SDA 法を用いた姿勢制御能の加齢変化の解析

Evaluation of postural control of aging change by stabilogram diffusion analysis

山下和彦^{1,2}(正会員), 岩上優美¹(正会員), 今泉一哉¹(正会員), 中島佐和子²(非会員),
井野秀一²(正会員), 伊福部達²(正会員), 小山裕徳³(非会員), 川澄正史³(正会員)

Kazuhiko YAMASHITA^{1,2}, Yumi IWAKAMI¹, Kazuya IMAIZUMI¹, Sawako NAKAJIMA²,
Shuichi INO², Toru IFUKUBE², Hironori KOYAMA³ and Masashi KAWASUMI³

Abstract

Falling is one of the most common and serious problems because advancing age has been associated with muscle weakness and deterioration of postural control system. The mechanisms contributing to age-related increases in ability of postural control and falls in the elderly remain unclear. The purpose of the stabilogram diffusion analysis (SDA) method was to study change of the mechanism of postural control between young and elderly generation. Any parameters of SDA were compared with several parameters of body sway derived from recordings of the center of pressure (COP) with the aid of a static force platform. The subjects were 48 healthy young volunteers (age: 18-64 years, mean±S.D: 33.6±14.6 years) and 41 healthy elderly volunteers (age: 65-87 years, mean±S.D: 77.7±4.3 years). They quietly stood on a static force platform with open and closing eyes for thirty seconds. The following results were indicated. 1. The elderly group was a significantly than the young group greater in the Diffusion constant D_s and the mean square critical displacement when eyes open and eyes closed. 2. On the elderly group, the correlation between SDA parameters and COP parameters was found to be greater in the closing eye condition than that in the open eye condition. 3. The correlations between diffusion coefficient and the range of anterior-posterior was greater than the correlations between the diffusion coefficients and the range of medio-lateral. Thus, the muscle of the tibialis anterior and the planter muscles was suggested.

Key Words

Postural control, SDA method, age related change

1. はじめに

高齢者医療費や介護保険費用の高騰が社会的問題である。高齢者の要介護度を上げる要因や寝たきりを助長する要因として挙げられるのが転倒である¹⁾ため、日本各地で転倒予防のための運動指導プログラムなどが実施されている。

転倒予防には、下肢筋力や姿勢制御能の向上が求められ^{2~4)}、定量的評価に基づいた転倒リスクを推定することが重要である。特に、姿勢制御能を定量的に解析する手法は十分に明らかではないため、地方自治体などで介入プログラムを実施しても、姿勢制御能がどのように変化したか、実施したプログラムがどのくらい効果を上げたかなどは全く評価されていないのが現状である。

人間の静止立位中の姿勢制御は視覚、聴覚、足部からの固有感覚情報や機械受容器からの入力、筋制御など複雑な制御機構を含んでいる^{5,6)}。また足部などに変形や感染などの異常があると転倒を誘発しやすいことが報告されており⁷⁾、姿勢制御能を評価するためにはさまざまなアプローチが必要である。

現在行われている姿勢制御能の一部を計測、評価する手法として、重心動揺計測や床反力計測が挙げられる。一般的な姿勢制御能の評価方法は、静止立位中における身体の動揺量を評価している。すなわち、重心動揺計測による姿勢制御能の評価は、重心の総軌跡長や面積など、結果の積分値に着目して評価が行

2007年6月13日受理

2007年7月21日最終原稿受理

1 東京医療保健大学 医療保健学部 医療情報学科, 東京都世田谷区世田谷 3-11-3

2 東京大学 先端科学技術研究センター, 東京都目黒区駒場 4-6-1

3 東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科, 東京都千代田区神田錦町 2-2

1Tokyo Health Care University, Faculty of Health Care, Division of Health Care Informatics, 3-11-3 Setagaya Setagaya-ku Tokyo

2University of Tokyo, Research Center for Advanced Science and Technology, 4-6-1 Komaba Meguro-ku Tokyo

3Tokyo Denki University, School of Science and Technology For Future Life, Department of Information Systems and Multimedia Design, 2-2 Nishiki-cho Kanda chiyoda-ku Tokyo

われている⁸⁻¹⁰⁾。これは重心の移動量が持つ振幅と移動の方向が主に反映されるため、時間的に変化するような動的特性には言及していない。そのため、重心動揺の周波数解析や 2 次元の重心軌跡と速度に着目して解析を加える位相面解析¹¹⁾が提案されているが、まだ姿勢制御能を適切に評価し、転倒リスクを算出できる手法は明確にされていない^{12, 13)}。

従来の重心動揺計測では、例えば、重心の軌跡長や面積が大きければ姿勢制御能が低いと評価され、実際に加齢により足圧中心(center of pressure: COP)の重心動揺軌跡長や面積が大きくなることなどが報告されている¹⁴⁻¹⁶⁾。しかし、これらの指標は必ずしも加齢変化や姿勢制御能を反映していないことが指摘されている¹²⁾。つまり、従来の重心動揺解析は、支持基底面の中での COP の制御に言及しないまま、姿勢制御能が検討されてきたと考えられる。そこで、COP がどのような軌跡で制御されているか、さらに、制御の観点から重心動揺の軌跡長がどうなると姿勢制御能が低下しているのかを系統的に検証する試みが必要であるといえる。以上の理由から、高齢者の転倒リスクについて姿勢制御能の立場から評価を加える十分な水準にはないと考えられる¹³⁾。

姿勢制御は時間的に常に変化しながら行われるため、検証を行うためには、重心動揺の時間的パラメータにも注目する必要がある。そこで本研究では、重心動揺計を用いた姿勢制御能の評価について、時間成分を考慮に入れた制御モデルを解析するために、Collins と DeLuca によって提案¹⁷⁻¹⁹⁾された stabilogram diffusion analysis 法(SDA 法)を用いて検討することとした。

本論文では、若年者および高齢者を対象として重心動揺計測を実施し、以下の着眼点について解析を行った。

- ① 総軌跡長や面積などの従来の重心動揺の解析手法に基づいて、若年者と高齢者の各パラメータの関係を調べる。
- ② 従来のパラメータと SDA 法によって得られるパラメータが加齢によりどのような変化をたどるかを調べる。
- ③ 上記 2 項目より、加齢による姿勢制御の手法がどのように変化したかを推定する。

以上を解析することにより、高齢者の姿勢制御の戦略の変化について言及することとする。

2. 対象者

対象者は若年者群 48 名(平均年齢 33.6 ± 14.6 歳, 18~64 歳), 高齢者群 41 名(平均年齢 77.7 ± 4.3 歳, 65~87 歳)である。すべての対象者は自立歩行可能で、心疾患、脳血管疾患等の既往歴がないことを確認した。対象者には、実験の主旨等を事前に説明し、インフォームドコンセントが得られた上で実験を行った。

3. 実験方法

3.1 実験条件

重心動揺計測は、Midi Capteurs 社製の Twin99 を用いた。サンプリング周波数は 20Hz、計測時間は 30 秒とした。重心動揺計の上には、素足で足をほぼ平行にそろえる形で乗るよう指示した。

実験に際しては、開眼および閉眼両足立ちの静止立位での計測をそれぞれ 1 回ずつ行い、計測中はできるだけ動かないよう指示し、開眼時は正面を注視するよう指示した。

3.2 SDA 法による姿勢制御能の解析

COP 軌跡は非定常であり、ランダム性を多く含んでいると考えられる²⁰⁾。そこで本研究では、COP 軌跡の結果を確率論的立場からブラウン運動などで用いられるランダムウォーク理論に基づいて構築された SDA 法により解析するものである¹⁷⁻¹⁹⁾。

COP 軌跡は、左右方向の時系列に座標データ x_i および前後方向 y_i として表現される。すなわち、時刻 i における m 時点離れた 2 点間の距離 $\Delta r_{m(i)}$ を式 1 のように定義した。さらに、式 2 により時間間隔 $\Delta t (=T_m, T$ はサンプリング間隔)の 2 点間の平均距離 $(\Delta r_{\Delta t})_{\Delta t}$ を求めた。

$$(\Delta r_{m(i)})^2 = (x_i - x_{(i+m)})^2 + (y_i - y_{(i+m)})^2 \quad \text{式 1}$$

$$(\Delta r_{\Delta t})^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} (\Delta r_{m(i)})^2}{(N-m)} \quad \text{式 2}$$

Fig.1 Example of COP analysis using SDA

式 2 より求められる SDA 法の結果の一例を Fig.1 に示す。Fig.1 より、横軸は Δt 、すなわち 2 つのペアの時間間隔(time interval)とし、縦軸は式 2 より算出された $(\Delta r_{\Delta t})^2$ とした。この結果をプロットすると Fig.1 のように 2 つの領域に分けられることがわかる。この 2 つの領域に対し、最小二乗法を用いて、それぞれに直線を当てはめ、その交点を境界点と定義した。この境界点までの時間を critical time interval (CTI)、境界点までの距離の 2 乗 $(\Delta r_{\Delta t_c})^2$ を mean square critical displacement (MSCD) と定義した。

Collins らは、境界点までの領域を短期間領域(short-term region)と定義し、開ループシステム(open loop system)による制御がなされ、これを越える領域を長期間領域(long-term region)とし、閉ループシステム(closed loop system)による制御がなされて

いと報告している¹⁷⁾。ここでいう開ループシステムとは、静止立位時の足底の安定中心点からCOPが遠ざかる方向の動きに相当し、その移動を開ループシステムが制御、すなわち、安定中心点に向けてCOPを戻そうとするフィードバック制御を行うことに相当する。

この考えに基づくと、CTIは開ループシステムによって決定される安定性維持のための時間間隔を示し、short-term regionに当てはめた直線の傾きが大きいほどCOPの確率論的活動が大きいことを示唆していると考えられる^{12,19)}。

本研究では、これらの考え方を取り入れ、short-term region, long-term regionに当てはめられた直線を拡散係数Dとし解析を進めた。拡散係数Dは図中の傾きから算出し、short-term regionに当てはまる傾きを D_{rs} (diffusion coefficients of short term region on plane of support: 支持平面上における短期間領域の拡散係数), long-term regionの傾きを D_{lt} (diffusion coefficients of long term region on plane of support: 支持平面上における長期間領域の拡散係数)と表現した。添え字のrは左右方向の座標を表すxと前後方向の座標を表すyの平方平均から求められる距離rを意味している。

本研究では、特に、開ループシステムによるCOPの確率論的活動の強さと姿勢制御へ与える影響を調べるために、 D_{rs} , MSCD, CTIに着目して解析を加えた。

4. 解析方法

本研究では、SDA法によって得られた結果と従来用いられている重心動揺計測のパラメータの比較を行った。そこで、従来用いられている重心動揺計測のパラメータとして、総軌跡長(total path length, 以下lengthと表記)、面積(area), 左右方向の平均速度(ML velocity)および最大移動距離(ML range), 前後方向の平均速度(AP velocity)および最大距離(AP range)とし、SDA法から得られるパラメータとして D_{rs} , 開ループシステムと閉ループシステムの境界点(critical point)までの時間間隔CTIと距離のパラメータMSCDとした。

高齢者群と若年者群の結果の検定は関連のないt検定を用い、従来の重心動揺の各パラメータ、SDA法から導かれる D_{rs} , MSCD, CTIの相関はピアソンの積率相関係数から求めた。

5. 実験結果

Fig.2, 3, 4にはSDA法によって得られる D_{rs} , CTI, MSCDを年齢別に表示した。年齢は18-30歳の青年群, 31-64歳の中年群, 65-75歳の前期高齢者群, 75歳以上の後期高齢者群とした。SDA法から得られるパラメータの加齢変化を確認するために分類を行ったので、従来の重心動揺のパラメータとの比較の際には、65歳未満の若年者群, 65歳以上の高齢者群と分けることとした。

Fig.2より、 D_{rs} は65歳未満では、視覚入力の有無にかかわらず、1.3以下を保っているのに対し、高齢者群では、30歳以下の青年群に比べ、前期高齢者群で開眼時に1.9倍、閉眼時で2.8倍、後

Fig.2 Aging change of D_{rs} with or without visual input

Fig.3 Aging change of CTI with or without visual input

Fig.4 Aging change of MSCD with or without visual input

Fig.5 Aging change of total path length with or without visual input

Table 1 D_{rs} between young group and elderly group

	length		area		ML velocity		AP velocity	
	open eye	closed eye	open eye	closed eye	open eye	closed eye	open eye	closed eye
young group	0.46 **	0.31 #	0.93 **	0.93 **	0.43 *	0.93 **	0.41 *	0.34 *
elderly group	0.19	0.85 **	0.92 **	0.79 **	0.07	0.84 **	0.28 #	0.79 **
	ML maximum range		AP maximum range		MSCD			
	open eye	closed eye	open eye	closed eye	open eye	closed eye		
young group	0.8 **	0.71 **	0.87 **	0.87 **	0.88 **	0.84 **		
elderly group	0.47 *	0.8 **	0.74 **	0.62 **	0.46 *	0.71 *		

** $P < 0.001$ * $P < 0.01$ # $P < 0.05$

Table 2 MSCD between young group and elderly group

	length		area		ML velocity		AP velocity	
	open eye	closed eye	open eye	closed eye	open eye	closed eye	open eye	closed eye
young group	0.46 **	0.23	0.93 **	0.83 **	0.42 *	0.2	0.47 **	0.23
elderly group	0.05	0.55 **	0.6 **	0.69 **	-0.06	0.62 **	0.14	0.44 *
	ML maximum range		AP maximum range					
	open eye	closed eye	open eye	closed eye				
young group	0.77 **	0.55 **	0.81 **	0.86 **				
elderly group	0.06	0.86 **	0.78 **	0.52 **				

** $P < 0.001$ * $P < 0.01$ * $P < 0.05$

Fig.6 Aging change of area with or without visual input

* $P < 0.05$

Fig.8 Aging change of displacement range with or without visual input

** $P < 0.01$

Fig.7 Aging change of average displacement velocity with or without visual input

期高齢者群で開眼時に 4.4 倍、閉眼時で 3.2 倍大きくなった。つまり、加齢により拡散係数 D_{rs} の傾きが大きくなり、開ループの確率論的活動度が青年・中年群に比べて大きいことがわかった。

Fig.3 より、CTI は前期高齢者群で開眼と閉眼の差が大きいことと、開眼時に比べて閉眼時の方が CTI が小さい傾向にあることが読み取れるが、それ以外は加齢による CTI への影響は確認されなかった。

Fig.4 より、MSCD は 64 歳以下の青年、中年群では開眼時で 3.6 mm^2 以下、閉眼時で 2.8 mm^2 以下であるのに対し、高齢者群では、青年群に比べて、前期高齢者群で開眼時に 3.2 倍、閉眼時に 2.7 倍、後期高齢者群で開眼時に 3.7 倍、閉眼時で 3.4 倍大きいことがわかった。

Fig.5 より、若年者群と高齢者群の総軌跡長を比較すると、若年者群に比べて高齢者群の総軌跡長の方が、開眼時で 49%、閉眼時で 43% 小さいことがわかった。Table 1 より、 D_{rs} と総軌跡長の関係は、若年者群の開眼で相関係数が 0.46、閉眼で 0.31、高齢者

群の開眼は相関が認められず、閉眼で0.85であった。Table 2より、MSCD と総軌跡長の関係は、若年者群の開眼で 0.46, 高齢者群の開眼で 0.55 であった。D_{rs}, MSCD と総軌跡長の間には、同じような相関の傾向がうかがえた。

Fig.6 より、若年者群と高齢者群の面積を比較すると、若年者群に比べて高齢者群の面積は、開眼で 1.8 倍、閉眼で 2.1 倍大きいことがわかった。Table 1 より、D_{rs}と面積の関係は、若年者群の相関係数は開眼、閉眼ともに0.93, 高齢者群の開眼は0.92, 閉眼は0.79 といずれも高い相関が認められた。Table 2 より、MSCD と面積の関係は、D_{rs}と同様に高い相関が認められ、若年者群の開眼で0.93, 閉眼で0.83, 高齢者群の開眼で0.6, 閉眼で0.69 であった。

Fig.7 より、左右方向 (ML) の COP の移動速度を比較すると、若年者群に比べて、高齢者群の左右方向の移動速度は、開眼で 52%, 閉眼で 47%小さいことがわかった。Table 1 より、D_{rs}と左右方向の移動速度の関係は、若年者群の開眼で 0.43, 閉眼で 0.93, 高齢者群の開眼では相関が認められず、閉眼で 0.84 であった。開眼時よりも閉眼時の方が D_{rs}と左右方向の COP の移動速度に高い相関が認められた。Table 2 より、MSCD と左右方向の移動速度の関係は、D_{rs}と同様の傾向が見られ、若年者の開眼で 0.42, 高齢者の閉眼で 0.62 の相関が認められた。

Fig.7 より前後方向 (AP) の COP の移動速度を比較すると、若年者群に比べて、高齢者群の前後方向の移動速度は、開眼で 45%, 閉眼で 48%小さいことがわかった。Table 1 より、D_{rs}と前後方向の移動速度の関係は、若年者群の開眼で 0.41, 閉眼で 0.34, 高齢者群の開眼で 0.28, 閉眼で 0.79 であった。Table 2 より、MSCD と前後方向の移動速度の関係は、若年者の開眼で 0.47, 高齢者の閉眼で 0.44 の相関が認められた。

Fig.8 より、左右方向の COP の最大移動距離を比較すると、若年者群に比べて、高齢者群の左右方向の最大移動距離は、開眼で 1.8 倍、閉眼で 1.6 倍大きいことがわかった。Table 1 より、D_{rs}と左右方向の最大移動距離の関係は、若年者群の開眼で 0.80, 閉眼で 0.71, 高齢者群の開眼で 0.47, 閉眼で 0.80 であった。開眼時よりも閉眼時の方が D_{rs}と左右方向の COP の最大移動距離に高い相関が認められた。Table 2 より、MSCD と左右方向の最大移動距離の関係は、若年者群の開眼で 0.77, 閉眼で 0.55, 高齢者群の開眼で 0.86 と高い相関が認められた。

Fig.8 より、前後方向の COP の最大移動距離を比較すると、若年者群に比べて、高齢者群の前後方向の最大移動距離は、開眼で 1.6 倍、閉眼で 1.5 倍大きいことがわかった。Table 1 より、D_{rs}と前後方向の最大移動距離の関係は、若年者群の開眼で 0.87, 閉眼で 0.87, 高齢者群の開眼で 0.74, 閉眼で 0.62 であった。開眼および閉眼ともに D_{rs}と前後方向の COP の最大移動距離に高い相関が認められた。Table 2 より、MSCD と前後方向の最大移動距離の関係は、若年者群の開眼で 0.81, 閉眼で 0.86, 高齢者群の開眼で 0.78, 閉眼で 0.52 と高い相関が認められた。左右方向の移動距離と比べて、高齢者群の開眼時を除き、前後方向の方が

高い相関が認められた。

Table 1 より、D_{rs}と MSCD の間には、若年者で開閉眼ともに約 0.85, 高齢者群の開眼で 0.46, 閉眼で 0.71 と相関が認められた。D_{rs}と MSCD 間に相関が認められたことから、Table 1 の D_{rs}と Table 2 の MSCD と総軌跡長などの各パラメータにおいて類似した相関係数の結果が得られたといえる。

また、結果は記載しないが、時間のパラメータである CTI は D_{rs}, MSCD とは相関が認められず、重心動揺の各パラメータとも有意な相関は見出せなかった。

Table 3 に若年者群と高齢者群の間で得られた結果をまとめて記載した。D_{rs}と MSCD は若年者群よりも高齢者群の方が大きい、CTI に両群間に差がないことがわかった。総軌跡長と前後左右方向の重心の移動速度は若年者が高齢者群よりも大きいのに対し、面積と前後左右の移動範囲は若年者群の方が高齢者群よりも大きいことが本結果よりわかった。

Table 3 Result between young group and elderly group on parameters

D _{rs}	: young group < elderly group
MSCD	: young group < elderly group
CTI	: young group = elderly group
total path length:	young group > elderly group
area	: young group < elderly group
ML・AP velocity:	young group > elderly group
ML・AP range :	young group < elderly group

6. 考察

6.1 SDA 法のパラメータによる姿勢制御能の解析

本研究では、高齢者と若年者の姿勢制御能の制御システムの変化、従来の姿勢制御能の評価パラメータと SDA 法から得られるパラメータの関係、その加齢変化について考察するために開眼、閉眼両足立ち時の重心動揺計測を行った。

結果より、開ループ制御の確率論的活動度を意味する D_{rs} は若年者群よりも高齢者群の方が大きいことがわかり、特に高齢者群の場合、閉眼により D_{rs} は大きく表れることがわかった。また、MSCD についても若年者群より高齢者群の方が大きく表れ、D_{rs}と同様の結果が認められ、D_{rs}と MSCD の相関も認められた。つまり、開ループ制御の確率論的活動度が大きいことは、境界点までの距離を延長させ、支持基底面が大きく使われることが推測された。

一方、Fig.4 より、境界点までの時間のパラメータである CTI に加齢変化は認められず、COP の各パラメータ、D_{rs}, MSCD との相関も認められなかった(結果省略)。つまり、姿勢制御のメカニズムの中で、鍵となる評価項目は、時間による制御ではなく、COP の位置情報を参照しながら、姿勢制御が行われていることが推察された。

COP の位置情報を取得するために使われる生体情報は、視覚、感覚器官で運動感覚をつかさどる三半規管や耳石器、足裏の固有感覚情報や機械受容器などが該当する。Fig.2 の D_{rs} は、視覚

を遮断する閉眼時において、65 歳以上の高齢者群は開眼時の 1.3 倍大きくなった。視覚は生体情報の 8 割を占めるといわれ、視覚情報を遮断することは、閉ループシステムによって起こる COP の安定中心点から遠方への移動の情報を視覚情報によって補正することが不十分となり、フィードバックループによる制御の遅れを生じると考える。以上の理由から、姿勢制御の開ループ部分の確率論的活動度が大きくなることが推察された。

一方で MSCD は開眼よりも閉眼の方が同等か、むしろ小さくなる傾向がうかがえる。これは、姿勢制御を行える支持基底面の大きさに関係していると考えられる。安定に COP を制御できる支持基底面の実効値は、下肢筋力や体の骨格の関係からほぼ決まっていると推測できる。したがって、開眼、閉眼にかかわらず、COP を制御できる最大値はそれほど変化しないことを意味すると考えられる。その結果、Fig.6 の開閉眼時の面積、Fig.8 の左右方向の最大移動距離、前後方向の最大移動距離の結果からも、開眼、閉眼時で同等か、むしろ小さくなる傾向にあると考える。

6.2 加齢による重心動揺のパラメータの変化

Fig.5 より、若年者群に比べて高齢者群の総軌跡長は約 4 割小さくなることがわかった。また、Fig.6 より面積は高齢者群の方が約 2 倍大きくなることがわかった。さらに、Fig.8 からは、前後左右の COP の最大移動距離が若年者群に比べて 1.5~1.8 倍拡大している結果が得られた。

これは加齢により COP の制御点が、足圧中心の最も安定な重心点から遠くまで離れて行われていることを表している。COP の距離が安定点から離れるということは、モーメントアームが長くなることを意味するため、その制御のためには、制御を担当する主導筋に大きな負荷がかかると考えられる。したがって、COP を制御するために、加えられる力が大きくなることでエネルギーが必要となる。ここで使える力の最大値が一定だとすると、遠くのを制御するためのエネルギー密度は小さくなると考えられる。したがって、Fig.7 の前後左右方向の移動速度に表されるように、高齢者群の方が若年者群よりも、約 40~50%小さくなると考えられ、総軌跡長も小さくなると考えられる。

先行研究では、加齢により総軌跡長が長くなるという報告^{15,16)}や平均移動速度は加齢変化を表すが、総軌跡長や面積は変化しないという報告^{12,14)}がある。本研究結果からは、総軌跡長はむしろ加齢により減少し、COP の制御のエネルギーという観点から、面積、および、前後左右の COP の最大移動距離は拡大し、前後左右の平均移動速度は減少することが示唆された。

さらに SDA 法のパラメータから D_{rs} と MSCD が拡大する傾向にあることがわかった。すなわち、足底部における COP の支持基底面の実効値が拡大するとともに、制御の確率論的要素が大きくなることを表しており、本結果で表される総軌跡長の減少、面積および前後左右の最大移動範囲の拡大は妥当であると考えられる。

6.3 SDA 法のパラメータと従来の重心動揺計測によるパラメータの比較

拡散係数 D_{rs} は面積、左右方向(ML)の最大移動距離、前後方向(AP)の最大移動距離に高い相関が認められた。Table 2 より、MSCD は面積、前後方向(AP)の最大移動距離に高い相関が認められた。特に、 D_{rs} と最大移動距離の関係は左右方向よりも前後方向で高い相関が認められた。これは MSCD についてもほぼ同様の結果であった。

姿勢の制御方法を解剖学的に考えると、前後方向の動きは前頸骨筋と足底腱膜、足関節周辺の筋や前足部の機能が関与²¹⁾しており、左右方向の動きは、股関節周辺の筋活動が関与している²¹⁾と考えられる。さらに姿勢制御は足関節-股関節戦略の手法から、静止立位のような小さい範囲の制御は足関節が担当し、足関節で対応できないような大きな動揺について股関節が担当することが報告されている²²⁾。

本研究では外乱等を加えることはしていないため、自発的動揺のみに着目している。したがって本研究からは主に足関節戦略による制御がなされていると予測される。Fig.8 より、左右方向の最大移動距離の平均値と標準偏差は、若年者群の開眼で 4.4 ± 0.5 mm、閉眼で 4.2 ± 0.6 mm、高齢者群の開眼で 8.1 ± 1.8 mm、閉眼で 6.8 ± 1.6 mm であった。前後方向の最大移動距離の平均値は、若年者群の開眼で 5.7 ± 0.6 mm、閉眼で 5.7 ± 0.7 mm、高齢者群の開眼で 9.0 ± 1.6 mm、閉眼で 8.3 ± 1.5 mm であった。すなわち、若年者群、高齢者群ともに開閉眼状態において前後方向の最大移動距離の方が左右方向よりも大きいことがわかった。 D_{rs} も左右方向よりも前後方向で高い相関が認められていることから、姿勢の制御には左右方向よりも前後方向に積極的に行われていると推測できる。

この理由として、上述したように動揺を制御するための解剖学的見地から、前足部である足指が前後方向の姿勢制御のためのトルクを発生させて自発的に発生する動揺を制御しているため、左右方向よりも前後方向の方が制御しやすいことが考えられる。

すなわち、本研究から得られた拡散係数 D_{rs} の結果は、足関節のトルクを発揮する筋、例えば、前頸骨筋、足底腱膜、足関節周りの筋により動揺を積極的に制御した結果が反映されていると考える。つまり横方向の動揺に対しては股関節周辺で行うことになるので、前後方向よりは確率的な制御になっており、割合として低い相関となったと考えた。

これまでの重心動揺計を用いた姿勢制御能の評価では、総軌跡長、面積、前後左右方向の最大移動距離を用いることが多かった。本研究結果の総軌跡長のばらつきを見ると、開閉眼ともに面積の結果よりも大きくなるとともに、 D_{rs} との相関も低いことがわかる。また、前後左右の速度についても同様の結果であった。また、左右方向の最大移動距離よりも前後方向の方が相関が高く、加齢による姿勢制御能の低下の割合を多く反映すると考えられることがわかった。前後方向は解剖学的見地からも姿勢制御能自体を反映させ、それは D_{rs} および MSCD との相関関係からも推測でき

た。以上のように、加齢に伴う姿勢制御能のストラテジの変化が解析された。

7. 結論

本研究では、若年者と高齢者の姿勢制御モデルの違いを解析するために SDA 法と、従来から行われている COP 解析のパラメータとの比較を行った。

その結果、SDA 法による D_{rs} と MSCD は加齢により大きくなることがわかった。そして、 D_{rs} および MSCD は従来のパラメータである面積、前後左右の最大移動距離との間に高い相関に認められることがわかった。

総軌跡長や面積が大きくなる要因の 1 つとして、生体中の開ループシステムの確率論的活動度が大きくなることが考えられる。さらに、 D_{rs} および MSCD は COP の前後方向の移動範囲と高く相関があることがわかり、その理由として、前頸骨筋や足底腱膜、前足部の機能などを使った制御の影響が推察された。一方時間のパラメータである CTI は COP の各パラメータとの相関が認められなかった。

本研究結果より、SDA 法により導出されるパラメータ、特に D_{rs} および MSCD の意義が実験的および解剖学的観点から推定でき、転倒リスク推定に利用できる可能性が示唆された。さらに、従来から用いられているパラメータの要素を高い相関係数から含有していることが認められ、このことは SDA 法の確率論的解析手法が姿勢制御能の評価に有効であることを示していると考えられる。

謝辞：本研究の一部は厚生労働省科学研究費 長寿科学総合研究事業 (H18-長寿-若手-002)、文部科学省科学研究費若手(B) (課題番号 18700479)、文部科学省科学研究費補助金(C) (課題番号 17500481)、文部科学省科学研究費補助金(C) (課題番号 18500441)、文部科学省科学研究費補助金 (B) (課題番号 18300191)、平成 19 年度 (財) 明治安田厚生事業団、平成 18 年度笹川科学研究助成、平成 18 年度石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成にて行われた。

引用文献：

- 1) 厚生労働省, 国民生活基礎調査 (2004)
- 2) Province MA, Hadley EC, Hornbrook MC, Lipsitz LA, Miller JP, Mulrow CD, Ory MG, Sattin RW, Tinetti ME, Wolf SL, The effects of exercise on falls in elderly patients a preplanned meta-analysis of the FICSIT trials. JAMA 1995; 273: pp.1341-1347
- 3) 木村みさか, 奥野直, 岡山寧子, 田中靖人, 高齢者の立位姿勢保持能に関する一考察. 体育科学 1998;26:pp.103-114
- 4) 鈴木隆雄, 杉浦美穂, 古名丈人, 西澤哲, 吉田英世, 石崎達郎, 金憲経, 湯川晴美, 柴田博, 地域高齢者の転倒発生に関連する身体的要因分析的研究-5 年間の追跡研究から. 日医老誌 1999;36:pp.472-478
- 5) Magnusson M, Enbom H, Johansson R, Wiklund J, Significance of pressor input from the human feet in lateral postural control. Acta Otolaryngol. 1990; 110: pp.321-327
- 6) Bisdorff AR, Bronstein AM, Wolsley C, Gresty MA, Davies A, Young A, EMG responses to free fall in elderly subjects and akinetic rigid patients. J Neurol Neurosurg Psychiatry 1999; 66: pp.447-455
- 7) 山下和彦, 野本洋平, 梅沢淳, 宮川晴妃, 川澄正史, 小山裕徳, 斎藤正男, 高齢者の足部・足爪異常による転倒への影響. 電学誌 C 2004;124:pp.2057-2063
- 8) Lord SR, Clark RD, Webster IW, Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons, J Gerontol. 1991; 46: pp.69-76
- 9) Black FO, Wall C, Rockette HE, Kitch R, Normal subject postural sway during the Romberg test. AM J Otolaryngol 1982; 3: pp.309-318
- 10) Goldie PA, Bach TM, Evans OM, Force platform measures for evaluating postural control: reliability and validity. Arch Phys Med Rehabil. 1989; 70: pp.510-517
- 11) Riley PO, Benda BJ, Gill-Body KM, Krebs DE, Phase plane analysis of stability in quiet standing. J Rehabil Res Dev. 1995; 32: pp.227-235
- 12) Raymakers JA, Samson MM, Verhaar HJJ, The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). Gait and Posture 2005; 21: pp.48-58
- 13) Collins JJ, DeLuca CJ, Burrows A, Lipsitz LA, Age-related changes in open-loop and closed-loop postural control mechanisms. Exp Brain Res. 1995; 104: pp.480-492
- 14) Laughton CA, Slavin M, Katdare K, Nolan L, Bean JF, Kerrigan DC, Phillips E, Lipsitz LA, Collins JJ, Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. Gait and posture 2003; 18: pp.101-108
- 15) Hasselkus BR, Shambes GM, Aging and postural sway in women. J. Gerontol. 1975; 30: pp.661-667
- 16) Murry MP, Seireg AA, Sepic BB, Normal postural stability and steadiness: quantitative assessment. J. Bone Joint Surg. 1975; 57:pp.510-516
- 17) Collins JJ, DeLuca CJ, Open-loop and close-loop control of posture: A random-walk analysis of center of pressure trajectories. Exp Brain Res. 1992; 95: pp.308-318
- 18) Collins JJ, DeLuca CJ, Random walking during quiet standing. Phys Rev Lett. 1994; 73: pp.764-767
- 19) Collins JJ, DeLuca CJ, Upright, correlated random walks: a statistical-biomechanics approach to the human postural control system. Chaos 1995; 5: pp.57-63
- 20) Duarte M., Zatsiorsky M, On the fractal properties of natural human standing: Neurosci. 2000; 283: pp.173-176
- 21) Winter DA, Patla AE, Prince F, Ishac M, Giolo-porczak k, Stiffness control of balance in quiet standing. J Neuro-physiol. 1998; 80: pp.1211-1221
- 22) Runge CF, Shupert CL, Horak FB, Zajac FE, Ankle and hip postural strategies defined by joint torques. Gait posture 1999; 10: pp.161-170