垂直半規管刺激性回転後眼振
—健常耳での外側半規管刺激との比較—

守田 雅弘¹⁾・武田 憲昭¹⁾

肥塚 泉²⁾・久保 武¹⁾

Vertical Semicircular Canal-Stimulative Post-Rotatory Nystagmus:
Comparison of the Nystagmus Induced by Lateral Semicircular
Canal-Stimulation in Normal Adult Subjects

Masahiro Morita¹⁾, Noriaki Takeda¹⁾,
Izumi Koizuka²⁾, Takeshi Kubo¹⁾

¹⁾ *Department of Otolaryngology, Osaka University Medical School*

²⁾ *Department of Otolaryngology, Saint Marianna Medical School*

To test vertical semicircular canal function, we developed a new and convenient type of rotation-chair, in which subjects sat with their heads and backs tilting backward 60° and with their heads rolling laterally 45°. A CCD camera and infrared video system was used to record eye movement in the dark. Normal subjects were rotated with an acceleration of 2°/sec² until the angular velocity reached 60°/sec. The rotation was then stopped with a deceleration of 100°/sec² after per-rotation nystagmus subsided. The maximal slow phase eye velocity (MSPEV) of vertical components of vertical semicircular canal (VSCC)-induced post-rotatory nystagmus (PRN) were analysed.

Subjects were first rotated with laterally rolling head angles of 30°, 45° and 60° to examine the optimal angle for stimulating VSCC.

MSPEV of posterior semicircular canal (PSCC)-induced PRN was largest with a head angle of 60°. While MSPEV of anterior semicircular canal (ASCC)-induced PRN did not vary with the laterally rolling head angle. MSPEV of the vertical components of VSCC-induced PRN was then compared with that of the horizontal components of lateral semicircular canal (LSCC)-induced PRN. MSPEV of both PSCC- and ASCC-induced PRN were significantly smaller than that of LSCC-induced PRN.

MSPEV of ASCC-induced PRN was slightly smaller than that of PSCC-induced PRN, though individual differences varied widely. However, there were very small left-right differences in MSPEV of both PSCC- and ASCC-induced PRN. Therefore, it is suggested that our PRN function test involving VSCC can diagnose vestibular diseases.

Key words: vertical semicircular canals, post-rotatory nystagmus, infra-red CCD camera, vertical nystagmus

¹⁾ 大阪大学医学部耳鼻咽喉科学教室

²⁾ 聖マリアンナ医科大学耳鼻咽喉科学教室

はじめに

回転検査は従来より外側半規管系に施行されており、回転後眼振の時定数や眼振最大緩徐相速度の解析などはもとより、回転中眼振の眼球速度から計算される前庭動眼反射の検討も多くなされている。我々は、回転椅子の背もたれと頭部位置を工夫することで、垂直半規管系の刺激が可能な回転刺激装置を開発し、すでに回転後眼振を中心に報告を行ってきた¹⁾。今回は、まず、各々の垂直半規管に適切な刺激を与える頭部位置を調べる目的で、頭部の側方への回旋角度について検討を行った。次に垂直半規管刺激性回転後眼振を同一人の外側半規管刺激性回転後眼振と比較し、垂直半規管と外側半規管の特性について検討した。

対象と方法

回転検査の対象としたのは、24歳から33歳までの中内耳疾患を認めない健常成人14名（平均年齢28歳）で、この内7名については、頭部側方回旋角度を3通りに設定する検討も行った。検査装置は、独自に開発した頭部後屈可能な第一医科製の回転椅子¹⁾を用い、赤外線 CCD カメラ付ビデオにて水平および垂直方向の眼球運動を ENG 記録し、コンピューター解析装置を用いて検討した。垂直半規管に関しては垂直方向すなわち上眼瞼または下眼瞼向きの眼振を、外側半規管に関しては左右方向の眼振を解析した。

外側半規管刺激の場合は頭部を前屈 30° にし、垂直半規管刺激の場合は鉛直面に対して背もたれより後方へ 60° 傾け、さらに左または右側方へ 45° 回旋した状態で回転刺激を与えた。回旋検査装置の写真を図 1 に示す。被検者の頭部中心が回転軸からずれないように椅子全体をずらすとともに背もたれの部分から後屈できるようになっている。ただし、頭部の側方への回旋角度について検討する場合は、その角度を 30°, 45°, 60° の 3通りに設定した。頭部位置の詳細については著者の他論文¹⁾に譲る。

垂直半規管に対する刺激を行うための回転様式は、コンピューター制御により始動角加速度 $2^\circ/\text{sec}^2$ で 30 秒間回転し、 $60^\circ/\text{sec}$ の一定角速度にて誘発眼振が消失するまで (30 秒間以上) 回転を続けた。その後、停止角加速度 $100^\circ/\text{sec}^2$ にて回転を停止し回転後眼振のうち、原則として、初回出現の眼振以外の眼振のうち最大眼球緩徐相速度

図 1 第一医科株式会社との共同開発の回転椅子と検査中の実際の頭部位置の写真

(以後 MSPEV と略す) を抽出し比較した。さらに同一の回転様式で、同一被検者に外側半規管に対する回転検査も異なった日に行った。なお、今回の報告文中では、便宜上、回転検査に関連して『半規管の興奮刺激』という言葉を用いる代わりに『半規管の刺激』とした。例えば、回転停止時に右の外側半規管に ampullopetal な内リンパ流動が引き起こされ興奮刺激となって生じる眼振を右の外側半規管刺激性後眼振とした。垂直半規管系についても、例えば、回転停止時に右の前半規管に ampullofugal な内リンパ流動が引き起こされて興奮刺激となって生じる眼振を右の前半規管刺激性後眼振とした。

垂直半規管由来の上または下眼瞼向眼振の MSPEV でみる DP (眼振方向優位性) については、上眼瞼向きを正として以下の式により V (Vertical)-DP% を求めた。

$$V\text{-}DP\% =$$

$$\frac{(\text{左右の後半規管刺激性 MSPEV の和} - \text{左右の前半規管刺激性 MSPEV の和}) \times 100}{\text{左右の前半規管および後半規管刺激性 MSPEV の総和}}$$

左右の前半規管および後半規管刺激性 MSPEV の総和

外側半規管由来の水平性眼振の MSPEV でみる DP については、右向きを正として以下の式により H (Horizontal)-DP% を求めた。

$$H\text{-}DP\% =$$

$$\frac{(\text{右の外側半規管刺激性 MSPEV の和} - \text{左の外側半規管刺激性 MSPEV の和}) \times 100}{\text{左右の外側半規管刺激性 MSPEV の総和}}$$

左右の外側半規管刺激性 MSPEV の総和

さらに、片側の前および後半規管各々の刺激性回転後眼振の MSPEV の和を対側の反応と比較した。すなわち、左右の垂直半規管の反応性の差の指標として、右側を正として、以下の式より Vertical canal asymmetry (V-As)% を求めた。

$$V\text{-}As\% =$$

$$\frac{(\text{右の前および後半規管刺激性 MSPEV の和} - \text{左の前および後半規管刺激性 MSPEV の和}) \times 100}{\text{左右の前および後半規管刺激性 MSPEV の総和}}$$

左右の前半規管および後半規管刺激性 MSPEV の総和

結 果

代表例について図 2 に、頭部側方回旋角度 45° の場合の、後半規管刺激性回転後眼振の緩徐相速度の経時変化を示す。この例では、左側の後半規管刺激性眼振の MSPEV は 28°/sec であり、右側の 24°/sec と比べ左側の眼振反応がやや強い傾向が認められた。次に頭部の側方への回旋角度を 30°, 45°, 60° の 3 通りに変化させた場合、後半規管または前半規管刺激性回転後眼振の MSPEV を健常成人 7 名にて比較した (図 3)。後半規管の刺激時には、頭部の側方への回旋角度が 60° の場合に MSPEV は大きくなった。前半規管の刺激時には、3 通りの頭部の側方への回旋角度による MSPEV の明らかな差を認めなかった。

図 4 に健常成人 14 名の外側および垂直半規管刺激性回転後眼振の MSPEV を示す。垂直半規管

図 2 左右の後半規管刺激性回転後眼振の経時変化 (代表例)

図 3 頭部の側方回旋角度別の後半規管および前半規管刺激性回転後眼振の最大緩徐相速度 (MSPEV) による比較 (健常成人 7 名)

の刺激時の MSPEV は、右前半規管: 20.1 ± 11.0 (平均±標準偏差), 左前半規管: 21.0 ± 8.4 , 右後半規管: 22.6 ± 11.3 , 左後半規管: 23.6 ± 12.8 であった。外側半規管の刺激時の MSPEV は、右: 29.2 ± 13.6 , 左: 31.1 ± 13.2 であった。半規管刺激時の MSPEV は、外側半規管, 後半規管, 前半規管の順に大きくなり、外側半規管刺

図4 垂直および外側半規管刺激性回転後眼振の最大緩徐相速度 (MSPEV)

A:前半規管, P:後半規管, L:外側半規管
r:右 l:左

横軸には刺激(興奮刺激)を受ける各々の半規管を, 縦軸には各々の刺激時に生じる回転後眼振の MSPEV の値(健康成人14名の平均±標準偏差: SD)を示す。

図中 □: 外側半規管刺激性回転後眼振の MSPEV の平均値

■: 垂直半規管刺激性回転後眼振の MSPEV の平均値

図5 垂直性眼振の眼振方向優位性 (V-DP), 水平性眼振の眼振方向優位性 (H-DP) および垂直半規管の反応の左右差 (V-As)

U:上眼瞼向き D:下眼瞼向き R:右 L:左
健康成人14名の平均±標準偏差: SD

図中 □: 外側半規管刺激性回転後眼振の方向優位性の平均値

■: 垂直半規管刺激性回転後眼振の方向優位性・反応の左右差の平均値

激時の MSPEV は, 前および後半規管の刺激時の MSPEV よりも有意に大きかった (t 検定にて $P < 0.05$)。

健康成人14名の垂直性の眼振の方向優位性を示す V-DP% は, 2.3 ± 13 となり, わずかに上眼瞼向きの眼振が優位であったが, 水平性の眼振の方向優位性を示す H-DP% は -0.8 ± 8.9 となりほぼ均衡していた。また, 垂直半規管反応性の左右

差である V-As% は -1.3 ± 8.4 で左右ほぼ均衡していた (図5)。

考 案

垂直半規管刺激性の回転後眼振の緩徐相速度の経時的な変化を図2に示した。この例では, 回転停止後に MSPEV の出現する時間が左右で若干の差を認めたが, 垂直半規管系刺激性回転後眼振の MSPEV のパターンは, 以前, 八木らの報告した外側半規管の回転後眼振のパターン²⁾に類似していた。このことより, 半規管刺激性回転後眼振において, MSPEV が, 外側半規管の場合と同様, 垂直半規管においてもその機能の指標になりえるものと思われた。

次に, 垂直半規管系の回転検査における頭位の至適条件を検討する目的で, 頭部の側方への回旋角度を変化させた。その結果, 図3に示すように後半規管の刺激の場合は, 45° よりもむしろ 60° の時のほうが MSPEV が大きくなった。コンピューターを用いてヒトの側頭骨の3次元解析を行った高木らの報告³⁾では, 後半規管は矢状面より 56° の, 前半規管は 41° の角度を有しており, 従来からの各々 45° ずつの角度を保つとする報告⁴⁾とは異なるとしている。高木らの報告に基づく, 後半規管が回転面に含まれるようにするためには頭部の側方への回旋角度は 34° が適切であることになり, 今回の検査で頭部側方回旋角度が 30° の場合に後半規管刺激性回転後眼振が最も強く認められるべきであった。しかし, 実際には, 60° の場合の方が眼振反応が強かったことは, 解剖学的な位置関係と生理学的な機能とが必ずしも一致するものではないことを示唆するものであると思われた。ただし, 前半規管の刺激の場合には頭部側方回旋角度による差は認められず, 後半規管と前半規管の各々の刺激(興奮刺激)時の眼振の性状や起こり方に違いがあるものと思われた。以上の頭位の至適条件を決める検討から, 頭部の側方回旋角度は, 後半規管刺激では 60° であったが, 前半規管刺激では差は明らかではなかった。また, 後半規管において解剖学的な頭部側方回旋角度の至適角度が 30° と考えられたため, 我々の以下の検討では頭部側方回旋角度を 60° と 30° の間で古典的な適正位置である 45° とした。

各半規管の刺激別に回転後眼振の MSPEV を

i) 左側前半規管刺激性眼振の発現機序

ii) 垂直半規管刺激性回転後眼振と刺激半規管

頭位	回転方向	刺激半規管 (興奮刺激)	眼振
後屈 60° 頭位			
右向 45°	右	右前半規管	下眼瞼向・回旋（時計回り）
	左	左後半規管	上眼瞼向・回旋（反時計回り）
左向 45°	右	右後半規管	上眼瞼向・回旋（時計回り）
	左	左前半規管	下眼瞼向・回旋（反時計回り）

図 6 片側前半規管刺激性眼振の発現機序と回転様式別の刺激半規管と眼振

みた場合、外側半規管刺激性回転後眼振の MSPEV はどの垂直半規管刺激性回転後眼振の MSPEV よりも大きかった (図 4)。回転後眼振にて前庭機能を比較する場合、徳増ら⁵⁾ はばらつきの多い MSPEV よりも眼振持続時間の左右差を見ることが重要であるとしている。しかし、鋭敏な CCD カメラによる ENG 検査を用いる場合には、逆に眼振の終末点の判定が困難なこともあり、むしろ MSPEV が結果的に良い指標になり得たものと思われた。

外側半規管刺激時の MSPEV が垂直半規管刺激時の MSPEV よりも大きかったことより、外側半規管系の刺激時の眼振反応が垂直半規管系の場合に比較して優位であると思われた。このことは、回転中の反応ではあるものの ENG 検査を用いて垂直半規管刺激時の MSPEV を調べ、外側半規管系の域値が垂直半規管系のそれよりも低いとした報告⁶⁾ と一致するものであった。ただし、前庭神経炎のように明らかな前庭機能障害を伴う疾患耳において、その経過をみていく場合は MSPEV よりも time constant, いわゆる時定数の方が意味があるとされており²⁾⁷⁾、今回の検討結果をそのまま疾患耳にあてはめるわけにはいかず、今後、時定数による検討も必要であると思われた。

図 5 に示すように眼振方向の優位性をみた場合、外側半規管刺激で特に明らかな左右の差がなかったことは健康成人においては当然の結果であったが、垂直半規管系でみた場合、わずかに上眼瞼向きの眼振反応が優位であった。しかし、下眼瞼向きの眼振が優位な例もあり、上・下眼瞼方向では個体差が非常に大きく、結果的に V-DP の標準偏差が大きくなったものと思われた。この個体差は、垂直半規管の機能を我々の開発した椅子と同様の椅子を用いて振り様回転の回転中眼振の MSPEV で検討した飯田らの報告⁸⁾ でも比較的大きかったが、上・下眼瞼方向の眼振の優位性は認めなかったとしており、これは振り様回転の刺激条件の違いによるものと思われる。

%As. では、左側の前半規管と後半規管の各々の刺激時の MSPEV と対側である右側の前半規管と後半規管の各々の刺激時の MSPEV とを比較したが、外側半規管における眼振方向優位性 (右向きがプラス) と同様にはほぼ 1 % に近く、また、標準偏差も 9 % 以内であった。以上より、病態的な意味はともかくとして、左右の垂直半規管系のバランスを示す %As. は、外側半規管刺激における眼振方向優位性、すなわち DP と同等に前庭疾患の診断に役立つものと思われた。

本研究において、垂直半規管刺激性回転後眼振

の発現機序について、図 6 (i) に示す。左側の前半規管が Ewald の第一法則にあるように ampul-lofugal な内リンパ流により興奮刺激を受けた場合、同側の上直筋と対側の下斜筋が収縮するために、この半規管面で眼球が上転し緩徐相となり、下眼瞼向きに急速相（図中矢印は緩徐相）を生じることが単一半規管神経を電気刺激することで眼球運動を調べた Suzuki⁹⁾ や Cohen¹⁰⁾ らの報告にある通りである。これを図 6 (ii) に今回の我々の椅子での回転後眼振にあてはめて考え、眼振の垂直および回旋方向をいずれも患者側から見た方向で示す。右側への頭部側方回旋（右向き）で右方向（時計回り）への回転後には左側の後半規管が刺激（興奮刺激）を受けることになり、それぞれ、下眼瞼向きで時計回り、上眼瞼向きで反時計回りの垂直回旋混合性眼振を生じたものと考えた。左向きの場合も同様に左側の前半規管と右側の後半規管の刺激を受けた結果の眼振と考えた。

今回、垂直半規管の刺激に基づく眼振の検討を行うにあたって垂直成分に関する解析のみを行ったが、前庭由来の眼球運動における回旋成分の解析の必要性を示唆する研究報告も少しずつみられるようになってきた。ヒトにおいては温度眼振検査にて Yagi ら¹¹⁾ は、温度眼振成分に混在する垂直半規管機能を調べるためには回旋成分の解析が必要であると述べ、Fetter ら¹²⁾ は良性発作性頭位めまい症の頭位変換眼振について回旋成分も調べ、後半規管病変の診断に有用であると報告している。また、動物では Arai ら¹³⁾ は温度眼振検査における頭位と眼振回旋成分との関連より垂直半規管の特性を明らかにし、Suzuki¹⁴⁾ らは猿にて半規管の遮断実験を行っているが、回旋成分が垂直半規管機能をみるうえで重要であるとしている。現在、臨床的に回旋成分をとらえることは、サーチコイルを用いた眼球運動記録解析装置¹⁵⁾ で可能であるが、磁場の条件設定やコンタクトレンズの装着の問題など検者、被検者とも手間がかかる。Yagi ら¹¹⁾ の開発した赤外線 CCD カメラ付きのゴーグルにて ENG 記録しコンピューター処理に基づく解析で虹彩紋理の動きから回旋速度を自動的に計算してしまう方法が最も簡便ではないかと思われるが、眼振の回旋軸が複雑であったり、解像度の問題など今後の課題も残されている。

徳増らは回転後眼振検査は回転中眼振検査に比較してその診断的意義に乏しいとしているが、比較的容易に小設備で短時間で行い得るという点で利便性も多い。外側半規管に関する回転後眼振をみる検査法は、Barany が報告して以来数多くあるが、垂直半規管系の回転後眼振に関する報告は我々のもの¹⁾ 以外は皆無に等しい。この理由として、特殊な椅子による特殊な頭位を考えつる必要があったことおよび従来の ENG 記録装置では垂直方向の眼球運動記録が不完全であったことがあげられる。今後 CCD 付きの赤外線カメラが普及するにしたがって、水平方向と同様に垂直方向の眼振検査も容易になってくるものと思われる。

回転刺激による眼振反応は、一側の興奮刺激と対側の抑制刺激との組み合わせによって生じているものであるが、本研究においては混乱を避ける目的で、便宜上、興奮刺激を生じている方の半規管名で比較した。その結果、回転後眼振の MSPEV について、垂直半規管と外側半規管の反応を比較した場合、外側半規管の MSPEV の方が大きかった。また、個体差はあるものの後半規管の（興奮）刺激時の眼振反応が強いものがやや多かった。同一健康成人において外側半規管と同様に垂直半規管刺激性回転後眼振も解析可能であったことから、今後、垂直半規管においても、一側前庭神経切断術や内耳破壊術を受けたヒトにおいて、片側の興奮刺激のみの機能を調べ、垂直半規管の特性をより明らかにしていくことで疾患耳の前庭機能診断に役立てていく必要があると思われる。

まとめ

1) 健康成人を対象に、CCD カメラ付き赤外線ビデオ ENG 装置と第一医科株式会社との共同開発の椅子を用いて垂直半規管刺激性回転後眼振を記録解析した。

2) 頭部の側方回旋角度別に、前または後半規管の興奮刺激性回転後眼振の最大緩徐相速度 (MSPEV) を比較した場合、前半規管の（興奮）刺激性の場合は差はなかったが、後半規管の場合は側方 60° 回旋の角度の時に最も大きくなった。

3) 各半規管（興奮）刺激性回転後眼振の MSPEV にて比較すると、外側半規管刺激性の場合に、前および後半規管刺激性の場合よりも大きくなった。

4) 垂直半規管刺激性回転後眼振の方向優位性(DP)をMSPEVにてみた場合、後半規管(興奮)刺激性の上眼瞼向き眼振が優位な例がやや多かったが、個体差が顕著であった。

5) 右側の前半規管と後半規管の各々の(興奮)刺激性回転後眼振のMSPEVを対側である左側のMSPEVと比較すると(%As.), ほぼ左右のバランスは保たれていた。

6) 以上より、外側半規管の場合と同様に、回転中眼振と違って比較的容易に施行し得る垂直半規管刺激性回転後眼振をみる検査法は、今後疾患耳に対しても垂直半規管系の機能検査法として資することができるものと思われた。

本論文は第5回後眼振研究会に於いて発表されたものである。

文 献

- 1) 守田雅弘：垂直半規管刺激性回転検査—正常耳での回転後眼振の観察—。Equilibrium Res 52: 461-465, 1993
- 2) 八木伸也, 田林徳昭, 内藤 泰：回転後眼振—病的例の検討—。Equilibrium Res 48: 144-150, 1988
- 3) Takagi A, Sando I, Takahashi H: Computer-aided three-dimensional reconstruction of semicircular canals and their cristae in man. Acta Otolaryngol (Stockh) 107: 362-365, 1989
- 4) Curthoys IS, Blanks RHI, Markham CH: Semicircular canal functional anatomy in cat, guinea pig and man. Acta Otolaryngol (Stockh) 83: 258-265, 1977
- 5) 徳増厚二：前庭機能検査における回転中ならびに回転後眼振の検討。日耳鼻 65: 8-33, 1962
- 6) Decher H: Experimental labyrinthine tests on isolated individual semicircular canals as a fitness test for astronauts. Aerospace Med 40: 1203-1208, 1969
- 7) Magnusson M, Brantberg K, Pyykkö I, et al:

Reduction of the time constant in the VOR as a protective mechanism in acute vestibular lesions. Acta Otolaryngol (Stockh) Suppl 468: 329-332, 1989

- 8) 飯田政弘, 石田克紀, 野村公寿, 他：非減衰振子様回転刺激を用いた垂直半規管機能の評価—健康成人と高齢者との比較—。Equilibrium Res 54: 416-424, 1995
- 9) Suzuki JI, Goto K, Tokumasu K, et al: Implantation of electrodes near individual vestibular nerve branches in mammals. Ann Otol Rhinol Laryngol 78: 1-12, 1969
- 10) Cohen B, Suzuki JI: Eye movements induced by ampullary nerve stimulation. Am J Physiol 204: 347-351, 1963
- 11) Yagi T, Kurosaki S, Yamanobe S, et al: Three-component analysis of caloric nystagmus in humans. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 118: 1077-1080, 1992
- 12) Fetter M, Sievering F: Three-dimensional eye movement analysis in benign paroxysmal positioning vertigo and nystagmus. Acta Otolaryngol (Stockh) 115: 353-357, 1995
- 13) Arai Y, Suzuki JI, Hess BJM, et al: Caloric nystagmus in three dimensions under otolithic control in rhesus monkeys; preliminary report. ORL 52: 218-225, 1990
- 14) Suzuki JI, Kodama A, Cohen B, et al: Canal plugging in the rhesus monkey; a tool to study the contribution of individual canals to nystagmus generation. Acta Otolaryngol (Stockh) Suppl 481: 91-93, 1991
- 15) 荻野貞雄, 加藤 功, 佐久間惇, 他：サーチコイルシステムによる眼球運動記録。Equilibrium Res 53: 229-236, 1994

(原稿到着：平成8年2月19日)
(別刷請求先：守田雅弘)
(〒562 大阪府箕面市萱野5-7-1)
(箕面市立病院耳鼻咽喉科)