直立時重心動揺の冗長性†

徳 増 厚 二・米 田 敏・八 木 一 記
藤 野 明 人・五 島 一 吉*

はじめに

ヒトの重心動揺図は、一定時間の直立時の二次元に展開された足圧中心点の移動軌跡である。正常者の重心動揺図にみられる軌跡は不規則であるが、左右方向、前後方向とも一定範囲内にとどまり、図の中心域では密、周辺域では粗のいわゆる中心性パターンを示すことが多い。不安定な両脚直立のため、抗重筋緊張の変化や循環、呼吸運動などから重心の移動が出現し、その都度立直り反射で修正されその繰り返しが重心動揺となると考

えられる。しかしながら重心動揺の波型を偏倚と立直りとして前庭性眼振の緩徐相と急速相に比較することは困難である。特に開眼直立では屢々、比較的高い周波数のいくつかの動揺が長周期の極めて遅い動揺に重畳してみられる。重心動揺の中心座標に対する経時的变化を観察して興味ある結果を得たので報告する。

研究対象と研究方法

北里大学病院人間ドックを受診した正常被検者38名を対象とした。30歳より62歳までの男性31名、女性7名で

図1 重心動揺図の経時的变化

33歳健康男子ロンベルグ姿勢開眼直立40秒間の重心動揺図と5秒ごと4秒間の経時的重心動揺、重心軌跡は矢印で示すように動揺中心座標に対して左右・前後方向とも対称的でない。

† Redundancy of Standing Ability in Normal Subjects

* Koji Tokumasu, Satoshi Yoneda, Kazunori Yagi, Akito Fujino and Kazuyoshi Goto

* 北里大学医学部耳鼻咽喉科学教室

30歳代 (35.7 ± 2.5) 14名, 40歳代 (43.9 ± 2.5) 18名, 50歳以上 (57.8 ± 3.3) 6名の3群に分けた。

被検者は靴をぬがせ、重心動揺計 (パテラ S-110A) の検査台上にロンベルグ姿勢で開、閉眼各1分間直立させた。開眼では目の高さの2 m前方の小さい固定視標を固視させた。左右・前後両方向の動揺をデータレコーダに記録し、その再生波を 10 Hz Low pass フィルタを通し、Signal processor (日本電気三栄 7T08) にて、サンプリング時間 50 msec, 1024点, 51.2秒間のデータとした。更にこの AD 変換データをマイクロコンピュータ (NEC PC-9801) に転送し、51.2秒間の重心点平均値を原点とした中心座標上に5秒および10秒おきの分割重心動揺図を経時的に再生し、あわせて重心動揺の標準偏差、軌跡長、最大動揺幅 (動揺範囲) を計測し、年代別、開閉眼別に検討した。

研究結果

本研究を始める動機となった正常被検者のロンベルグ姿勢40秒間閉眼直立時の重心動揺図とその記録の5秒おきの4秒間の分割重心動揺図を経時的に図1に示す。

図中の矢印で示した重心点の移動は中心座標に対して

対称的ではなく、分割重心動揺図の動揺範囲が経時的に動いている。

図2, 3, 4は本研究対象例であり、51.2秒間のロンベルグ姿勢直立の重心動揺図 (図右端) と左より右へ経時的に中心座標上にならべた10秒ごとの分割重心動揺図である。51.2秒間の重心位置平均値を中心座標とし、いづれも図上段は開眼、図下段は閉眼である。

左端重心動揺図には重心位置平均値 (中心座標) と2倍標準偏差楕円、最大動揺幅を、分割重心動揺図には左右、前後方向軌跡長と通常軌跡長のヒストグラムを示した。

図2は54歳男性で分割重心動揺図は上段開眼では中心座標上を前後方向、左右方向にゆっくり移動し、右端重心動揺図では動揺幅が大きく多中心性パターンを示す。しかし下段閉眼では分割重心動揺図の遅い動きは開眼時に比べて小さい。

図3は62歳男性、図4は62歳女性であり、いずれも10秒ごとの分割重心動揺図では51.2秒間にはほぼ1周期の遅い前後方向の動きが上段の開眼で認められる。しかし下段の閉眼では10秒ごとの軌跡長は開眼より延長している

図2 重心動揺図とその分割 (1)

開眼重心動揺図 (上段) は多中心性で、閉眼の図 (下段左) より前後方向へ動揺範囲が拡大している。

54歳健康男子ロンベルグ姿勢直立51.2秒間の重心動揺図とその10秒ごとの分割。サンプリング時間 50 msec, 1024点の平均値で座標を示す。目盛は 1 cm, 最大動揺範囲と 95% 楕円 (2SD) を示す。ヒストグラムは10秒ごとの左右方向軌跡長 (白), 前後方向軌跡長 (黒), 総軌跡長 (白)。開眼10秒ごとの分割図の中心は前方より後方へ、また左右へ移動した。軌跡長は相対値を示す。

図3 重心動揺図とその分割(2)

開眼重心動揺図(上段右)は多中心性であり、閉眼の図(下段右)とはほぼ同じ前後方向の動揺範囲がみられる。記録は図2と同じ方式による。62歳健康男子ロンベルグ姿勢51.2秒間の直立時重心動揺図と10秒ごとの分割。開眼では重心中心は、51.2秒間に後方より前方へ移動し、閉眼では軌跡長が大きい。

図4 重心動揺図とその分割(3)

重心動揺は開閉眼とも小さく、前後方向の動揺範囲は開眼(上段右)、閉眼(下段右)ともほぼ等しい。記録は図2と同じ方式による。

62歳健康女子ロンベルグ姿勢51.2秒間の直立重心動揺図と10秒ごとの分割。開眼では50秒間に動揺中心が僅かながら前方より後方へ移動している。

図5 重心動揺図とその分割（4）

開眼重心動揺図（上段右）は多中心性の傾向があるが、閉眼（下段右）と前後方向への動揺範囲はほぼ等しい。10秒ごとの分割では開眼で、前後方向に50秒で1周期（0.02 Hz）の動揺中心の移動がある。閉眼では軌跡長が長く、また10秒ごとの変動が大きい。

記録は図2と同じ方式による。69歳、椎骨脳底動脈循環不全のめまい患者男性。

表1 正常者年齢別ロンベルグ姿勢直立時重心動揺の解析（I）

単位 mm

年齢 歳	条件	例数		標準偏差		軌 跡 長			最大動揺幅	
				左右方向	前後方向	左右方向	前後方向	総軌跡長	左右方向	前後方向
30-39	開眼	14	平均値	4.5	5.1	530.0	564.2	855.5	27.2	27.4
			S D	1.0	1.7	97.3	100.4	142.1	6.8	7.2
	閉眼	14	平均値	4.9	5.7	674.4	696.7	1045.	28.7	31.1
			S D	1.1	2.2	118.1	151.6	4191.0	8.2	7.3
40-49	開眼	18	平均値	4.3	5.0*	488.0	507.9	773.6	24.0	24.6
			S D	1.0	1.7	89.6	70.4	113.4	6.4	5.3
	閉眼	18	平均値	4.8	4.6	639.3	621.2	986.8	27.5	28.1
			S D	0.7	1.4	158.4	88.6	181.7	5.4	8.1
50-62	開眼	6	平均値	3.9	6.4*	547.5	547.2	850.2	23.0	31.0*
			S D	1.0	1.7	116.8	76.3	132.2	7.9	9.0
	閉眼	6	平均値	5.0	5.0	755.1	763.2	1307.5	30.5	28.5
			S D	1.0	1.2	444.2	244.9	381.4	8.3	7.8

標準偏差、軌跡長、最大動揺幅の平均値と標準偏差（SD）を示す。51.2秒の解析、サンプリング時間 50 msec, 単位は mm.

* 印では開眼値が閉眼値より大きい。

表2 正常者年齢別ロンベルグ姿勢直立時重心動揺の解析 (II)

単位 mm

年齢	例数/全数		左 右 方 向					
			標準偏差		軌 跡 長		最大動揺幅	
			開眼	閉眼	開眼	閉眼	開眼	閉眼
30-39	7/14 (50%)	平均値	5.1	4.6	527.0	664.1	29.0	26.5
		S D	0.7	0.6	43.5	101.4	5.7	6.7
40-49	5/18 (28%)	平均値	5.5	4.8	509.2	640.2	29.4	28.2
		S D	0.7	0.5	38.8	174.0	3.8	4.8
50-62	1/ 6 (17%)	平均値	5.3	5.1	616	757	37.5	35.5
		S D						
年齢	例数/全数		前 後 方 向					
			標準偏差		軌 跡 長		最大動揺幅	
			開眼	閉眼	開眼	閉眼	開眼	閉眼
30-39	4/14 (29%)	平均値	5.9	4.7	543.0	601.8	30.7	25.3
		S D	1.8	0.9	31.3	54.7	6.2	4.1
40-49	11/18 (61%)	平均値	5.8	4.9	519.5	620.7	27.0	28.3
		S D	1.7	1.4	77.7	108.1	4.6	8.1
50-62	5/ 6 (83%)	平均値	6.8	4.8	561.0	792.2	33.3	28.1
		S D	1.7	1.2	76.4	262.0	7.6	8.7

直立時重心動揺で標準偏差で現わされる動揺の大きさが閉眼より開眼で大きいものを左右動揺（上段）、前後動揺（下段）について示した。最大動揺幅は一部を除いて同様の傾向を示した。

その出現率は左右方向では高齢者には減少、前後方向では高齢者には増加した。しかし軌跡長はいずれの場合も閉眼は開眼より延長した。

が、開眼時の長周期動揺はみられない。

図5は69歳、椎骨脳底動脈循環不全のめまい症例である。上段開眼直立時の分割重心動揺図では正常被検者の場合と類似して前後方向に長周期の移動がみられた。下段閉眼では10秒ごとの軌跡長は著しく異り、動揺は不規則で大きいが開眼時の遅い動きは消失し、右端重心動揺図は中心性パターンである。

重心動揺のパラメータとして標準偏差、軌跡長、最大動揺幅について、被検者を年代ごとにわけて、ロンベルグ姿勢51.2秒間直立の開、閉眼左右方向、前後方向動揺の平均値と標準偏差を求め表1に示した。軌跡長は重心動揺全体の大きさをあらわすのに対して標準偏差は個々の動揺のパラツキを示し、最大動揺幅は個々の動揺の大きさとパラツキの双方に影響される。閉眼直立でみられた長周期動揺の出現では軌跡長には影響はないが、標準偏差および最大動揺幅が増加する。

各パラメータの開眼、閉眼を比較すると各年代とも軌跡長は開眼は閉眼より小さく、その差は50歳以上の左右、前後方向軌跡長を除いて有意 ($P < 0.05$) であっ

た。しかし標準偏差、最大動揺幅では表1の星印を附した40歳代、50歳以上の前後動揺では標準偏差が、50歳以上の前後動揺では最大動揺幅が開眼で閉眼より大きい平均値を示した。この差は有意ではないが次に標準偏差値で開眼が閉眼より大きい被検者を集めて表2に示した。

表2の上段は左右方向標準偏差が、下段は前後方向標準偏差が開眼より閉眼で大きい例を集めたものである。それぞれ年代別に標準偏差、軌跡長、最大動揺幅の平均値と標準偏差ならびにその出現率を示した。

左右方向で標準偏差が開眼が閉眼より大きい例では最大動揺幅も同様に開眼が閉眼より大きい。前後方向で標準偏差が開眼が閉眼より大きい場合には40歳代を除いて左右方向と同じく最大動揺幅でも開眼が閉眼より大きい。しかしながら軌跡長は左右方向、前後方向とも閉眼が開眼より大きな数値であった。

閉眼より開眼で大きい標準偏差値を示すものの出現頻度は、左右方向では加齢とともに減少し、前後方向では加齢とともに増加した。視性立直り反射関与の有無によって直立時身体動揺は変化し、これは開眼より閉眼で大

図6 重心動揺の周波数分析。

26歳健康男子開眼 mann 検査 (Bo) と単脚直立検査 (Co) の重心動揺記録周波数分析, パワースペクトルのルート変換値で51.2秒間の解析。左右動揺X, 前後動揺Y。Mann 検査では左右方向に, 単脚直立検査では前後方向, 左右方向に動揺が大きくなる。左右方向の動揺は 0.1 Hz, 前後方向の動揺は 0.1 Hz 以下で増大している。

きい軌跡長に反映されている。一方閉眼より開眼でみられた標準偏差の増加は, 重心位置の大きいバラツキを意味し, 開眼時に観察された長周期の大きい重心動揺に対応し, これらの例では閉眼に比べ開眼でより大きい最大動揺幅を示すものが多かった。

考 案

1. 重心動揺周波数分析の一般的特徴

正常被検者ロンベルグ姿勢1分間直立時の重心動揺周波数分析では, 開眼, 閉眼ともそのパワースペクトルをみると, 大部分のパワーは 1 Hz 以下に集中し, 周波数の増加とともにパワーは急速に減少する。この一般的傾向は正常被検者群で¹⁾, また正常の同一被検者の反復検査で²⁾ 一定のバラツキがあるが観察される。ロンベルグ姿勢直立に対してマン直立では左右方向に, 単脚直立では前後左右方向に動揺が増加し, 低周波のパワーの増大と, より高周波域のパワーの増大がみられるが周波数とそのパワーの関係はロンベルグ姿勢直立と類似している (図6)。

武者³⁾, 山本ら⁴⁾ は自然界の特徴あるパワースペクトルを示す現象として, 低周波帯域で周波数に逆比例のスペクトルの振動に注目し, これを $1/f$ 特性と呼んでいる。例えば, 正規分布の発射間隔で励起された, ヤリイカの巨大神経活動電位を, 数 cm 伝導した部位で記録した場合の発射間隔分布や, アフリカマイマイにみられる自発発射活動の発射間隔の低周波のゆらぎに $1/f$ 特性を認めている。

清水ら⁵⁾ はヒト直立時の重心動揺で左右, 前後方向動揺のパワースペクトルはいずれも主として 1.25 Hz 以下の周波数成分からなり, 低周波ほどパワーが大きい傾向があると指摘し, スペクトルの傾きは 1 Hz 以下では $1/f$, 1 Hz 以上の周波数帯域では $1/f^3$ に近似していると報告している。

ヒトの直立姿勢制御に関与する自己受容器系, 前庭系, 視覚系各立直り反射およびその他の重心動揺の変化に関与する現象は, 低周波の $1/f$ 特性といわれる基本的パワースペクトルの僅かな変化として出現し, あるいは

図7 重心動揺図の呼吸成分。

Aは正常者ロンベルグ姿勢閉眼1分間直立の重心動揺図, Bは前後方向重心動揺(Y)と呼吸運動(R)の振幅スペクトル図, Cは前後方向重心動揺と呼吸運動の相互相関とその周波数を示す。重心動揺前後方向に呼吸運動成分のあることを示している。

その中に被いかくされている。

2. 重心動揺パワースペクトル中の特徴周波数

直立時の重心動揺の解析にあたって, 直立姿勢制御と関連する抗重筋緊張変化と, 直立機能と直接関連のない循環や呼吸運動が区別される。抗重筋緊張変化には深部知覚系, 表在知覚系, 前庭系, 視覚系の立直り反射の他, 長時間直立では筋疲労や, 最近間野⁹⁾により報告された下肢血液循環を調節する自律神経系も関与している。

重心動揺と呼吸運動との関係は既に高田ら⁷⁾によって明らかにされているが, 我々も正常被検者ロンベルグ姿勢閉眼直立の前後方向重心動揺と, 呼吸運動との相互相関図からそれを確認した(図7)。

深部知覚系, 前庭系, 視覚系による直立姿勢制御の特徴周波数については, ヒト直立での実験的研究や, 上記各系に障害を持つ患者と正常者との比較で検討されている。

深部知覚系については Aggashyan, Gurfinkel ら⁸⁾が, 筋朧心性神経の慢性障害の患者ならびに正常者での筋朧

心性神経の実験的な一時的遮断で, 閉眼直立時に 0.7~1.2 Hz の体動揺がみられたと報告している。前庭系については, 松岡⁹⁾は末梢性前庭障害患者の閉眼直立時重心動揺で左右方向に 0.2~0.5 Hz の平均振幅が多いと述べている。視覚系姿勢制御については, 森戸ら¹⁰⁾は正常被検者直立で開眼固視から閉眼にすると左右方向より前後方向で 0.2~0.5 Hz の範囲で動揺が増大するとし, 中田¹¹⁾は視覚障害者と正常者の直立とを比較し, 視覚障害者の重心動揺では 0.5 Hz のパワー増大がみられると報告している。報告者によって検査条件や重心動揺解析方法が必ずしも一致しないが, 深部知覚系立直り反射では 0.7~1.2 Hz と比較的高周波域の動揺を抑え, 視覚系, 前庭系立直り反射では 0.2~0.5 Hz の比較的低周波域の姿勢制御を, 更に前者では前後動揺, 後者では左右動揺の制御を受持つように推察される。

3. 重心動揺の超低周波成分

著者らは本研究で正常被検者ロンベルグ姿勢51.2秒間直立時の重心動揺を, 10秒毎の分割重心動揺として平均重心位置である動揺中心座標上に経時的に作図し1周

期的50秒 (0.02 Hz) の極めて遅い動揺を観察した。そしてこの超低周波成分の出現は閉眼直立でみられ、閉眼では僅か、あるいは認められない。また超低周波成分が出現する場合、軌跡長は延長せず標準偏差が増大し、最大動揺幅も大きい。したがって超低周波成分の出現を閉眼より開眼で大きい標準偏差を示すものとしてとらえることが出来た。正常被検者38名を30歳代40歳代と50歳以上の3群に分けて閉眼より開眼で標準偏差が大きいもの、すなわち超低周波成分の出現するものを調べたところ左右動揺では30歳代50%, 40歳代 28%, 50歳以上が17%と加齢と共に減少し、前後動揺では30歳代 29%, 40歳代 61%, 50歳以上 83%と加齢とともに増加した。

閉眼より開眼で大きい標準偏差を示したこれらの群では最大動揺幅も閉眼より開眼で大きい傾向があるが、軌跡長はいずれも閉眼が開眼より大きいことが確認された。

稲村ら¹²⁾は11—41歳正常被検者閉眼固視ロンベルグ姿勢の長時間直立検査の重心動揺記録で30秒〜3分程度の長周期の明瞭な周波数成分を認めた。そして足底前部中内側の機械的受容感覚情報を実験的に変化させたところ、0.011—0.014 Hz, 0.014—0.027 Hz の2成分のパワーが増減した。すなわちその部の感覚刺激の増減と上記2成分のパワーの増減とが一致したことから、この超低周波成分には足底前部からの触圧感覚をおこす機械的受容器感覚情報が関与し、足指部と足関節の動揺調節が重要な役割を果たすと結論している。

また間野⁶⁾は直立時重心動揺に関与する、下肢血流調節の自律神経系の因子が重心動揺の約 0.02 Hz と対応すると報告し、このパワーは下腿三頭筋筋電図、交感神経活動・胸部周径・心拍数、静脈圧といずれも 0.6 又はそれ以上の相関係数が得られたとのべている。

0.02 Hz 前後の超低周波成分の成因に関しては稲村らの足底前部の知覚による姿勢調節、間野の下肢自律神経活動と重心動揺の研究が評価される。しかしながら著者らの観察した、超低周波動揺が開眼直立で出現し、閉眼直立で減少または消失すること、その出現の左右、前後方向での加齢による違いについては更に検討が必要であろう。

分割重心動揺図の経時的観察では直立姿勢制御の偏倚と立直り反射は、閉眼直立で超低周波成分につて体の左右、前後への傾斜のままおこなわれ、直立姿勢制御のゆとり、すなわち冗長性を示すことが推定される。超低周波成分は直立姿勢制御の冗長性を現わすという結論は、それが視性立直り反射の加わる開眼直立で出現し、閉眼直立で減少または消失することで支持される。

ま と め

1. 正常被検者38名のロンベルグ姿勢閉眼直立時重心動揺を検討した。51.2秒間直立の重心動揺を5ないし10秒ごとの分割重心動揺図とし中心座標上に経時的に再生し、左右方向、前後方向の約50秒1周期 (0.02 Hz) の超低周波動揺を観察した。
2. 直立時重心動揺の超低周波成分は軌跡長に比べ標準偏差の増大としてとらえられ、主として閉眼直立で出現し、閉眼直立で減少消失した。
3. 開眼での超低周波成分の出現頻度は左右動揺では加齢と共に減少し、前後動揺では加齢とともに増加した。そして超低周波動揺は直立姿勢制御の冗長性によると推定した。

本研究の一部は第45回日本平衡神経科学会シンポジウム直立姿勢制御機構とその検査 (司会 時田喬教授) において報告した。

文 献

- 1) 米田 敏, 徳増厚二: 正常人の直立時重心動揺の周波数分析(1) 視覚, 足底支持面の影響, *Equilibrium Res* 41(1): 56-60, 1982
- 2) 徳増厚二, 米田 敏, 池上彰博, 斉藤 彰, 西端慎一: 直立時重心動揺の再現性について, 正常者の周波数分析, *Equilibrium Res* 43(1): 24-31, 1984
- 3) 武者利光: 生体情報と 1/f ゆらぎ, *応用物理* 54: 429-435, 1985
- 4) 山本光璋, 中浜 博: 神経インパルス信号の時系列分析とその生理学的意義, *日本生理誌* 48: 491-504, 1986
- 5) 清水史郎, 藤木宏嗣: 基本動作的姿勢における重心動揺と身体動揺の三次元分析, *姿勢研究* 3(2): 59-64, 1983
- 6) 間野忠明, 稲村欣作, 岩瀬 敏: 体性感覚入力および自律神経系活動と直立制御, *Equilibrium Res* 46(1): 24-25, 1987
- 7) 高田和之, 渡辺興作, 掛布英辰, 竹内伸也: 直立姿勢における重心動揺と呼吸の自己回帰モデル, *姿勢研究* 2(2): 65-72, 1982
- 8) Aggashyan RV, Gurfinkel VS, Mamasakhlisov VG and Elner AM: Changes in spectral and correlation characteristics of human stabilograms at muscle afferentiation disturbance, *Agressologie* 14D: 5-7, 1973
- 9) 松岡豊彦: 起立時身体動揺の定量的解析, *耳鼻臨床* 70(増2): 1191-1280, 1977
- 10) 森戸貞良, 羽柴基之, 林 良一, 三宅彰英, 渡辺悟: 重心動揺よりみた Romberg 姿勢および Mann

姿勢. 姿勢研究 1(1): 13-19, 1981

- 11) 中田英雄: 重心動揺からみた視覚障害者の直立姿勢保持能力. 姿勢研究 2(1): 41-48, 1982
- 12) 稲村欣作, 河合 学, 青木賢一, 天岸祥光, 間野忠明, 大原孝吉: スタビログラムの低周波成分について. 約1分前後の周期のもつ周波数成分と機械受容感覚情報の係わり. 姿勢研究 6(1): 1-11, 1986

Abstract

Normal stabilogram were examined in 38 subjects, 38 males and 7 females, aged 30 to 62 years, standing erect in Romberg's posture with eyes open and with eyes closed. From analog data of body sways in both lateral (RL) and anterior-posterior (AP) directions, digital data of 51.2 sec duration with a sampling time 50 msec were obtained in each case. Each serial partial statokinesigram of 5 or 10 msec duration was displayed on rectangular coordinates, the origin of which was fixed at the mean value of each location of the center of gravity during 51.2 sec with the use of a microcomputer (NEC PC 9801). The slow deviation with a period of about

50 sec or with 0.02 Hz, of body sway in the RL or AP direction was not infrequently observed when the eyes were open. However, it was eliminated or negligible when the eyes closed. When such a slow deviation of body sway appeared, larger values of standard deviation and maximal range of body sway occurred in spite of the short length of the trace of the center of gravity.

The incidence of slow deviation of body sway decreased in the RL direction and increased in the AP direction with the age of the test subjects. The origin of such a slow deviation is considered to be a redundancy of human standing ability, because it appeared only in stable and safe standing in normal subjects with eyes open.

Key words: movement of the center of gravity, aging, total length, standard deviation

(原稿到着: 昭和62年 8 月12日
別刷請求先: 徳増厚二
〒228 神奈川県相模原市北里15-1
北里大学医学科耳鼻咽喉科学教室)