変化情報をフィードバックする Ia 求心性神経活動がヒトの静止立位制御にいかなる役割を果たすかについて明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の実験を行った。

(1) アキレス腱への長時間振動刺激後によって、下腿三頭筋の求心性神経活動がどのように変化し、またどのような時間経過をもって回復するか、神経生理学分野で古くから用いられている H 反射法を用いて評価することで、Ia 求心性神経への刺激効果の残存性を検討した。

(2) 昨今の若齢者のバランス能力  
「そもそも現代の日本人はどの程度の平衡機能を有しており、またどの程度の個人差が存在するか」ということを探るべく、健常な大学生を対象に、床反力計上にて開眼・閉眼時の足底中心動揺測定を各 1 分間行った。足底中心動揺は前後・左右ふたつの座標軸を持つ平面内での座標の時系列変化で表現されるため、その動揺の前後・左右・水平面の各時系列データについて、先行研究 (Prieto et al. *Trans Biomed Engng* 1996) で用いられているさまざまな指標を用いて、量的 (揺れの大きさ)・質的 (揺れの周波数特性) に定量評価した。また B モード超音波法を用い、下腿三頭筋の筋厚を測定し、これと下肢長から個々人の下腿三頭筋の筋量を推定し (Miyatani et al. *Eur J Appl Physiol* 2001)、上記足底中心動揺指標との関連性を検討し

た。

(3) (1)での実験データを参考に、アキレス腱への長時間振動刺激法による下腿三頭筋の Ia 求心性神経活動低下が、立位姿勢調節時の足底中心動揺に与える影響についても検討した。また、静的立位姿勢保持時と同等の静的随意収縮時の発揮トルク動揺の振動刺激による変化についても検討を行った。

## 4. 研究成果

(1) アキレス腱への振動刺激による下腿三頭筋の H 反射振幅の変化

実験(1)では、12名の被検者を対象に、研究代表者の近年の研究報告と同様の設定で (Ushiyama et al. *J Appl Physiol* 2005)、アキレス腱に 30 分間、機械的振動刺激を与えた、その影響で下腿三頭筋の H 反射がどのように変化するか、振動刺激停止後 1 時間にわたり、その履歴を検討した。分析には、このなかから、三筋すべてから H 反射が誘発された 10 名の被検者のデータを用いた。結果、振動刺激停止直後には、下腿三頭筋の H 反射振幅一様に低下し、10 分程度その効力は持続することが明らかとなった。また、振動刺激停止後の回復過程も検討した結果、興味深いことに、刺激停止後 20 - 30 分をかけて、振動刺激適用前とほぼ同等の値に戻り、その後、H 反射振幅はむしろ増加するという結果も得られた。先行研究において、大脳皮質への経頭蓋磁気刺激によって誘発される運動誘発電位が、30 分間の振動刺激によって有意に減少するが、振動刺激停止後むしろ増加傾向をたどるといったような現象が報告されており (Steyvers et al. *Neuroreport* 2003)、本研究の関連性について、興味はつきない。しかし、この H 反射の推移については、被検者間でかなりばらつきも存在することから、振動刺激の中枢神経系、末梢感覚神経系への影響については今後もさらなる検討が必要であろう。

いずれにせよ、この手法を姿勢制御研究に応用する場合、刺激停止後 10 分間程度ですべての測定を終了させるようなプロトコルの確立が必要であることが明らかとなった。

(2) 現代の若齢者の平衡機能特性

実験(2)では、本大学の大学生 126 名 (男性 45 名、女性 81 名) を対象に、床反力計上にて開眼・閉眼時の足底中心動揺測定を各 1 分間行った。足底中心動揺のさまざまな指標を評価する解析プログラムを作成し、動揺の前

後・左右・水平面の各時系列データについて、先行研究(Prieto et al. *Trans Biomed Engng* 1996)で用いられているさまざまな指標を用いて、量的(揺れの大きさ)・質的(揺れの周波数特性)に定量評価した。

その結果、足底中心動揺の平均変位、最小2乗平方根、平均軌跡速度など、足底中心の揺れの大きさを評価する指標において、本大学の学生は、先行研究(Prieto et al. *Trans Biomed Engng* 1996)の若齢群よりも高値を示した。また、動揺の周波数特性に着目すると、本大学の学生は、Prieto et al. (1996)の若齢群に比して、スペクトルの広がりが大きく、かつ高周波の揺れが大きいことが示唆され、むしろ高齢者に似たような傾向が見てとれた。こうした結果は、本大学の学生の平衡機能がPrieto et al. (1996)の若齢群よりも劣っている可能性を示唆するものであり、現代の若齢者の身体機能の特徴のひとつとして認知されるべき問題であろう。

一方、過去のシミュレーション研究(Maurer et al. *J Neurophysiol* 2005)において、位置制御成分を意味する比例ゲイン $K_p$ と最も負の相関の強い平均周波数と、最も正の相関が強い平均変位との間には、前後・左右・水平面すべての系列において、有意な負の相関が得られた。この結果はすなわち、位置制御情報が大きい被検者ほど、身体動揺量が増える傾向にあることを示している。同じくシミュレーションを用いた先行研究(Masani et al. *J Neurophysiol* 2003; Masani et al. *Gait Posture* 2006)によると、静的立位の制御にはとくに速度情報が重要であることが示唆されている。本研究の結果は位置情報優位の制御を行っている被検者ほど動揺量が増えることが示しており、従って、静的姿勢制御においては速度情報が重要性であるというMasaniらの主張を支持するものであった。

(3) 同じく実験(2)では、静的立位保持の主働筋である下腿三頭筋の筋量を、超音波法によって計測された下腿三頭筋の筋厚と下肢長から推定し、足底中心動揺の各指標との一次回帰分析から、筋量が若齢者の平衡機能の制限因子となりえるかの検討も行った。その結果、男子においてのみ、水平面・前後系列における足底中心の揺れの大きさと筋量との間に負の相関関係が見出された。本研究ではとりわけ男子の筋量が先行研究(Ishida et al. *Am J Human Biol* 1997; Miyatani *Int J Sport Health Sci* 2003)に比して小さい傾向にあったことから、例え若齢者でも、十分な筋量を有しない場合には、筋量が平衡機能の規定因子となり得ることが示唆された。

従来は高齢者においてのみ平衡機能の規定因子と考えられていた筋量が、若齢者においても平衡機能の個人差の一因になったという本研究の結果は、単に筋力・筋パワーのみならず、平衡機能の改善にもレジスタンストレーニングが有効である可能性を示すものである。こうした研究を積み重ねていくことで、将来的には、個々人の特性に合わせた平衡機能向上のための運動プログラムの開発につながるものと考えられる。

(4) 実験(3)では、8名の被検者を対象に、実験(1)と同様の設定の振動刺激をアキレス腱に30分間与え、下腿三頭筋のIa求心性神経活動を減退させた場合に、立位保持時の足底中心動揺がどのように変化するかを検証した。あわせて、H反射の変化も記録し、Ia求心性神経活動の低下の程度との関連性も検討した。

結果、立位課題時には、H反射振幅の低下の程度が大きいもの、すなわちIa求心性神経活動低下が大きな者ほど、とくに閉眼時の平均動揺速度が大きくなる傾向にあった。さらに、動揺の周波数特性に着目すると、平均周波数などについても増加傾向にあったことから、振動刺激によるIa求心性神経活動減退後は、とりわけ高周波の動揺が増す傾向にあることが示唆された。姿勢保持時には、視覚・前庭系・固有感覚系からのフィードバック情報がとくに重要と考えられているが、本研究の結果は、このうちの視覚情報に頼れなくなったような試行時に、固有感覚系、とりわけIa求心性神経による筋の長さ変化のフィードバック情報の重要度が増すことを示すものと思われ、この筋の長さ変化情報が正常にフィードバックされることで、ヒトの立位はゆるやかな動揺になるよう制御されているものと思われる。

一方、同一被検者を対象に、静的立位時と同等のトルク発揮を筋力計上で行った際に、トルクの変動がどのように変化するかも検討した。その結果、静的トルク発揮のトルク変動はむしろトルクの低周波成分において、顕著な変化がみられる結果となり、Ia求心性神経活動は、力の低周波の揺れの生成にも関わっていることが示唆された。こうした結果は、とくに高周波の揺れが増すという立位姿勢保持とは異なる結果であり、Ia求心性神経活動の課題依存的な役割というものが推測された。

ただし、振動刺激の効力に関してはかなりの個人差(振動刺激への感受性の個人差)があるうえ、三筋すべてからH反射が誘発された

者は5名であり、多くの被検者に対し、同様の件等を行わなければ、真理を追求したとは言いがたい。今後、15名～20名程度のデータを採集することで、統計的分析も加え、Ia求心性神経活動の立位姿勢制御への貢献を検討していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

牛山潤一，政二慶，村松憲，清水静代，村山光義，佐々木玲子．様々な重心動揺指標を用いた本塾塾生の平衡機能の評価．慶應義塾大学体育研究所紀要．47: 13-24, 2008. 査読有り

〔学会発表〕(計6件)

牛山潤一，政二慶．大学生のバランス能力に関する研究～とくに足圧中心動揺と下腿筋量との関連性に着目して～．Hiyoshi Research Portfolio 2008．2008. 11. 15 (神奈川)

Ushiyama J, Masani K. Postural stability is associated with muscle volume of the ankle extensors only in men. The 55<sup>th</sup> Annual Meeting, American College of Sports Medicine, Indianapolis, USA, 2008.5.28-31

Masani K, Ushiyama J, Vette AH, Popovic MR. Measures of postural stability are associated with gains and noise in the control system: A simulation study. The 55<sup>th</sup> Annual Meeting, American College of Sports Medicine, Indianapolis, USA, 2008.5.28-31

牛山潤一，政二慶．様々な足圧中心動揺指標を用いた男女大学生の平衡機能の評価～足関節底屈筋群の筋量との関連性に着目して～．第35回日本体育学会東京支部学会大会．2008.3.7(東京)

牛山潤一，村松憲，奥山静代，村山光義，佐々木玲子．男女大学生にみられる静的立位時身体動揺特性の個人差の要因に関する検討．第62回日本体力医学会大会．2007.9.14-16(秋田)

牛山潤一．筋感覚研究における機械的振動刺激法の有用性．第23回筋電図の会(依頼講演)．2006.9.23(兵庫)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

牛山潤一(USHIYAMA JUNICHI)  
慶應義塾大学・体育研究所・助教  
研究者番号：60407137

(2)研究分担者

(3)連携研究者

(4)研究協力者

政二慶(MASANI KEI)  
トロント大学・生体材料・生体医用工学研究所・研究員  
研究者番号：30282510