6. 重心動揺計を用いた体平衡機能検査 —重心動揺検査・電気性身体動揺検査—

山本 昌彦・吉田 友英

Body Tracking Test (BTT) ・ Galvanic Body Sway Test (GBST)

Yamamoto Masahiko, Yoshida Tomoe

*Toho University Medical Center, Sakura Hospital, Department of
Otorhinolaryngology*

There are many methods for performing a body balance function test. Body balance function tests can be divided into static body balance function tests and dynamic body balance evaluations. In recent years, the development of highly precise electrical devices has advanced body balance function tests. Regarding stabilometers for evaluating static body balance, many analysis methods have been improved as a result of progress in device accuracy and computer software. Moreover, a body tracking test (BTT) using visual stimulation has been developed as a new method for stimulus evaluation using a stabilometer for dynamic body balance evaluations. The Galvanic body sway test (GBST) can also be performed as a vestibular stimulus evaluation. These methods and evaluations as well as their associated problems are discussed.

Key words: Stabilometry, Body Tracking Test (BTT), Galvanic Body Sway Test (GBST), Static body balance, Dynamic body balance

体平衡機能検査…重心動揺計を用いた検査

1. 体平衡検査と重心動揺計の歴史

重心動揺計は、体平衡機能を評価するための検査機器で、平成6年に診療報酬に収載され、臨床検査として一般診療に利用されるようになった。

しかし、このように臨床に应用されるようになった重心動揺計であるが、その歴史は長い。重心は、ヒト体重心を意味するが、ヒトの体重心は1380年 Borelli¹⁾ によって測定されたとの記録がある²⁾。これは、図1に示したように身体の重さの

中心がどこにあるのかを板に死体を乗せて測っている。この図は横であるが、重心動揺計で図る重心は立位姿勢での体重心である。直立姿勢を保持するときに、身体には揺れが起こっている。これは反射による自動制御であるが、倒れようとする身体（偏倚）を、元に戻そうとする反射（立ち直り）の働きが繰り返されることで姿勢が維持されている³⁾（図2）。このときの起こっている身体の揺れが姿勢制御の過程を示していると考え、姿勢の揺れを記録することが始められた。1928年に Adolf Basler⁴⁾ は、図3のようにバネ秤の針の動きを記録して、左右または前後の1次元の重心動

図1 ヒト重心の測定

図2 偏倚と立ち直り

揺を記録している。1944年に、Roland C. Travis⁵⁾が、前後と左右の揺れを同時に記録したことを発表した(図4)。機械的なメカニズムではあるが、画期的なことであった。我が国では、1908年(明治41年)島菌⁶⁾によって、頭部動揺が記録されている。この原理は、我が国で長きにわたり体動揺記録法として、重心動揺計が開発されるまで続けられた。現在のような重心動揺計が開発されたのは、1964年 Baron⁷⁾によってである。圧センサーが開発され、電気的に圧を取り出すことが出来るようになって、オシロスコープにて、重心の動きを記録できるようになった。我が国でも三栄測器(現在は無い)から圧センサー(圧ストレンゲージ使用)を使った重心動揺計が開発・販売さ

図3 1次元の重心動揺の測定

図4 前後・左右の2次元記録

れ、重心動揺解析が広まっていた。図5は当時の重心動揺計である。まだ、パーソナルコンピュータなどは無い時代であったが、既に病院などに研究用として使用されていたミニコンピュータと称されるコンピュータにて解析が始まっていた。コンピュータが使用されるようになってからは、多くの解析による評価指標が見いだされ、今日の重心動揺検査へと進歩した。

2. 重心動揺検査

重心動揺検査は、基本的に開眼と閉眼の条件で

図5 初期の重心動揺計（1 G-02 型）

検査を行う。この条件は、ロンベルグ検査と同じ方法にて行うことから、ロンベルグ検査をより定量的に評価することができ、なおかつ、一層詳細な姿勢制御状態を評価することが出来る。

1) 重心動揺検査法

検査法は、日本めまい平衡医学会の検査手引き（2006年 ER 65, 468-503）に以下のように示されている。

- ・検査室：静かで、明るさが均等な部屋、音や視刺激による身体偏位が生じない条件で検査。
- ・記録の準備：検査台の基準点と記録紙上の基準点を対応させる。
- ・記録における約束：X-Y記録では、重心が前方、右方へ偏位する時、それぞれ上方、右方向に記録される。経時的動揺記録では、重心が前方、右方へ偏位する時、それぞれ上方へふれるように記録する。
- ・重心動揺計上の直立位置：被検者の足底の中心が検査台上の基準点と一致するように直立させ

る。

- ・足位：両足内側を接して直立する。直立維持が不安定で閉足直立が困難な例では、開足またはかかとをつけて足尖を開いて直立させて検査し、開足間距離あるいは足尖を開いた角度を記載する。
- ・直立姿勢の設定：両上肢を体側にし、自然に直立した姿勢（natural standing）で検査する。
- ・履物を脱いで素足で検査するが、薄い靴下であればそのままでも良い。
- ・検査は開眼および閉眼で行う。
- ・視点の設定：開眼検査においては、正面、眼の高さに設定された視点を注視させ、閉眼時には設定された視点をイメージし、頭をまっすぐに保ち検査を行う。指標と検査台との距離は1～3 m とする。
- ・記録の開始：重心動揺が安定した時点（約10～15秒後）から記録を始める。過渡的なゆらぎを除き定常的な動揺を記録する。

前後型、左右型、求心型、びまん型、多中心型

1. 前後型 2. 求心型 3. びまん型 4. 多中心型
図5 正常人の重心動揺の型

図6 時田による動揺図型分類

A : 3病日

B:10病日

移動軌跡長 cm	開眼	閉眼	ロンベルグ率
A : 3病日	113. 28	345. 66	3. 05
B:10病日	100. 49	176. 38	1. 76

図7 前庭神経炎経過

- ・ 記録時間：60秒間の記録を基準とする。60秒直立困難な例では、30秒記録を行う。60秒以外の時には記録秒数を記載する。
- ・ 記録中話しかけたり指示を与えたりしない。

付：記録の大きさの較正：重心1 cm の偏位を何 cm に記録するか定め、記録紙上に記録する。X-Y 記録では、重心1 cm の偏位がペンで1 cm ふれる条件が適当である。

図8 患側の異なる前庭神経炎の8方向別動揺速度

図9 脊髄小脳変性症の8方向別速度の経過変化

以上の検査記録条件下で検査を行うが、下線を示した部分は、現在の重心動揺計は自動的に行ってくれるので、古い機器で検査を行う場合には、条件を守って検査を行う。

検査は、開眼・閉眼それぞれ60秒間記録を標準にするが、開眼から閉眼に移るときには、開眼記録が終了して、一呼吸置いたところで、ゆっくり閉眼をしてもらいそのまま閉眼記録に静かに移る。

めまいやフラツキの強い場合には、転倒には十

分に気をつけて検査を行う。検査者は被検者の後方に立って、常に転倒を防止できる体制で検査を進めることが重要である。

重心動揺検査で、開眼時に1~3 m前方に位置する目の高さの視標は、1~2 cm くらいの大きさで目立つ色のものを正面の壁に貼り付ける。視標との距離を1~3 mとしたのは、1 m 以下であれば、視標に近づき過ぎるために威圧感が出現し、姿勢が不安定になる。また、3 m 以上視標から離れると、開眼注視時の視覚抑制が減少して、次第

図10 紹介状の検査結果とコメント

に揺れが大きくなっていく。均一なモノトーンの壁の前で検査を行ったときも視標がなければ揺れが大きくなるために、視標との距離を決めてある。

2) 検査結果の判定

重心動揺検査の指標は非常に多く考えられ、それぞれについて姿勢状態を評価できる。全ての指標の評価法については紙面の都合で説明できないため、利用頻度が比較的高い指標について示すが、指標を大きく3つに分けて検討することを勧める。

a. 大きさの指標

大きさのパラメータは、最も分かりやすい。重心動揺移動距離（移動距離）、重心動揺面積（面積）がこの分類に入る。

b. 方向性の指標

動きの方向性や形の方向性が示される。動きの方向性は速度の方向性、加速度の方向性、分布の方向性などを示す。8方向に分けたグラフ上に速度や加速度、位置などの平均データを表示してそれぞれの動揺の大きさの方向性を見る。また、分布を主成分分析によって広がりの方角性を見ることが出来る。

c. 型や性質の指標

図6に時田⁸⁾による型分類が現在用いられている。型は基本的に動揺図で判断するが、方向性の

図11 BTT

パラメータも形としての特徴を捉えることが出来る。著者は、ウィルクスのΛ解析法によって型分類の定量化を進めている。

3) 検査結果の読み方

要素分類にて、指標の性質を分類し目的に適った解析を行い評価することが分かりやすい。それぞれについて使われる指標について説明する。

「大きさの指標」は動揺の大きさを評価するために、身体の揺れそのものの大きさを比較することが出来る。開眼と閉眼を比較することでも開眼と閉眼の揺れの違いが比較できる。このために、その時のフラツキやめまいの程度が大きさとして評価できると共に、平衡障害の経過を観察することに適している。また、ロンベルグ症候を定量的に現すことができる。最も使いやすい指標である。移動距離や動揺面積が使いやすいが、この2つの指標の違いは、移動距離は記録時間に比例して大きくなって行く、しかし動揺面積はある時間でほぼ一定となる。この面積が一定になる時間がほぼ60秒であることから、重心動揺検査の記録時間を60秒と決めている。図7に前庭神経炎の動揺

図12 BTT 結果

図と動揺面積を示したが、経過により姿勢が安定して症状が軽快してくる様子を定量的に見ることが出来る。

「方向性の指標」は、体動揺の揺れの方向を示すものであるが、方向を分けて表示することが多く、特に8方向に分けた表示を使う。これによって、どの方向にどのくらいの大きさで揺れているかが分かる。しかし、揺れの方向について、何を評価したいのが重要である。これによって選択する指標が決められる。

ベクトル表示は動揺の動きの力の方向を示す。立位姿勢は、立ち直り反射の上に成っている。このときの姿勢制御の動きは、多くの骨格筋の動きによってなされる。そのため、いろいろな方向の力が働き、重心動揺を作っている。これらの動きをそれぞれ評価する方法として、ベクトル表示や速度表示、加速度表示などによって制御状態を評価する。簡単には、速度表示で、図8に示した前庭神経炎の発症時のように左右の揺れの速度を比較することで、めまい発作時の速度解析により、眼振と同様の動き速度を持った制御がされていることが分かる。また、動揺図による動揺の揺れとして方向の特徴を示す例がある。

脊髄小脳変性症は、症状の進行と共に、図9に示すように前後動揺が大きくなっていく。

「型や性質」の指標は、動揺図によってその評価が可能で、障害の部位によって違いの特徴を見ることが出来る。また、動揺の性質を評価する指

標については沢山あるが、一つの指標で、多くの性質を知ることが出来る指標にFFTパワー解析がある。周波数解析によって、どの周期の周波数の揺れが多いか揺れの特徴や性質を評価する。速い揺れや遅い揺れの姿勢制御を確認できるので、障害部位による揺れの特徴を示すことが出来る。同じような指標に単位面積軌跡長がある。単位面積軌跡長は、 1 cm^2 面積内にある移動距離の平均値を示しているが、この指標の意味するところは 1 cm^2 という単位内の移動距離が大きいことは、早い揺らぎを持っており、小さいと言うことはゆっくりした揺れの姿勢制御をしていることを示している。

4) 重心動揺検査自動解析の見方と落とし穴

最新の重心動揺検査機器の中には自動解析評価が出来るようになっている機器がある。ニューラルネットを使つての判別による解析結果を表示する。多くの種類の解析指標を使い、それぞれの指標の正常値を基準として、正常か異常かの判定を行う。その上で、異常値を示したデータが末梢性障害によるのか中枢性障害によるのかの判定を示す。

医療機器でも、心電計などは早くから自動評価が組み込まれているが、それでも医師が結果を判定するようにとの断り書きの出てくるものが多い。非常に便利な判定結果であり、便利であることには違いない。しかし、この自動判定だけを鵜呑みにして、異常と出たので診て欲しいとの紹介

図13 電極の位置

図15 両極短形波刺激反応波形

図14 単極短形波刺激反応波形

が来る。図10に紹介状に添付されてきた重心動揺データを示す。始めの判定が異常が100%であり、内耳か中枢かの判定では98%中枢の障害と出ている。この判定をどの様に解釈するかは医師にあるが、基礎的知識は最低限勉強することは必要と考える。しかし、このような判定が出てくると内心不安になり、落ち着かない。どの様な検査にも、正常値としての基準がある。まず、データは正常標準値内にあるのか無いのかを判断することが必要最小限のことであり、多くの指標を使つての判定がこのようなデータを作ってしまうことを分かった上で自動判定値を利用する。ちなみに、この自動判定は、約70%の判定能力を持っていることから言えば、非常に利用価値の高い機能と言える。この自動判定機能が悪いのではなく、利用

の仕方によっては注意することを常に念頭におくことである。

2. Body Tracking Test (BTT)

BTTは、動的体平衡機能を定量的に評価する。動的体平衡機能の評価法には、福田による足踏み検査や書字検査が用いられ、今でも一般外来での平衡機能標準検査として使われている。全身の動的体平衡を評価するためにより定量的に評価する方法として山本・吉田によって開発された。基本的には、重心動揺計を使い、定量的に視覚からの移動刺激に、体重心を移動させて動く指標に追随させる能力を判定するものである。

1) 検査方法

重心動揺計に重心動揺検査と同じ姿勢で始める。動揺計の上に、直立・閉足位で立ち、前方の画面に現れる移動刺激に合わせて重心を移動させて追随する(図11)。移動する視標は、1mの位置に置く。1つの視刺激検査時間は60秒間で、視標の移動刺激はいろいろな刺激法として検討しているが、標準的に前後・左右の移動刺激を使う。画面上の移動視標は、左右刺激は表示画面上に水平移動するが、前後刺激は表示画面上、上下移動の視刺激になる。この場合、上が前方向で下が後方向になる。立位姿勢での検査であるために、被検者が転倒する可能性があり、検査中検者は被検者の後方に立ち、転倒の防止に気をつけて行う。

60秒間の検査を遂行できない場合には、行えた時間を、データに記載しておく。追従時に、被検者は上体、下腿を動かしながら重心移動を試み

る。この場合に両腕を挙げる場合があるので、上肢は体側に寄せた状態で行うことを説明しておく。

2) 検査結果の判定

結果の判定は、10段階評価法によって評価するが、年齢によって評価値が変わってくる。追隨の追隨図によると、追隨の仕方には非常に個人差があり、それぞれが追隨しやすい姿勢をとりながらの重心移動を行っていることが分かる。図12に良好な左右BTTと前後BTTを示す。BTTの解析指標は、今後多く開発されてくるものと思われる、重心動揺検査の刺激検査として有用である。

3) 検査上の注意

視刺激に慣れてから検査を開始する方が良いので、1-2回トラッキングさせて、要領が分かってから開始する。また、平衡障害が強い場合には、転倒の危険性があるので、常に被検者や検査機器周囲には危険がないように心がける。また、被検者自身で追隨の悪さを作ることが出来るので、意志の関与については十分に注意をして行う。

3. 電気性身体動揺検査 Galvanic Body Sway Test (GBST)

Galvanic Body Sway Test (GBST) は、耳後部へ電気刺激をすることで前庭刺激が体平衡バランスを変化させる。この変化を重心動揺計によって記録するものである。

電極を両耳または一側耳におき、直流を通電することによって得られる身体動揺を観察するが、この電気刺激によって発現する身体動揺を電気性身体動揺 (galvanic body sway) という。電気刺激が前庭系のどこに刺激が入って、身体動揺が誘発されるかについては未解決な点がある。しかし、末梢迷路か後迷路機能検査としては重要である。

1) GBST 検査法:

検査装置としては、電気刺激装置と重心動揺計が必要である。しかし、重心動揺反応波形が小さいために波形の加算をする必要がある場合があり、加算装置も必要である。左右耳 (耳珠あるいは乳突部上) に電極をおき、左右の感電極間に電流を流す両極両耳法と、一側耳にプラスまたはマイナス電極をおき、不感電極を前額あるいは前腕部におく単極単耳法が一般的に用いられている (図13)。電気刺激は直流電流刺激を使うが、他に

刺激電流は単極矩形波刺激と両極矩形波刺激の方法がある。身体動揺は重心動揺計からの出力を加算平均してみるとわかりやすい。被検者は重心動揺計に閉足位・閉眼の直立姿勢自然体で姿勢を保持させる。

2) 結果の判定

正常反応について図に示すと図14が単極矩形波刺激であり、図15が両極矩形波刺激である。刺激側への体の移動反応がみられる。

異常反応の評価は、身体動揺の発現遅延、消失あるいは減弱、または反応の形の異常で評価する。

このような異常は、前庭神経炎や聴神経腫瘍で高率にみられる。後迷路機能の左右反応状態、量・型を比較して評価する。また中枢前庭障害の判定や、半規管と耳石器障害の鑑別への応用も検討されている。

3) 検査上の注意

電気刺激であるために、被検者によってはいやがる場合がある。また、刺激時の偏倚の状態によっては転倒の危険があり、常に転倒には注意を払った上で施行する。また、揺れが強い場合には、偏倚現象が不安定になり記録にアーチファクトが入り、データにならないことがあるので注意を要する。また、逆に、刺激反応が無いにもかかわらず、反応様の波形を見る場合があり、特に小さい波形の判断が難しいため、何度か繰り返しての再現性をみる習慣をつける。

まとめ

重心動揺計は、エレクトロニクスの発達と共に進歩してきた。体平衡機能を評価するためには不可欠な検査であり、静的体平衡機能と共に刺激を与えての姿勢制御を捉える機器としても使用されるようになり、利用範囲が広がってきた。体平衡を評価する指標は、現在もなお考えられており、新しい評価法が検討されている。病巣の違いによる特徴が見いだされて来るにつれ、将来は病巣診断の検査機器としての役割も可能になると思われる。

BTTは、動きを自身で正確に制御することを求めるために、非常に負荷の大きい検査であると共に、上手くできる・出来ないの差が大きく分かれる。バランスの機能と共に高位中枢の働きも関与する検査である。GBSTは、内耳前庭刺激によ

って前庭脊髄反射を評価することから障害の程度を直接量として評価できる。

文 献

- 1) Borelli GA: De Motu Anamaliu. Luduni Bat. (Quoted from D. le Clerc and J.J. Mangetus, Bibliotheca Anatomica, Pars Secunda, de Thorace, 873), 1680
- 2) Carroll E Palmer: Center of gravity of the human body during growth. Am J Phys Anthropol 11: 423-455, 1928
- 3) 福田 精: 運動と平衡の反射生理. 119頁, 医学書院, 東京, 1957
- 4) Basler A: Zur Physiologie des Hockeno. Z Biol 88: 523-530, 1929
- 5) Travis RC: A new stabilometer for measuring dynamic equilibrium in the standing position. J Exp Psychol 34: 418-424, 1944
- 6) 島蘭順次郎: 種々の疾病に於ける身体動揺に就いて. 東京医学会雑誌 22: 1023-1048, 1908
- 7) Baron JB: Presentation d'un appareil pour mettre en evidence les déplacements du center de gravite du corps dans le polygone de sustentation. Societe de medecine et d'hygiene du travail 25: 41-49, 1964
- 8) 時田 喬: 頭部並びに重心動揺計による立ち直り反射検査. 耳鼻臨床 65: 443-456, 1972
- 9) 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. 耳鼻臨床 77: 2206-2216, 1984
- 10) 山本昌彦, 吉田友英, 竹内寿一郎, 他: 重心動揺解析における Wilks のラムダ (Λ) 解析法. Equilibrium Res 59: 215-223, 2000
- 11) 山本昌彦, 原田克也, 小松崎 篤, 他: 両側前庭機能障害者のリハビリテーション効果—重心動揺速度よりみた訓練の評価—. Equilibrium Res Suppl 5: 170-175, 1989
- 12) 山本昌彦, 吉田友英: 姿勢調節障害の理学療法—姿勢調節障害の評価 平衡機能検査. 医歯薬出版, 東京, 2005
- 13) 吉田友英, 山本昌彦, 小田 恂, 他: Body Tracking Test を使った動的体平衡機能の加齢による変化について. 日耳鼻会報 102: 27-34, 1998
- 14) 吉田友英, 山本昌彦, 竹内寿一郎, 他: Body Tracking Test (BTT) の定量的評価法の検討. Equilibrium Res 62: 47-54, 2003
- 15) 時田 喬, 戸村義則, 高木恭也, 他: 電気性眼振, 電気性脊髄反射による半規管系・耳石器系障害の鑑別. 耳鼻臨床 補2: 104-112, 1986
- 16) 関谷 透: Galvanic Test の研究. 加速度記録図法による電気性頭部動揺の観察と Galvanogram の表現. 日耳鼻会報 68: 996-1015, 1965
- 17) 田中宗昭, 本庶正一, 山田隆志, 他: Computer による Galvano-ARG の解析. Equilibrium Res 32: 67-69, 1973
- 18) 渡辺行雄, 大井秀哉, 將積日出夫, 他: 電気性身体動揺反応による後迷路性前庭障害の診断とその問題点. 前庭神経節細胞と前庭神経炎. 関谷 透, 他編. 山口大学・迷路会, 宇部: 99-100, 1988
- 19) 將積日出夫: 耳鼻咽喉科・頭頸部外科の機能検査—何がどこまでわかるか—V. めまい検査 ④ GBST 検査. 耳鼻・頭頸外科 75: 161-164, 2003