足蹠受容器の立ち直りに関する役割について

大久保 仁

The Role of the Plantar Mechanoreceptor in Standing Body Sway

Jin Okubo

(Tokyo Medical and Dental University)

The role of the plantar reflex in control of bodily sway was examined stimulating the plantar mechanoreceptor. The stimulations were applied using boards with shotgun balls, that were placed 1, 1.5, and 2 cm apart. The subjects were told to stand straight on the board and their body sway was analyzed by the stabilometer.

The results of the analysis indicated that factors such as the area of sway, the accumulated shift length caused by the sway and the velocity of sway all tended to decreased depending on the type of stimulation.

Experiments on neuron discharge from the tibial nerve fibers revealed that the number of neuron discharge was markedly higher when stimulations were given than without stimulation. These findings suggested that the increase in plantar mechanoreceptor input information was involved in a higher central nervous system control mechanism rather than the spinal level control system, and it was particularly effective in causing reflexes such as footing adjustment when right and left sway occur.

Key words: righting reflex, body sway, plantar reflex, stabilogram, plantar mechanoreceptor

はじめに

人が両足で立つという動作は、行動を起こしたり、運動が行なわれる為の第一歩である。この動作が、動物内でも人が異なっているのは、二本の足で立つことである。この立つ動作によって解放された人の両手は、物を持ったり、仕事をするために使用された。その結果下肢は、その仕事が効率よく行なえるための支持的役目として、また、二本足立ちのバランスを保つべく発達した。猿が人に近いとしても、歩行はナックルウォークで、しかも、足は物を握む性質をもつので母指が特徴ある位置にある。従って、四足歩行と二足歩行の動物を比較すると、体性感覚野は全く異なり、熊などの前肢で物を捉える動物では、大脳領域の手の運動情報で発

火する領域が、足の情報領域と比べて数倍の広い領域に渡るなど、大脳運動領域に様々な発育領域の差を生じている (Adrian, 1947)。このように、比較解剖や生理学的見地から種属による差は大きく、特に体の平衡障害を研究するグループにとって、二本足で立つ実験は、人以外に適当な実験動物などがないため、この研究に多くの工夫がなされている。例えば、平衡障害で歩行や運動に障害の生じている者でも、運動負荷などのない寝ている状態や安静時では、全く正常者と変わりがなく、立つとか、運動が負荷された時だけ、よろめきや転倒が生じる。このことは、神経疾患などでも観察され、脊髄小脳変性症 (SCD) などは安静位で全く症状を観察することができず、正常者と区別出来ない。し

かし行動が開始されるとその失調障害は如実に現われる。このような現象から、平衡障害の研究には、いろいろな負荷運動が行なわれるが、この負荷の適否によっては、確実な現象を捉えたり、他の要因から生じた誤った情報を捉える可能性も多分にある。最近、前庭脊髓反射を数値的に取り扱う目的から、重心計が盛んに用いられている。この装置は、人が起立すると身体重心の垂線重心が足底面に捉えられ、この座標軸の変化を重心動揺として記録する。この重心動揺は、絶えず前後左右に小さな動揺を繰り返して起立運動を保持している。そこで、平衡機能が外乱されたり平衡調節が障害されると、身体動揺の拡大が生じ、障害の部位に依っては laterality が生じる。しかし、この動揺は、平衡障害が生じた不均衡に対して立ち直ろうとする中枢の表現でもある。そこで、この立ち直りに足底部の効果器からの求心情報がどのような役割を果たしているか、重心動揺を指標に考えてみたい。

重心動揺計

重心動揺計の計測原理は、人の直立姿勢を保持する時の体重心の動揺を、3個以上の荷重変換器の垂直荷重変化から計測する(図1)。一般に荷重検出装置と呼ばれるものには歩行分析などで使用されるフォースプレート(床反力計)がある。これは、踏力などを三方向分力に分けて計測する必要からXYZの三分力計測が行なわれる。しかし、静的(直立姿勢で)重心動揺を観察するのには、三軸分力を測定する必要はなく、垂直荷重変化から演算を行なうように装置が作られている。

足位による体動揺

図2は、種々な足位で生じる直立姿勢の重心図の一例である。足位が変わるだけでも体動揺のパターンが変化する。これは、足の開き加減などによって上体を支える垂線重心点が移動し易い方向があるということで、体の動揺を分析する時、この足位による影響を考慮する必要がある。そして、この結果として、体の揺れに伴

Principle of measuring

図1 重心計の原理

い足底部にかかる重力点(足趾入力情報)が変わるため、立ち直りも影響を受けパターンが変化する。図の動揺パターンでは、足位の違いによる方向性が伺われるが、T；(総動揺軌跡長)でも明らかに動揺度の差として軌跡長に変化がみられている。また、この軌跡長を左右する因子は、立ち直りの速度である。このような軌跡長に影響する立ち直りに関して、Magnus (1924) は、迷路、視器、固有受容器、触受容器、を重視している。そこで、立ち直りに足底部受容器の情報がどのような影響を持つかの検討がなされた。

足趾反射

1. マットレス(ラバホーム)

まず、体の動揺を検討する時に、足底部の入力情報を減じた場合が検討対象に選ばれるのが通常である。この考え方は、一般的で図3の上段のような重心動揺が観察される。重心計の上

Sway of the center of gravity by each foot position in standing M.O. 24 m. (normal)

図2 各足位に於ける重心図パターンと総動揺軌跡長の比較

図3 ラバホームを使用した重心図の比較
上：正常者，下：脊髄小脳変性症

にラバホームを置いて起立させたときの重心図は、急速な立ち直りらしきものが認められない。この結果は、体重心移動で生じる重力圧が、立ち直りに必要な床反発力として足底部の効果器（触受容器）へ入力情報を十分に伝えないためと解釈される。下段は、脊髄小脳変性症の患者を厚さ 3 mm で四角の柵目 1.3 cm の金網を敷いて立たせた時の重心動揺を比較したものである。敷かない場合は、失調性の重心図であるが、金網を敷かれると失調成分が消失して緩やかな重心図に変化する。この 2 つの変化は、それぞれが意味を持っており、上段は、入力情報の欠如で、下段は、入力情報が増加した結果である。このラバーホームを用いる方法は、体重の差によりラバーホームの足底部への弾力が異なり、入力情報として一定の値を得るのには不向きである。

2. 足底部加圧プレート

そこで、足底部の触受容器に過剰な刺激情報を入れた場合についての検討が行なわれた。図 4 のようなプレートが作成された。そして、健

図4 足底部刺激に用いたプレート
(上から 1 cm, 1.5 cm, 2 cm 間隔のもの)

健康成人男子16名(24.5才)が選ばれた。刺激の内容としては、直径 2.0 mm の鉄球をプラスチック板の上に約 1.3 mm 程度突出させ、1 cm (W1), 1.5 cm (W1.5), 2.0 cm (W2) の間隔で固定した3種の板を用意した。この刺激は、足底の約 1.3 mm 程度に刺激が加わり、足の大小により多少の刺激点の差は生じたが、体重による差については考慮する必要がないと考えられた。なお、検査の足位は、30度の扇形足位を用いた。図5は、各プレートを用いて比較した一例であるが、W1のプレートで得られた重心図は、明らかに動揺面積の縮小、動揺軌跡長の短縮が認められる。

a. 動揺面積、図6が動揺面積の開眼と閉眼で得られた16例の各平均値と標準偏差である。開眼での動揺面積値は、W1, W1.5, W2.0 がともに無刺激(W0)のものより縮小した面積を示した。閉眼でも、無刺激(W0)の動揺面積より W1, W1.5 は、縮小した。この面積が縮小した因子を検討するため総軌跡長を検討した。

b. 総動揺軌跡長、図7は、開眼、閉眼の各刺激の軌跡長の平均値と標準偏差である。開眼では、面積が縮小した割には、軌跡長の変化が小さい。しかし、閉眼での内容は、明らかに W1, W1.5, W2.0, が無刺激のものより低い値を示して動揺度が少ない結果である。特に、W1に於いて著明である。このような軌跡長に影響する因子として動揺の速度について検討した。

図5 各プレート使用時の重心図と
総動揺軌跡長の1例

Comparison of square area by each stimulation of plantar mechanoreceptor with eyes open and closed

図6 動揺面積での比較(平均値と標準偏差)

図7 総動揺軌跡長での比較 (平均値と標準偏差)

図8 動揺速度のX軸(左右), Y軸(前後)比較 (平均値と標準偏差)

図9 脛骨神経の神経発射と各刺激プレートと比較

c. 動揺速度 (左右成分, 前後成分), 体の動揺速度を分析することは, 軌跡長と関連して立ち直りの内容を示唆する因子である. 図8は左右, 前後の成分に分けて各刺激の動揺速度をプロットしたものである. 開眼では, Y軸 (前後軸) が無刺激 (W0) と比較して W1, W1.5 に明らかな速度の減弱が認められる. 閉眼でも, W1, W1.5 は W0 よりも Y, X (左右軸) はともに速度の減弱が認められた. W2 は, 刺激間隔が広いいためか, 著明な差を認めない. そこで, 足底部受容器の刺激について検討した.

足底部受容器刺激と Tibialis 神経の unit 発射

3種の異なったプレート刺激で体の動揺調節が変化した. 特に 1 cm 間隔と 1.5 cm 間隔のものでは, 閉眼時の動揺が, 動揺面積, 動揺軌跡長, 動揺速度, 共に減少や縮小を示した. この結果は, 足底部の受容器関与が考えられ, この受容器には, 古くから misner 小体や merkel 触板, pacini 小体などが知られている. そこで, このような刺激がはたして神経発射などを高めているのか検討した. 胫骨神経繊維に微小電極を挿入して, 各刺激板上に立たせた時の神経発

図10 足底部受容器刺激伝達と神経回路

射を調べてみた。図 9 は、各刺激板で得られた神経発射である。1 cm, 1.5 cm, の板で神経反射が増加しているのが認められる。2 cm では、発射がやや減じている印象を受けるが無刺激 (W0) の場合より、なお増加している。閉眼時に発射が増加するのは、体の動揺が増加する結果である。

足蹠反射の役割

この実験を通じて足底部の受容器刺激は求心性のインパルスを増加させた。このパルスの増加は、人が歩行などを行なうと、足底部から歩行情報が上位中枢へ投射され、上位の体動揺情報処理機構に有効に働く。そして、これら入力情報に伴い運動中枢は、脊髓レベルの調節系などの作動をより効率よく処理していると考えられる。この点について、Mountcastle (1967) は、触覚の場合について、第一の入力受容機構は皮膚に並んだ受容器シートで、この受容電位のインパルスは末梢から大脳皮質に忠実に伝達される。即ち、末梢受容野で観察した情報は、忠実に第一次感覚野に還元されると報告している。本実験も、足底部刺激の情報増加で体動揺に有効に作用した。この点について、情報伝達系を考えてみると、先にも述べた脊髓小脳変性症の動揺が足底受容器刺激でゆっくりとなる現象と併せて、後柱系の後索内側毛帯系（識別触覚路）が関与していると考ええるよりは、脊髓視床系が関与していると考えたい。この原始触覚路と言われる脊髓視床系は、粗な触覚や圧覚を伝達し、Bawsher ら (1965) も、前脊髓視床

路（新脊髓視床路）が比較解剖学的に人や猿で発達するところから重視している。そして、この系は、旧脊髓視床路と同様に後柱系と比べて繊維も細いことから生理学的に時間的に変化する変調情報伝達に關与する系と考えられ、この時間的に変化する微分情報が立ち直りに一役買ったものと考えられる (図10)。また、これら tactile organ で足蹠や手掌のものは、順応が遅い特徴があると Adrian (1974) も述べているが、これら、足底部受容器の順応が遅い特徴は、二足歩行や立つ動作などにとって好都合な生理機構で、この足底部の受容器は、立ち直りに重要な役割を演じるものである。

文 献

- 1) 大久保仁, 渡辺 勲, Baron JB: 足蹠受容器が重心動揺に及ぼす影響について. 耳鼻臨床 72: 1553~1562, 1979.
- 2) Adrian ED: The physical background of perception. Oxford Clarendon Press, 1947.
- 3) Mountcastle VB: The problem of sensing and the neural coding of sensory event. The Neuroscience (ed by Quarten GC, Melrechuk T and Schumitt FO). Rockefeller Univ. Press, New York, 1967.
- 4) Bawsher D and Albe-Fessard JC: The anatomophysiological basis of somatosensory discrimination. Int Rev Neurobiol 8: 35~57, 1965.

（別刷請求先：大久保 仁）

〒113 東京都文京区湯島 1-5-45

東京医科歯科大学耳鼻咽喉科学教室