迷路性立直り反射の動特性†

時 田 喬, 前 田 正 徳, 大 橋 伸 一

宮 田 英 雄, 正 木 道 熹, 池 田 貞 秀

森 岡 保, 斎 藤 富 康, 浅 井 徳 光*

1. はじめに

私共は迷路性平衡障害の特徴を明らかにする目的で起立姿勢に現われる頭部・重心の X-Y レコーダ記録の観察, 動揺の定量的解析, 相関・パワースペクトル分析を行ってきた(時田ら, 1970, Tokita, et al. 1972, 時田ら, 1972, Tokita, et al. 1976, 田口, 1977, 島田, 1977, 松岡, 1977), しかし, これらの動揺分析にも関わらず起立障害が迷路障害に起因するか否か判定し難い例が少なかった。

起立姿勢は随意運動, 抗重筋への緊張支配, 視性・迷路性・自己受容性立直り反射, 小脳の働きによる頭部・軀幹・四肢の協同運動などの综合作用により遂行されているので, 頭部・重心動揺の如き平衡障害の共通的症状の分析によって, 個々の機能異常を把握することには限界があるように思われる。

これらの理由により, 私共は起立姿勢維持に働く迷路性立直り反射系の周波数応答 (frequency response) を計算し, それより系の動特性 (dynamic characteristics) を捉えんと試みた。この方法により, ヒトの迷路性立直り反射系が起立姿勢維持に果している役割りを明らかにしようとするとともに, 迷路性起立障害の診断をも行ないうると考えたためである。

本報告においては, 私共の行なった迷路性立直り反射系の動特性検査の方法と正常者, 迷路障害の検査成績を述べる。

2. 方 法

1. 検査の原理

検査の原理を図1に示した。ヒトの起立において, 軀幹のゆらぎに対して頭が同じに動くものではない。迷路性の立直り反射により, 頭部は重力に対して正しい位置に立直る。そこで, 肩の動き(a)と頭の動き(b)を捉え, 肩の動きから頭部の動きを引けば頭の立直り運動(c)を

図1 検査の原理(説明本文)

捉えることができる。迷路性立直り反射系の特性は, 肩の運動を系への入力信号, 頭部の立直り運動を出力信号とした伝達関数 (transfer function) として表わすことができる。伝達関係は系への入力を $x(t)$, 出力を $y(t)$ とすると各々のラプラス変換の比である。系への入力と出力がわかれば系の伝達関数が定まる。そして, 伝達関数は系の特性を完全に表現するとされている。

勿論, 肩の動き, それに対する頭の立直りを迷路性立直り反射系の入力, 出力と考えること, 肩のゆらぎに対する頭の動きを迷路性立直り反射のみの働きとすることには問題がある。しかし, 頭部の立直り運動には迷路性立直り反射が主役を演ずると考え, 本検査を行なった。

2. 検査方法

検査のシステムを図2に示した。被験者に両足尖を揃えて起立せしめ, 肩の左右への動き(a), 頭の左右への動き(b)を偏位計あるいは加速度計で捉え, 肩の動きから頭の動きを引いた頭部の立直り運動(c)とともにポリグラフ, データレコーダに記録した。検査は開眼および閉眼で行なった。記録時間は120秒である。今回の実験は左右動揺についてのみ行なった。データレコーダの記録より, 電算機 PDP-12 および伝達関数プログラムを使

† Dynamic characteristics of the labyrinthine righting reflexes.

* Takashi Tokita, M.D., Masanori Maeda, M.D., Shin-ichi Ohashi, M.D., Hideo Miyata, M.D., Michihiro Masaki, M.D., Sadahide Ikeda, M.D., Tamotsu Morioka, M.D., Tomiyasu Saito, M.D. and Norimitsu Asai, M.D.

* 岐阜大学医学部耳鼻咽喉科学教室 (主任: 時田喬教授)

図2 検査システム (説明本文)

用し、図中に示した計算方法で伝達関数を計算し、結果はボード線図(ゲイン線図, 位相線図)として陰極線管に図形表示した。分析は0.1~12.5 Hzの周波数範囲が0.1 Hz間隔で表示される条件で行なった。すなわち、結果は周波数応答 (frequency response) として示される。なお、入力のパワースペクトルも必要に応じ表示できる。なお、使用したプログラムは理経コンピュータ株式会社貝塚邦泰, 井上豊, 笠松郁子氏に製作依頼したものである。

3. 被 検 者

健康成人男子11名, 両側迷路反応喪失例4名, 一側迷路反応喪失例2例。

4. 成 績

A. 正常者の検査成績

図3は正常者11名の閉眼時の両脚起立検査よりえた周波数応答である。ゲインと位相遅れの平均値と標準偏差が各周波数毎に示してある。ゲインは0.3~6 Hzの周波数範囲において、周波数の増加につれ約1 decade 10 dBの傾斜で増加している。位相は0.3 Hzより周波数の増加につれ次第に遅延し、1 Hzにおける遅れ約45°, 3

Hzにおける遅れ約90°である。

この成績は、迷路性頭部立直り反射系は微分制御動作

図3 正常者の頭部立直り反射系の周波数応答 閉眼両脚起立検査よりえた結果である。11名の平均値と標準偏差を示してある。6 Hzより速い周波数では値が散ばり計測困難であった。ゲインは周波数がますます増大している。位相も周波数がますます遅れが増大している。この系が微分制御動作を行なうことを示している。

(derivative control action) を行なっていることを示している。この動特性は迷路が速く短い身体動揺に対する立直り運動の解発に重要な役割りを演じていることを示

図4 正常者の頭部立直り反射系の周波数応答
開眼両脚起立検査よりえた結果である。閉眼時の成績と類似している。起立姿勢維持が容易な両脚起立では、頭部立直りに視性立直りに反射の関与が少ないことを示唆する成績である。

図5 両側迷路反応喪失例の頭部立直り反射系の周波数応答

SM 中毒, 1965年発病, 検査1977年, 検査時年齢47歳, ゲイン図においてゲインは低く, 平坦である。周波数の増加につれてのゲインの増加がない。起立姿勢に現われる速い動揺に対する立直りの悪いことが伺える。

している。

図4は開眼起立検査よりえた成績である。ゲイン図, 位相図は閉眼検査のものと同じ傾向を示している。

この成績は, 視性立直り反射は, 正常者においてはその維持が容易である両脚起立姿勢の維持においてはそれ程大きな役割りを演じていないことを示唆している。

B. 両側迷路反応喪失例の検査成績

図5は SM 中毒により両側迷路反応を失った症例の検査成績である。起立検査において両側迷路反応喪失例に特徴的な前後動揺を示した。図の上段は閉眼起立検査の成績である。ゲイン図においてゲインは低く, 周波数の増加に伴うゲインの増加を認めない。かえって 1 Hz を越えた部分でゲインの低下を示している。位相も約 0.7 Hz より遅れを示している。約 1.5 Hz より速い周波数帯域では応答が散ぶり, 規則的な応答が失われていることが伺われる。図の下段は開眼起立検査の成績である。ゲイン図においては, 0.3~1 Hz の周波数範囲においてゲインは低く平坦である。位相も同じ周波数範囲に

図6 一側迷路反応喪失例の頭部立直り反射系の周波数応答

メニエール病, 1978年超音波手術, 検査, 術後2カ月, 術時年齢50歳, 周波数応答はほぼ正常者と同じで周波数がますにつれゲインが増加する型である。しかし, ゲイン, 位相とも値に散りが多い。立直り運動に正確さが失われていることが伺われる。

おいて遅れが徐々に増大している。

他の3名の両側迷路反応喪失例の検査においても同じ傾向を認めた。

以上の成績は、両側迷路反応を喪失した症例では速く短い身体動揺に対する立直りが障害されることを示している。

C. 一側迷路反応喪失例の検査成績

図6は左メニエール病例で超音波手術を行なった症例の検査成績である。術後は術側左の迷路反応を喪失している。開・閉眼の成績とも、ゲイン、位相の値に散ばりが多い。しかし、ゲイン図は周波数の増加につれてのゲインの増加を示し、位相図は周波数の増加につれ遅れの増加を示している。これらの点は正常者の動特性と同性質である。

中耳炎性内耳炎で内耳摘出を行なった症例は更に乱れた周波数応答を示した。特に、位相において乱れが大大であった。しかし、ゲイン図では周波数の増加に伴うゲインの増加が認められた。

以上の成績は、一側迷路反応を喪失した症例では、起立姿勢に現われる速く短い身体動揺に対し、周期の遅い動揺に対するより比較的に大きな立直り運動を誘発する機能は残っているが、この運動の誘発に規則正しさが失われることを示している。

5. 総 括

1. 迷路性立直り反射系の動特性を検査する目的で、起立姿勢に現われる肩の動揺を入力信号、頭の立直り運動を出力信号として、系の伝達関数を計算し、結果を周波数応答（ゲイン図、位相図）として表示した。

2. 正常者において、系の周波数応答は身体動揺の周波数が増すにつれゲインは増加し、位相遅れが増大する特性を示した（微分制御動作）。迷路が起立姿勢に現われる速く短い動揺に対して立直り運動を誘発するのに重要な役割を演ずることを示すものである。

3. 両側迷路反応喪失例のゲインは平坦で低かった。両側迷路機能を失うと、速い短い身体動揺に対する立直り運動の解発に障害をきたすことを示すものである。

4. 一側迷路反応喪失例の周波数応答はゲイン、位相の値に散りを示したが、その特性は正常者に類似したものであった。一側迷路機能を失った場合、迷路性立直り反射系の鋭敏な制御が障害されることを示すものである。

6. 考 察

1. 迷路性立直り反射系の動特性検査の目的

起立姿勢の解析はME機器の進歩、電算機の導入により著しい進歩を遂げている。重心動揺の記録、分析はその中心をなしている。我々は重心動揺の検査により、起立姿勢維持に働く視器、迷路、自己受容器の役割、

各種の疾患で現われる起立障害の特徴につき多くの知見をうることができた。しかし、重心動揺という起立障害の総合的な把握では、起立制御系のなかのどの系のどのような障害による起立障害かを明確にし得ないことが少なくなかった。

私共は迷路性起立障害の特徴を明確に捉えるためには、起立維持に働いている諸機能のなかでの迷路の働きを単独にとり出し検査する必要があると考え、迷路性立直り反射系の動特性の検査を意図したのである。なお、起立維持における迷路の働きとして、立直り反射とともに迷路性筋緊張について検討する必要があるが、起立姿勢維持における迷路性筋緊張の役割についてにはすでに報告した（Tokita, et al. 1972, 時田1974）。

2. 方法について

(1) 頭部立直り運動について：1つの系の動特性を検査するには系に対する入力信号と出力信号を明確に捉える必要がある。迷路性眼運動系においては入力は、頭部（迷路）に加わる加速度であり、出力は眼運動である。系に対する入出力が明確である。これに対し、迷路性立直り反射系においては頭部の偏位に対し頭部に立直り運動が現われるので刺激と応答を区別し難い。頭部に加わる加速度刺激を入力、頸筋活動を出力とすることが考えられるが、起立維持に際しての頸筋活動の変化は大きくないので利用し難い欠点がある。そこで、軀幹の動きに対する頭の立直り運動を捉え迷路性立直り反射系の特性を観察したのである。迷路性立直り反射がまず頭部に現われること、迷路から脊髄への神経支配は主として頸筋に行なわれることなどは、肩の動きに対し頸部に現われる立直り運動で迷路性立直り反射系の特性をみることに支持を与えたと考えた。他方、この方法で考慮すべき点も少なくない。肩と頭の運動が何れも起立制御系の出力ではないかとの疑問である。これに対しては、肩の動きより頭の動きを引くことにより頭部立直りのみを取り出したと考えた。また、頭部の立直り運動が迷路性立直り反射のみによるものでないことも考える必要がある。頸筋の物理的抵抗、弾性、頸筋よりの自己受容性反射、頭部の慣性なども考える必要がある。しかし、頭部の立直り運動に主役を占めるものは迷路性立直り反射であると考え実験を計画したが、両側迷路反応喪失例が正常者と全く異なる特性を示したことはこの考えを支持するものと考えている。

(2) 肩、頭部運動の捉え方について：起立時、肩、頭部には左右方向への直線加速度とともに左右への傾斜運動が加わる。我々は肩、頭の運動を捉えるのに主として加速度計を用いたので左右への直線加速度とともに傾斜を捉えている。ヒトの起立時、肩、頭部の傾斜角度は少く、我々の捉ええたものは左右への直線加速度に対する

動特性と考えているが、将来は両者を区別して解析する必要がある。

3. 頭部運動の動特性に関する文献

Barens and Rance (1975) は軀幹に運動を加えることにより生ずる頭部運動の動特性につき報告している。ヒトを実験台上の椅子に坐らせ、台に pitch, roll 運動を加えた時の頭部運動を観察し、1~2 Hz では頭部は軀幹に伴って動き、2~8 Hz では頭部運動は椅子の運動より増大して動き、それより高い周波数では頭部運動は減少、位相の遅れは増大することを述べている。Ezure and Sasaki (1978) は去脳した猫を回転台上にのせて迷路刺激を加えた時の頸筋活動を観察し、迷路性頸筋反射 (vestibulo-colic reflexes) の周波数応答を調べている。すなわち、この系に直線性のあること、回転角速度を入力、筋活動を出力とした周波数応答では 0.01~0.5 Hz の周波数範囲においてゲインは 40 dB/decade の傾斜で減衰し、位相の遅れは次第に増大し 140~150° に至ることを述べ、本系に神経積分機構の存すること、本系が first-order lag-lead system であることを述べている。更に、Ezure, et al. (1978) はこの系に関与する三種の入力、 r ループを含む求心系、前庭脊髄系、前庭頸反射に関与する多シナプス系につき検討し、前庭頸反射の特性は、 $C_1 \sim C_4$ の後根を切断しても影響されないこと、MLF の内側前庭脊髄路を切断しても動特性に変化のなかったことを述べている。

4. 迷路性立直り反射系の特性

本報告で述べた検査では、迷路性立直り反射系は、0.3~6 Hz の周波数範囲において動揺の周期が速くなる程大きな立直り運動を誘発する特性（微分制御動作）をもつことが認められた。この成績は、迷路が速く短い身体動揺に対する立直り運動の解発に大きな役割を持つことを示すものである。Barens and Rance は身体の pitch, roll 運動において 2~8 Hz の周波数範囲で頭部運動が増大することを述べ、これは軀幹の下部に回転中心をもった振り様回転を行なうため頭部の加速度運動が直線成分を持つためと説明している。我々の実験条件は起立における自発動揺で、肩の運動に対する頭部運動の観察であり直ちに比較することは適当ではないが、速い動揺に大きな頭部運動を生ずる点において類似した成績である。ただ、この理由について、我々は迷路の微分制御動作は迷路性眼運動系の検査でも認めており（時田ら、1976, 1976）、迷路反射系の特性と考えている。Ezure and Sasaki は迷路性頸筋反射の周波数応答を振り様回転運動の加速度を入力とし頸筋活動を出力として求め、0.01~0.5 Hz の周波数範囲で 40 dB/decade の傾斜でゲインが減衰すると述べている。この成績は、入力を偏位として考えれば、入出力比が比例していることを意味す

る。すなわち、迷路性頸筋反射の動特性は比例制御動作であるとの成績である。この成績は我々の結果と異なるものであるが、その理由として次の点を挙げることができる。第一は、Ezure and Sasaki の実験は法脳猫の頭部を固定し、振り様回転刺激を加えた際の頸筋活動の観察であるのに対し、我々の実験はヒトの自然の起立において頭部運動に制限を加えず行なったことである。第二は、Ezure らの観察が 0.5 Hz より遅い周波数であるのに対し、我々の観察は自然動揺に現われた 0.5 Hz より 6 Hz に及ぶ周波数範囲のものである点である。第三は、Ezure らは頭部に加えた振り様運動を入力とし、頸筋活動を出力として系の特性を求めているが、我々は肩の動きを入力、頭部の動きを出力として系の特性を求めた点である。これらの差は今後の実験で埋めてゆきたいと考えている。

5. 視性立直り反射系の働き

本報告で述べた結果においては、視性立直り反射が働らく開眼時の検査と、その働きがない閉眼時の検査で、得られた特性に差を認めなかった。正常者では、閉眼でも安定して起立姿勢が維持できる両脚起立においては視性立直り反射系の関与が少ないことを示唆する。起立維持がむづかしいマン検査では開眼時、閉眼時の検査で差を示す例がある。その場合、開眼時では低い周波数範囲でのゲインが増加し、入出力比が 1 に近づく傾向を認める。

6. 迷路障害例の検査成績

両側迷路反応喪失例における頭部立直り反射系の特性はゲインが低く、平坦で、速く短い身体動揺に対して大きな立直り運動を誘発する性質が失われていた。そして、これらの症例は起立時の身体動揺のパワースペクトルにおいて、正常者に比べ速い動揺成分の増加がみとめられた。このことは、両側迷路反応を喪失すると起立時の速く短い動揺に対する立直り機能が失われ、その周波数帯域での動揺の振幅が増大することを示す。

一側迷路反応喪失例では周波数応答全体の型は正常者と同様の微分制御動作を示したが、ゲイン、位相の値に散りが大で、線の直線性が失われ、立直り運動の開発に正確さが失われていることが伺われた。

7. 結 果

起立姿勢維持に働く迷路性立直り反射系の動特性の検査法と正常者ならびに迷路障害例の検査成績を述べ、考察を加えた。

起立検査においては、頭部、重心動揺の如きすべての起立制御系の働きを積分したものの検査とともに、迷路性立直り反射の動特性検査の如き迷路独自の働きを検査する方法を導入する必要があると思う。この両者により、迷路性起立姿勢制御機構を明らかにし、迷路性起立障害

の診断を確実にすることができると考えるものである。

稿を終るに臨み、ご助言を戴いた岐阜大学医学部反射研究施設三宅彰英氏、林良一氏に深謝します。

参 考 文 献

- 1) Barends, G. R. and Rance, B. H.: Head movement induced by angular oscillation of the body in the pitch and roll axes. *Aviat Space Environ Med.* 46: 987-993, 1975.
- 2) Ezure, K. and Sasaki, S.: Frequency-response analysis of vestibular-induced neck reflex in cat. I. Characteristics of neural transmission from horizontal semicircular canal to neck motoneurons. *J. Neurophysiol.* 41: 445-458, 1978.
- 3) Ezure, K., Sasaki, S., Uchino, Y. and Wilson, V. J.: Frequency-response analysis of vestibular-induced neck reflex in cat. II. Functional significance of cervical afferents and polysynaptic descending pathways. *J. Neurophysiol.* 41: 459-471, 1978.
- 4) 松岡豊彦: 起立時身体動揺の定量的解析. 耳鼻臨床 70: 1191-1280, 1977.
- 5) 島田六郎: 中枢性めまい平衡障害の起立時身体動揺の研究. 耳鼻臨床 70: 1113-1190, 1977.
- 6) 田口拓雄: 起立時身体動揺の研究, 正常者ならびに迷路障害例を中心に. 耳鼻臨床 70: 1065-1112, 1977.
- 7) 時田 喬: 起立姿勢維持における迷路の働き—迷路性筋緊張の検討一. 神経研究の進歩 18: 728-739, 1974.
- 8) 時田 喬, 他: 直立時の身体動揺の分析—動揺の多現象記録と相関分析による一. 耳鼻臨床 63: 363-387, 1970.
- 9) 時田 喬, 他: 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: 443-456, 1972.
- 10) 時田 喬, 他: ヒトの迷路性眼運動系の生理—伝達関数の検討を中心に—. 日耳鼻 79: 59-73, 1976.
- 11) 時田 喬, 他: 迷路性眼反射の生理—半規管系・耳石系の伝達関数. 耳鼻臨床 69: 1250-1259, 1976.
- 12) Tokita, T., et al.: Correlation analysis of the body sway in standing posture. *Agressologie* 17, B: 7-14, 1976.
- 13) Tokita, T., Taguchi, T. and Matsuoka, T.: A study of labyrinthine ataxia with special reference to proprioceptive reflexes. *Acta Otolaryngol.* 74: 104-112, 1972.

Abstract

To determine the dynamic characteristics of the labyrinthine righting system, transfer function of the system was calculated by using shoulder movements and righting movements of the head which appear during the standing position. The results computed were displayed as frequency response (i.e., gain and phase diagrams).

(1) In healthy subjects, frequency response of the system indicated an increase of gain with the increase in frequency of the body sway (i.e., derivative control action).

(2) In cases of bilateral loss of labyrinthine excitability, gain diagram was flat and values of gains were low. These patients showed disturbances in the righting movements to rapid body sway.

(3) In those with a unilateral loss of labyrinthine excitability, frequency response was similar to that seen in healthy subjects who showed some irregularity in gain and phase diagrams.

These findings indicate that the labyrinth indeed plays an important role in provocation of the righting movements to short and rapid body sway.