 原 著

高齢者の重心動揺 —ピーク面積-周波数スペクトルによる検討—

時田 喬¹⁾・宮田 英雄¹⁾・青木 光広²⁾

Frequency analysis of body sway in standing posture in the elderly —examination by the peak-area frequency spectrum—

Takashi Tokita¹⁾, Hideo Miyata¹⁾, Mituhiro Aoki²⁾

¹⁾*Emeritus Professor, Gifu University*

²⁾*Department of Otolaryngology, Gifu University School of Medicine*

In a previous report, we proposed a method for the frequency analysis of sway of the center of gravity in a standing posture. The method evaluated power-law distribution of the peak-area values in the spectrum from the frequency range 0.01 Hz to 5 Hz in. In this study, we improved this technique as a method to estimate a high frequency band (1–5 Hz) and a low frequency band (0.01–1 Hz) separately. Using our improved method, the body sway of 8 healthy adults and 10 healthy elderly people was examined. The elderly subjects showed the following results in comparison with the younger adults. 1) The first was a disorder of the power-law distribution in the low frequency band. This disorder suggests a failure of the interaction between the visual and vestibular systems on the maintenance of the standing posture. 2) The second results was an increase in value of the scaling exponent of power approximation indicating flattening of the power-law distribution curve. The flattening indicates an increase of random tendency of the sway. 3) The third was an increase of the peak-area values in the high frequency band. This finding indicates a failure of fine control of muscle activity by the proprioceptive system.

Key words: Stabilometry, frequency analysis, peak-area spectrum, power-law distribution, elderly people

緒 言

高齢社会を迎え、平均寿命が延びてきているが、重要なことは、質の良い日常生活を送ることができる健康寿命を延ばすことである。このため

に必要なことの一つは、直立・歩行などの基本的動作を行う機能の維持を図ることである。高齢者の平衡機能を的確に把握し、平衡機能の低下を予防することが求められる。

直立時の平衡機能を被験者に侵襲を加えることなく、簡単に検査する方法の一つとして重心動揺検査が普及し、本論文の考察の項の記述の如く、

¹⁾ 岐阜大学名誉教授

²⁾ 岐阜大学医学部耳鼻咽喉科教室

高齢者の重心動揺につき種々の方法での検査成績が報告されているが、さらに高齢者の直立機能低下の特性、成立機序を把握できる解析方法を開発し、平衡訓練と合わせ高齢者の質の良い生活維持に貢献する必要がある。

我々は、重心動揺の周波数解析法として、ピーク面積-周波数スペクトルを検査する方法を開発し、健常者のスペクトルはべき乗分布を示すことより、健常成人のスペクトルの基本型を明らかにし、臨床例の重心動揺を定量的に評価できることを報告した¹⁾。本研究では、本法の直立機能検査としての有用性を高めることを意図し、重心動揺周波数スペクトルの性質、および直立制御に働く視覚系、前庭系、自己受容反射系の特性を考慮し、スペクトルを低周波数帯域と高周波数帯域に分けて解析する方法に改良し、高齢者の重心動揺解析を行った。

検査方法

1 重心動揺記録

基準的方法²⁾³⁾に従い、被験者を重心動揺計（アニマ社製）上に閉足にて直立せしめ、開眼および閉眼にて各60秒間の重心動揺を記録した。サンプリング間隔は50 ms、サンプリングデータ数1201である。

2 重心動揺の周波数解析

周波数解析は、重心動揺の経時記録を用い、開眼および閉眼の左右動揺、前後動揺について行った。周波数解析はMemCalc（諏訪トラスト製）⁴⁾を用い、最大エントロピー法（MEM法）によるパワースペクトル解析を行った。解析条件は前報告¹⁾と同じでラグの値は10%、解析周波数は0.01~10 Hzとした。解析によりえられたピーク中心周波数とピーク面積のファイルより、エクセルを用いピーク面積-周波数-スペクトル図を作成した。スペクトル表示範囲は0.01~5 Hzとした。面積値（cm²）の表示にはルート値を用いた。高い周波数での面積値は小数点以下の小さい値となり図示に不適当なためである。本報告が前報告¹⁾と異なる点は、ピーク面積点列のべき乗近似を0.01~1 Hz（低周波数帯域）、1~5 Hz（高周波数帯域）に分けて行ったことである。これにより、低周波帯域、高周波数帯域、別々に近似曲線、近似式 $y=ax^b$ の定数 a 、スケーリング指数 b の値、相関係数の二乗（ R^2 ）の値が得られる。

1) 検査項目

開眼および閉眼の左右動揺、前後動揺について、次の検査を行った。

- (1) 全検査周波数範囲（0.01~5 Hz）の総面積
- (2) 最大スペクトルピークの周波数と面積
- (3) 低周波数帯域（0.01~1 Hz）：べき乗近似式（ $y=ax^b$ ）の定数 a 、スケーリング指数 b 、相関係数の二乗（ R^2 ）の値
- (4) 高周波数帯域（1 Hz~5 Hz）：低周波数帯域と同じ項目

2) 各検査の意図

各検査がもつ意義は前報告¹⁾と同じであるが、本報告では、直立制御に視覚・前庭系が主役を占める低周波数帯域と、自己受容反射系が主役を占める高周波数帯域を分けて評価した点が異なる。各検査の目的は以下の如くである。

① スペクトル総面積より揺らぎの大きさを評価した。

② 最大スペクトルピークの周波数・面積より、揺れの主役となる周波数など、動揺全体にかかわる性質を評価した。

③ スペクトルのピーク面積点列の分布の状態、および相関係数 R の二乗の値より、べき乗分布のあてはまりの良さ、揺らぎの規則性、直立制御に働く系の相互作用を評価した。

④ べき乗近似式 $y=ax^b$ における係数 a の値の評価は主として高周波数帯域について行った。スペクトルの位置（上下）よりピーク面積の大小、揺らぎの微細さを評価した。スケーリング指数 b の値、近似曲線の傾きより、揺らぎの周期性・ランダム性、揺らぎの記憶を評価した。

⑤ 異常を直立制御系（視覚系、前庭系、自己受容系）の働きとの関連で解釈した。

被験者

高齢者と評価基準とする健康成人の検査を行った。

高齢者は、71歳から94歳の10例である。今岡ら⁵⁾が報告した国内17施設で収集した3歳から94歳までの男女2415例より、各種動揺型が含まれるよう、また、外周面積、単位時間軌跡長の値が年齢平均値に比べ大きい例、小さい例も含まれるよう選択した。被験者として各種の動揺を示す例を選んだのは、加齢による共通の特徴を得ることを目的としたためである。なお、10例の動揺型、外周

図1 スペクトル提示例3例の重心動揺

図2 図1に重心動揺図を提示した3例のFFT法により得られたパワースペクトルである。各行とも左より開眼左右、開眼前後、閉眼左右、閉眼前後動揺のスペクトルである。縦軸はパワー ($\text{cm}^2 \cdot \text{値正規化}$)、横軸は周波数 (周波数範囲 0.02~10 Hz)

面積、単位時間軌跡長の値は、測定結果の表3に併記した。

成人被験者は、上記データベースより、20代~50代まで各年代2名ずつ計8名、外周面積、単位時間軌跡長が年齢別(5歳区分)・男女別の平均

値+SD以内にある例を選択した。

図1は、スペクトル提示例3例の重心動揺XY記録である。成人例(40歳、男、外周面積：開眼 2.03 cm^2 、閉眼 3.12 cm^2)、前期高齢者例(70歳、男、外周面積、開眼 3.61 cm^2 、閉眼 12.94 cm^2)、

後期高齢者例（94歳，男，外周面積：開眼 8.91 cm²，閉眼 7.60 cm²）である。

図2は，図1に重心動揺図を示した3例のFFT法を用いた周波数解析によりえられたパワースペクトルである。多数のピークが出現しているが，スペクトルの特徴，スペクトルの解釈，3例のスペクトルの差異を適確に表現することが難しい。国際基準²⁾では，低（0.02～0.2 Hz），中（0.2～2 Hz），高（2～10 Hz）周波数帯域の振幅の積分値の評価を提示しているが，活用されているとは考え難い。我々の推奨するピーク面積スペクトルの解析はこれらの問題を解決するものであると考えている¹⁾。両解析の対比に資する目的で従来法の検査成績を提示した。

結 果

1 成人例の検査成績

図3は，健康成人（40歳，男）のピーク面積一周波数スペクトルである。開・閉眼，前後・左右動揺のスペクトルが示してある。各図，横軸は周波数，縦軸はピーク面積（cm²）のルート値であ

る。各図左側の数値：上段は最大スペクトルピークの中心周波数，下段は面積。○印点列は低周波数帯域（0.01～1 Hz）のピーク面積値，●印点列は高周波数帯域（1～5 Hz）のピーク面積値である。各図中の数式は，上は低周波数帯域，下は高周波数帯域のべき乗近似式の値と相関係数の二乗の値 R² である。

本例のスペクトルの特徴は，開・閉眼，前後・左右動揺，低・高周波数帯域ともスペクトル（ピーク面積値点列）がべき乗分布を示していることである。

表1は，健康成人8例の検査結果である。測定値の最大～最少値を最右列に示した。後述の高齢者の測定値の評価において重要な項目の測定結果は以下の如くである。

1) べき乗近似における相関係数の二乗の値。低周波数帯域では，開眼左右にて6例は0.81以上であるが2例（症例2，6）は低い値を示している。開眼前後も2例（症例4，8）が低値である。閉眼左右では1例（症例2），前後では3例（症

図3 健康成人（40歳男）のピーク面積一周波数スペクトル。

○低周波数帯域（0.01～1 Hz）ピーク面積点列。--近似曲線

●高周波数帯域（1～5 Hz）ピーク面積点列—近似曲線

左上の図中に説明した数値，近似式の配列は以後の図においても同じである。本図の特徴は低・高周波数帯域とも点列がべき乗分布を示していることである。

表1 健康成人8例 (20歳代~50歳代) の測定値

検査条件	検査条件		N 1 25 F		N 2 27 F		N 3 33 M		N 4 37 F		N 5 40 M		N 6 47 M		N 7 55 F		N 8 57 M		N 1~N 8	
	被験者		左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後
開眼	動揺型		求心		多中心		求心		求心		求心		求心		前後		求心			
	外周面積		3.39		1.81		1.68		3.3		2.03		1.86		2.65		3.46		最小~最大	
	単位軌跡長		1.18		0.85		0.99		1.22		1.12		0.81		0.91		1.42			
	動揺方向		左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後
	最大スベクトルピーク	0.01~5 Hz 面積	0.95	0.6	0.66	0.26	0.82	0.6	1.33	0.57	0.87	0.85	0.45	0.84	0.72	0.45	0.55	0.53	0.45~1.33	0.26~0.85
		周波数	0.14	0.23	0.39	0.34	0.04	0.11	0.04	0.41	0.02	0.06	0.33	0.04	0.55	0.22	0.67	0.6	0.02~0.67	0.04~0.6
		面積 (√値)	0.29	0.13	0.14	0.08	0.25	0.21	0.42	0.16	0.21	0.47	0.1	0.60	0.24	0.1	0.18	0.11	0.1~0.42	0.08~0.6
	y = ax ¹ b 0.01~1 Hz	係数 a	0.07	0.07	0.08	0.02	0.07	0.04	0.08	0.09	0.1	0.05	0.09	0.03	0.06	0.03	0.12	0.06	0.06~0.12	0.02~0.09
		スケーリング指数 b	-0.63	-0.5	-0.34	-1.59	-0.45	-0.74	-0.56	-0.30	-0.22	-0.81	-0.04	-0.85	-0.47	-0.85	-1.03	-0.57	-1.03~-0.04	-1.59~-0.3
		R ²	0.81	0.74	0.45	0.85	0.83	0.97	0.86	0.32	0.90	1	0.00	0.94	0.94	0.91	1	0.56	0~1	0.32~1
y = ax ¹ b 1~5 Hz	係数 a	0.07	0.04	0.04	0.02	0.10	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.08	0.03	0.07	0.06	0.04~0.1	0.02~0.06	
	スケーリング指数 b	-2.2	-1.3	-1.85	-1.52	-2.73	-2.07	-1.77	-1.78	-1.93	-1.95	-2.26	-1.75	-2.44	-1.74	-2.12	-1.92	-2.73~-1.77	-2.07~-1.3	
	R ²	0.96	0.96	0.99	0.94	0.98	0.96	0.93	0.94	0.87	0.95	0.98	0.97	0.97	0.93	0.97	0.89	0.87~0.99	0.89~0.97	
閉眼	動揺型		左右求心		左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右	左右
	外周面積		4.49		1.6		2.39		3.33		3.12		2.73		1.9		2.57		最大~最少	
	単位軌跡長		1.79		1.03		1.59		1.56		1.47		1.26		1.17		1.2			
	動揺方向		左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後
	最大スベクトルピーク	0.01~5 Hz 面積	1.81	1.09	0.77	0.57	1.04	0.91	0.92	0.81	1.19	0.52	0.78	0.87	0.55	0.72	0.61	0.79	0.55~1.81	0.52~1.09
		周波数	0.04	0.06	0.3	0.13	0.3	0.08	0.33	0.23	0.15	0.28	0.29	0.29	0.28	0.22	0.26	0.2	0.04~0.33	0.06~0.29
		面積 (√値)	0.37	0.22	0.2	0.03	0.18	0.24	0.23	0.2	0.27	0.2	0.23	0.28	0.14	0.16	0.2	0.25	0.14~0.37	0.03~0.28
	y = ax ¹ b 0. 01~1 Hz	係数 a	0.14	0.11	0.08	0.04	0.1	0.08	0.1	0.09	0.07	0.04	0.08	0.05	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03~0.14	0.03~0.11
		スケーリング指数 b	-0.34	-0.25	-0.21	-0.62	-0.32	-0.45	-0.73	-0.61	-0.72	-1.24	-0.88	-1.02	-0.88	-0.63	-1.4	-1.41	-1.4~-0.21	-1.41~-0.25
		R ²	0.89	0.71	0.25	0.71	0.71	0.99	0.91	0.75	0.97	1	0.99	0.83	0.94	0.95	0.96	0.87	0.25~0.99	0.71~1
y = ax ¹ b 1~5 Hz	係数 a	0.14	0.08	0.12	0.03	0.13	0.07	0.07	0.06	0.1	0.08	0.05	0.04	0.09	0.06	0.06	0.05	0.05~0.14	0.03~0.08	
	スケーリング指数 b	-2.48	-2.05	-2.58	-1.81	-2.65	-2.16	-2.07	-1.83	-2.28	-2.47	-2.20	-1.84	-2.4	-2.13	-1.89	-1.61	-2.65~-1.89	-2.47~-1.61	
	R ²	0.94	0.91	0.97	0.94	0.97	0.95	0.98	0.94	0.96	0.96	0.98	0.96	0.95	0.97	0.92	0.90	0.92~0.98	0.90~0.97	

表2 健康成人8例 (20代~50代各2例) の測定値：平均±標準偏差

検査条件		開眼				閉眼			
		平均	SD	A-2 SD	A+2 SD	平均	SD	A-2 SD	A+2 SD
測定	外周面積	2.52	0.77	0.98	4.06	2.77	0.90	0.97	4.57
	単位時間軌跡長	1.06	0.21	0.64	1.48	1.38	0.26	0.87	1.90
	動揺方向	左右				前後			
測定	0.01-5 Hz 面積	平均	SD	A-2 SD	A+2 SD	平均	SD	A-2 SD	A+2 SD
		0.79	0.27	0.25	1.34	0.96	0.40	0.15	1.77
		0.27	0.25	-0.23	0.77	0.24	0.10	0.05	0.44
		0.23	0.10	0.03	0.43	0.23	0.07	0.09	0.37
最大スベクトルピーク	面積 (√値)	0.08	0.02	0.05	0.12	0.08	0.04	0.01	0.15
		-0.47	0.30	-1.06	0.12	-0.69	0.39	-1.47	0.10
		0.72	0.34	0.05	1.40	0.83	0.25	0.33	1.33
		0.06	0.02	0.02	0.11	0.10	0.03	0.03	0.16
y=ax'b 0.01-1 Hz	スケーリング指数 b	-0.47	0.30	-1.06	0.12	-0.69	0.39	-1.47	0.10
		0.72	0.34	0.05	1.40	0.83	0.25	0.33	1.33
		0.06	0.02	0.02	0.11	0.10	0.03	0.03	0.16
		-2.16	0.32	-2.80	-1.52	-2.32	0.26	-2.84	-1.80
y=ax'b 1-5 Hz	R^2	0.96	0.04	0.88	1.03	0.95	0.03	0.90	1.00
		0.08	0.02	0.05	0.12	0.08	0.04	0.01	0.15
		-0.47	0.30	-1.06	0.12	-0.69	0.39	-1.47	0.10
		0.72	0.34	0.05	1.40	0.83	0.25	0.33	1.33

図4 前期高齢者(70 M)のピーク面積—周波数スペクトル。

太字は成人の平均 ± 2 SD 範囲外の値。最大スペクトルピークの周波数が高い。

低周波数帯域：べき乗分布の不規則。分布曲線平坦。

高周波数帯域：近似式の定数 a の値が大きい。曲線の位置が高い。

例1, 2, 4)が0.71~0.75である。健常例でも、低周波数帯域では、開・閉眼、前後・左右動揺の一部でべき乗分布が乱れを示す例がある。これに対し、高周波数帯域では、開眼、左右0.87~0.99、前後0.89~0.97、閉眼、左右0.92~0.98、前後0.90~0.97と全例 R^2 の値は高く、良いべき乗分布を示している。スペクトルのべき乗分布の評価における指標となる。

2) べき乗近似式スケーリング指数の値。開・閉眼、前後・左右における最小~最大の値を表中に示したが数値の開きが大きい。指数が0に近い値(近似曲線の傾きが平坦)を示す揺らぎはランダム性が強く、値の小さい(負の値の大きい)揺らぎは周期性がある。測定値に広がりがあるが、スペクトルにおける近似曲線の観察と合わせ、揺らぎの性質の把握に重要な指標である。

3) 高周波数帯域における近似式定数 a の値。開眼左右0.04~0.10、前後0.02~0.06、閉眼左右0.05~0.14、前後0.03~0.08である。この値はスペクトルピークの面積($\sqrt{\text{値}}$ で表示)を示す。ス

ペクトル図より得られるピーク数(波数)は、開眼・左右15~20、前後16~20、閉眼・左右16~21、前後17~19である。面積と波数は高周波数帯域の揺れの微細さを評価する指標となる。

表2は、表1の測定値より算出した開・閉眼、左右・前後動揺の平均と標準偏差値である。表1の測定値とともに、高齢者の検査成績評価の基準とした。

2 高齢者例の検査成績

a 前期高齢者

図4は、70歳男子例のピーク面積-周波数スペクトルである。図左上の開眼、左右動揺において、低周波数帯域のピーク列の配列が乱れ、最大のスペクトルピークは0.15 Hzであるが、約1 Hzにも山があり2峰である。低周波数帯域の R^2 の値は、0.21と小さい。べき乗分布が破綻している。スケーリング指数の値は-0.25で基準範囲内であるが、分布曲線の傾きは平坦である。揺らぎがランダムであることを示している。高周波数帯域では、 R^2 の値は0.96でべき乗分布は良好である。

図5 後期高齢者(94 M)のピーク面積—周波数スペクトル。

太字は成人の平均 ± 2 SD 範囲外の値。低周波数帯域：べき乗分布不規則，相関係数の二乗の値が小さい。べき乗分布曲線は平坦。
高周波数帯域：近似式の定数aの値が大きいの。近似曲線の位置が高い。

近似式aの値は0.17で、標準値を超えているが、ピーク数(波数)は18で健康成人の散らばり範囲内である。高周波数帯域では揺れ面積の増加がある。

開眼前後動揺，閉眼左右・前後動揺においても，低周波数帯域のべき乗分布の破綻，近似曲線の傾きの異常(開眼前後，閉眼左右ではスケリング指数が+)を認める。高周波数帯域の近似式の定数aの値(開眼前後0.14，閉眼左右0.35，閉眼前後0.14)が基準値を超える。図においても，高周波数帯域スペクトルの位置上昇を認める。ピーク数は17～19で前述健康成人の散らばりの範囲内である。これらの所見は，高周波数帯域では揺れ面積の増大により微細さが失われていることを示している。

b 後期高齢者例

図5は，94歳男子のピーク面積-周波数スペクトルである。開・閉眼，前後・左右動揺で，項目は異なるが何らかの基準範囲を超える値が見られる，最大スペクトルピークでは周波数の高値(閉眼前後0.36)，面積増大(開眼左右0.38)を認め

る。低周波数帯域ではピーク面積点列の配列は開・閉眼，前後・左右で不規則で， R^2 の値も開眼左右0.48，閉眼前後0.49と低くべき乗分布が破綻している。スケリング指数の値は開眼左右-0.41，前後-0.28，閉眼左右-0.37，前後-0.16と0値に近く，分布曲線の傾きも平坦である。高周波数帯域では係数aの値が大きく(開眼：左右・前後，閉眼左右)，ピーク面積の増大を示している。

開・閉眼，前後・左右動揺により異常値を示す項目に差異はあるが，低周波数帯域のべき乗分布の破綻，分布曲線の平坦化，高周波数帯域のピーク面積増大が認められた。

C 高齢者10例の検査成績

表3は，10例の検査成績である。健康成人の測定値の平均 $\pm$ 標準偏差(基準値)を超える値を太字で示した。症例1，10が提示例である。基準値を超える値を示す例が多いが，開閉眼・前後左右動揺の何れに異常を示すか，どの項目に異常を示すかについては個人差が大きいが，10例の検査結果においては次の傾向を認める。

表3 高齢者10例の測定値。太字は表2に示した基準範囲（成人の平均±2SD）外の値である。
A 1 例, A 10例は図3、図4にピーク面積スペクトルを提示した例である。

被験者	A 1 70 M		A 2 71 M		A 3 73 M		A 4 85 M		A 5 86 M		A 6 86 M		A 7 88 F		A 8 89 F		A 9 93 F		A 10 94 M	
	求心	左右	求心	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右
開眼	動揺型																			
	外周面積 cm ²	3. 61	2. 24	2. 24	8. 32	11. 40	7. 48	10. 59	4. 83	6. 62	2. 15	3. 54	8. 91	6. 22	2. 15	3. 54	8. 91	6. 22	2. 15	3. 54
	単位時間軌跡長 (cm)	3. 22	1. 40	2. 87	2. 63	2. 07	3. 46	3. 05	2. 65	2. 15	3. 54	8. 91	6. 22	2. 15	3. 54	8. 91	6. 22	2. 15	3. 54	8. 91
	動揺方向	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右
	0.01-5 Hz 面積	0. 52	1. 22	0. 89	0. 61	2. 02	1. 20	0. 73	1. 86	1. 2	1. 56	2. 21	0. 99	1. 45	1. 05	1. 54	1. 68	1. 2	1. 96	2. 13
	周波数	0. 15	1. 26	0. 18	0. 39	0. 04	0. 53	0. 07	0. 12	0. 07	0. 18	0. 19	0. 35	0. 31	0. 4	0. 37	0. 4	0. 08	0. 13	0. 26
	面積 (√値)	0. 19	0. 15	0. 21	0. 15	0. 45	0. 21	0. 76	0. 18	0. 64	0. 27	0. 66	0. 29	0. 25	0. 18	0. 29	0. 3	0. 68	0. 37	0. 38
	係数 a	0. 11	0. 13	0. 05	0. 05	0. 12	0. 15	0. 13	0. 12	0. 11	0. 25	0. 09	0. 15	0. 08	0. 12	0. 10	0. 15	0. 10	0. 11	0. 19
	スケーリング指数 b	-0. 25	0. 43	-0. 92	-1. 05	-0. 46	-0. 13	-0. 57	-0. 33	-0. 7	-0. 06	-1. 17	-0. 41	-0. 77	-0. 49	-1. 01	-0. 46	-0. 79	-0. 61	-0. 41
	Y = ax ² b 0.01-1 Hz	0. 21	0. 42	0. 82	0. 95	0. 93	0. 09	0. 69	0. 14	0. 96	0. 80	0. 99	0. 73	0. 80	0. 99	0. 76	0. 74	0. 99	1	0. 48
閉眼	動揺型																			
	外周面積 cm ²	12. 94	4. 13	16. 74	15. 05	15. 41	5. 03	3. 27	3. 17	15. 41	5. 03	3. 27	3. 08	3. 15	2. 58	2. 30	8. 19	7. 60	7. 60	7. 60
	単位時間軌跡長 (cm)	6. 59	2. 04	5. 16	5. 52	3. 17	3. 27	3. 17	3. 17	3. 17	3. 27	3. 17	3. 08	3. 15	2. 58	2. 30	8. 19	7. 60	7. 60	7. 60
	動揺方向	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右
	0.01-5 Hz 面積	2. 81	2. 39	2. 29	1. 63	1. 08	2. 29	1. 98	2. 6	2. 09	2. 28	2. 06	1. 73	1. 47	1. 12	1. 58	1. 65	0. 98	1. 27	1. 49
	周波数	1. 04	0. 61	0. 61	0. 03	0. 4	0. 33	0. 31	0. 18	0. 34	0. 1	0. 34	0. 24	0. 39	0. 27	0. 51	0. 19	0. 20	0. 38	0. 22
	面積 (√値)	0. 48	0. 28	0. 48	0. 28	0. 44	0. 48	0. 39	0. 53	0. 31	1. 09	0. 45	0. 33	0. 30	0. 32	0. 26	0. 8	0. 47	0. 2	0. 31
	係数 a	0. 37	0. 19	0. 19	0. 12	0. 08	0. 15	0. 18	0. 15	0. 21	0. 09	0. 12	0. 08	0. 19	0. 08	0. 17	0. 11	0. 21	0. 1	0. 11
	スケーリング指数 b	0. 15	-0. 19	-0. 19	-0. 35	-0. 82	-0. 95	-0. 65	-0. 77	-0. 08	-1. 07	0. 81	-0. 67	-0. 49	-1. 13	-0. 18	-1. 2	-0. 51	-0. 81	-0. 73
	Y = ax ² b 0.01-1 Hz	0. 21	0. 21	0. 21	0. 72	0. 60	0. 86	0. 97	0. 97	0. 09	0. 98	0. 77	0. 81	1. 00	0. 98	0. 23	1	1	0. 78	0. 9
閉眼	動揺型																			
	外周面積 cm ²	12. 94	4. 13	16. 74	15. 05	15. 41	5. 03	3. 27	3. 17	15. 41	5. 03	3. 27	3. 08	3. 15	2. 58	2. 30	8. 19	7. 60	7. 60	7. 60
	単位時間軌跡長 (cm)	6. 59	2. 04	5. 16	5. 52	3. 17	3. 27	3. 17	3. 17	3. 17	3. 27	3. 17	3. 08	3. 15	2. 58	2. 30	8. 19	7. 60	7. 60	7. 60
	動揺方向	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右	前後	左右
	0.01-5 Hz 面積	2. 81	2. 39	2. 29	1. 63	1. 08	2. 29	1. 98	2. 6	2. 09	2. 28	2. 06	1. 73	1. 47	1. 12	1. 58	1. 65	0. 98	1. 27	1. 49
	周波数	1. 04	0. 61	0. 61	0. 03	0. 4	0. 33	0. 31	0. 18	0. 34	0. 1	0. 34	0. 24	0. 39	0. 27	0. 51	0. 19	0. 20	0. 38	0. 22
	面積 (√値)	0. 48	0. 28	0. 48	0. 28	0. 44	0. 48	0. 39	0. 53	0. 31	1. 09	0. 45	0. 33	0. 30	0. 32	0. 26	0. 8	0. 47	0. 2	0. 31
	係数 a	0. 37	0. 19	0. 19	0. 12	0. 08	0. 15	0. 18	0. 15	0. 21	0. 09	0. 12	0. 08	0. 19	0. 08	0. 17	0. 11	0. 21	0. 1	0. 11
	スケーリング指数 b	0. 15	-0. 19	-0. 19	-0. 35	-0. 82	-0. 95	-0. 65	-0. 77	-0. 08	-1. 07	0. 81	-0. 67	-0. 49	-1. 13	-0. 18	-1. 2	-0. 51	-0. 81	-0. 73
	Y = ax ² b 0.01-1 Hz	0. 21	0. 21	0. 21	0. 72	0. 60	0. 86	0. 97	0. 97	0. 09	0. 98	0. 77	0. 81	1. 00	0. 98	0. 23	1	1	0. 78	0. 9

① 最大スペクトルピークにおいては、開眼では左右動揺、閉眼では前後動揺に異常を示す傾向を認める。開眼・左右動揺における周波数 0.1 Hz 以下 7 例、面積増加 5 例であり、閉眼・前後動揺における周波数増加 5 例、面積増加 3 例である。

② べき乗近似式の係数 a においては、開眼、閉眼とも前後動揺に異常を示す傾向を認める。係数 a の値の増加を示した例は、高周波数帯域において開眼・前後動揺で 8 例、閉眼・前後動揺で 6 例である。

③ スケーリング指数 b の値は、健康成人の測定値の標準偏差が大きいため、低周波数帯域での基準範囲との数値的評価は避け、分布曲線の傾きは 0 線との比較、健康成人の平均値との比較で行った。

④ 相関値の二乗の低下を示した例は、開眼前後 4 例、閉眼前後 5 例であった。

考 察

1 ピーク面積スペクトル解析において周波数を分けた解析を計画した理由。

第一は、図 6 に示すスペクトルの性質を考慮したためである。左上の図は、前報告¹⁾で述べたピーク面積-周波数スペクトルである。ピーク面積

スペクトルはべき乗分布を示している。右上の図は、その両対数表示である。回帰直線は、約 1 Hz で傾きが変わっている。1 Hz 以下の低周波数帯域と 1 Hz 以上の高周波数帯域では制御機序が異なることが窺われる。左下は、1 Hz 以下と 1 Hz 以上を分けたスペクトルである。本報告で提示したスペクトルである。右下の図は、その両対数表示である。回帰直線の R^2 値は、低周波数帯域 0.99、高周波数帯域 0.98 で、右上の 0.01-5 Hz 一括近似における R^2 値、0.97 より良好である。低・高周波数帯域を分けて解析することが望ましいことを示している。

第二は、直立制御に働く受容器の特性を考慮したためである。時田ら⁷⁾は、視覚系は、約 1 Hz までの比例動作、前庭系は約 0.6 Hz までの積分動作、自己受容反射系は周波数の増加 (0.2~1 Hz) につれ筋活動の割合が増加することを報告している。約 1 Hz を境に直立制御に主役を占める系が異なっている。

以上が、低周波数帯域と高周波数帯域を分けて検査した理由である。なお、低周波数帯域と高周波数帯域の区分となる周波数を常に 1 Hz とすることが適当かについては検討の余地がある。武

図 6 ピーク面積-周波数スペクトル：一括解析（上段）と分割解析（下段）。右上の図において回帰直線は約 1 Hz で傾斜が変化している。低周波数帯域 (0.01~1 Hz) と高周波数帯域 (1~5 Hz) では直立制御機序が異なることを示唆する。

者⁶⁾は、健常者の重心動揺のFFT法を用いたパワースペクトルにおいて1 Hz以上で1/f揺らぎ(パワースペクトル密度が周波数fに反比例するゆらぎ)を示すことを述べている。この記述は、区分周波数を1 Hzとすることを支持するが、さらにめまい・平衡障害例などで検討が必要と考えている。

2 高齢者の重心動揺の流れ一周波数分析を中心に—

高齢者の重心動揺の報告は多いが、多施設の多数例を対象とした報告として時田、宮田は⁸⁾全国17施設で収集した3.5歳から94歳までの健常男女2201名の重心動揺データ⁵⁾の集計を行い、高齢者の重心動揺の性質として、面積、単位時間軌跡長の増加、位置ベクトル、振幅確立密度分布の標準偏差が左右方向で増大すること、前・後方向への速度ベクトルの増大を報告している。

高齢者の重心動揺の周波数解析に関しては、後藤らは⁹⁾、FFT法による周波数分析を行い高齢者群では若年者群に比べ、平均周波数0.1~1.0 Hzでは前後動揺にて増加、平均周波数0.12~1 Hzでは閉眼前後動揺にて増加することを報告している。国際基準²⁾に従った周波数評価法(0.02~0.2 Hz, 0.2~2 Hz, 2~10 Hz 3周波数帯域面積比の比較)を用いた報告として、時田、宮田⁸⁾は、上述の今岡らのデータにおいて、加齢による変化は前後動揺で明確であり、開・閉眼とも低い周波数帯域(0.02~0.2 Hz)の面積比が減少し、高い周波数帯域(2~10 Hz)の面積比が増大することを認め、自己受容反射の働きの亢進を示唆する所見と述べている。パワースペクトルの周波数と制御機構について、藤原ら¹⁰⁾は、周波数帯域ごとの振幅ヒストグラム平均値を検討し、視覚機能を示す開眼時の0.1~0.5 Hzは50歳までは加齢に伴って漸増、60歳以上では急増、前庭機能を示す閉眼時の0.1~0.5 Hzは加齢変化が小さく、固有感覚機能を示す閉眼時の0.5~1 Hzと1.0~1.5 Hzは50歳代間ではほとんど変化なく、60歳以上では顕著に増加したことを述べている。平成3・4年度科学研究費補助金による総合研究A(代表 野末道彦)において、水越ら¹¹⁾は重心動揺パワースペクトル密度(0.1~3.96 Hz)は年齢と関係なく閉眼で増強し視覚入力の影響が強く見られたことを述べている。

3 本研究でえられた知見と解釈

上述のごとき周波数解析に対し、本研究ではピーク面積-周波数スペクトル解析法を用い、スペクトル(ピーク面積点列)のべき乗分布を評価することにより、個々の高齢者の特性を定量的に捉えることができた。症例により出現に差異があるが、高齢者の動揺の特徴を示すと考えられる知見とその解釈は以下の如くである。

① 最大スペクトルピーク周波数の増加。高齢者の重心動揺が速い揺らぎであることを示す。

② ピーク面積点列のべき乗分布の破綻。直立制御に働く系の相互作用の低下を示す。

③ 指数bの値の増加、分布曲線の傾きの平坦化。ゆらぎの記憶の短縮、揺らぎのランダム傾向を示す。

④ 高周波数帯域・係数aの値の増加。揺れの微細さの減少を示す。自己受容反射の機能低下による微細な筋活動の障害によるものと考えられる。

⑤ 異常は、開閉眼とも前後動揺、高周波数帯域に多い。直立制御において前後系は、左右系に比べ構造的に自己受容反射に依存することが多いことが報告¹²⁾されているが、この所見は、高齢者の直立障害には自己受容反射の機能異常の関与が強いこと示す。

⑥ 検査結果には個人差が大きい。全身の骨・骨格筋系、脳・神経系の老化の個人差、多様性に起因する部分が多いと考えられるが、高齢者の直立姿勢(膝を曲げた前屈姿勢)、直立維持における随意性などによる個人差、多様性も考える必要があると思われる。平衡生理学的観点よりの解明が期待される。

以上の如く、ピーク面積スペクトル解析で得られた高齢者の重心動揺の特徴は、低周波数帯域のべき乗分布の破綻、分布曲線の傾きの異常、高周波数帯域のピーク面積増加である。これらは直立維持に働く制御系の相互作用の破綻、自己受容反射の機能低下によるものと考えている。

4 今後の課題

高齢者が、健康で自立した生活を送るためには、安定に直立、歩行を行う機能を保つことは極めて重要である。バランス検診¹³⁾を普及させ、直立姿勢維持機能の低下を早期に発見し、必要な例には平衡訓練を行い、健康寿命の延長を図る必要

がある。本検査は、高齢者の直立制御機能低下の検出にも有用と考える。

ま と め

1) 先に報告したピーク面積-スペクトル周波数スペクトル検査を低周波数帯域、高周波数帯域に分けて解析する方法に改良し、結果を直立制御に働く視覚系、前庭系、自己受容反射系の特性との関係で解釈した。

2) 健常成人では、ピーク面積-スペクトルは低・高周波数帯域ともべき乗分布を示した。健常成人の動揺範囲を提示し、高齢者の検査結果の定量的評価のための資料とした。

3) 改良法を用いた高齢者の検査では、健常成人に比べ次の特徴が観察された。① 低周波数帯域ではべき乗分布の乱れが著明で加齢による直立障害の一因として制御系の相互作用の破綻があることが認められた。② 高周波数帯域ではピーク面積増大を認め、自己受容反射系の微細な働きの破綻が高齢者の直立動揺の一つの特徴であることが認められた。③ べき乗近似曲線の傾きが減少し、加齢により重心動揺はランダム化することを認めた。

本論文の要旨は第72回日本めまい平衡医学会（大阪）にて発表した。

文 献

- 1) 時田 喬, 宮田英雄, 青木光広: 重心動揺の周波数解析—ピーク面積-周波数スペクトル検査の提唱. *Equilibrium Res* 72: 238-246, 2013
 - 2) Kapteyn TS, Bles W, Nijokiktjen CJ: Standardization in platform stabilometry being a part of posturography. *Agressologie* 24: 231-326, 1983
 - 3) 日本平衡神経科学会運営委員会: 重心動揺のQ & A (1995). *Equilibrium Res* 55: 64-77, 1996
 - 4) 常磐野和男, 大友詔雄, 田中幸雄: 最大エントロピー法による時系列解析 [第2版] — MemCalc の理論と実際—. 1-252頁, 北海道大学出版会, 札幌, 2008
 - 5) 今岡 薫, 村瀬 仁, 福原美穂: 重心動揺検査における健常者データの集計. *Equilibrium Res (Suppl 12)*: 1-84, 1997
 - 6) 武者利光: ゆらぎの世界 (第22刷). 69-141頁, 講談社, 東京, 1994
 - 7) Tokita T, Takagi K, Ito Y: Analysis of the vestibule-spinal system with a five-dimensional feedback model. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 104: 322-327, 1987
 - 8) 時田 喬, 宮田英雄: 高齢者の重心動揺. *Geriat Med* 37: 821-828, 1999
 - 9) 後藤昭信, 宮下善和, 平林千春, 他: 高齢者の直立重心動揺の特徴について. *Equilibrium Res* 48: 138-143, 1989
 - 10) 藤原勝夫, 池上晴夫: 立位姿勢における身体動揺の周波数成分の加齢変化. *姿勢研究* 4: 81-88, 1984
 - 11) 水越鉄理, 渡辺行雄, 中川 肇, 他: 高齢者の姿勢制御に占める視覚系体制感覚系の役割. *耳鼻* 39: 745-749, 1993
 - 12) 時田 喬, 伊藤八次, 水田啓介: 直立制御の解析—複雑系の観点より—. *Equilibrium Res* 66: 17-25, 2007
 - 13) 時田 喬, 宮田英雄, 伊藤八次, 他: バランス検診を目的とした重心動揺検査. *Equilibrium Res* 63: 325-334, 2004
- 利益相反に該当する事項はない