身体重心動揺の速度解析 ——末梢前庭障害における左右方向別動揺速度について——

東邦大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：小松崎 篤教授）

山 本 昌 彦

VELOCITY ANALYSIS OF THE SWAY IN THE CENTER OF GRAVITY OF THE BODY ——LATERAL SWAY VELOCITY IN PERIPHERAL VESTIBULAR DISORDERS——

MASAHIKO YAMAMOTO, M.D.

Department of Otorhinolaryngology, Toho University School of Medicine, Tokyo

The bodily sway may be quantitatively evaluated in detail when the data are subjected to a computer analysis. Such analyses are feasible for diverse aspects of the phenomenon of "bodily sway" including the distance, extent, direction, velocity, acceleration velocity, and power spectrum. Among these, our interest has been to investigate the change in velocity of laterally-directed bodily sway in vestibular disorders and its correlation with the direction and magnitude of nystagmus. When our velocity analysis method for 8 directions was employed, there was a close correlation between the velocity of lateral sway and the direction of nystagmus when the eyes were closed.

This report deals with velocity of the bodily sway and lateralized velocity, correlatively studied in patients with peripheral vestibular disorders.

In acute monophasic peripheral vestibular disorders, the velocity of lateral bodily sway and the difference in counter-directed velocity were both greater than the corresponding control value. However, even among patients with acute vestibulopathies, patients during the first attack and those during an episode of repeated attacks showed a different response; specifically, for those who were in an acute phase of repeated attacks, the bodily sway to the lateral directions was smaller while the nystagmus appeared to be the same in intensity. In bilaterally-involved vestibulopathies in which caloric response was moderately reduced, the velocity of lateral bodily sway and the velocity difference were close to a normal value. Those patients who did not respond to 50ml of ice-cold water introduced into the each external meatus and were Romberg phenomenon positive, revealed a large lateral sway velocity, while the velocity difference was rather small both when the eyes were opened and closed. Therefore, the postural controls may be maintained rather effectively even in those with bilateral vestibulopathy when the caloric response is only modestly or moderately impaired. These results indicate that the bodily sway as assessed by the velocity of lateral directions and the velocity difference should be interpreted in a different way.

Key words: 重心動揺, 8方向別動揺解析法, 末梢前庭障害, 左右動揺速度, A89—0754—25582
速度差

1) はじめに

ヒトが直立姿勢を保持するために、その姿勢制御の上から、揺れの現象が出現する。この揺れの現象は、

ヒトが倒れようとする偏倚現象と、その偏倚を元の位置へもとそうとする立ち直り反射によって成立していると考えられている。これらの現象について、多くの

研究がなされ、福田¹⁾はこの臨床的意義を詳細に検討している。一般にヒトの姿勢制御系に障害を来した場合、平衡失調に陥り、直立姿勢は大きな揺れが生じ、さらには直立姿勢を保持することが困難となる。したがって、これら姿勢制御障害の臨床像より病巣局在診断の助けとする試みが以前よりなされてきた。しかし、身体動揺における臨床的意義は、眼球運動のそれに比してまだ限られたものと言わざるを得ない。近年、動揺解析は次第にその価値を高めつつあり身体の揺れの恒常性や特長について定量的判断が可能となってきた。

重心動揺解析の客観的評価としては、いくつかのパラメータがあり、重心動揺軌跡距離²⁾、動揺面積³⁾、周波数⁴⁾⁵⁾⁶⁾、パワースペクトル⁷⁾⁸⁾⁹⁾等が検討されてきた。

私は、動揺解析の定量的解析をおこなうにあたって、眼振に緩徐相、急速相の2相があるごとく、重心動揺も速度の異なる2相が存在する可能性を推定し、動揺速度について、動揺を方向別に分け速度解析を行ってきた。そこで、左右方向動揺速度が眼振とに高い相関を示すことを確認した。すなわち、眼振の出現した時の重心動揺は、特に閉眼において速い速度と遅い速度の二相を持ち、眼振急相方向に速く緩徐相方向に遅い速度を持って揺れていることが分かった¹⁰⁾¹¹⁾。今回、この左右方向別重心動揺速度が、末梢前庭障害ではどのような速度傾向を示すかについて解析し、末梢前庭障害と総括された症例でも一側性障害では急性期や時間が経過した時期、また両側性障害では、ロンベルグ現象を示す時と示さない時の障害程度と動揺の有りに差異が出現することが推定され、これらを中心に検討を加えたので報告する。

2) 被検者並びに記録解析方法

I) 正常者として健康な成人の男女55名を使用し、

このデータを正常値として扱った。また、異常者として疾患の明確な末梢前庭機能障害患者とし、めまいを伴う突発性難聴、前庭神経炎、急性前庭障害(反復性)、片側半規管機能低下、両側半規管機能低下例を対象とした。

II) 記録方法は、被検者を直立姿勢、閉足位で立たせ、開眼、閉眼それぞれ90秒間記録される。開眼時には、前方3mにある視標を1点注視させる。データ解析には90秒間のうちの安定した60秒間を使用した。

III) 重心急揺記録並びに解析システム

i) 重心動揺記録装置：図1に示すように、重心動揺計として三栄測器製1GO2型三点ストレンゲージ圧トランスデューサ方式による重心(足圧中心)検出を行い、増幅器を通して三点の電位差よりX-成分(左右方向)、Y-成分(前後方向)の2成分を出力する。出力電圧は、200mV/10Kg・cmである。記録装置は、データレコーダとX-Yレコーダを使用した。重心動揺図は60秒間のデータによる。

II) 解析システム：コンピュータPC-8801(NEC)を使用し、データレコーダからのアナログデータをA/Dコンバータによって100msecでサンプリングされ、デジタルデータとして方向別速度が演算処理される。データ時間は60秒間である。演算された結果は、CRT並びにプリンターに出力される。

IV) 左右方向別重心動揺解析の方法

重心動揺の方向別動揺速度の解析は、新たに考案し解析検討してきた8方向別重心動揺速度解析法¹⁰⁾¹¹⁾を使用した。図2は、その解析方法であるが、今回は左右方向動揺についての解析が必要なため、1の方向、5の方向の2つの方向について解析した。8方向は各々45°の幅をもたせてある。データのサンプル点それぞれについてこの方向へ向かう点を検出し、同時に速度を割り出す。速度は左右各方向へ向かった点の総

図1 重心動揺解析システム

図2 8方向別重心動揺解析法

数の平均速度として演算される。

3) 解析結果

I) 正常者の左右方向別重心動揺速度

正常者における左右方向別動揺速度は、異常者のデータを扱うための基準値として必要である。重心動揺60秒間における正常者55名の全体の平均動揺速度は、開眼時 9.41mm/sec, 標準偏差値(以下S.Dとする)=1.67, 閉眼時 15.34mm/sec, S.D=3.29であった。表1は、正常者55名の開眼時、閉眼時それぞれ60秒間の左右方向別速度の平均値である。開眼時動揺の右方向速度は 10.03mm/sec, S.D=2.20 であり、左方向動揺

速度 10.02mm/sec, S.D=2.29 であった。左右方向動揺速度差は 0.58mm/sec, S.D=0.48 である。閉眼時動揺の右方向動揺速度は、16.36mm/sec, S.D=3.84 であり、左方向動揺速度は、16.08mm/sec, S.D=3.38 であった。左右方向速度差は 1.47mm/sec, S.D=1.29 であった。この値を左右方向動揺速度の正常基準値とした。

II) 末梢前庭障害例における左右方向動揺速度

末梢前庭障害で眼振出現時における動揺は、左右方向動揺と非注視下の特に閉眼時の眼振に相関を示すが¹⁰⁾¹¹⁾、その時の左右方向動揺速度が各々どの程度であるのか、また眼振を伴わない場合で片側と両側の障害ではどのような左右方向動揺速度を示すのかについて症例毎に解析を行った。解析結果は開眼、閉眼の左右方向動揺速度を正常値と共にグラフに示し、同時に動揺図と検査時の眼振所見を示した。

以下に代表的な症例として、a) 一側性前庭障害の急性期における重心動揺速度、b) 両側性前庭機能の軽度障害例、および高度障害例について重心動揺速度の大きさ、左右方向速度、左右速度差などについて検討した。

a) 一側性前庭機能障害例における重心動揺速度

症例1: めまいを伴う右突発性難聴の25歳男性である。図3にみられるように左向き定方向性水平回旋混合性眼振を認めている。開眼時での平均動揺速度は 12.96mm/sec とあまり大きくなく、速度差も小さい。しかし、閉眼時では 45.25mm/sec と大きい平均動揺速度を示しており、左方向速度が優位となっている。左右

表1 正常者における重心動揺速度、並びに左右別動揺速度と左右方向速度差

60秒間 N=55

開 眼 時		
重心動揺速度(正常平均)	9.41mm/sec	S. D=1.67
右方向動揺速度	10.03mm/sec	S. D=2.20
左方向動揺速度	10.02mm/sec	S. D=2.29
左右方向速度差	0.58mm/sec	S. D=0.48
左右方向平均	10.025mm/sec	
閉 眼 時		
重心動揺速度(正常平均)	15.34mm/sec	S. D=3.29
右方向動揺速度	16.36mm/sec	S. D=3.84
左方向動揺速度	16.08mm/sec	S. D=3.38
左右方向速度差	1.47mm/sec	S. D=1.29
左右方向平均	16.32mm/sec

図3 右突発性難聴 S.T. 25歳男 (Co. 143-1)

図4 左前庭神経炎 (1病日) Y.S. 43歳女 (Co. 108-1)

方向速度差は、4.08mm/sec と大きい値を示し眼振急速相方向に速い速度を持っている。

症例2：左前庭神経炎。43歳女性である。発症1病日の記録であり、図4に示したように右向き水平回旋混合性眼振を認めている。開眼時では、眼振が強い割には動揺速度が小さく、閉眼時の正常値程度であり、やや右方向速度優位であるが速度差も小さい。一方、

閉眼時動揺速度では右方向動揺速度が大きく速度差は12.96mm/sec となっている。移動距離も大きく失調の強いことを示し、眼振急速相方向に速い速度で揺れている。

症例3：左急性前庭障害、33歳男性である。図5にみられるように右向きの眼振が認められる。開眼時では右方向動揺速度がやや優位であり左右動揺速度差は

図5 左急性前庭障害（反復性）N.H 33歳男（Co. 169-1）

図6 右半規管機能廃絶（右前庭神経切断6ヵ月後）50歳男性（201-1）

1.37mm/secである。閉眼時では、右方向動揺速度が大きく、左右動揺速度差は3.22mm/secと左右方向速度、左右方向速度差共に正常値より大きい値を示し眼振急速相方向に速い速度を持っている。

以上に示した3例は、比較的急性期の時期における例である。閉眼時における重心動揺左右速度差は眼振の強さに比して小さく、ほぼ正常内を示している。一

方、閉眼時においては大きい動揺速度を示すとともに大きい左右速度差を示している。しかも左右の優位速度方向は、眼振急速相方向と同じであり、このことは眼振急速相方向に速く揺れている、との先の報告に一致している¹⁰⁾¹¹⁾。

一方、急性前庭機能障害が時間の経過とともに代償した症例について以下に示したい。

症例4: 右前庭機能廃絶例 (前庭神経切断術後), 50歳男性である。手術後6カ月過ぎた時期の例で図6に示したように注視眼振検査, 頭位眼振検査で眼振は認めない。また, ENGの非注視下においても眼振を認めていない。開眼時, 閉眼時の動揺速度は9.03mm/sec, 16.72mm/secと正常値を示し, 左右速度差も0.5mm/sec, 1.00mm/secの正常値内を示している。

急性期に前庭機能が障害された時には, 大きい動揺を示しても, 時間の経過とともに姿勢は安定し動揺速度, 速度差は小さくなり正常内となる。

症例5: 両側半規管機能中等度低下, 54歳男性, 温

度眼振検査にて 30° , 44° で反応がほとんど認められず, 氷水で反応が認められた例である。この症例は, ロンベルグ現象陰性, 足踏み検査にて若干のフラツキを認めるが偏位は認めない。開眼時, 閉眼時における動揺速度は, 図7に示すように7.95mm/sec, 18.64mm/secと正常値にあり, 左右方向速度差も0.73mm/sec, 2.47mm/secで, ほぼ正常値を示している。

両側前庭機能低下の症例で, 軽度障害では前記のごとき正常内の結果を得たが, 以下に高度障害症例と対比したい。

症例6: 両側半規管機能高度低下, 67歳, 男性, 氷水

移動距離 47.72 cm (60 sec)

移動距離 110.78 cm (60 sec)

図7 両側半規管機能中等度低下 (氷水反応あり) T.K 54歳男 (236-1)

移動距離 161.52 cm (60 sec)

移動距離 937.08 cm (60 sec)

図8 両側半規管機能低下 (氷水反応なし) T.H 67歳男 (260-1)

温度眼振検査において全く反応を認めない例である。ロンベルグテスト陽性、足踏み検査にてフラツキ、転倒傾向著明であった。図8に示したように、開眼時動揺速度は、正常より大きい値を示し26.92mm/secであり、左右方向速度差は3.05mm/secとやや大きい値である。閉眼時動揺では、動揺速度は非常に大きくなり156.18mm/secとなっている。しかし、速度が大きい割には左右方向速度差は4.26mm/secと比較的小さい値を示している。

ここに示した症例4, 5, 6の3例は、一側性あるいは両側性前庭機能が低下してから、長時間の経過を経たものであるが共に眼振の認められない例である。

4, 5の2例は、開眼、閉眼それぞれほぼ正常値の動揺速度を示し、動揺速度よりみると代償されていると考えられる。つまり、一側が高度に低下していても、時間が経過した場合や、両側が中等度に機能が障害されている症例では姿勢保持の面からは比較的良好な姿勢保持の機能を果たしているものと思われる。一方、症例6に示した両側前庭機能高度低下例において、開眼時の動揺では代償機構が働いているとは思われず、閉眼時動揺速度は非常に大きくなっている。しかし、開眼時動揺速度も正常値より大きい値を示しており、共に代償機構の働きが悪いものとする。

急性期の末梢前庭障害では、明らかに眼振急速相方向に速い速度を持ち、緩徐相方向に遅い速度を示した左右方向動揺がある。しかし、一度のみの発作の症例と、反復するめまい発作の症例では眼振の強さが同程度であっても動揺速度に大きな違いがあり、初回発作において左右動揺速度は大きくまた速度差も大きい。何度か反復する発作の場合には、代償機能の働きによると思われるが、動揺速度、速度差は、比較的小さい値を示す。

両側前庭機能障害で氷水温度眼振検査に反応を示す中等度低下の場合は、ほぼ正常な動揺速度ならびに速度差を示すが、高度低下では、ロンベルグ現象陽性であるが開眼時動揺速度も正常値より大きい値をしめす。しかし、大きい動揺速度に比し速度差は小さい値を示した。

4) 考 按

末梢前庭障害における平衡障害は、障害の強さに対して眼振の緩徐相速度や総振幅の大きさと関連の高いことが知られている。

8 方向別重心動揺速度解析法による左右方向動揺速

度の解析は、速度と速度差の比較が重要と考えられる。

今回、一側性前庭障害、反復性前庭障害1例および両側の障害ならびに著明な両側前庭障害の症例などを検討した結果、次のことが分かった。すなわち、重心動揺速度は眼振急速相方向に速い速度をもっているが、その他に急性の障害では、重心動揺の速度の大小、左右速度差の大小は、温度眼振反応の低下と関係があり、当然のことながら高度に低下した症例に速度差が大きい。さらに、反復するめまい発作の症例では、初回発作の症例に比して速度の大小、左右速度差の大小が縮小する傾向にあり、これは反復するめまい発作に対する姿勢制御系の対応が推定される。

末梢前庭障害の急性期における身体重心動揺速度は、注視下での眼振を認めるにもかかわらず開眼時では比較的小さい動揺速度を示している。この理由の一は、視覚入力為“めまい”という周囲の回転や動揺という誤った視覚として入ってくることとなるが、この状態は、“めまい”が無い時の静止した周囲からの視覚入力より非常に不安定な視覚情報となる。しかし、このような不安定で不十分な視覚系入力であっても姿勢制御には大きな役割は果たしていると考えられる。つまり、注視下の眼振出現は失調の程度としては、強いものと考えられるが、回転感を感じてもなおかつ安定した姿勢を保つことができるということは、揺れて入ってくる視覚情報であっても十分に姿勢を制御するための情報として受け取ることが可能であることを示している。このような強い失調では、当然のこととは言え、閉眼時には速い動揺速度を示しており、閉眼時には眼振急速相方向に速く、緩徐相方向に遅い速度で揺れる規則性は認められる。この時には、体性感覚系が姿勢保持に大きな役割を果たしていると考えられるが、健側の前庭機能はどのように働いているのかは不明である。しかし、何らかの姿勢を制御する方向に働いていると考えたい。

一方、一側前庭機能が高度低下または廃絶していても時間の経過と共に重心動揺速度の大きさ、左右速度差は正常範囲となってゆく。

両側前庭機能が障害された場合でも温度眼振検査で氷水反応が残っているようであれば、比較的十分な機能を示し重心動揺速度の上からは、正常に近い値を示す。つまり、弱い不十分な前庭入力に対しても静的姿勢制御上は十分に働くものと考えられ、先の急性前庭障害における注視眼振が認められる時のような不十分な視覚入力でも開眼時動揺速度が小さく安定している

のと似ている。

しかし、全く両側前庭機能廃絶した場合は、開眼時の動揺速度は正常よりやや大きい値を示している。視覚系と体性感覚系が正常に働いているとすれば、この動揺速度の増大は前庭機能廃絶によるところと考えられる。とすれば、視覚系と前庭系とではどちらが敏感な反射反応を持つものなのかとの疑問が生ずる。この点に関し、動特性としてみた場合 Nashner¹²⁾¹³⁾ は半規管の刺激から下肢の筋へ約 100msec の時間を要するが、視覚系を遮断しても変化はない、としている。つまり、前庭入力とは視覚入力と関係のない速度で姿勢制御のための伝達速度を持っている。視覚系の反応は、三好¹⁴⁾ が述べているように自己の位置認識のうへに姿勢の保持を行うため反応が遅くなるとし、視覚の入力は認識という 1 ステップを持った上で反応することを示した。また Stark¹⁵⁾ が報告したように視標追跡は予測した場合 1Hz の速度まであまり位相はずれないが、予測出来ない場合には著明に位相がずれることを指摘している。この予測が開眼時の姿勢制御には大きな役割をし、少しでも反応速度を速めることに関与していると考えられる。以上のことを考慮すると、反応速度は前庭系の方が視覚系より速いことを意味する。つまり、正常者の閉眼時動揺速度よりも両側前庭機能廃絶例の開眼時動揺速度の方が速い速度を示しやすい理由が、この前庭系と視覚系の反応速度の違いにあるのではないかと考えられた。また、注視下での眼振を伴った場合の末梢前庭障害でも開眼時動揺が小さい速度を示すのは、予測効果が大きい働きをしているためと考えられた。

5) ま と め

今回、左右方向別重心動揺速度と眼振を含めて末梢前庭障害例の解析検討を行った。その結果、

1. 開眼時における左右方向動揺速度は、強い眼振が出ているにもかかわらず正常者閉眼時動揺速度程度である。また、速度差も大きくはならない。

2. 閉眼時における左右方向速度、速度差が失調時の状態を良く現し、眼振急速相方向に速く、緩徐方向に遅い動揺速度を示している。

3. 片側半規管機能高度低下で眼振を伴わず、反対側が正常な場合、その左右動揺速度、速度差は正常である。

4. 両側半規管機能低下では、氷水温度眼振検査にて反応を示す場合左右方向動揺速度、速度差は開眼時、

閉眼時共ほぼ正常を示す。しかし、反応を示さない場合の閉眼時では大きい動揺速度を示しロンベルグ現象陽性となるが、左右速度差はあまり大きくならない。また、開眼時動揺速度は正常より大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 福田 精：運動と平衡の反射生理。医学書院、東京、1957。
- 2) 田口喜一郎：重心動揺軌跡距離測定法。日耳鼻 79：835-843、1976。
- 3) Njiokiktjien CH, Rijke W DE: The Recording of Romberg' Test and its Application in Neurology. Agressologie 13, C: 1-7, 1972.
- 4) 時田 喬, 福田 精, 宮田英雄, 永田隆郎, 田口拓郎, 嶋田六郎, 早野洋二, 松岡豊彦, 服部智美：直立時の身体動揺の分析の新考案。日耳鼻 72：418-419、1969。
- 5) Kapteyn TS, Wit G: Posturography as an Auxiliary in Vestibular Investigation. Acta Otolaryng 73: 104-111, 1972.
- 6) 川野六郎, 徳増厚二, 竹内義夫：頭部および重心動揺記録の周波数分析。Equilibrium Res 33: 156, 1974.
- 7) Scott DE, Dzendolet E: Quantification of Sway in Standing Humans. Agressologie 13, B: 35-40, 1972.
- 8) Aggashyan R-V: On Spectral and Correlation Characteristics of Human stabilograms. Agressologie 13, D: 63-69, 1972.
- 9) Agaashyan R-V, Gurfinkel V-S, Manasakhlisov G-V, et al: Changes in Spectral and Correlation Characteristics of Human Stabilograms at Muscle Afferentation Disturbance. Agressologie 14, D: 5-9, 1973.
- 10) 山本昌彦, 小松崎篤：身体重心動揺における方向別速度成分の解析—眼振との関係—。耳鼻臨床 77 増 6: 2206-2216, 1984。
- 11) Yamamoto M: Velocity and Distance of Sway of the Center of Gravity. Proceedings of the Third Symposium on Postural Reflex and Body Equilibrium: 100-115, 1982 (Nara Japan).
- 12) Nashner LM: A Model Describing Vestibular Detection of Body Sway Motion. Acta Otolaryng 72: 429-436, 1971.
- 13) Nashner LM: Vestibular and Reflex Control of Standing In Control of Posture and Locomotion. Stein RB et al (ed): Plenum Press, New York, 1973, pp. 291-308.
- 14) 三好豊二：視器刺激の重心動揺に及ぼす影響—重心偏

- 位の二相性について. 耳鼻臨床 61: 1620-1641, 1968.
- 15) Stark L, Vossius G, Young LR: Predictive Control of Eye Tracking Movements. IRE Transactions on Human Factors in Electronics. September: 53-57, 1962.
- 16) 時田 喬, 松岡豊彦, 早野洋司, 田口拓雄, 島田六郎: 頭部並びに重心動揺計による立直り反射検査. 耳鼻臨床 65-5: 443-456, 1972.
- 17) 山本昌彦: 重心動揺の解析—重心動揺パターンの定量化について—. 耳鼻臨床76-2: 183-196, 1983.
- 18) 山本昌彦, 高山吉隆: 身体重心動揺パターンの解析. 東邦医会誌 31-4: 328-332, 1984.
- 19) Yamamoto M, Komatsuzaki M.: Relationship between Nystagmus and Velocity of Lateral Sway. Proceedings of 7th Int Symp Int Soc Posturography, (Vestibular and Visual Control on Posture and Locomotor Equilibrium.), Houston, Tex., 1983, Karger, Basel, 1985, pp. 105-109.
- 20) 山本昌彦, 小松崎篤: 前庭機能異常症例の程度および代償過程の判定に対する重心動揺速度の意義. 耳鼻臨床 78-6: 2611-2614, 1985.
- 21) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉沢 正: 多変量解析法. 日科技連出版社, 東京, 1977.
-
- 稿を終えるに当たり, 御校閲, 御指導を賜った小松崎篤教授に深謝いたします。また, 本研究に御協力いただいた慶応大学工学部, 竹内寿一郎先生に心より感謝いたします。なお, 本研究の要旨は第42回日本平衡神経科学会にて発表した。
-
- (原稿受付 昭和61. 2. 8日急載)
- 別刷請求先 〒143 東京都大田区大森西6-11-1
東邦大学医学部耳鼻咽喉科学教室 山本 昌彦