

原 著

一側前庭障害症例における水平後方移動刺激に 対する立ち直り反応

浅 井 正 嗣

富山医科薬科大学耳鼻咽喉科学教室

Postural responses to backward translations in patients with unilateral vestibular disorders

Masatsugu ASAI

Department of Otolaryngology, Toyama Medical and Pharmaceutical University,
Toyama 930-01, Japan

Key words : unilateral vestibular disorders, automatic postural response, strength,
central compensation

要 旨

ヒト直立時に床面を急に後方移動すると、前方転倒を防ぎ、直立安定化のための立ち直り反応が出現する。本研究では、一側前庭障害のこの反応の強さに対する影響を検討した。反応出現時に両側の足圧中心位置が急速に前方移動する。この移動がもたらす体重心の角運動量を患側肢、健側肢別々に計算して反応の強さの評価を行った。一側前庭障害症例60例に対して分析した結果、(1) 一側前庭障害例では、患側肢では健側肢に比較して反応の強さが低下していること、(2) この傾向は、急性期の症例ほど強くみられること、(3) 中枢性代償が進む慢性期症例では、患側健側の差が緩和されることが明らかとなった。

はじめに

一側前庭障害例の姿勢維持機能に関する研究は、従来、静止直立時の重心動揺検査を中心に行われてきた^{1, 2)}。一方、急速な後方への水平移動刺激を負荷する方法も報告されており³⁻⁷⁾、刺激に対して前

方転倒を防ぐために身体を後方に引き起こす立ち直り反応が出現するとされている。この反応は随意運動と伸張反射との中間的な性格を有することから、automatic postural response⁴⁾と呼ばれ、深部知覚入力などにより惹起され、あらかじめ中枢性にプログラムされた筋収縮パターンにそって発現するとされる³⁻⁶⁾。これにより、足関節を中心に身体の後方への回転力が発生して前傾を止め、さらに後方に引き起こされる。この反応を修飾する因子として前庭入力に関与していることは、両側前庭機能廃絶例での研究から確認されている⁷⁾が、一側前庭障害例についての報告例はない。本論文の目的は、一側前庭障害例に対して急速な水平後方移動刺激を加えた際に惹起される立ち直り反応を、左右側各々の足圧の変化から評価しうる刺激分析装置を用いて分析し、姿勢維持機能異常の特徴について解析することにある。

方法および対象

1. 方 法

1) 刺激装置

刺激装置は、起立台、前景およびコンピューターより構成されている (Equi Test[®], ニューロコム社, 図 1)。起立台中央部分には46cm×23cmのフォースプレート2枚が軸により左右に連結されている。各プレート下面には前後2個の足圧検出器が設置されており、この出力は増幅後、サンプリング周波数 100HzでAD変換されコンピューターに取り込まれる。被検者には開眼状態で、左右足

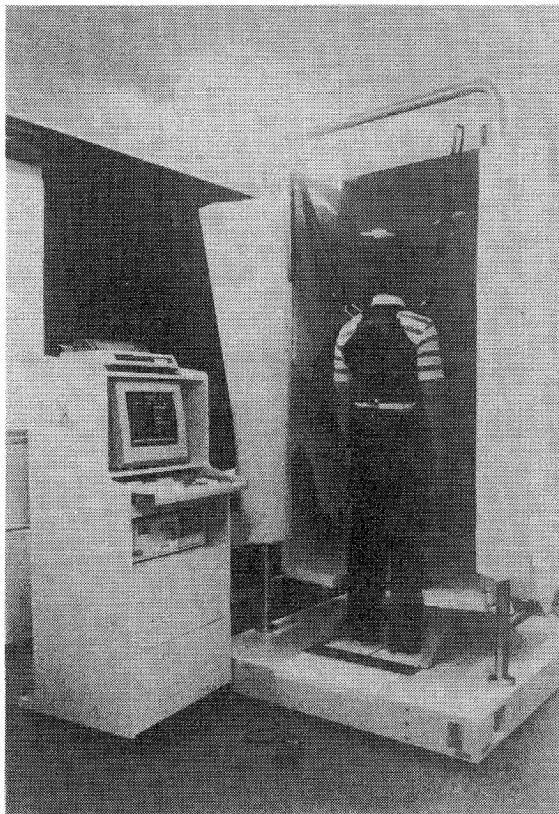


図1 Equi Test 全景

表1 刺激条件

	刺激時間(msec)	移動距離(cm)
小刺激	250	H×D1
中刺激	300	H×D2
大刺激	400	H×D3

H: 被検者の身長

D1: 1.27/183, D2: 3.18/183, D3: 5.72/183

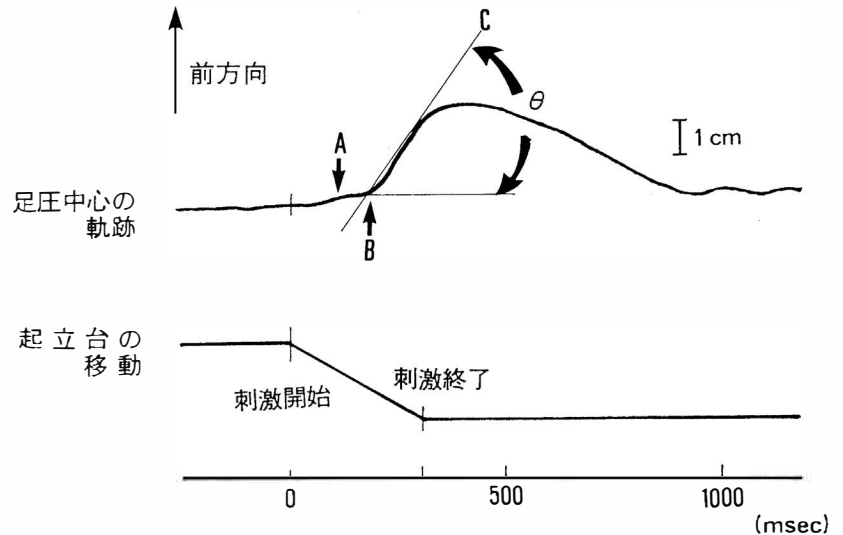


図2 水平後方移動刺激時の足圧中心軌跡

中刺激での足圧中心軌跡、起立台フォースプレートの後方移動を示す。A: 刺激に対して被検者が前傾し始め、足圧中心が前方移動し始めた状態。B: 立ち直り反応の開始点。C: 反応開始点より160ミリ秒(16ポイント)のサンプリング点から求めた近似直線。θ: 近似曲線と基線のなす角度。tan θが足圧中心位置の移動速度に相当する。

各々の足関節内顆が圧検出器の中間に位置するように直立させ、フォースプレートを後方移動させた。移動刺激の強さは小中大の3種類(表1)とし、この順に各3回ずつ行った。移動距離は、被検者の前傾角が一定になるよう身長補正された。

2) 分析

後方移動刺激によって、被検者は前傾姿勢となるため、身体を後方に引き起こす反応が発現する。この反応における一側肢の足圧中心位置の経時的变化を図2に示す。刺激開始後、前傾姿勢となるのに伴い足圧中心は前方へわずかに移動する(図2矢印A)。この後、身体を後方に引き起こそうとする反応により足底部は床面を前下方におすため、足圧中心は急速に前方に移動する(図2矢印B)。この矢印Bが示す急速な前方移動開始点から、急速な立ち上がり曲線の近似直線Cを計算し、この直線の傾きから足圧中心の前方への平均移動速度が計算される。本装置では、この足圧中心速度から身体の前傾停止および後方への引き戻しの際の身長、体重補正した角運動量を計算し、これを "strength" と定義した。単位は $\text{cm}^2 \text{ degrees/second}$ となる(以後の文中では単位は省略する)。strengthは左右足、各々について計

表2 対象症例 (N=60)

診断名	症例数
メニエール病	18
突発性難聴	16
聴神経腫瘍	11
遅発性内リンパ水腫	6
前庭神経炎	5
ハント症候群	2
中耳炎術後	1
内耳梅毒	1
総数	60

算される。

$$\text{strength} = k_1 \times k_2 \times \tan \theta$$

$\tan \theta$: 足圧中心位置の平均前方移動速度, k_1 : 183×0.55 (身長183cmの場合の体重心の高さ), k_2 : $180/\pi$ (体重心の動揺速度を deg/sec で表すための定数)

なお、本装置の精度で足圧中心の急速な移動開始点が検出されない場合は、足圧中心位置変化の近似直線が計算できないため、strength の計算は不能となる。

3) 他の神経耳科学的検査

本研究は前庭障害例を検討の対象とするため以下

表3 正常例 strength の平均値, 標準偏差

(a)小刺激				
年齢	例数	左足	右足	左右平均
20-39	28	5.1(1.8)	5.0(1.9)	5.1(1.8)
40-59	16	5.6(2.5)	5.3(2.1)	5.4(2.1)
60-70	15	5.7(2.6)	5.2(1.4)	5.5(1.8)
全例	59	5.4(2.2)	5.2(1.8)	5.3(1.9)
(b)中刺激				
年齢	例数	左足	右足	左右平均
20-39	29	8.6(2.6)	8.7(2.8)	8.7(2.6)
30-59	22	8.7(2.9)	8.4(2.1)	8.6(2.7)
60-70	22	8.0(2.5)	8.2(2.0)	8.1(2.0)
全例	73	8.5(2.7)	8.5(2.7)	8.5(2.5)
(c)大刺激				
年齢	例数	左足	右足	左右平均
20-39	29	10.6(3.2)	10.6(3.3)	10.6(3.2)
40-59	22	11.5(3.3)	11.3(2.7)	11.4(2.7)
60-70	23	10.3(3.1)	10.1(2.5)	10.2(2.5)
全例	74	10.8(3.2)	10.7(2.9)	10.7(2.8)

(): 標準偏差, 単位: $\text{cm}^2\text{deg/sec}$

の神経耳科学的諸検査の結果を参考とした。

自発眼振検査: 閉眼下ENG (electronystagmography) 記録の自発眼振数。

温度眼振検査⁸⁾: 冷温交互刺激時の眼振反応の最大

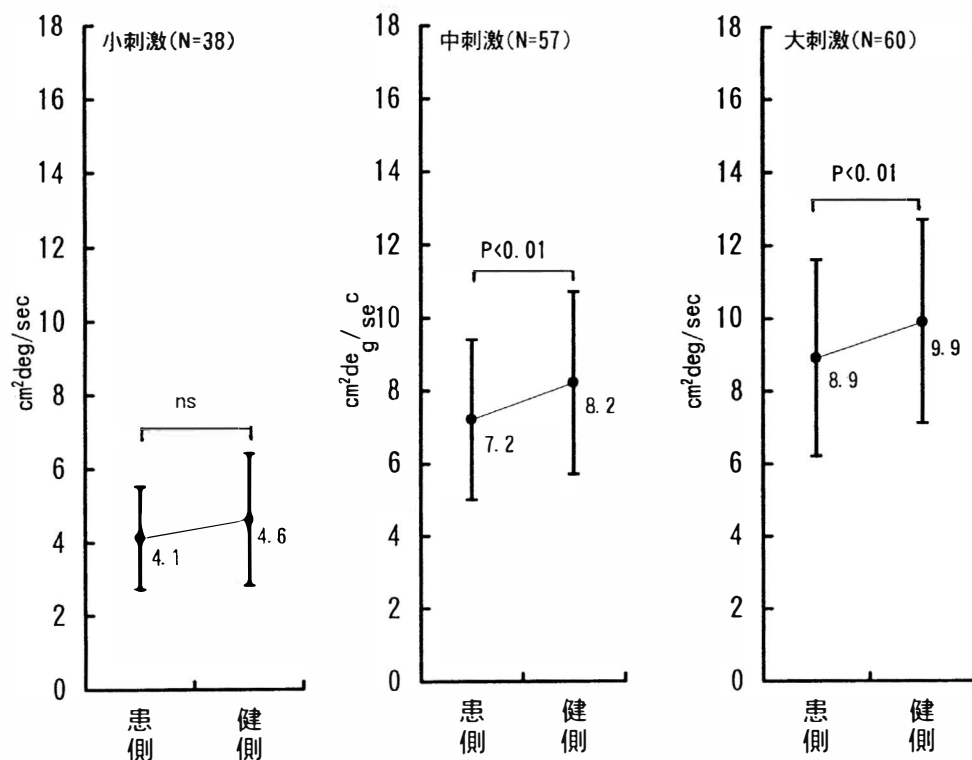


図3 初回検査施行例 (N=60) の strength

初回検査時の患側, 健側の strength の検定結果を示す。図中の数字は平均値。

緩徐相速度を指標とした半規管麻痺(canal paresis ; CP) の程度 (CP %)。

回転検査⁹⁾：振子様回転刺激による VOR ゲイン。

重心動揺検査²⁾：開眼30秒、閉眼30秒の重心軌跡長 (mm) または単位時間の軌跡長 (mm/sec)。

2. 対 象

めまいの既往および四肢・体幹に機能異常を来するような疾患の既往のない正常成人74例 (年齢21~70才, 平均44.7才), 一側前庭障害例60例 (年齢21~71才, 平均48.7才) を対象とした (表2)。60例の内訳は, 激しいめまい発作 (回転性または浮動性) があり, 温度眼振検査の半規管麻痺 (CP %異常) のある50例と, 他に半規管麻痺が明らかでない突発性難聴4例, メニエール病6例である。後者の10例については聴力変動などその他の所見から患側を決定した。

なお, 結果の統計的分析には Wilcoxon test を用いた。

1) 正常例の結果

対象74例中, 小刺激59例, 中刺激73例, 大刺激74例で strength の計測が可能であった。表3に示すように, 各刺激条件下で年齢別の平均値には有意差がなく, また右足 strength, 左足 strength の間には差異はみられなかった。

2) 一側前庭障害症例の結果

一側前庭障害症例60例中, strength が測定できた症例は小刺激38例, 中刺激57例, 大刺激60例であった。

(i) 患側・健側の比較：対象症例60例中には, 経過観察のために複数回の検査を行った症例が含まれるが, ここでは初回検査結果についてのみ分析し, 図3に示した。各刺激とも患側の strength は健側に比較して低下していた (小刺激 NS, 中刺激 $P < 0.01$, 大刺激 $P < 0.01$)。

(ii) 疾患の病期, 活動性と strength の関連：めまい症状の強い急性期症例と, 発症後時間が経過してめまい症状が軽度となった慢性期症例について患側, 健側 strength の比較を行った。ここで急性期症例とは, めまい感やふらつきが強く, 本検査時点で自発

結 果

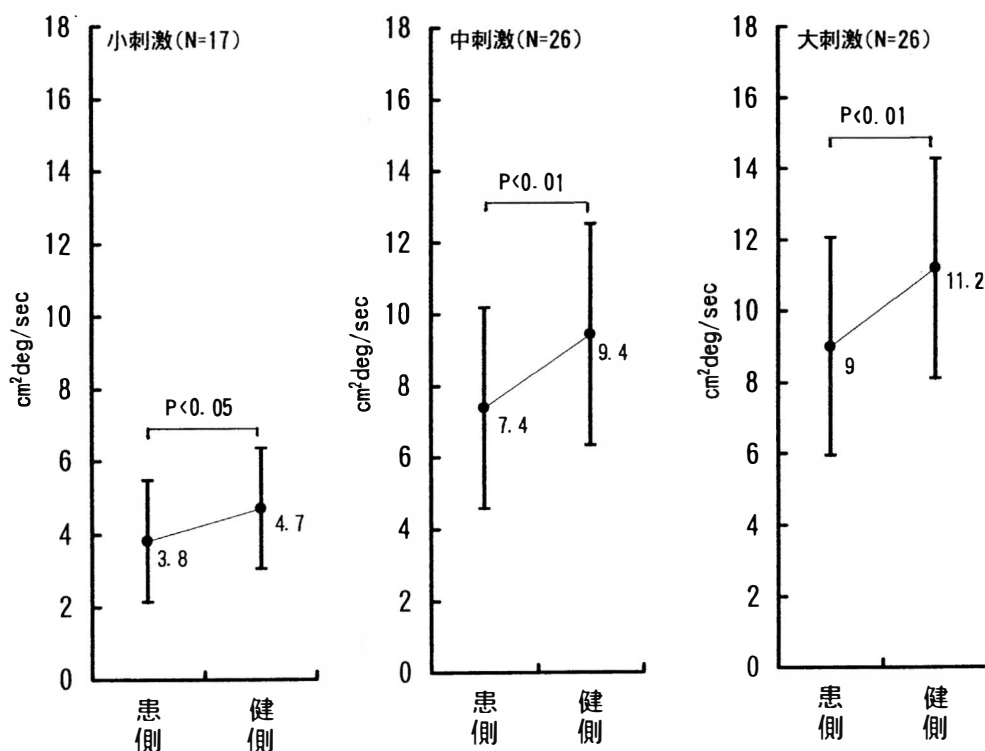


図4 急性期検査施行例 (N=26) の strength

急性期症例の条件 (文中) に合致した一側前庭障害例26例の健側および患側 strength の検定結果。図中数字は平均値。

眼振を認め、重心動揺検査で正常範囲をこえている症例26例とした。この中には初回検査時に急性期に該当した症例10例と、複数回検査施行中に急性期に該当した症例16例が含まれる。慢性期症例は、めまいやふらつきが軽度で、自発眼振を認めず、重心動揺検査正常の症例22例とした。図4に示したように、急性期症例では患側と健側のstrengthの差は図2の結果よりもさらに著明となることが明らかとなった。なお、中、大刺激では健側のstrengthが図3の正常例の値よりも高値を示した。一方、慢性期症例では、どの刺激でも患側、健側strengthの有意な差は認められなかった(図5)。

(iii)症例の経過観察：以下にstrengthを用いて一側前庭機能高度低下発症後の経過観察した2症例について述べる。

(症例1) 43才女性

診断名 左同側型遅発性内リンパ水腫

保存的治療に抵抗性のため左迷路破壊術を施行した。この術前および後の経過を図6に示した。術前のstrength(中刺激)は左(患側)5, 右(健側)7であ

った。術後、患側耳は温度眼振検査無反応となった。2週間目には著明な右向き自発眼振、高度右向きVOR-DP、閉眼時重心軌跡長増大とともにstrengthは左4, 右8と左右差が増大した。その後、他の検査所見の軽快とともにstrength左右差も減少し術後11週目には差は消失した。しかし13週目以後仕事を再開するとstrength左右差は再び増大し、その他の検査所見も悪化傾向となった。

(症例2) 48才女性

診断名 左聴神経腫瘍

摘出術施行前後の経過を図7に示す。術前日のstrength(中刺激)は右7, 左5であった。術後2ヵ月後の検査では左3と正常下限(3.5)を逸脱して異常低値となった。高頻度の右向眼振、右向きVOR-DPを認め、重心軌跡長も異常値を示し、温度眼振検査では高度の左CP(CP%=69%)がみられた。7ヵ月以降は患側、健側差が消失し、重心動揺軌跡長も正常化した。しかし、自発眼振はこの時点で残存しており11ヵ月で消失した。

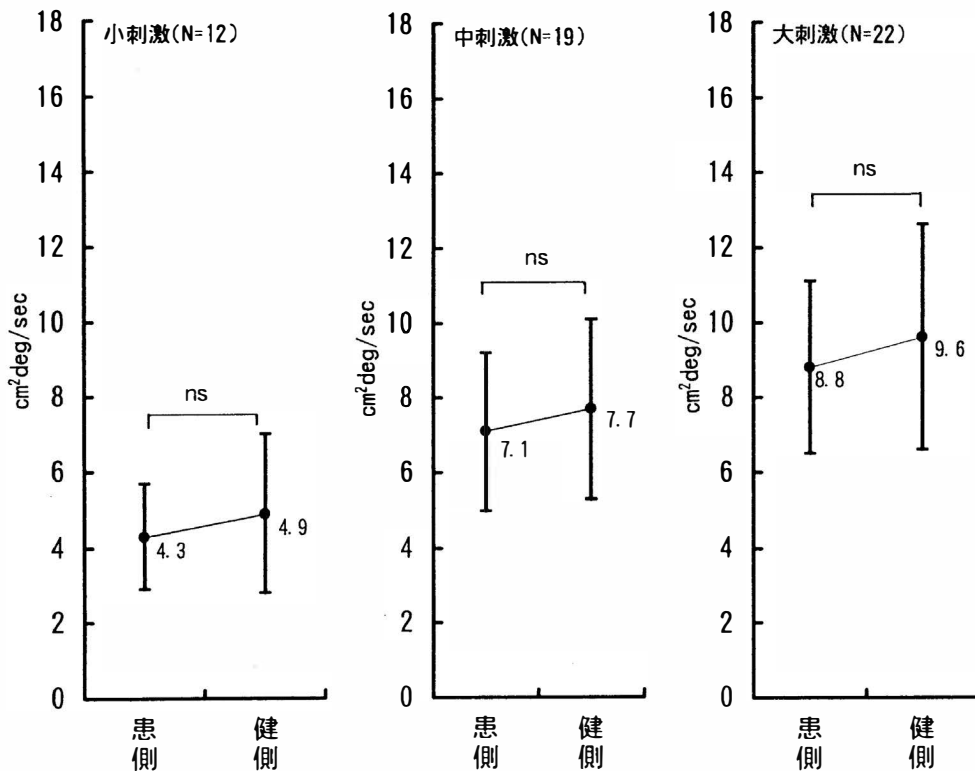


図5 慢性期検査施行例(N=22)のstrength
慢性期症例の条件(文中)に合致した一側前庭障害例22例の健側および患側strengthの検定結果。図中数字は平均値。

考 察

本研究の結果、一側前庭障害例の患側 strength は健側のそれに比して低下し、特に急性期症例でこの傾向が著明であった。この患側 strength 低下の機序については以下のように考えられる。第 1 に、Molina-Negro ら¹⁰⁾はヒトで、Lacour ら¹¹⁾はサルで一側前庭神経切断後、切断側の Hoffman 反射を調べ、H 波の振幅低下、H 波・M 波比の低下を示したことを報告し、これは、一側前庭機能低下は下腿三頭筋を支配する脊髄運動ニューロンの活動性を低下させた結果であろうとのべている。このことから、本研究における一側前庭障害例の抗重力筋緊張は健側

に比し患側で低下していたと考えられ、その結果患側 strength が健側のそれに比して有意に低下したと推測される。第 2 に頭部加速度受容器としての前庭機能が患側で低下したため、前庭脊髄反射による下腿筋収縮の強さに差が生じた可能性も考えられる。Allum ら¹²⁾は、本研究と同様の刺激を用いて検討した結果、後方移動開始後早期 (20msec 程度) に頭部加速度変化が生じており、前庭脊髄反射による立ち直り反応を引き起こしうることを指摘している。

一方、正常例と両側前庭障害例で strength を比較した Horak⁷⁾の報告がある。彼女は、両側前庭障害例の方が正常例よりも strength が増加することを示し、これは小脳を含めた体性感覚系神経回路の活動

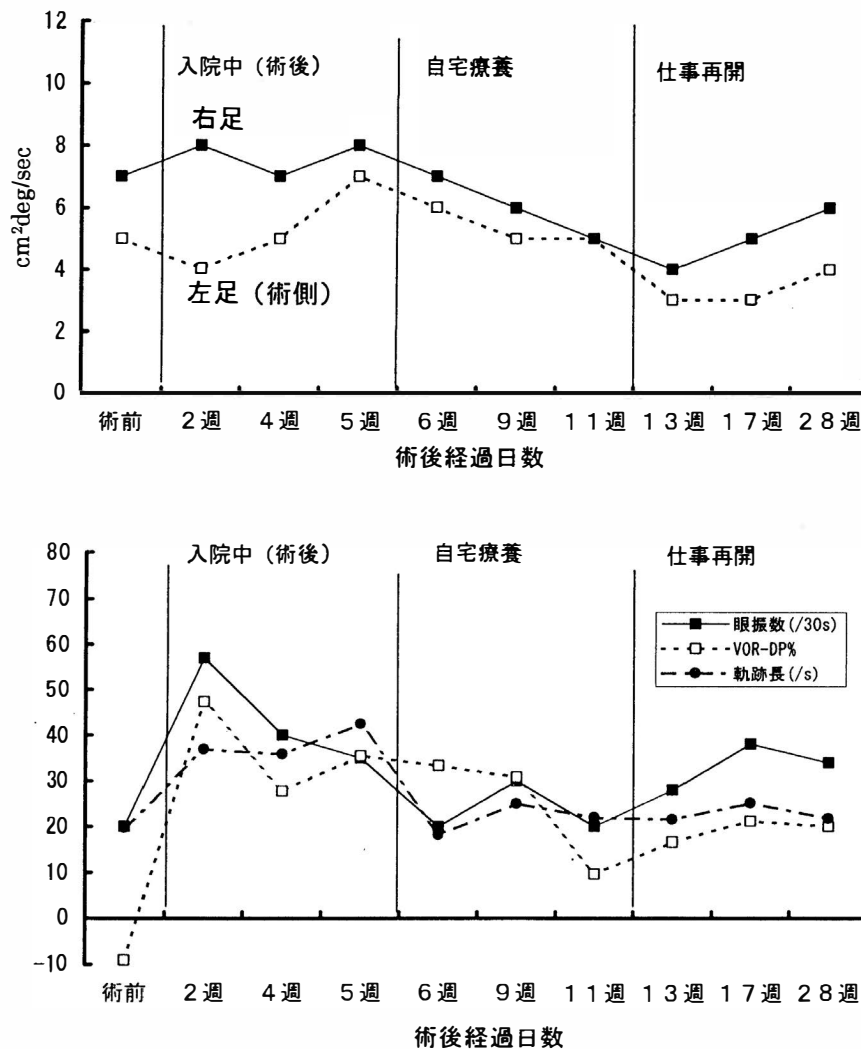


図 6 症例 1 の経過

上段：術側と健側の中刺激 strength。下段：30秒間の右向き自発眼振数、VOR ゲインから計算した VOR-DP % (正方向の増加は右向き DP が増大したことを示す)、単位時間あたりの閉眼時重心軌跡長 (正常上限 19mm/sec)

亢進によるものであろうとしている。本研究で得られた一側前庭障害例の患側 strength の低下は、Horak の両側前庭障害例の結果と逆である。この点について、以下のように考察した。Tokita ら¹³⁾は、両側迷路を破壊した兎が頭部後屈前肢伸展姿勢をとること、両側前庭機能喪失患者が直立時に前後への反復動揺を示すことを報告し、迷路は抗重的筋緊張を抑制的に統御し自己受容性反射と均衡を保って起立姿勢を維持するとした。さらに、永木¹⁴⁾、加藤¹⁵⁾は迷路が同側伸筋に促進的に働くと同時に反対側伸筋に抑制的に働き、迷路系全体としては、伸筋に対する抑制支配が優位であると述べている。この反対側伸筋に対する抑制支配については、網様体脊髄路が関与することがManzoni et al¹⁶⁾ および小泉¹⁷⁾ によっ

て指摘されている。したがって、一側前庭障害例では、同側前庭脊髄路からの促進的影響の低下と反対側からの抑制のために患側 strength の低下が生ずるが(図8a)、両側前庭障害例では、両側迷路からの抑制的支配の低下により下腿三頭筋などの抗重的筋緊張亢進をきたし strength が増大する(図8b)と推察される。

本研究において、2症例の一側前庭機能低下発症後の経過観察から自覚症状と他覚所見の改善とともに、strength の健側・患側差の減少傾向が観察された。また、慢性期症例では患側、健側の間に有意の差を認めなかった。この結果は、移動刺激時の立ち直り反応に関与する脊髄運動神経の活動性が回復したことを意味し、この回復は前庭神経核を含めた中

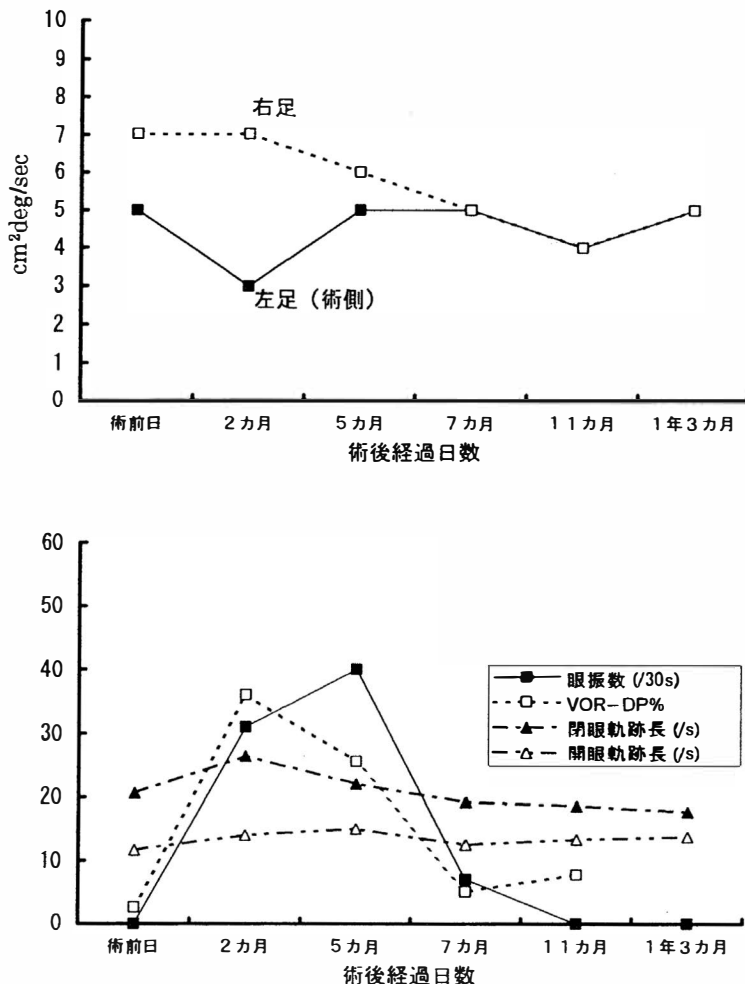


図7 症例2の経過

上段：術側と健側の中刺激strength. 下段：30秒間の右向き自発眼振数，VOR ゲインから計算した VOR-DP % (正方向の増加は右向き DP が増大したことを示す)，単位時間あたりの開眼時重心軌跡長 (正常上限14mm) および閉眼時重心軌跡長 (正常上限19mm/sec)

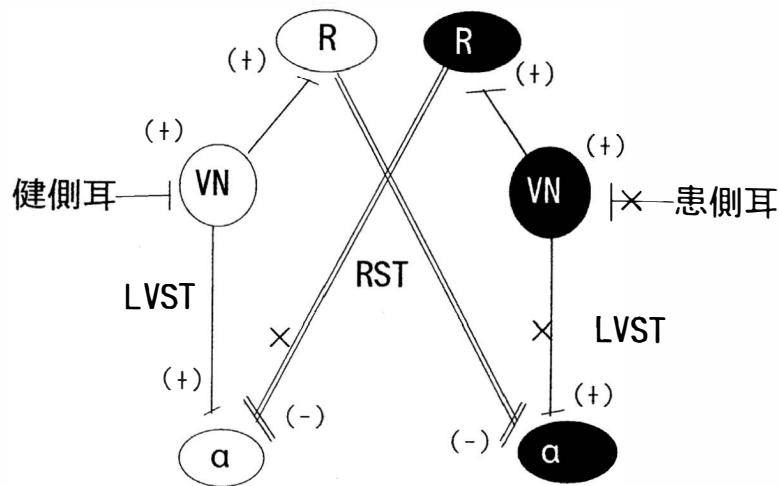
枢性代償によるものであると考えられる¹⁸⁾。Lacourら¹⁹⁾は、一側前庭破壊術後の中枢性代償を観察するために動物の落下実験を行い、落下中のヒラメ筋収縮、H反射、腿反射の経過を観察した。この実験で術後2日目にみられた術側ヒラメ筋の反応低下と非術側の反応亢進は、3週間後に左右差が軽快して術前の程度に回復している。これは上位中枢からの直接および γ 運動神経を介する α 運動神経の活動への影響によるものであると述べている。このような中枢性代償の発現する機序に関して Maeda²⁰⁾は^[14C]deoxy glucose 法により脳局所代謝率について検討した。この結果、術後4週間で小脳虫部後葉、歯状

核、脳幹網様体、患側前庭神経核における代謝率が向上したことを述べている。歯状核、脳幹網様体から前庭神経外側核への出力が促進的作用を及ぼすことを考慮すると、外側前庭脊髓路を介して脊髓運動細胞の興奮性が増大したと考えられる。この結果、患側腓腹筋などの抗重力筋の緊張が回復し strength の患健側差も改善したと思われる。

結 論

一側前庭障害例60例の水平後方移動刺激に対する立ち直り反応の強さ(strength)について、Equi Test®

(a)一側前庭障害例



(b)両側前庭障害例

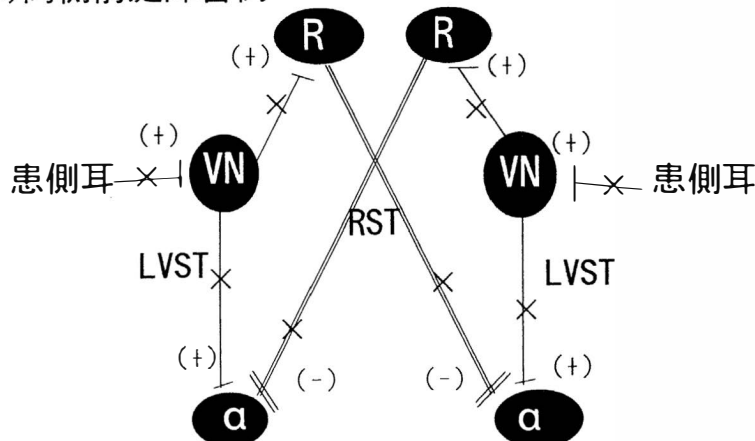


図8 前庭障害の脊髓運動細胞に対する影響について

(a) 両側前庭障害例, (b) 一側前庭障害例, RST: 網様体脊髓路, LVST: 外側前庭脊髓路, R: 網様体, VN: 前庭神経核, α : 脊髓運動細胞, (+): 促進的影響, (-): 抑制的影響, \times : 機能低下を意味する。2重線は、影響がより強いことを示す。

を用いて検討した。その結果、以下の事項が判明した。

- (1) 一側前庭障害例では、健側に比して患側の strength が低下していることが明らかとなった。
- (2) 疾患の急性期では健側、患側間の strength の差が著明であるのに対して、慢性期症例では有意の差を認めなかった。
- (3) 2 症例の経過観察で、strength の左右差が変化した。これは、一側前庭障害例の平衡障害が中枢性代償により緩和されることを示し、約過観察、治療効果を評価する上で、有用であった。

稿を終えるにあたりご指導ご校閲を賜りました恩師渡辺行雄教授に甚大なる感謝の意を表し、ご助言を賜りました川崎匡第一生理学教室教授に心から感謝いたします。

なお、本論文の要旨は第95回日本耳鼻咽喉科学会総会(1994)において発表した。

文 献

- 1) 時田 喬：重心動揺検査。臨床神経生理学入門 その基礎と臨床的応用。(中西孝雄，島村宗夫編)：378—411。真興交易医書出版部，東京，1980。
- 2) 浅井正嗣，大橋直樹，渡辺行雄ほか：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。Epilibrum Res. **43**：276—280，1984。
- 3) Nashner L. M.：Fixed Patterns of Rapid Postural Responses among Leg Muscles during Stance. Exp. Brain Res. **30**：13—24，1977。
- 4) Nashner L. M. and Cordo P. J.：Relation of Automatic Postural Responses and Reaction-Time Voluntary Movements of Human Leg Muscles. Exp. Brain Res. **43**：395—405，1981。
- 5) Diener H. C., Horak F. B. and Nashner L. M.：Influence of Stimulus Parameters on Human Postural Responses. J. Neurophysiol. **59**：1888—1905，1988。
- 6) Horak F. B. and Nashner L. M.：Central Programming of Postural Movements：Adaptation to Altered Support-Surface Configurations. J. Neurophysiol. **55**：1369—1381，1986。
- 7) Horak F. B.：Comparison of Cerebellar and Vestibular Loss on Scaling of Postural Responses. In：Posture and Gait Development. Adaptation and Modulation (Amblad P., Berthoz A. and Clark F. eds.)：370—373. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988。
- 8) 水越鉄理：めまい・平衡障害例の診断と治療情報処理システムを中心に。現代医療社，東京，1988。
- 9) 小林英人：末梢性前庭機能障害例における閉眼および開眼下の前庭動眼反射に関する臨床診断学的研究。日耳鼻 **91**：1012—1022，1988。
- 10) Molina-Negro P., Bertrand RA., Martin E. et al.：The role of the vestibular system in relation to muscle tone and postural reflex in man. Acta Otolaryngol. **89**：524—533，1980。
- 11) Lacour M., Roll J. P. and Appaix M.：Modifications and development of spinal reflexes in the alert baboon (papio papio) following an unilateral vestibular neurectomy. Brain Res. **113**：255—269，1976。
- 12) Allum J. H. J., Honegger F. and Phaltz CR.：The role of stretch and vestibulo-spinal reflexes in the generation of human equilibrating reactions. Prog. Brain Res. **80**：399—409，1989。
- 13) Tokita T., Taguchi T. and Matuoka T.：A study on labyrinthine ataxia with special reference to proprioceptive reflex. Acta Otolaryngol. **74**：104—112，1972。
- 14) 永木譲治：Tonic labyrinthine reflex の動物モデルにおける分析。神経研究の進歩。 **18**：721—727，1974。
- 15) 加藤俊徳：迷路性筋緊張の研究。耳鼻臨床 **70** 増2：1029—1063，1977。
- 16) Manzoni D., Pompeiano O., Stampacchia G.

et al. : Response of medullary reticulospinal neurons to sinusoidal stimulation of labyrinth receptors in decerebrated cat. *J. Neurophysiol.* **505** 1059—1079, 1983.

- 17) 小泉 光：HRP法を用いた網様体脊髓路, 前庭脊髓路の研究. *Equilibrium Res. Suppl.* **3** — 1—29, 1988.
- 18) 徳増厚二：突発性前庭機能低下による症状とその快復過程について. *耳鼻臨床* **75** 増1 : 237—244, 1982.
- 19) Lacour M., Xerri C. and Hugon M. : Compensation of postural reactions to fall in the vestibular neurectomized monkey. Role of the remaining labyrinthine afferences. *Exp. Brain Res.* **37** : 563—580, 1979.
- 20) Maeda M., Miyaoka M. and Ishii S. : Investigation of central mechanisms underlying compensation in the hemilabyrinthectomized cat. *Neurol. Med. Chir. (Tokyo)* **28** : 18—26, 1988.

Summary

When the support surface upon which a subject stands is translated backward, the postural response to stabilize the induced subject's sway is triggered. In this study, we evaluated the effects of unilateral vestibular disorders on the magnitude of that response with Equi TestTM. Subjects stood on dual force plates with their feet apart and were stimulated with backward translations. Two transducers, set in each of the plates, detect each foot's pressure. When the response is triggered, the center of foot pressure (COF) abruptly moves forward. Velocity of the COF following the onset of response are calculated and are translated to the angular momentum of backward body sway. This is referred to as strength (cm² degree/second). The strength was calculated for each foot. Sixty patients with unilateral vestibular disorders were examined. The average strength in the leg on the side of the affected ear was less than that on the healthy side. This tendency was remarkable in the patients at the acute stage of the disease (N=26). On the contrary, the significant difference could not be found between the both legs in the patients at the chronic stage of the disease (N=22). From these results, we concluded that the magnitude of postural response has a tendency to reduce for the leg on the same side as an affected ear.