

高齢者の直立姿勢制御の特徴

大金雅子¹⁾、白澤葉月¹⁾、合志徳久¹⁾、西園秀嗣²⁾、平田文夫²⁾

鹿屋体育大学スポーツ科学講座¹⁾

鹿屋体育大学スポーツトレーニング研究センター²⁾

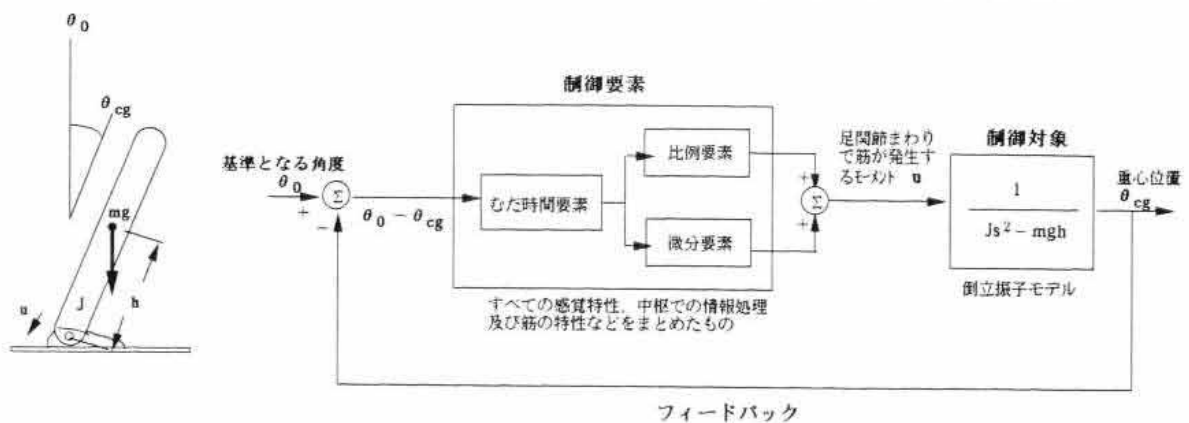
緒 言

高齢者社会への突入とともに、高齢者の健康や生理的機能の維持・増進が大きく取り上げられている。その項目の一つに、姿勢を安定に維持する能力がある。青年と高齢者の直立時の重心動揺を比較した研究では、平坦な床上に両足で接地し直立した場合（静的平衡）の重心動揺は、高齢者で動揺が大きい⁵⁾、あるいは両者に差がない⁷⁾等と報告されてきた。一方、片足立ちなどの動的平衡の場合には、加齢によって姿勢の安定性が低下するという報告が大部分を占める⁶⁾。

これまでに青年と高齢者の静的平衡能力を比較した先行研究の多くでは、重心が動いた軌跡長や面積、最大の動揺角度などが評価のパラメータとして用いられてきた。これらのパラメータでは、測定時間中に重心がどのように動いていたかという、重心動揺のダイナミックな側面が

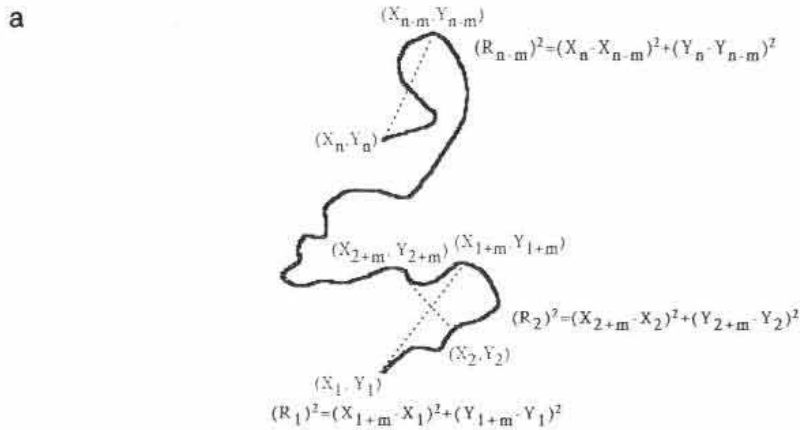
評価できない。つまり、これらのパラメータから動揺の大小は評価できても、それらがどのような過程で形成されたかを評価できないという問題点があった。

近年、工学の分野では、ヒトのからだを倒立振り子と見なし、時々刻々と変化する重心の位置と基準となる望ましい重心の位置との差を検出してフィードバック制御を行うという姿勢制御モデルが一般化してきた（図1）。生体内の情報処理過程を考慮に入れると、フィードバック制御が有効に作用し、検出された重心位置の差が小さくなるまでには、ある程度の時間遅れがある（図1、むだ時間要素）。また、生体で観察される揺らぎの多くは、ある特定の1点を基準としてフィードバックがかけられているというよりは、ある程度の幅をもった基準範囲を越えるとフィードバックがかかるという性質を持つものも多い。つまり、姿勢の安定には、フィー



- J: 足関節まわりの慣性モーメント
- h: 足関節と身体重心の距離
- m: 身体質量
- θ_{cg} : 身体傾斜角度
- θ_0 : 制御の基準となる角度
- g: 重力加速度
- u: 足関節まわりの筋が発生するモーメント
- s: ラプラス演算子

図1 直立姿勢制御系のモデルとブロック図



特定の時間間隔 ($\Delta t = \text{データ数 } m$) についての重心移動距離の平均平方

$$\langle \Delta R^2 \rangle_{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} (R_i)^2}{(N-m)}$$

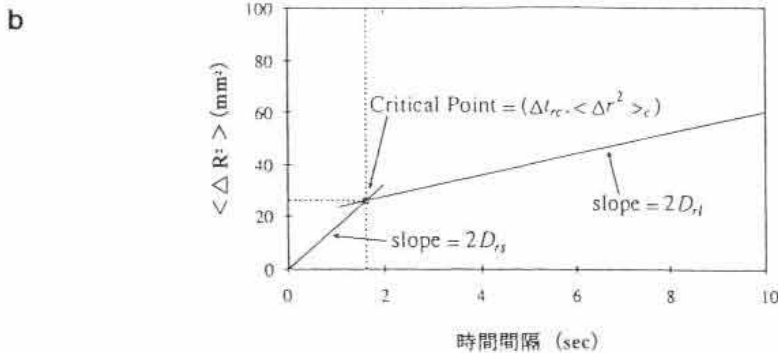


図2 重心(足圧中心)動揺の分析方法

- a: 太線は、重心動揺の軌跡。すべての時系列データについて、特定の時間間隔後の重心移動距離 (R 、点線)を調べ、その平均平方を計算する。
- b: 各パラメータの算出方法

ドバック制御の良さのほか、フィードバック制御が有効に作用するまでの時間とその閾値(重心の移動量)などが関与すると考えられる。そこで本研究では、重心の動きを2次元のランダムウォーク(統計学上の確率過程の一種)とみなし、その特徴を記述することによって、青年と高齢者の姿勢制御の特徴をフィードバック制御の観点から比較することを試みた。

本研究の目的は、静的平衡を維持した際の青年と高齢者の重心動揺の比較から、高齢者の姿勢制御の特徴を明らかにすることであった。

方 法

被検者は、健康な青年男女11名(20-27歳)と中高齢者89名(46-84歳)であった。被検者

は両踵を2cm離し、床反力計上で直立姿勢を維持した。被検者には、測定中、両手を体側に自然に下ろし、前方を直視するよう指示した。測定時間は、開眼で試行、閉眼での試行ともに40秒であり、両試行間には約15秒間の休息を挟んだ。床反力計からの信号はすべて100HzでA/D変換し、時系列データの形でパーソナルコンピュータに取り込み、保存した。重心(足圧中心)位置の計算及び下記の分析は、コンピュータプログラムを自作し、行った。重心の動きの解析は、Collinsらの先行研究¹⁾によった。彼らの方法は、基本的に、ある時刻における重心の位置が特定の時間間隔後にどれだけ離れた位置へと移動するかを調べるものである(図2a)。まず、時系列データの形で計算された重心の位置の全記録

について、特定の時間間隔後の重心の位置との差を調べ、その二乗和をデータ数で正規化（平均平方）する。そして、時間間隔と重心移動距離の平均平方との関係を調べる。ある時刻を基準として考えた場合、そこから特定の時間間隔をおいた後の重心の動きが、それまでの重心の動きと同じ方向へ動く確率が高ければ、重心移動距離の平均平方は大きくなる。反対に、その確率が小さければ、その値は小さくなる。この方法を用いて時間間隔と重心移動距離の平均平方との関係を調べると、図2bのように、2つの異なる傾きの成分が観察される。短い時間間隔のところで観察される重心移動距離の増加が大きい（同じ方向へ重心が動き続ける可能性が高い）成分と、長い時間間隔のところで観察される重心移動距離の増加が小さい（同じ方向へ重心が動き続ける可能性が低い）成分である。Collinsらは、この前者をフィードフォワード制御の成分、後者をフィードバック制御の成分と考えた。本研究では、前者をフィードバック制御が有効に働くまでの成分、後者をフィードバック制御が作用している成分と捉えることにする。これら2つの成分について直線回帰を行うと、それぞれの回帰直線の傾きの $1/2$ がランダムウォークの拡散係数となる。また、両成分の回帰直線の交点が、フィードバック制御が有効に作用し始める時間遅れ（タイムラグ）とその時の重心の移動距離の二乗（閾値）と考えられる。

本研究では、各被検者についてこれらのパラメータを計算し、年齢との関係を調べた。

結 果

図3に、青年と高齢者の重心動揺の1例を示した。このような重心動揺の軌跡について、図2a、bの方法を適用し、分析を行った。

各被検者の年齢とフィードバック制御が作用し始めるまでの成分の拡散係数の関係を図4に示した。特に閉眼での試行において、青年と比較して高齢者では拡散係数の個人差が大きくなり、拡散係数の大きい者が多い傾向にあった。一方、フィードバック制御が作用している成分の拡散件数（図5）は、青年と高齢者であまり差がなかった。

年齢とタイムラグの関係を図6に示した。高齢者では青年と比較してタイムラグの個人差が大きくなり、その値の大きい者が多かった。閾値についても、高齢者の方が青年よりも個人差が大きい傾向が観察され（図7）、その傾向は特に閉眼時に顕著であった。

以上のように、高齢者では、フィードバック制御が作用するまでの姿勢制御の個人差が大きいことが明らかとなった。そこで、フィードバック制御が作用するまでの成分の拡散係数、タイムラグ、閾値の各パラメータについて、青年の最大値より大きな値が観察された高齢者の数を調べ、表1に示した。すべてのパラメータにお

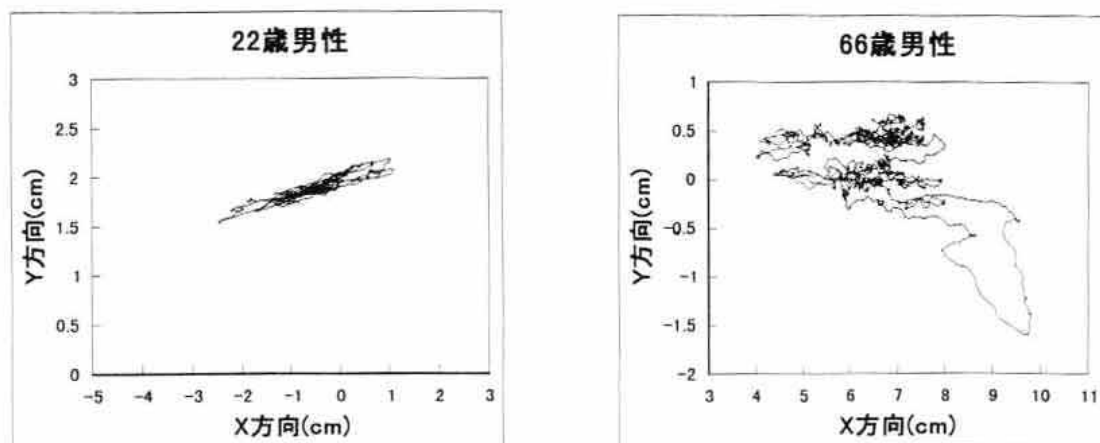


図3 青年と高齢者の重心動揺の1例

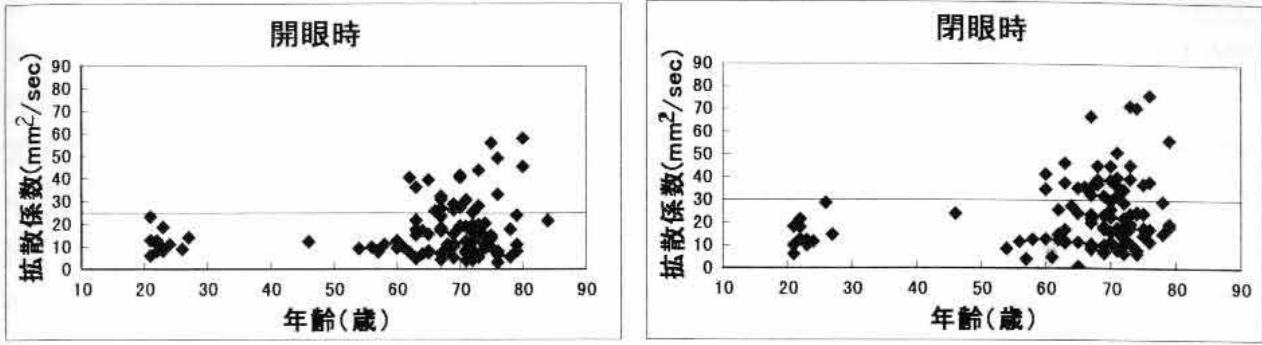


図4 年齢とフィードバック制御が作用するまでの成分の拡散係数との関係
(図中の横線は、青年の最大値を表す)

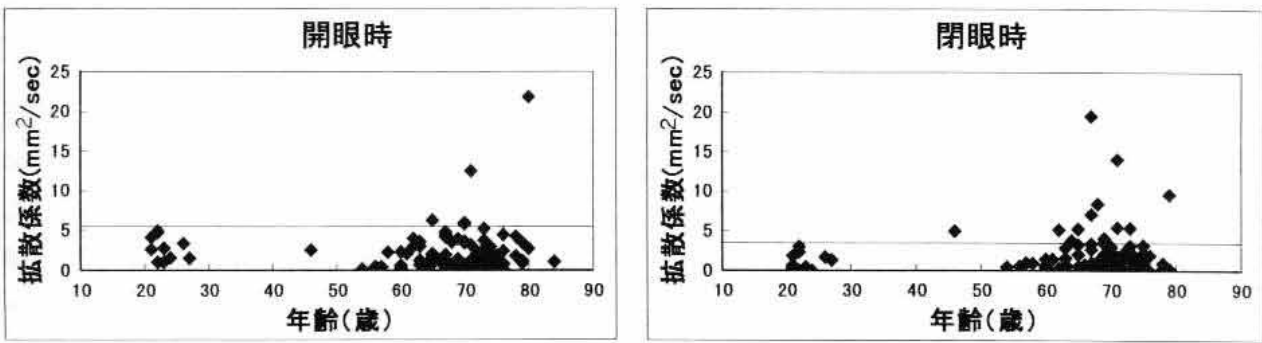


図5 年齢とフィードバック制御が作用している成分の拡散係数との関係
(図中の横線は、青年の最大値を表す)

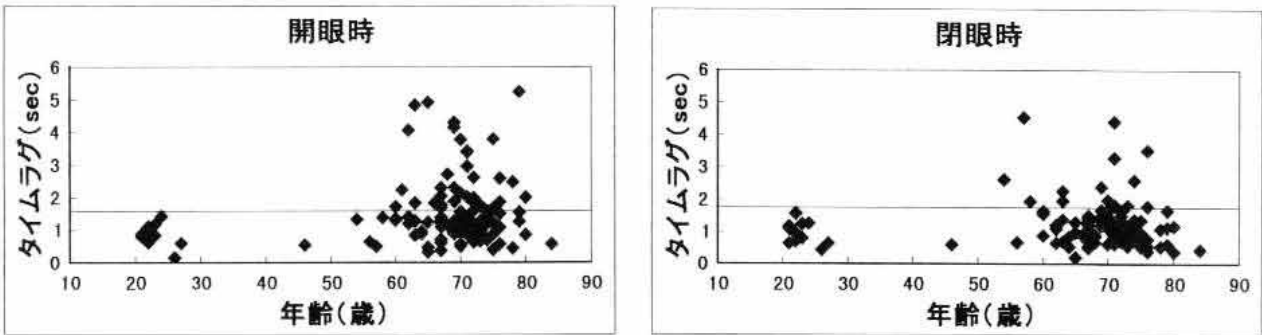


図6 年齢とタイムラグとの関係
(図中の横線は、青年の最大値を表す)

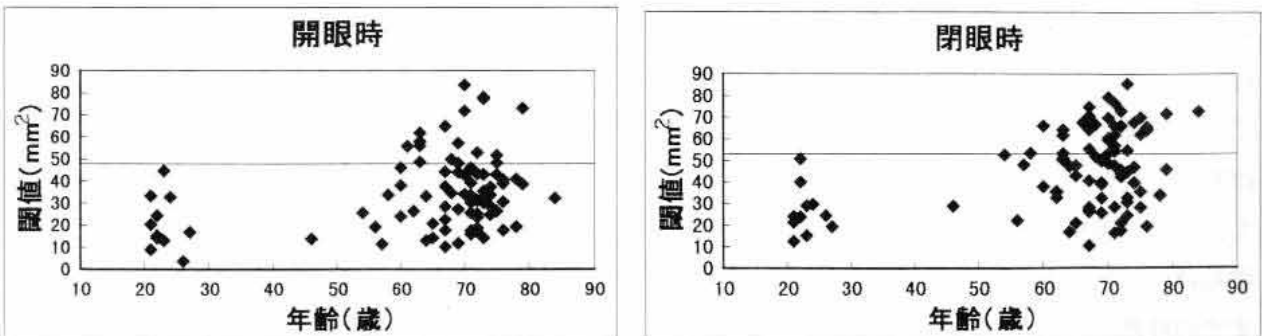


図7 年齢と閾値との関係
(図中の横線は、青年の最大値を表す)

表1 青年の最大値よりも大きな値が観察された高齢者の数
(フィードバック制御が作用するまでの成分)

	開眼時			閉眼時		
	青年		青年の最大値より 大きい値であった 高齢者数 (人)	青年		青年の最大値より 大きい値であった 高齢者数 (人)
	平均±標準偏差	最大値		平均±標準偏差	最大値	
フィードバック制御が有効に 作用するまでの拡散係数 (mm^2/sec)	12.2±4.73	23.0	26	15.1±6.19	28.5	40
タイムラグ (sec)	0.838±0.318	1.42	39	0.954±0.327	1.57	21
閾値 (mm)	20.7±11.5	44.8	20	26.4±10.5	50.8	35

いて、20名(22.5%)以上が青年の最大値より大きい値を示した。特に拡散係数と閾値については、閉眼時に青年の最大値よりも大きな値を示す高齢者の数が多く、拡散係数では40名(44.9%)、閾値では35名(39.3%)にも上った。青年の各パラメータの値は、開眼時と閉眼時で差が見られなかった(paired T-test: N.S.)。

論 議

本研究で観察された結果を要約すれば、高齢者と青年の姿勢制御の違いはフィードバック制御が有効に作用し始めるまでの過程にあり、かつそれは閉眼条件で顕著になると表現される。

ここでいうフィードバック制御とは、身体全体を振動子の結合体と考えた際の重心の動きの制御をいうのであって、身体各部で観察される反射による筋活動という意味ではない。どちらかといえば、反射などによって生じる下肢の筋群の活動は、その潜時の大きさから考えて、本研究ではフィードバック制御が有効に作用するまでの姿勢調節に含まれよう。このことは、本研究の分析方法を推奨しているCollinsらによって、すでに指摘されている¹⁾。先行研究の中で彼らは、フィードバック制御が有効に作用するまでの時間における素早い動揺が、長潜時反射などに起因する可能性を述べている。

加齢にともなう姿勢反射の変化については、足部に外乱を与えた後の姿勢補正中の筋活動を調べることによって、いくつか報告されてきた。Dietzらは、外乱後の姿勢の補正を担う下肢伸展筋群の活動に関与する多シナプス性の反射の感受性が、加齢によって低下することを報告している³⁾。単シナプス反射の感受性は加齢によって変化しないといわれていることや、多シナプス性の反射には上位中枢が関与することなどから、多シナプス性の反射の感受性の低下は、上位中枢から介在ニューロン回路への促通性の入力が増加するためではないかと考えられる²⁾。また、外乱を与えた直後に、高齢者では姿勢調節のための主動筋と拮抗筋のco-contractionが起こることを報告している先行研究⁸⁾もある。このようなco-contractionは下肢伸展筋群の伸展に対する感受性の低下を引き起こすので、その結果姿勢の安定性が低下する可能性もある。このように、外乱を与えた場合の動的平衡の実験によって、高齢者では下肢の筋群の反射の感受性の低下が明らかとなっている。このような反射の感受性の低下が、フィードバック制御が有効に作用するまでの姿勢調節に影響を与え、それが本研究の結果を導いた可能性が考えられる。

一般的に直立姿勢制御は、固有感覚、視覚、前庭感覚をもとに行われると考えられている。

上述のような反射は、そのうち固有感覚に関わるので、反射の感受性の衰えは固有感覚情報を有効に利用しづらくなる可能性を高めたかもしれない。通常、生体の運動制御に用いられる感覚情報は冗長であり、そのうちの一部が欠けても他の情報によって補われ、その制御は安定な範囲におさまるといわれている。本研究で、青年の各パラメータが、開眼時と閉眼時で変化しなかったのは、そのような理由によるであろう。一方高齢者では、閉眼時に、各パラメータの値が青年よりも大きい者の数が増加した。これらの者は、視覚情報が欠けた分を他の感覚情報で十分に補えなかったと推察される。先行研究において、平坦な床の上で直立を維持する場合には、前庭系は姿勢制御にあまり寄与していないことが報告されている⁴⁾。よって、高齢者の姿勢調節能力の衰えが閉眼条件で顕著だった背景として、固有感覚情報利用能力の低下が考えられ、これにも上述の反射の感受性の低下が関与していた可能性がある。

総 括

青年と高齢者の姿勢制御の様相について、重心の軌跡変化をランダムウォーク（確率過程）と捉えてその特徴を記述し、比較を行った。その結果高齢者では、フィードバック制御が有効に作用するまでの姿勢調節の個人差が青年より大きく、その能力に劣る者の存在が確認された。また、青年よりも姿勢調節能力が劣る者の数は、開眼条件よりも閉眼条件で多く、その一因として固有感覚情報利用能力の低下が考えられた。

引用文献

- 1) Collins, J. J., et. al. : Open-loop and closed-loop control of posture: A random-walk analysis of center-of pressure trajectories. *Exp. Brain Res.* 95 : 308-318, 1993.
- 2) Dietz, V. : Role of peripheral afferents and spinal reflexes in normal and impaired human locomotion. *Rev. Neurol. Paris* 143 : 241-254, 1987.
- 3) Dietz, V. et. al. : Posture in Parkinson's disease: impairment of reflexes and programming. *Ann Neurol.* 24 : 660-669, 1988.
- 4) Fitzpatrick, R., et. al. : Stable human standing with lower-limb muscle afferents providing the only sensory input. *J. Physiol.*, 480 : 395-403, 1994
- 5) 橋詰謙ほか：立体保持能力の加齢変化。日本老年医学会誌, 23 : 85-91, 1986
- 6) 木村みさかほか：閉眼片足立ちと開眼片足立ちからみた高齢者の平衡機能。体育科学, 24 : 118-129, 1996
- 7) Peterka, R. J., et. al. : Age-related changes in human posture control: Sensory organization tests. *J. Vestibular Res.* 1 : 73-885, 1990
- 8) Woollacott, M., et. al. : Response preparation and posture control. : Neuromuscular changes in the older adult. *Ann NY Acad. Sci.* 515 : 42-53, 1988.