シリーズ教育講座「めまい平衡検査の原点から現状、そして未来へ」

2. Head Impulse Test (HIT) と video Head Impulse Test (vHIT)

新藤 晋¹⁾²⁾

Head Impulse Test (HIT) and Video Head Impulse Test (vHIT)

Susumu Shindo¹⁾²⁾

¹⁾*Department of Otorhinolaryngology, Saitama Medical University Faculty of Medicine, Japan.*

²⁾*Department of Neurology, Saitama Medical University Faculty of Medicine, Japan*

Head impulse test (HIT), first described in 1988 and conducted at the bedside, is a safe and quick way of assessing semicircular canal function in patients with peripheral vestibular loss. This test is practical even in sick patients and needs no equipment. The clinician identifies overt (=visible) catch-up saccades back to the target after passive head rotation as a clinical sign of canal paresis. However, it is known that some patients with absence of vestibular function do not make overt saccades, but instead make covert catch-up saccades during the passive unpredictable head turn, which are extremely difficult for the clinician to detect by the naked eye.

In 2009, a new lightweight, nonslip, high-speed video-oculography system (vHIT; video head impulse test) that measures the eye velocity during head rotations was developed. This system is easy to use in a clinical setting, provides an objective measure of the vestibulo-ocular reflex (VOR), and detects both overt and covert catch-up saccades in patients with vestibular loss.

To understand the principle of HIT/vHIT, it is very important to understand the physiology of eye movements, especially the VOR and saccades. In this article, the characteristics of HIT/vHIT are discussed, while explaining the physiology of eye movements.

Key words: Head Impulse Test, video Head Impulse Test, catch-up saccades, vestibulo-ocular reflex

1. はじめに

Head Impulse Test (以下 HIT)¹⁾ と video Head Impulse Test (以下 vHIT)²⁾³⁾ はともに半規管機能検査の一つである。HIT/vHIT は同じ半規管機能検査である温度刺激検査に比べて、①検査時間が短いこ

と、②侵襲が少ないこと、③生理的な回転刺激で検査できること、などから近年注目を集めている検査である。本稿では HIT/vHIT の原理を中心に解説する。

2. 歴史的変遷

1988年に Halmagyi と Curthoys は簡便な半規管機能検査として Head Impulse Test (HIT) を発表した¹⁾。HIT の優れている点は、装置や器具を一切

¹⁾ 埼玉医科大学耳鼻咽喉科

²⁾ 埼玉医科大学神経眼科

図1 健常者に右向き水平方向の head impulse 刺激を与えた際の前庭動眼反射経路

MLF : medial longitudinal fasciculus 内側縦束
ATD : ascending tract of Deiters' ダイテルス上行路

使用せず素早く検査ができることである。HIT は何の準備も必要無く10秒ほどで検査ができることから、急性めまいのスクリーニング検査として世界で広く行われている。一方で HIT には①肉眼で診断するために主観が入る、②肉眼では見ることができない Catch Up Saccades (CUS, 後述) が出現するタイプの半規管機能低下を診断できない、③半規管機能の定量的な評価ができない、などの課題がサーチコイルを用いたデータにより当初から明らかになっていた。サーチコイルは費用や侵襲の面の問題で日常臨床への利用は困難であったことから、侵襲の少ないビデオカメラを用いた定量的 HIT の研究が20年近く行われ、2009年に video Head Impulse Test (vHIT) が発表された²⁾。

3. 原理

3-1. 半規管前庭動眼反射

ここでは水平半規管における前庭動眼反射の原理について述べる。安静時、半規管ニューロンは両側とも約100回/秒の発火頻度で前庭神経核に興奮性入力を送っている。ここで頭部を素早く右に回転させると半規管前庭動眼反射 (VOR) の働きにより目が左に動くが、この反射には複数の経路が存在する (図1 A)⁴⁾。右の外側半規管が興奮して発火頻度

が上昇すると同側の右前庭神経核の興奮性ニューロンと抑制性ニューロンがともに興奮する。右前庭神経核興奮性ニューロンの興奮は対側の左外転神経核を経由して右眼の内直筋と左眼の外直筋を収縮させ、右前庭神経核抑制性ニューロンの興奮は同側の外転神経核を経由して右眼の外直筋と左眼の内直筋を弛緩させる。その結果、右外側半規管の興奮刺激は両眼が左に動くように働く。この時、左の外側半規管は逆に抑制され発火頻度が減少する。左外側半規管への抑制刺激は同側の左前庭神経核の興奮性ニューロンと抑制性ニューロンをとともに抑制する。左前庭神経核興奮性ニューロンの抑制は、対側の右外転神経核を経由して左眼の内直筋と右眼の外直筋を弛緩させる。また左抑制性ニューロンの抑制は結果として興奮と同じ効果をもたらし、同側の外転神経核を経由して左眼の外直筋と右眼の内直筋を収縮させる。その結果、左外側半規管の抑制刺激は、右外側半規管の興奮と同じように両眼を左側に動かすように働く。さらに前庭神経核間には交連抑制が存在し、上記の働きを増強する。つまり頭を右に回転させると数多くのニューロンが反応し、全て眼を左に動かすよう協調して働く。ここでもし右半規管機能が低下した場合、左右どちらに回転した場合でも

VOR 発現に障害が生じることになる (図1 B, C)。

3-2. HIT/vHIT が回転検査でありながら一側半規管機能低下の患側が分かる理由

温度刺激検査が一側の半規管だけを刺激できるのに対し、回転検査はどの方向に回しても両側の半規管が刺激される。このため回転検査では一側前庭機能低下例の患側は分からないとされてきた。ここで HIT/vHIT が回転検査でありながら一側前庭機能低下の患側が分かる理由について説明する。

HIT/vHIT は安静時から頭部回転時に生じる左右

半規管ニューロン発火頻度の「変化」を見る検査であり、それぞれの発火頻度の変化量の和（注：実際には単純な和ではない）を、VORにおいて目を動かす“パワー”と考えると理解しやすい。パワーの源となる半規管ニューロンにおける発火頻度の増加と減少それぞれの変化量は、一定の角加速度以下では対称であるが、それ以上になると非対称になる (図2 A)⁵⁾。ここで右一側半規管機能廃絶患者に低速、高速で head impulse 刺激を与えた場合の発火頻度の変化量を模式図で表してみると図2 Bのよう

図2 A：角加速度刺激を与えた際の半規管ニューロンの発火頻度の変化をみたもの。興奮刺激を与えると角加速度に比例して発火頻度は増加する(灰色両矢印)。一方抑制刺激を与えると、同様に発火頻度は低下するものの0以下には低下しない(白色両矢印)。
B：右半規管機能廃絶患者に低角加速度刺激、高角加速度刺激をそれぞれ与えた際の発火頻度の変化量。低角加速度刺激では患側回転、健側回転いずれにおいても発火頻度の低下量に差が少なく、患側が分からないが、高角加速度刺激では患側回転において、健側回転より発火頻度が大きく低下し、肉眼で見える saccade が出現するので患側決定が可能である。

注：図2は HIT の原理を理解しやすくするため、文献5「Goldberg JM, Fernandez C: Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. I. Resting discharge and response to constant angular accelerations. J Neurophysiol 34: 635-660, 1971」の Fig. 11 を著者が手を加えて作成した。

になる。

まず振子様回転検査のように比較的低い角加速度で刺激を与える検査では

| 興奮刺激による発火頻度の変化量 | $\approx$

| 抑制刺激による発火頻度の変化量 |

となり、左右どちらに回転させても VOR gain の低下はほぼ同じとなることから一側半規管機能低下例の患側は分からない。一方 HIT/vHIT のような高角加速度刺激では、興奮による発火頻度は最大角加速度に比例してそのまま上昇するのに対し、抑制による発火頻度の減少は0回/秒でプラトーになり頭打ちとなるため

| 興奮刺激による発火頻度の変化量 | $>$

| 抑制刺激による発火頻度の変化量 |

となり、右(患側)回転時の VORgain は左(健側)回転時の VORgain より有意に小さくなる。

この現象を HIT で見ると、患側に回転させた時

は視線が視標から大きくズレるので肉眼でもわかる代償性眼球運動 (Catch Up Saccade, 以下 CUS) が出現する。健側に回転させた際にも CUS が出現するが、CUS が小さいため肉眼では捉えられない。以上の原理により HIT で一側半規管機能低下例の患側が分かるのである。vHIT ではさらに細かく、head impulse 刺激中における頭と目の角度比 (ICS impulse) もしくは刺激中のある時点における両者の角速度比 (Eye See Cam) の絶対値を VOR gain で表すことで“パワー”を定量化することが可能である(注：HIT/vHIT は角加速度刺激の検査であるが、インパルス刺激のパターンと刺激時間(約 150 msec) がともにほぼ一定であるため、角加速度、角速度、角度それぞれに比例関係があるとみなすことができる(図3))。健常者の VOR gain は約1であり、これは入力(頭部回転)と出力(目の回転)の比が1であることを意味する。ICS impulse を例

図3 vHITにおける角度、角速度、角加速度の関係。分かりやすく head impulse の刺激時間を 100 msec とし、head impulse の波形を三角波で近似している。
 最大角速度 400°/sec で vHIT を行った場合（検査A）、角度、最大角加速度はそれぞれ 40°、4000°/sec² となる。次に最大角速度 100°/sec で vHIT を行った場合（検査B）、角度、最大角加速度はそれぞれ 10°、1000°/sec² となる。この時、検査AとBそれぞれにおける角度比、最大角速度比、最大角加速度比はいずれも 1 : 4 と同じである。

にすると、健常者は頭を右に10度素早く回転させた時、反射的に目が左に10度動くことで視線と視標は一致し、注視し続けることができる。ところが VOR gain が0.4の半規管機能低下患者の場合、頭が右に10度動くのに対し目は4度しか左に動かないので視線と視標には6度のズレが生じ、head impulse 刺激後に視標を再捕捉する CUS が現れる。

よくある誤解が「右半規管機能廃絶患者に vHIT を行った場合、右（患側）回転時の VOR gain は0になるはず」である。前述した通り右が廃絶していても、正常な左からの半規管からの入力があるので、患側回転で VOR gain が0になることはないし、健側回転で VOR gain が1になることもない。前庭代償の時期や回転速度など条件によって異なるものの、右廃絶時の VOR gain は、患側回転で0.2～0.4程度、健側回転で0.7～0.9程度である。

3-3. HIT/vHIT は他の眼球運動には無い VOR の特徴を利用した検査である。

HIT/vHIT は、他の眼球運動（急速眼球運動（saccade）、追跡眼球運動（pursuit）、視運動性眼球運動（optokinetic）等）には無い VOR の二つの特徴を巧みに利用した検査である。

VOR だけの特徴とは、「潜時が非常に短いこと」と「半規管からの入力を受けていること」である。潜時について考えてみると、他の眼球運動が約 70

msec～200 msec と潜時がいずれも長いのに対し、VOR の潜時は 8～15 msec と非常に短い。特に HIT/vHIT のように視標と視線に突然大きな gap が生じる状況では、pursuit や optokinetic のようなゆっくりした眼球運動では代償しきれないので、最大角速度が 700°/sec に達する saccade を用いて視標を捕捉する（CUS）⁴⁾。ただし saccade の潜時は一般に 200 msec 前後と VOR よりかなり遅いので、約 150 msec の短い impulse 刺激であれば、回転終了後すなわち頭部回転が停止してから CUS が出現することになる。よく HIT/vHIT に慣れていないと回転刺激がゆっくりであったり、head impulse 刺激後にピタッと止めず元に戻してしまうことがある。刺激停止までに時間がかかりすぎると CUS が頭部回転中に出現してしまい肉眼で CUS を見分けることができなくなるため、手技を十分に習熟する必要がある。また一部の患者において CUS の潜時が短く、肉眼では検査に習熟している者が HIT を行っても CUS が視認できない“covert” CUS (covert とは「目に見えない」の意) が現れることが分かっている²⁾。つまり HIT で CUS が認められないからと言って半規管機能が正常であるとは限らないことに注意が必要である。もう一つの入力について考えてみると、他の眼球運動が視覚情報などを入力としているのに対し、VOR だけが半規管からの入力を受けている。

図4 vHIT lateral mode における頭部回転前 (A) と右向き10度回転後 (B) それぞれの頭の位置

つまり極めて短い時間で回転刺激を与えることにより、半規管成分だけを抽出しつつ半規管機能低下時に現れるCUSを見分けることが出来るのである。

なお、振子様回転検査のようにゆっくり時間をかけて刺激するVOR検査では、他の眼球運動成分が入らないよう完全暗所で行うことが必要である。一方HIT/vHITは刺激時間を短くすることで他の眼球運動成分を除去するため暗所で行う必要が無い。むしろ縮瞳していると瞳孔が眼瞼に隠れることが無く、検査の精度が上がるため明るい部屋で行うべきである。

4. 手技と方法

4-1. HITの手技と方法

HITの手技は、まず検者は被験者と正対するように座り、被験者に検者の鼻先を見続けるよう指示する。次に検者は被験者の側頭部を両手でしっかり把持し、速く・小さく回転させるhead impulse刺激を与える。健常者にhead impulse刺激を与えると、前庭動眼反射(VOR)の働きにより視標(鼻先)を見続けることができる。しかし半規管機能低下例の患側方向にhead impulse刺激を与えると、VORが充分働かないために視標を見続けることができず、代償性眼球運動(Catch Up Saccade, 以下CUS)が刺激開始から約200 msec後に出現する。

HITでは左右3回ずつhead impulse刺激を与え、2回以上CUSを肉眼で確認できた場合、半規管機能低下があると判定する。

4-2. vHITの手技と方法① lateral mode (外側半規管機能を評価するモード)

vHITは検査中の頭位と眼位を同時記録するため、vHIT専用の機器が必要である。機器の種類にはカメラとジャイロセンサーを内蔵した軽量ゴーグルを頭部に装着するタイプ(ICS impulseやEye See Camなど)と、据え置きカメラを用いて眼位と頭位を同時に測定するタイプ(vHIT Ulmer)の2つがある。以下、当科で使用しているICS impulseを例にして説明する。

1. まず被験者を壁から約1~1.5 m離れた椅子に座らせ、壁を正面視できる高さに視標を設置する

2. vHIT用のゴーグルを装着する。

3. 関心領域(ROI)の設定を行う。被験者が視標を正面視している状態で、瞳孔が中心に来るように関心領域の位置を調節する。

4. キャリブレーションを行う。ICS impulseは水平方向のみで行うのに対し、Eye See Camでは水平+垂直方向でキャリブレーションを行うなど、機種によりその方法は異なる。

5. 検者は被験者の後ろに立ち、頭部またはあご

図5 A : vHIT LARP (Left Anterior/Right Posterior) mode における被験者の位置。前方の視標に対し右方向に45度回転させ、頭部を前後方向に head impulse 刺激を与えた際に左前半規管、右後半規管だけが刺激されるように検査を行う。

を両手でしっかり把持する。次に被験者に前述の視標を注視するよう指示し、水平方向に被験者の頭部を約10度急速に回転させ、元に戻さずそのまま止める。首を速く回転させることに抵抗があるかもしれないが、図4のように10度の変化は僅かであり、被検者になって経験してみると首への負担がほとんどないことが分かる。施行回数は機種やバージョンによって異なるため、それぞれ指定された回数まで検査を行う。

4-3. vHIT の手技と方法② LARP/RALP mode (垂直半規管機能を評価するモード)

LARP は Left Anterior-Right Posterior の略であり、左前半規管と右後半規管の機能を評価するモードである^{6)~8)}。同様に RALP は Right Anterior-Left Posterior の略であり、右前半規管と左後半規管の機能を評価するモードである。ここでは LARP を例にとって説明する。基本的な準備や手技は lateral mode と同じであるが、左前半規管と右後半規管だけを刺激するよう、被検者を壁と正対した状態から全体に水平方向に右に45度回転させた状態、つまり被検者の左頬が前になった状態で頭部を前後方向に約10度急速に回転させて行う(図5)。RALP では逆に被検者を左に45度回転させ、被検者の右頬が前になった状態で、同じく前後方向に回転させて行う。

4-4. vHIT の手技を方法③ SHIMP (Suppressive Head IMPulse Paradigm)

SHIMP とは Suppressive Head Impulse Paradigm の略であり⁹⁾¹⁰⁾、通常行う HIT/vHIT では視標は壁などに固定 (earth fixed target) されているのに対し、SHIMP では被検者の頭部に固定されたレーザー光を視標にして検査を行う。つまり SHIMP とは頭の動きに同期して動く視標 (a target that moved with the head) を見る検査である。SHIMP では HIT/vHIT とは異なる反応が見られる。例えば健常者に右向きに SHIMP を行うと、直後は潜時の早い VOR の働き (約 10 msec) により頭は動いても視線は元の場所からほとんど動かない。ところが注視すべき視標 (レーザー光) は頭と同時に右に動いているので、視標を注視するための CUS が約 150~250 msec の潜時で出現する。この時の眼の動きを頭の位置を基準にして考えると、まず VOR の働きで左向きに動き、その後 CUS により VOR とは反対の右向きに目が動くことになる。興味深いことに、SHIMP における CUS の発現パターンは HIT/vHIT のそれと真逆の関係になる。すなわち、健常者は HIT/vHIT では CUS を認めないが、SHIMP では明瞭な CUS を認める。一方両側前庭機能廃絶例では HIT/vHIT では明瞭な CUS を認めるが、SHIMP では CUS が認められない。

5. HIT/vHIT の生理学的意義

1. 回転検査でありながら半規管機能の評価ができ、患側が分かる。

HIT/vHIT は回転検査でありながら半規管機能の評価ができ、患側が分かる。同じ半規管機能検査でもカロリックテスト（温度刺激検査）とは異なった刺激方法であることから、2つの検査を行うと疾患毎に異なる結果が得られることがある。例えばメニエール病では、温度刺激検査で一側半規管機能が低下しているのに HIT では両側正常と、両者の結果が乖離しやすいことが知られている。

2. 垂直半規管の機能が分かる。

vHIT の登場によって、臨床現場において垂直半規管の機能の評価することが可能となった。vHIT に VEMP を組み合わせることで、末梢前庭器（3半規管、2耳石器）全てを評価することが可能である。

6. 評価と診断

半規管機能は、一般的に VOR gain で行われる。健常者の VOR gain の正常下限は水平半規管では 0.8、垂直半規管では 0.7 であり（ICS impulse の場合）、それぞれの値を下回った場合、半規管機能低下と診断する。ただしアーチファクトなどの影響により、見かけ上 VOR gain が低下することがある。そのため VOR gain の低下だけでなく、十分な最大角速度を持つ CUS が出ていることを半規管機能低下の条件に付け加えることでより確実に半規管機能低下を診断することが可能となる。

7. 将来と展望

HIT の発表から 30 年、vHIT の発表から 10 年がそれぞれ経過したが、まだ新たな知見が次々に報告されている分野である。しかし本邦は vHIT 専用機器のうち 2 機種（ICS impulse と Eye See Cam）の医療機器認証がようやく済んだ段階であり、まだまだ十分に普及していないのが現状である。今後、HIT/vHIT の知識、技術が普及し、日本から世界に新た

な知見が次々に出ることを期待したい。

文 献

- 1) Halmagyi GM, Curthoys IS: A clinical sign of canal paresis. Arch Neurol 45: 737-739, 1988
- 2) Weber KP, MacDougall HG, Halmagyi GM, et al.: Impulsive testing of semicircular-canal function using video-oculography. Ann NY Acad Sci 1164: 486-491, 2009
- 3) 新藤 晋, 杉崎一樹, 伊藤彰紀, 他: 新しい半規管機能検査法 video Head Impulse Test. Equilibrium Res 73: 22-31, 2014
- 4) 小松崎 篤, 篠田義一, 丸尾敏夫: 眼球運動の神経学. 51-57頁, 医学書院, 東京, 1985
- 5) Goldberg JM, Fernandez C: Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. I. Resting discharge and response to constant angular accelerations. J Neurophysiol 34: 635-660, 1971
- 6) Macd (D) ougall HG, McGarvie LA, Halmagyi GM, et al.: The video Head Impulse Test (vHIT) detects vertical semicircular canal dysfunction. PloS one 8: e 61488, 2013
- 7) MacDougall HG, McGarvie LA, Halmagyi GM, et al.: Application of the video head impulse test to detect vertical semicircular canal dysfunction. Otol Neurotol 34: 974-979, 2013
- 8) 新藤 晋: video Head Impulse Test. Equilibrium Res 74: 94-97, 2015
- 9) MacDougall HG, McGarvie LA, Halmagyi GM, et al.: A new saccadic indicator of peripheral vestibular function based on the video head impulse test. Neurology 87: 410-418, 2016
- 10) 新藤 晋: SHIMP による前庭機能評価. Equilibrium Res 77: 177-179, 2018

利益相反に該当する事項はない。