5. ENG（回転検査, OVAR）

肥塚 泉

Rotational Test, Off-vertical Axis Rotation

Izumi Koizuka

Department of Otolaryngology, St. Marianna University School of Medicine

Since our visual sense performs analysis best when images remain steady on the retina, the eyes need to move. To move the eyes, optokinetic and vestibular reflexes have evolved to stabilize images on the retina during head movements. The vestibular and optokinetic systems work together to maintain clear vision during head movements. Because natural head movements are of high frequency, the visual system is impeded by relatively slow retinal processing (about 70 msec), and cannot act rapidly enough to produce compensatory eye movements that can hold images steady on the retina. In contrast, the semicircular-ocular reflex (ScOR) has a latency of less than 16 msec. The ScOR promptly produces slow phase eye movements to compensate for head rotations. To evaluate the ScOR, caloric and rotational tests are routinely used. Bárány first described the velocity step test in 1907. In 1948, Van Egmond et al. described an elaboration of this test, which they called cupulometry. These tests are rarely performed today. They have proved to be highly unreliable and not sensitive enough in the detection of lesions, because of the difficulty in producing repeatable stimuli and making accurate response measurements. The modern era of rotational testing began in the 1960 s. Today all aspects of rotational testing including stimulus generation, response measurement, and data analysis are controlled by computer. The vestibular system also contains otolithic receptors that respond to linear accelerations of the head. The otolith-ocular reflex (OOR) becomes important when head translations cause a slip in the image on the retina. Off-vertical axis rotation (OVAR) is a stimulus wherein persons are rotated while the axis about which they are rotating is tilted with respect to gravity. Thus the OVAR can be used to assess the OOR. In this article, the principle and clinical application of rotational tests are introduced.

Key words: rotational test, earth vertical axis rotation, semicircular ocular reflex, off-vertical axis rotation, otolith ocular reflex

緒 言

平衡機能検査の役割およびその使命は、①患者

の訴える平衡異常を他覚的に把握しこれを記録・保存する、②平衡機能障害の病巣局在診断を行う、③治療効果の客観的な評価を行うなどである。平衡機能検査には、日常生活の範囲内におい

図1 a 回転検査に用いる回転椅子
b 検査にあたっては、被験者頭部を30°前屈させて、外側半規管が地面に対して水平になるように固定する。

て out put の状態を観察する検査と、軽い負荷を加えて out put の状態を観察する検査（誘発または負荷検査）、そしてさらに迷路、視器、深部知覚器などを積極的に刺激し、刺激に対する out put を定量的に観察および記録する刺激検査の3つに大きく分類することができる。回転検査はこれらの中で、3番目の刺激検査に属し、前庭系を刺激した結果、前庭一眼反射によって生じる out put としての眼振を観察・記録した後、これを評価する検査法である。本稿では、回転検査の原理ならびに臨床応用について述べる。

回転検査

頭部に回転角加速度が加わると、半規管系が刺激され、半規管一眼反射による眼球運動が生じる。この眼球運動を記録・解析することにより、前庭機能を評価するのが回転検査である。検査を行う際は図1 aに示すような回転刺激装置を用いる。被験者を椅子に座らせて頭部を30°前屈させ、外側半規管が地面に対して水平になるような位置に頭部を固定して検査を行う（図1 b）。頭部および体幹の固定が不完全な状態のまま刺激を加えると、体性感覚入力、頸部の捻転によって生

じる頸性一眼反射など、本来の検査目的である前庭一眼反射以外の刺激で生じる眼球運動が混入することがある。我々は前庭眼反射に対する体性感覚刺激の影響を、健康成人18名を対象として検討を加えた¹⁾。振り様回転刺激と体性感覚刺激を40分間、同時に加えて刺激前後の半規管一眼反射の利得を比較した。体性感覚刺激は、被験者の上腕外側に“コの字型”アームの先に設置した圧力子を軽く接触させた後、これを電磁石の力で被験者の両肩方向に椅子の回転に同期（同相ならびに逆相）させて動かすことによって加えた（図2）。体性感覚刺激を加えない状態で回転刺激を40分間、連続して加えたものを対象とした。体性感覚刺激を加えた群では刺激後、半規管一眼反射の有意な利得の低下（ $p < 0.05$ ）を認めた。対照群では、刺激前後で利得の変化を認めなかった。回転検査を行う際は、被験者の頭部や体幹の固定には細心の注意を払い、体性感覚刺激の影響を最小限にするような配慮が必要であることが再確認された。また眠気などで意識レベルが低下すると、眼振の解発が抑制されるので、検査中は暗算負荷などを与えて、被験者の覚醒状態の維持にも留意す

図2 体性感覚刺激装置

被験者の上腕外側に“コ”字型アームの先に設置した圧力子を軽く接触させ、これ全体を電磁石の力で被験者の両肩方向に動かし、上腕外側に交互に疼痛を与えない程度の圧刺激を加えることができる。回転椅子の動きに同期して作動する。

図3 過渡応答法の際に用いられる代表的な刺激様式

a インパルス応答, b インディシャル応答, c ランプ応答

ることも重要である。

1. 回転刺激検査の刺激様式および解析法

前庭眼反射のような、いわゆる反射系の特性を評価する際は、制御工学的手法が用いられる^{2)~4)}。一般に制御系は、入力信号の時間的変化に対して出力が定常状態に達するまで、いわゆる過渡現象を示し、これを系の過渡応答という。一方、系に

対する入力が定常値になったときの系の定常現象を定常応答という。制御系の特性を評価する際は、これら2種類の応答に着目して行なう。過渡応答に着目して系の解析を加える方法を過渡応答法、後者の定常応答に着目して解析を加える方法を周波数応答法という。

1) 過渡応答法

図4 回転後眼振
回転している椅子を急に止めると、負方向の強い回転角加速度が加わり、回転開始時とは反対方向に眼振が解発される。

図5 周波数0.2 Hz、最大角速度60°／秒の振子様回転刺激で得られた眼球運動波形
上段は回転椅子の位置、下段はDC-EOGを用いて記録した眼位

制御系に入力に加えられた後、定常状態に達するまでの過渡応答に着目して制御系の特性を解析する方法である。過渡応答を計測する際は通常、インパルス応答、インディシャル応答、ランプ応答の3種類の刺激様式が用いられる(図3)。これらの中で前庭眼反射の解析に用いられているのは、主にインディシャル応答である。インディシャル応答とは

$$f(t) = 1 \quad t \geq 0$$
$$f(t) = 0 \quad t < 0$$

で定義される単位ステップ入力に対する出力応答と定義することが出来る。具体的には衝撃的外力、つまり回転開始時および停止時に生じる、大きな角加速度を刺激に用いる。定速回転刺激による回転刺激検査がこれに相当する。ENGがなかった時代は、回転中に解発される眼振を観察することは不可能であったので、回転後眼振の持続時間を裸眼で観察していた。これにはBárány方式とよばれる20秒10回転法、Kobrakにより提唱された30秒5回転法などがある。時計方向回転と反

図6 健康成人14名を対象とした、Harmonic Acceleration Test (HAT) 各刺激周波数における前庭—眼反射の利得 (ボード線図) (●は平均値, バーは標準偏差を示す)

時計方向回転の2方向の回転刺激を加える。時計方向回転では、右外側半規管が優位に刺激されて右向き眼振が解発される。反時計方向回転では左外側半規管が優位に刺激されて左向き眼振が解発される。回転している椅子を急に止めると、負方向の強い回転角加速度が加わり、回転開始時とは反対方向に眼振 (回転後眼振) が解発される (図4)。すなわち時計方向回転停止後は左外側半規管が優位に刺激されて左向き眼振が、反時計方向回転停止後は右外側半規管が優位に刺激されて右向き眼振が解発される。Bárány方式では、健康成人の眼振持続時間は10~40秒、左右差は0~8秒である⁵⁾。30秒5回転法では健康成人の眼振持続時間は裸眼観察では5~22秒、左右差は5秒、Frenzel眼鏡を装着した場合、眼振持続時間は11~25秒、左右差は4秒である⁶⁾。Bárány方式は回転角加速度が強く、めまいや悪心などの前庭自律神経反射を引き起こすことが多い。これらの回転刺激法は刺激量が不正確で、定常的に一定の加速度を与えることが困難であること、また回転時加速度と停止時減速度の間の時間があまりにも短く、刺激を反復すると反応が次第に減弱する現象 (response decline: RD 現象) が生じやすいなどの

図7 a 垂直軸回転検査 (Earth vertical Axis Rotation: EVAR)
b 偏垂直軸回転検査 (Off-vertical Axis Rotation: OVAR)

欠点を有するため現在は、両側前庭機能廃絶の定性的診断するのに用いられる以外、後に述べる振子様回転刺激にその主役の座を譲ることとなった。

2) 周波数応答法

正弦波入力に対する線形系の出力は入力と同様正弦波となるが、振幅は変化し位相はずれる。振幅の変化や位相のずれの度合いは入力の周波数に応じて変化する。出力正弦波と入力正弦波の振幅の比、つまり利得とこれら両者の位相差を周波数の関数として表現するものを周波数応答法という。振子様回転検査は、周波数応答法の代表的な検査法である。振子様回転刺激は、過渡応答法の1つである定速回転刺激よりも、刺激様式が生理的でありその結果、被検者に前庭自律神経反射による嘔気や嘔吐のような不快な副反応を引き起こすことが少ない。また、半規管刺激量の正確な設定が可能である、温度刺激検査の様にその結果が外耳、中耳の構造に左右されない、RD現象が生じにくいなどの利点を有する。一方、両側半規管を同時に刺激するために、一側半規管の機能を知ることが困難であり、めまい・平衡障害患者の部位診断を行なうことは原則として不可能である。現在は主に、これらの患者の経過観察に用いられている。刺激法には単一刺激周波数で行う方法と、いくつかの刺激周波数を組み合わせて行う方法とがある。後者のうち、刺激周波数を0.01 Hz, 0.02 Hz, 0.04 Hz……1.28 Hzのように、等比級数

図8 定速度 OVAR の bias component と modulation component

定速度回転刺激で OVAR を行うと傾斜後ある一定の潜時において、定方向性、小振幅の眼振が持続的に解発される。持続して解発される眼振を bias component とよぶ。また眼振の緩徐相速度は被験者頭部の重力方向の変化に応じて、正弦波様に変調を受けたような変動を示す。この正弦波様の変動を modulation component とよぶ。

的に変化させて行う場合を特に、Harmonic Acceleration Test (HAT) と呼ぶ。刺激速度と得られた眼振緩徐相速度との比より利得、位相を求めて、左右方向についてこれらを比較する。図5に、周波数 0.2 Hz、最大角速度 $60^\circ/\text{秒}$ の振子様回転刺激で得られた眼球運動波形を示す。図6に、健康成人14名を対象とした、HAT 各刺激周波数における前庭—眼反射の利得（ボード線図）を示す⁷⁾。一側前庭機能障害患者の急性期は、右方向と左方向でのそれぞれの利得に差を認めるが、前庭代償の進行とともにこれが減少する。この特性を利用して、一側前庭機能障害患者の回復過程の評価に用いられている。

2. 偏垂直軸回転刺激検査 (Off-vertical Axis Rotation : OVAR)

一般的な回転検査 (垂直軸回転刺激検査 : Earth Vertical Axis Rotation : EVAR) は主に、外側半規管の機能を知る検査法である (図7a)。図7bに示すように、椅子の回転軸に傾斜を加えて回転刺激を加える方法を OVAR と呼ぶ。回転軸を斜めにして回転刺激を加えることにより、回転に応じて被験者頭部に加わる重力加速度の方向が連続的に変化し、耳石—眼反射による眼振が解発される。刺激様式としては、定速度回転刺激法と、振子用回転刺激法の2種類が用いられている。椅

子の傾斜角度は 30° ならびに 20° が用いられている。回転軸の傾斜角度を 90° にすると、耳石器に対する刺激が最大となる。この場合を特に Earth Horizontal Axis rotation (EHA) とよぶ⁸⁾⁹⁾。

1) 定速度回転刺激

定速度回転刺激で OVAR を行う際は、先に椅子を傾斜させてから回転刺激を加える方法 (TR法 : tilt then rotation method) と、最初に椅子を等速度で回転させてから、傾斜を加える方法 (RT法 : rotation then tilt method) の2つの方法がある。いずれの方法で行っても検査法の意義は同じであるが、RT法の場合は回転開始時、および回転終了時に半規管と耳石器の両者が同時に刺激され、被験者に前庭—自律神経反射を引き起こし、動揺病症状を誘発する可能性がTR法よりも高くなることが知られている。定速度回転刺激 OVAR では回転刺激開始後、外側半規管—眼反射由来の眼振は比較的速やかに消失しその後は、定方向性、小振幅の眼振が持続的に解発される。持続して解発される眼振を bias component とよぶ。また、持続して解発される眼振の緩徐相速度は、被験者頭部の重力加速度に対する方向に応じて正弦波様に変調を受けたような変動を示す。この正弦波様の変動を modulation component とよぶ (図8)。これら2つの要素はいずれも耳石器に由来

図9 フロセミド投与前後の OVAR modulation component の変化 (メニエール病確実例 4 例, 正常被験者 4 例)

図10 フロセミド投与前後の OVAR bias component の変化 (メニエール病確実例 4 例, 正常被験者 4 例)

して出現する眼球運動である。modulation component は主に被験者頭部の両耳方向 (inter-aural direction) に直線加速度刺激を加えた際の, 卵形囊一眼反射による眼球運動とほぼ同様の意義を有する。一方 bias component は RT 法で定速度刺激を加えた場合, 傾斜を加えてから数秒の潜時をおいてから出現する事から modulation component とは異なり, 耳石器からの入力といった速度蓄積機構 (velocity storage mechanism: VSM) に蓄えられた後, これが放出されて出現する眼振と推察されている^{10)~13)}。定速度偏垂直軸回転刺激に

よる OVAR は耳石器機能のみではなく, 耳石一眼反射の VSM の機能を知ることが可能となる。一側前庭機能障害患者では, modulation component には変化は認められないが, bias component には左右差が生じる¹⁴⁾。耳石一眼反射を引き起こすには一側迷路があれば十分であるが, VSM の機能を維持するには両側迷路が必要であることを示す結果と考えられている¹⁰⁾。

メニエール病確実例 4 例および正常被験者 4 名を対象に, bias component と modulation component の振幅の左右差 (DP%) をフロセミド投与

表1 垂直軸回転と偏垂直軸回転の利得（平均値±標準偏差）
健康人（23名），BPPV 症例（18症例）

	周波数	0.4 Hz			0.8 Hz			検定結果
	症例数	中心軸回転	偏垂直軸回転		中心軸回転	偏垂直軸回転		
			nose-down	nose-up		nose-down	nose-up	
健常人	23	0.88±0.69	0.75±0.68	0.51±0.37	0.30±0.25	0.40±0.52*	0.35±0.46	N.S.
BPPV 全症例	18	0.72±0.57	0.71±0.67	0.59±0.50	0.59±0.59	0.38±0.35	0.22±0.18	P<0.05
半規管結石型	10	0.74±0.46	0.84±0.81	0.67±0.45	0.57±0.75	0.41±0.40	0.21±0.18	N.S.
クプラ結石型	8	0.70±0.72	0.56±0.45	0.51±0.57	0.63±0.33	0.35±0.28	0.23±0.19	P<0.05
垂直半規管	8	0.60±0.37	0.53±0.40	0.57±0.29	0.31±0.19	0.28±0.26	0.19±0.14	N.S.
外側半規管	10	0.82±0.70	0.86±0.82	0.62±0.63	0.82±0.70	0.47±0.39	0.24±0.21	P<0.05
ふらつきあり	9	0.65±0.45	0.70±0.84	0.32±0.34	0.63±0.76	0.30±0.21	0.18±0.16	P<0.05
ふらつきなし	9	0.80±0.69	0.72±0.50	0.87±0.49	0.55±0.38	0.47±0.44	0.26±0.19	N.S.

22名の結果

前後で比較した¹⁵⁾。左右差（DP%）の算出には次式を用いた。

<メニエール病確実例>

左右差（DP%）＝

$$\frac{\text{健側向回転} - \text{患側向回転}}{\text{健側向回転} + \text{患側向回転}} \times 100(\%)$$

<コントロール群>

$$\text{左右差 (DP\%)} = \frac{\text{右向回転} - \text{左向回転}}{\text{右向回転} + \text{左向回転}} \times 100(\%)$$

modulation component についてはフロセミド投与後，メニエール病確実例では振幅の左右差（DP%）が減少する傾向を示したが，正常被験者については一定の傾向を認めなかった（図9）。一方，bias component についてはフロセミド投与後，メニエール病確実例，正常被験者の両者共，一定の傾向を示さなかった（図10）。卵形嚢に生じた内リンパ水腫がフロセミド投与によって改善し，卵形嚢—眼反射の利得が改善した結果と思われる。フロセミドテストと OVAR を組み合わせることによって，内リンパ水腫疾患における卵形嚢の内リンパ水腫の有無を知ることが可能となる。

2) 振子様刺激

OVAR を振子様刺激で行うと，重力方向に対する被験者頭部のオリエンテーションは複雑なパターンとなる。外側半規管と卵形嚢，球形嚢が時間

図11 偏垂直軸回転検査（Off-vertical Axis Rotation：OVAR）

差を持って連続的に刺激されるため，解発される眼振の緩徐相速度の変化も回転刺激の基本周波数に対する反応に，高調波成分が混入した複雑なパターンとなる。つまり振子様刺激の OVAR のみでは，耳石器機能を評価することは不可能である。振子様刺激の OVAR の場合は，同周波数，同回転角加速度で施行した垂直軸回転刺激（Earth Vertical Axis Rotation：EVAR）で得られた眼球運動と比較することによって，耳石機能の評価が可能となる。

良性発作性頭位めまい症 (Benign Paroxysmal Positional Vertigo: BPPV) 患者18名 {(後半規管型半規管結石症) 6名, 前半規管型2名, (半規管結石症1名, クブラ結石症1名) 外側半規管型10名 (半規管結石症3名, クブラ結石症7名)}, 健康成人23名を対象とし OVAR と EVAR を施行して両者の利得を比較検討した (表1)^{16)~18)}。傾斜角度は30°の nose-down (図11 a) および nose-up (図11 b), 周波数は0.4 Hz, 0.8 Hz, 最大角速度は60°/秒で行った。健康成人では OVAR と EVAR で, 有意な利得の差を認めなかった。BPPV 群では0.8 Hz nose-up OVAR にて有意な利得の低下 ($p<0.05$) を認めた。さらに BPPV 群を半規管結石症群, クブラ結石症群に分けた場合, 半規管結石症群では有意な差を認めなかったがクブラ結石症群では0.8 Hz nose-down OVAR, nose-up OVAR とも, 有意な利得の低下 ($p<0.05$) を認めた。また, 垂直半規管型 (後半規管型, 前半規管型), 外側半規管型に分けた場合, 外側半規管型の0.8 Hz, nose-up OVAR にて, 利得の有意な低下 ($p<0.05$) を認めた。ふらつきあり群となし群に分けた場合, ふらつきあり群の0.8 Hz nose-up OVAR で, 利得の有意な低下 ($p<0.05$) を認めた。BPPV においては, 耳石器機能障害が存在するため, 耳石—眼反射の利得が低下したと思われる。また, 半規管結石症よりもクブラ結石症でより変化が大きく出たのは, 小耳石片の付着でクブラの質量が変化し, 半規管—眼反射の動特性にも変化をきたしたためと考えられる。ふらつきあり群で有意に利得が低下したことは, BPPV におけるふらつきには, 半規管結石症だけでなく, 耳石器機能障害も関与している可能性が示唆された。

文 献

- 1) 三上公志, 鈴木一輝, 宮本康裕, 他: 体性感覚入力が半規管—眼反射に及ぼす影響. *Equilibrium Res* 68: 28-33, 2009
- 2) Robinson DA: The use of control system analysis in neurophysiology of eye movements. *Ann Rev Neurosci* 4: 463-503, 1981
- 3) Young LR, Oman CM: Model for vestibular adaptation to horizontal rotation. *Aerospace Med* 40: 1076-1080, 1969
- 4) 肥塚 泉, 久保 武: 前庭—眼反射のサイバネティクス(II). *ブレインサイエンス* 6: 73-75, 1995
- 5) 金野 巖: 前庭器. *日本耳鼻咽喉科全書*, 第1巻, 第1冊, 基礎編. 34-99頁, 日本医書出版, 東京, 1953
- 6) 内藤 僑, 松永 亨: 前庭反応の定量的検査. *平衡神経の検査法—その理論と実際—日本平衡神経科学会編*. 71-93頁, 金原出版, 東京, 1970
- 7) 肥塚 泉, 武田憲昭, 荻野 仁, 他: 総合的平衡機能検査装置(MVM-C 2)による Centric 及び Eccentric VOR 検査. *Equilibrium Res Suppl* 4: 63-67, 1988
- 8) Wall III C, Furman JM: Nystagmus responses in a group of normal humans during earth-horizontal axis rotation. *Acta Otolaryngol* 108: 327-335, 1989
- 9) Furman JM, Wall III C, Kamerer DB: Earth horizontal axis rotational responses in patients with unilateral peripheral vestibular deficits. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 98: 551-555, 1989
- 10) Cohen B, Suzuki J, Raphan T, et al.: Selective labyrinthine lesions and nystagmus induced by rotation about off-vertical axes. Functional basis of ocular motility disorders. pp 337-346, Pergamon Press, Oxford and New York, 1982
- 11) Cohen B, Suzuki J, Raphan T: Role of the otolith organs in generation of horizontal nystagmus: effects of selective labyrinthine lesions. *Brain Res* 276: 159-164, 1983
- 12) Goldberg JM, Fernández C: Physiological mechanisms of the nystagmus produced by rotations about an earth-horizontal axis. In ed Goldberg JM, Fernández C. Mechanism of nystagmus. pp 40-43, New York Academy of Science, New York, 1981
- 13) Harris LR: The eye movements evoked by a rotating linear acceleration vector in the cat depend on a central velocity storage mechanism. *Brain Res* 437: 393-396, 1987
- 14) Furman JM, Schor RH, Kamerer DB: Off-vertical axis rotational responses in patients with unilateral peripheral vestibular lesions.

- Ann Otol Rhinol Laryngol 102: 137-143, 1993
- 15) 肥塚 泉：メニエール病の診断と治療. Otol Jpn 20: 45-51, 2010
- 16) Sugita-Kitajima A, Azuma M, Hattori K, et al.: Evaluation of the otolith function using sinusoidal off-vertical axis rotation in patients with benign paroxysmal positional vertigo. Neurosci Lett 422: 81-86, 2007
- 17) Sugita-Kitajima A, Koizuka I: Recovery of otolith function in patients with benign paroxysmal positional vertigo evaluated by sinusoidal off-vertical axis rotation. Neurosci Lett 436: 124-127, 2008
- 18) 肥塚 泉：耳石—眼反射を用いた耳石器検査法. Equilibrium Res 69: 161-167, 2010