Active Head Rotation Test†

高橋正紘・星川治子
緑川周子・辻田直美*

はじめに

回転検査は長い歴史を有し、その間様々な回転様式が考案されて来た。回転検査は前庭眼反射 (VOR) 機能を調べるのに最も適している筈であるが、臨床検査としての評価は低く、標準的回転様式も存在しない¹⁴⁾。著者らは6年前より被験者自身による能動的左右頭振り運動中の固視機能を調べることにより VOR 機能を検討して来た。この結果、本検査は従来の暗所の眼振を指標とする方法に比べ幾つかの長所を有しており、回転検査としての新しい可能性を持つことが判明した。検査方法、所見については既に詳細に報告して来たので¹⁵⁻²³⁾、本稿では回転検査に対する著者らの考え方、Active head rotation test の特徴について重点的に述べた。

回転検査に求められる条件

1. 他の検査、特に温度眼振検査で代用し得ない所見が得られる。

回転検査の長所は温度眼振検査が最も得意とする左右迷路機能の障害の程度を知ることはできないが、回転という生理的な刺激に対する VOR 弓の反応を知ることにある。すなわち、迷路という VOR システムの1つのパーツが正常か異常かを調べるのではなく、システム全体として本来の機能を果たしているか否かを知ることにある。この回転検査の特徴を臨床検査として応用するためには、単に回転方向による反応の左右差をとらえるのでは不十分であり、新たな概念の導入が必要である²²⁾。

2. 前庭眼反射の最も重要な機能の良否を反映する

VOR の最も重要な機能は頭部回転中、代償性眼球運動を駆動し、明所における固視を助けることである。この機能は日常生活の一刻一刻で実現されているので、日常余り経験されない人工的な検査条件において調べるよりは、日常良く経験される頭部運動に近い検査条件で調べるのが望ましい²¹⁾。また VOR の本来の機能を調べるためには暗所の眼球運動の観察により得られる情報には限界があり、明所における固視機能を同時に調べる

必要がある。

3. 検査に必然性があり、客観的評価に耐える

従来回転検査に対する評価は一般に低かった。その理由は明快で、回転検査を行わなくとも通常めまい患者の診断に困ることはなく、回転検査で得られる情報の貢献度が低かったためである¹⁴⁾。一方、近年の VOR に関する基礎的研究の進歩はめざましく、VOR は3つのニューロンを介する単純な反射弓ではなく、脳幹、小脳さらに高位中枢により精密に調節されていることが判明して来た^{2,3,4,7,8)}。従って、たとえ回転刺激をいかに精密に与え、得られた反応を詳細に分析しても、刺激観察条件が不適当な場合には、その反応が本来の VOR 機能の反映とはいえない。暗所の回転眼振を指標とする検査（従来の多くの回転検査がこれに相当する）は多少の違いはあれ、この致命的な欠点を有する。回転検査で初めて得られる所見でしかもその所見が診断上価値が高いために、1, 2に述べた項目を満たし、且つ検査として信頼性を高める刺激観察条件の工夫が必要である。

回転検査に求められる条件をこのように検討してくると、新しい回転検査の目的は従来のそれとおのずから異なってくる。

検査方法

新しい回転検査に求められる条件を満たす方法の1つとして我々の行っている Active head rotation test (図1) について述べる。本検査の特徴は次の3項目に集約される。

日常的な回転様式の採用

一点固視機能の観察

VOR ゲイン

1. 回転様式

日常経験される頭部運動は実に多様であり、一定の様式は存在しない。最も自然な頭部運動の一つに側方注視のための一方向への比較的速い水平回転運動がある。これは現在の eye-head coordination の概念の基礎を作った Bizzi らがサルの実験で採用した回転様式でもある^{3,4)}。これはその後、人の検査にも応用されて来た^{13,23,26)}。この方法は代償性眼球運動の他にサッカーの異常を検出できる利点がある。しかし頭部運動が被験者に任されているため、回転速度に変化を持たせることが困難

†Active Head Rotation Test

*Masahiro Takahashi, Haruko Hoshikawa, Chikako Midorikawa, and Naomi Tsujita

*東京女子医科大学耳鼻咽喉科学教室

図1 検査装置。ジャイロセンサ (A), 眼球運動の校正および壁上の一点固視のための赤色視標 (B), 固視抑制のための頭部に固定された赤色視標 (C), 頭部固定装置 (D) — 能動回転の際はこれを解除する, モーター (E)。

なこと, 固視条件が一種類であることは, VOR の反応特性を知る上で情報量が少ないという欠点を有する。

被験者自身による能動回転で且つ再現性良く回転速度を変化させるため, 我々はメトロノームを用いて振り様に左右頭振りを行わせている。振幅, 頻度については種々の組み合わせで行った結果, 被験者が一点固視しつつ再現性良く行える上限は振幅 40° , 頻度 1.0 Hz 附近であることが判明した。さらに頭部回転速度に3倍の幅を持たせるため, 0.67 Hz , 0.33 Hz を追加し, 3つの回転頻度で検査を行っている。この際, 最大頭部回転速度は 0.33 , 0.67 , 1.0 Hz でそれぞれ約 50 , 100 , $150^\circ/\text{sec}$ となる。その後, 同一回転振幅, 頻度の電動回転椅子を作製し, 能動回転と受動回転の検査所見を比較したところ, 定性的にはおゝむね同様の所見が得られた^{5,17)}。従って本検査の重要なポイントの1つは, 速い回転速度の採用であり, 異常所見の摘発のみを目的とする場合には受動回転で代用し得る。

2. 観察条件

本検査の観察条件を最終的に決める以前は, vestibular-visual interaction の観点から被験者の眼前に斜にミラーを装着し方向逆転プリズムと同様な catastrophic situation おける VOR と固視の関係, また暗所における壁上の一点, 眼前の一点のイメージが VOR に及ぼす影響を調べた^{15,19,20)}。これらの検査条件の設定により明らかにされた点が多いが, VOR の基本的性質は次の3条件でほぼ把握することができることが判った。

暗所暗算負荷—開眼

壁上の一点固視

頭部に固定した眼前の一点固視

A. 暗所暗算負荷—開眼

暗所の眼球運動の観察は従来の表現を用いれば, 回転中眼振の観察ということになる。しかし, 考え方は大きく異なっている。従来の回転検査が大振幅, 小頻度の回転における眼振最大緩徐相速度, 眼振頻度, 眼振持続時間等を反応の指標として用いて来たのに対し, 本検査では眼球運動と頭部運動を合成した空間的視線運動および眼球運動と頭部運動の最大速度の比 (前庭眼反射利得, VOR ゲイン) を指標とする。すなわち, 固視を除いた状態でどの程度の代償機能 (回転中眼振ではなく, 代償性眼球運動) があるかを調べる。

本検査条件では VOR は本来の固視を助ける目的を持たない為, その機能が100%発揮されることはない。しかし, 逆転プリズムの実験等により, 未知の視前庭刺激条件において固視機能を獲得する過程には必ず暗所の VOR ゲイン値の変化 (adaptive gain control) が見られることが明らかにされて来た^{6,9,27)}。これより, 暗所の VOR は本来の VOR 機能をそのまま表現するものではないが, 固視機能と無関係ではなく, 一種の固視準備状態と考えられる。

B. 壁上の一点固視

頭部回転中, 明所で一点を固視させた場合, 固視は smooth pursuit に影響されるので, VOR 機能の観察

には一見不適當と思われる。しかし、これは回転速度が遅い場合にのみ正しく、我々が採用している振幅40°、頻度1.0 Hz の条件では smooth pursuit が固視に占める割合は極めて小さい。本検査条件は固視のため VOR の代償機能が100%発揮される可き条件であるので、VOR の代償機能およびゲイン調節機能の精度を知るのに適したものである。

図2 暗所暗算負荷一開眼の記録。同一正常者の受動回転 (a) と能動回転 (b)。

C. 頭部に固定した眼前の一点固視

本検査条件は壁上の一点固視と正反対に、VOR が固視の妨げとなる条件である。この点では温度眼振検査における visual suppression test²⁴⁾ に似ているが、2つの点で異なる。第一は固視により抑制される VOR が、visual suppression test では温度眼振という生理的に抑制される可き目的を有しない眼振であるのに対し、本検査では明所において常に解発される可き代償性眼球運動であること。第二に回転頻度 (速度) を変化させることにより、単に VOR の抑制の程度を知るのではなく、smooth pursuit と密接に関係する固視機能を知ることができる点である。

検査所見

検査所見については、正常者の能動回転所見^{15,20)}、一側および両側迷路機能消失例の能動回転所見¹⁶⁾、一側迷路機能消失例の代償過程¹⁸⁾、能動回転と受動回転の比較^{5,17)} について報告して来た。詳細はそれぞれの論文に譲り、本稿では結果の一部および検査所見の意義について述べた。

図3 壁上の一点固視の受動回転記録。発症早期の右迷路機能消失例 (a) と両側迷路機能消失例 (b)。一側障害では患側回転に局限した固視異常が現われる (↖)。

1. VOR ゲイン

暗所における代償性眼球運動はそれ自体では目的を持たないが、この速度と頭部回転速度の比 (VOR ゲイン) は前庭眼反射弓の固視準備状態を示すと考えられる。受動回転では能動回転に比べやや低値を示す傾向がある (図2)。個体間の変動が大きいが、正常者、一例および両側迷路機能消失例、小脳障害例いずれにおいても、回転頻度 0.2~1.0 (0.85) Hz 間では大きな値の変動はない。

末梢障害例では当然 VOR ゲイン値は低下するが、一側障害例では原則として患側のみの値が低下する。一側迷路機能消失例では時間軸の対数に比例して VOR ゲイン値の左右差は直線的に減少し、発症約1年後には左右差が消失する。この VOR ゲイン値の左右差の変化と患側回転における固視障害は極めて良く平行する。一方、小脳障害例においては、VOR ゲイン値は正常値から1.0以上まで変動が極めて大きいが、増大するものが多く、我々の15例の観察では平均値 (0.85) は正常値のそれ (0.65) に比べ30%大きかった。

これらの結果より、暗所の VOR は本来の空間的視線固定機能と smooth pursuit 機能の発達により獲得した固視による抑制機能を両立させるための一種の中立状態と考えられる。

2. 空間的視線固定 spatial fixation

空間的視線固定は VOR の最大の目的であるので、

図4 一側障害例の能動回転における壁上の一点固視のゲインの平均値(4日—6ヶ月)。健側回転(a)と患側回転(b)。controlおよびbil CPは正常者20名および両側CP例5名の平均値とSDを示す。

VOR 機能の良否を調べるのに最も適した検査条件といえる。このことはVOR弓のいずれに障害がある場合にも固視の異常として出現し得る可能性と同時に、軽い障害は代償され易く、異常として検出し難いという相反する二つの性質を予想させる。従来の回転検査でこの観察条件が注目されなかったのは、能動的頭部回転記録の困難性と同時に、異常を検出できる小振幅、速い回転速度を採用しなかったこと、固線に占める smooth pursuit を過大評価した為と思われる。

一点固視の異常は視線記録で容易に知ることができる。正常者では少なくとも1.0 Hz まで極めて容易に固視できる。一側迷路機能消失例においては、著者らも予想しなかったことであるが、病初期より固視異常が代償されるまでのほぼ全経過(約1年)で代償性眼球運動の不足による固視の異常は患側回転においてのみおこる(図3, 4)。両側迷路機能消失例では代償はおこり難いが(図3), 徐々に改善が見られた。しかし、能動回転

図5 SCD 例の壁上の一点固視(a)と頭部に固定した眼前の一点固視(b)の記録。aでは代償性眼球運動の過多およびサッカードの dysmetria による固視障害が見られる。bでは固視抑制の著しい低下が見られる。

と受動回転で差が見られないことから、頸性眼反射の関与は少ないと思われる。迷路障害による固視の異常は回転頻度(速度)に著しく影響され、頻度が増すにつれ著しくなる。

一方、小脳障害例においても半数以上に固視の異常が観察された(図5)。小脳障害による固視の異常はVORゲイン値の異常を必ずしも伴わず、代償性眼球運動が過多(ゲイン1.0より大)のものと不足による(ゲイン1.0より小)ものと両者が見られた。しかし、固視によるVORの抑制機能の障害に比べれば、一点固視機能の障害の程度は軽い。この所見とVORゲイン値の増大傾向を考慮すると、空間的視線固定に占める小脳の役割は補助的なもので、ゲインの正確な調節機能の障害が固視の障害を来たと考えられる。

3. 固視によるVOR抑制 fixation suppression

正常者では振幅40°の場合0.33 Hzでは固視は良好であるが、0.67 Hz以上で固視によるVORの抑制が不完全となり、固視は悪化する。迷路機能障害例においては当然予想される如く、VORゲインの低下に伴い固視は一見良好となる。この際においても一側障害例では患側回転においてのみ固視が改善する。しかし、頭部に固定した眼前の一点固視におけるゲイン値とVORゲイン値の比を調べると、一側障害例、両側障害例いずれの

図6 頭部に固定した眼前の一点固視における受動回転のゲインの平均値とSD。小脳障害例(N=15, ○), 正常例(N=20, ●), 両側迷路機能消失例(N=3, △)。

場合においても正常者の値に近い。この所見は代償性眼球運動が減少すると一見固視による抑制は改善するが、固視による抑制の程度は代償性眼球運動の大小に影響されず、回転頻度に依存することを示している。

小脳障害例では固視による抑制は著しく不良であるが、0.85 Hz の速い回転においても頭部に固定した眼前の一点固視のゲイン値が VOR ゲイン値を上回することは稀であった(図5, 6)。これらの所見をまとめると、固視による VOR の抑制は迷路の障害では変化せず、小脳障害で著しく低下し、smooth pursuit の所見と良く一致していた。

おわりに

回転検査に対する著者の考え方および Active head rotation test の方法、所見について概略を述べた。臨床検査として応用する場合の本検査の守備範囲は

1. 日常的頭部運動における前庭眼反射機能の把握
2. 前庭眼反射の異常による固視機能障害の客観化
3. fixation suppression 機能の観察、定量化
4. 動揺視の客観化

などが考えられる。

本検査法は暗所、明所、一点固視による抑制という3つの観察条件で行う点では、OKN ドラム内の大振幅、低頻度の受動回転検査に似ている^{1,10,11)}。しかし、本検査の目的は日常的頭部運動中の固視に占める VOR 機能の把握であり、受動回転様式を採用する場合においてもこの目的に変わりはない。一方、OKN ドラムを使用する回転検査は OKN と回転中眼振の干渉作用を見ることを目的としており、異なった検査といえる。

参考文献

- 1) Baloh, R. W., Jenkins, H. A., Honrubia, V., Yee, R. D., and Lau, C. G. Y.: Visual-vestibular interaction and cerebellar atrophy. *Neurology* 29: 116-119, 1979.
- 2) Barr, C. C., Schultheis, L. W., and Robinson, D. A.: Voluntary non-visual control of the human vestibulo-ocular reflex. *Acta Otolaryngol* 81: 365-375, 1976.
- 3) Bizzi, E., Kalil, R. E. and Tagliasco, V.: Eye-head coordination in monkeys: evidence for centrally patterned organization. *Science* 173: 452-454, 1971.
- 4) Dichgans, J., Bizzi, E., Morasso, P. and Tagliasco, V.: Mechanisms underlying recovery of eye-head coordination following bilateral labyrinthectomy in monkeys. *Exp Brain Res* 18: 548-562, 1973.
- 5) 藤代武久: 受動回転と能動回転における代償性眼球運動および固視機能の比較. *耳鼻* 28: 479-489, 1982.
- 6) Gonshor, A. and Melvill Jones, G.: Extreme vestibulo-ocular adaptation induced by prolonged optical reversal of vision. *J Physiol* 256: 381-414, 1976.
- 7) Ito, M., Jastreboff, P. J. and Miyashita, Y.: Adaptive modification of the rabbit's horizontal vestibulo-ocular reflex during sustained vestibular and optokinetic stimulation. *Exp Brain Res* 37: 17-30, 1979.
- 8) Lisberger, S. G. and Fuchs, A. F.: Role of primate flocculus during rapid behavioral modification of vestibulo-ocular reflex. I. Purkinje cell activity during visually guided horizontal smooth-pursuit eye movements and passive head rotations. *J Neurophysiol* 41: 733-763, 1978.
- 9) Melvill Jones, G. and Davies, P.: Adaptation of cat vestibulo-ocular reflex to 200 days of optically reversed vision. *Brain Res.* 103: 551-554, 1976.
- 10) Mizukoshi, K., Kobayashi, H., Ohashi, N. and Watanabe, Y.: Quantitative analysis of the human visual vestibulo-ocular reflex in sinusoidal rotation. *Acta Otolaryngol Suppl* 393: 58-64, 1983.
- 11) Schmid, R. and Buizza, A.: Visual-vestibular interaction in oculomotor control: a model in-

- terpretation of pathological situations. *Adv Oto-rhino-laryngol* 30: 217-221, 1983.
- 12) 島崎千賀: 迷路障害例の側方注視における眼と頭の協同運動異常. *耳鼻* 28: 27-37, 1982.
 - 13) Shimizu, N., Naito, M. and Yoshida M.: Eye-head co-ordination in patients with Parkinsonism and cerebellar ataxia. *J Neurol Neurosurg Psychiatr* 44: 509-515, 1981.
 - 14) 鈴木淳一, 他: 平衡機能検査の現況に関するアンケート調査報告. *Equil Res.* 41: 298-303, 1982.
 - 15) Takahashi, M., Uemura, T. and Fujishiro, T.: Studies of the vestibulo-ocular reflex and visual-vestibular interactions during active head movements. *Acta Otolaryngol* 90: 115-124, 1980.
 - 16) Takahashi, M., Uemura, T. and Fujishiro, T.: Compensatory eye movement and gaze fixation during active head rotation in patients with labyrinthine disorders. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 90: 241-245, 1981.
 - 17) Takahashi, M., Uemura, T. and Fujishiro, T.: Compensatory eye movement and gaze fixation upon passive head-and body rotation and active head rotation. *Arch Otorhinolaryngol* 238: 157-166, 1983.
 - 18) Takahashi, M., Uemura, T. and Fujishiro, T.: Recovery of VOR and gaze disturbance in patients with unilateral loss of labyrinthine function. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 93: 170-175, 1984.
 - 19) 高橋正紘, 上村卓也, 新井寧子, 島崎千賀, 藤代武久: 能動的頭振り運動による前庭性眼反射の研究(予報) *耳鼻* 24: 566-570, 1978.
 - 20) 高橋正紘, 上村卓也, 藤代武久: 能動的頭振り運動による前庭眼反射の研究—正常者の定量的解析—. *日耳鼻* 82: 583-591, 1979.
 - 21) 高橋正紘: 前庭眼反射記録. *耳喉* 53: 727-733, 1981.
 - 22) 高橋正紘: 前庭機能検査—温度眼振検査. 回転検査めまい—臨床の基本(小池吉郎, 鈴木淳一, 時田喬加藤功編) p. 82-105, 現代医療社, 1983.
 - 23) 高橋正紘: 迷路障害例における眼と頭の協同運動障害—代償性眼球運動と固視の異常について—. *神経研究の進歩* 27: 900-905, 1983.
 - 24) Takemori, S: Visual suppression test. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 86: 80-85, 1977.
 - 25) Uemura, T., Arai, Y. and Shimazaki, C.: Eye-head coordination during lateral gaze in normal subjects. *Acta Otolaryngol* 90: 191-198, 1980.
 - 26) Uemura, T., Arai, Y. and Shimazaki, C.: Disturbances of eye-head coordination during lateral gaze in labyrinthine disease. *Ann New York Acad Sci* 374: 571-578, 1981.
 - 27) Yagi, Y., Shimizu, M., Sekine, S. and Kamio, T.: New neurotological test detecting cerebellar dysfunction. Vestibuloocular reflex changes with horizontal vision reversal prisms. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 90: 276-280, 1981.

Abstract

The conditions required for a new rotation test were defined as (1) to obtain findings not detectable by other tests, especially caloric tests, (2) to reflect the most important function of the vestibulo-ocular reflex and (3) to have specificity and sensitivity as a clinical test.

The active head rotation test is a new test in which the vestibulo-ocular reflex and smooth pursuit can be demonstrated by measuring the abilities of spatial fixation and fixation suppression during daily experienced fast head rotations in the light. The findings and clinical application of this test are described.