重心動揺のエネルギー分布による 動態解析法

高 木 明

Dynamic Evaluation of Body Sway by Means of Energy Distribution

Akira Takagi

(Kyoto University)

To evaluate body sway dynamically and to detect the direction of body sway deviation, a new method of analysis is proposed which can be visualized by a two-dimensional energy distribution histogram in relation to the position of the center of gravity. Energy is calculated by multiplying the force which is derived from the acceleration vector by the corresponding distance that the center of gravity is moved.

In this paper, two kinds of energy analyses are introduced: one for lateral and antero-posterior body sway energy distribution and the other for centric and centrifugal body sway energy distribution. These are obtained by separating the original acceleration vector and speed vector into the respective directions.

By these methods the direction of the falling tendency of body sway and the position where the feedback mechanisms work dominantly can be understood. In addition, the importance of centrifugal energy as well as centric energy can be realized in relation to the stabilization of body sway.

This method can be valuable in detecting the cause of dysequilibrium and useful in quantitatively and qualitatively evaluating the stability of body sway.

は じ め に

従来よりめまい患者にみられる重心動揺の解析法として、動揺面積¹⁾²⁾³⁾、動揺軌跡長¹⁾²⁾、動揺の周波数⁴⁾⁵⁾などを分析する方法が試みられている。しかしこれらパラメータの解析によっても、正常と病的例との区別、更にはめまいの病巣診断などは非常に困難であることが多い。これは一つには、動揺面積、動揺軌跡長に代表される解析が、動的現象である重心動揺を静的な図形に還元してとらえる所に原因があると考えられる。又、動揺周波数の分析では、本来、2次元的事象である身体動揺を前後、左右の各々独立した一次元的事象として解析するため、重心動揺の方向性に関する情報が欠落してしまう点に問題があった。

そこでこれらを補って、重心動揺を動的かつ、2次元的にとらえる加速度ベクトルを基にした解

析法を考案したので、今回、本法による重心動揺の解析手法を報告する。さらに、この方法により立ち直り反射における転倒傾向の方向を明らかにすることが可能となり、又、中枢性、末梢性疾患の鑑別など、重心動揺の質的、定量的評価の可能性についても触れる。

装置及び測定条件

三栄測器社製の重心動揺検出機 1G02 により前後、左右振幅の 2 ch の信号を体重・身長補正回路と増幅器とを通した後、Contec 社製の A-D 変換器から、パーソナルコンピュータ

PC9801 (NEC 社製) に取り込んだ。測定は Romberg 位で開眼、閉眼をそれぞれ 1 分間行なった。A/D 変換は、12bit の精度で 20Hz のサンプリング周波数で行なった。

解 析 方 法

まず、加速度ベクトルを求める。図 1 の様に任意の連続する点、 A_1 、 A_2 、 A_3 、を想定すると、 A_2 の点に働いたと考えられる加速度ベクトル ($\vec{a}$) は速度ベクトル $\vec{V}_1$ 、 $\vec{V}_2$ の変化から求めることができる。例として、図 2 に 1.2 秒間の重心動揺における 50msec 毎の点での加速度ベクトルを示した。

この加速度ベクトルを基に、臨床的に意味をもつ動態解析のために、以下の 2 つの解析を行なった。

1) 左右、前後のエネルギー分布

この目的は、立ち直りに要したエネルギー (仕事量) の分布を左右、前後と 2 次元的に表示することにより、揺れの方向性、転倒傾向の方向を定量的に知ることにある。又、この分布のパターンから、立ち直り反射 (feedback) が強く働いた偏倚点を知ることにある。

図 3 に示す様に加速度ベクトル ($\vec{a}$) を左右、前後の 2 方向 ($\vec{a}_x$ 、 $\vec{a}_y$) に分割しその方向の

力を求め、更に速度ベクトル ($\vec{V}_2$) を 2 方向に分割して作用点の移動距離を求めた。こうしてエネルギーは力とその作用点の移動距離とから求めることができる。なお、エネルギーには、元来、方向性がないが、論文中では便宜上、右向きの力が働いた点では右向きエネルギーと表現することにした。

図 4 に健常成人の解析例を示す。左右方向の結果につき述べる。

i) 右向きの力を示した点の分布 (D_R) と左向きの力を示した点の分布 (D_L) はほぼ同様の分布を示し、左右のずれはわずかで、大部分は重なり合う。このことは動揺の中心付近の比較的広い範囲において、偏倚と立ち直りの力の方向とは一定していないことを示す。

ii) 右向きのエネルギー分布 (E_R) の中心は、重心動揺の中心より左に偏倚した所であり、又、左向きのエネルギー分布 (E_L) の中心は、右に偏倚した所にある。 E_R 、 E_L はほぼ

図 1: 加速度ベクトルの求め方

相似形であり、左右の分離が D_R , D_L よりよい。このことは、身体の偏倚と反対方向の力がその偏倚の大きさに応じて強く働くことを意味する。又、左右の力が対称的に働いたことも明らかである。

iii) 偏倚と立ち直りのエネルギーの大きさの関係をj知するために、偏倚とその位置における一サンプリング点あたりの平均的なエネルギーの大きさを右向きを M_R 、左向きを M_L として示した。右向きエネルギーは左方辺縁部で、又、左向きエネルギーは右方辺縁部で

図2：実際の重心動揺と加速度ベクトル円運動に近い動きの部分では、その求心向きの加速度ベクトルがみられる。

$$E_{RL} = |\vec{a}_x| \times |\vec{v}_{2x}| \times \text{const.}$$

$$= |\vec{a}| \times \cos \alpha \times |\vec{v}_2| \times \cos \theta \times \text{const.}$$

$$E_{AP} = |\vec{a}_y| \times |\vec{v}_{2y}| \times \text{const.}$$

$$= |\vec{a}| \times \sin \alpha \times |\vec{v}_2| \times \sin \theta \times \text{const.}$$

図3：左右・前後のエネルギーの求め方

急速に大きくなっており、左右の偏倚がある程度以上大きくなった所で初めて強い feedback の力が加わったことが示される。これらのことは、前後方向の分析に関しても同様であった。

2) 求心・遠心エネルギー分布

この目的は、重心動揺のサンプリング総和の算術平均を中心とした場合、偏倚と中心向きの立ち直りの力がどういう関係にあるかを知ることにある。

その方法は図5に示す様に、中心方向の加速度ベクトル ($\vec{a}_0$) とその作用点の中心方向への移動距離 ($|\vec{V}_{20}|$) の積より、求心エネルギーを求めるものである。同様に中心から遠ざかる力が働いた時、遠心エネルギーが求められる。

図6に健常成人の解析の例を示す。左右軸に関して以下述べると、遠心方向の力の点の分布 (D_0) は、動揺の中心付近にピークを持つ正規分布の形を示す。その個数は、求心方向の力の点の分布 (D_1) の54.5%であり、Root mean square (RMS) で拡がりを見るとその比は0.84と (D_1) より小さな拡がりを示す。又、これをエネルギー分布で見ると、遠心エネルギー (E_0) は求心エネルギー (E_1) の32.7%である。これらより、身体の立ち直りにおいては、中心に向かう力のみではなく、エネルギーは小さいが逆に外に向かう力が、中心付近で働

$$E_0 = |\vec{a}_0| \times |\vec{v}_{20}| \times \text{const.}$$

$$= |\vec{a}| \cos \alpha \times |\vec{v}_2| \cos \theta \times \text{const.}$$

図5：求心エネルギーの求め方

図4：左右・前後のエネルギー分布（健常成人例）

DR, DL：右, 左向きの力を有した点の振幅ヒストグラム。

ER, EL：右, 左向きのエネルギー全体の分布。

MR, ML：右, 左向きの平均的なエネルギー ($M_R = E_R/D_R$, $M_L = E_L/D_L$).

R：右, L：左, A：前, P：後

図6：求心・遠心エネルギー分布（健常成人例）

Di, Do：求心, 遠心向きの力を有した点の振幅ヒストグラム。

Ei, Eo：求心, 遠心向きのエネルギー全体の分布。

Mi, Mo：求心, 遠心エネルギーの平均 ($M_i = E_i/D_i$, $M_o = E_o/D_o$).

図 7 : 左前庭機能廃絶例 (左右・前後エネルギー解析)
(◄) 部に分布の異常を認める。

図 8 : 脊髄小脳変性症例 (求心・遠心エネルギー解析)
前後に 2 相性の求心エネルギーのピークをみる。

いていることが分る．さらに偏倚とその平均的な立ち直りのエネルギーをみると，偏倚が大き

くなると求心エネルギー (M_I) も大きくなることが分る．

病的例の解析結果

1) 左前庭機能廃絶例 (左右・前後エネルギー解析, 図7)

左聴神経腫瘍摘出術後に迷路廃絶を来し，足踏試験にて左偏倚を認める患者である．右向きのエネルギー分布 (E_R) と左向きのエネルギー分布 (E_L) が非対称的で，右向きのエネルギーの分布では明らかなピークを示さず，左へ偏倚した台形を呈している．さらに右向きの平均的エネルギー (M_R) は，かなり左に偏倚した所で大きいことがわかる．これらのことはこの患者の左側への転倒傾向を示すものである．前後に関しては，左右程著明でないが，前向きのエネルギーの分布 (E_A) のピークがかなり後方へずれていることから，後方への転倒傾向があることがわかる．この例では左右の揺れのエネルギーが前後の揺れのエネルギーの2.17倍と大きく，左右型の揺れであることが定量的に示されている．

2) 脊髄小脳変性症例 (求心エネルギー解析, 図8)

強い前後動揺を示す例である．その強さは左右の揺れの41倍である．この例において遠心エネルギーと求心エネルギーの比は0.096と小さく，強い求心エネルギーが働いていることがわかる．にもかかわらず大きな揺れを示すのは，その力の働き方が適切な偏倚部位で働いていないからと解釈される．前後動揺において，求心エネルギーの分布 (E_I) をみると，前後に2つのピークを作っていることがわかる．それに比し，遠心エネルギーは，極めて小さく中心近傍にみられるのみである．これらのことは，中心向きの力が，前後に大きく偏倚した所で初めて働くことを示すものである．又，揺れ過ぎの制動の働きを持つと思われる遠心エネルギーが小さいことは，**feedback** 系の異常が示されている．

考

重心動揺の動的解析における本法の利点，欠点などにつき以下に述べる．

i) 本法の特徴，有用性について

前述の様に従来の重心動揺の解析は動揺面積，動揺軌跡長などの，静的な図形としての分析が主であり，運動の動態の把握には不十分であった．本法では，重心動揺図の各偏倚点における力の大きさ，方向が加速度ベクトルとして求まることに着目し，さらにこのベクトルを分割することで，身体動揺の左右・前後のエネルギー，求心・遠心エネルギーの各エネルギーを求め，2次元的に重心動揺の偏倚とエネルギー分布を表示しうる様にした．この様な解析の方法により重心動揺の動態の解析がはじめて可能となり，重心動揺検査の目的である立ち直りの**feedback** の強さを偏倚との関連において定量

按

的に知ることができるようになった．

具体的には，左右・前後各方向のエネルギーの大きさとその分布，及び各方向への偏倚とその平均的エネルギーとをヒストグラムで示し，従来の重心動揺図での前後型，左右型といった定性的表現⁹⁾ に対し，エネルギーの比から定量的表現ができるようにした．又，分布のかたよりを数量化することにより，転倒傾向の方向と強さの定量的表示や，**feedback** の働く偏倚位置の判定ができる．

求心，遠心エネルギーの分布では，重心の中心へ向かう力 (求心力) と共に，外向きの力 (遠心力) という別のパラメータの解析も試みた．従来身体の立ち直りは求心力のみで成り立つと考えられていたが，実際の身体動揺は単純な振子様運動ではなく，重心動揺の中心付近で

は、求心力に制動をかけたり、むしろ倒れる方向に力を働かせたりする遠心力が存在し、この遠心力が動揺の質に大きく関与していることが、遠心力の解析で明らかにされた。内耳前庭系は加速度に反応し、平衡器が適切に機能するには身体は常に一定量揺れている必要がある。この意味でも遠心力の存在を今後考慮する必要があると考えられる。

ii) 問題点

1) エネルギーという用語に関して

重心動揺計で何を計測しているかという基本的問題とも関連するが、今回は重心の動きがとらえられているとし、重心という一つの質点に対し、立ち直り力という外力が働いて、その重心を一つの平面内で制御していると仮定した。この意味で純粋の物理量としてのエネルギーとするには、若干の問題はあるが、これは用語の面で解決可能と考える。又、ある質量の運動体に対し、移動距離、速度、加速度、力、エネルギーは一連の力学的パラメータであり、これまでの重心動揺についての軌跡距離、速度⁷⁾⁸⁾と

いった基本的パラメータの延長上でエネルギーという用語も受け入れられると思われる。

2) 測定結果の単位について

エネルギー解析には、当然ながら被験者の質量、検出機の質量・動特性、サンプリング条件等、装置全般が関係する。今の所、エネルギーに対する適当な較正手段がない。よって現段階では重心動揺のエネルギーをいわゆる物理量である Joule (J) という絶対量で表現することは困難である。それ故、異なる個体間での動揺の安定度の評価には本解析によるエネルギーの算出値の大きさそのものより、左右のエネルギーの比、求心と遠心エネルギーの比といった相対的なものでなされるべきと考えられる。但し、同一個体間での経時的比較等においては、算出値そのものが検討の対象となる。

3) 解析時間について

これら2つの解析に十数分を要する。将来、Basic以外の言語、適切な hardware の使用でこの点は解決されることが考えられる。

ま と め

1) コンピューターによる重心動揺の新しい解析法として、加速度ベクトル解析を基にした、エネルギー分布解析を行ない、重心動揺の動的解析に有用であることがわかった。

2) 前後、左右方向のエネルギー分布を重心動揺の偏倚と対応させながらヒストグラムで示し、転倒傾向の方向、動揺の優位方向等を定量的に表現した。

3) 動揺中心に向かう求心力、及び外方へ向う遠心力についての求心・遠心エネルギー分布解析を行なった。これにより求心エネルギーのみならず遠心エネルギーが動揺の質に大きく影響することを示した。

4) これらの解析が、病巣診断に有用であることを示唆した。

稿を終えるにあたり、御指導、御校閲を賜りました本庄 巖教授に深く感謝致します。又、御協力、御助言を戴いた兵庫県立尼崎病院末広 進医長に深謝致します。

本論文の一部は、第43回日本平衡神経科学会にて発表した。

参 考 文 献

- 1) 田口喜一郎, 依田美千穂: 重心動揺分析法. 一重
心動揺領域と重心動揺軌跡距離一. 日耳鼻 79:
1577~1589, 1976.
- 2) 浅井正嗣, 大橋直樹, 渡辺行雄, 小林英人, 中川
肇, 将積日出夫, 水越鉄理: ルーチン検査として
の重心動揺検査の診断的意義について. ER 43
: 276~279, 1984.
- 3) Takagi A, Suehiro S and Fujimura E: A new

- method of statokinesigram area measurement. -Application of a statistically calculated ellipse-Vestibular and Visual Control on Posture and Locomotor Equilibrium. Igarashi, Black (eds): 74~79 (Karger. Basel 1985).
- 4) 米田 敏, 徳増厚二: 直立時重心動揺の周波数分析—末梢性前庭障害と中枢障害について—. ER 43: 264~271, 1984.
- 5) Black FO, Wall C and O'leary DP: Postural control of center-of-force trajectories in patients with peripheral, eight nerve, and posterior fossa lesions. Vestibular mechanisms in health and disease. London, Academic Press, 1978.
- 6) 時田 喬, 松岡豊彦, 早野洋司, 田口拓夫, 島田六郎: 頭部並びに重心動揺記録計による立ち直り反射検査. 耳鼻臨床 65: 443~456, 1972.
- 7) 池上彰博: 直立重心動揺の振幅と速度の研究—年齢変化と診断的意義—. 日耳鼻 86: 887~898, 1983.
- 8) 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: 2206~2216, 1984.

原稿到着: 昭和59年12月27日 急載
別刷請求先: 高木 明
〒606 京都市左京区聖護院川原町
京都大学医学部耳鼻咽喉科学教室