7. 温度刺激検査

今井 貴夫

Caloric test

Takao Imai

*Department of Otorhinolaryngology - Head and Neck Surgery,
Osaka University Graduate School of Medicine*

The caloric test has been used worldwide for many years. It is a clinical test that is performed to evaluate the function of the lateral semicircular canal, by irrigation of the external auditory canal with warm or cold water. This irrigation generates a convective flow in a duct of the lateral semicircular canal, stimulating or suppressing the canal, and inducing nystagmus and vertigo. Robert Bárány termed the neurologic response to the irrigation of water of different temperatures, the “caloric response.” The duration or the maximum angular velocity of the slow phase of the nystagmus is used as the evaluation index. Caloric stimulation is the only test in which the right ear and the left ear can be stimulated separately. When the caloric response is weak, canal paresis is diagnosed. The caloric test was established by Bárány, who was awarded the 1914 Nobel Prize in Physiology/Medicine for it. To obtain a strong response, the recording must be done while the subject is in complete darkness. During the caloric test, a visual suppression test is also performed to check the activity of the central vestibular system. During the caloric response, the subject looks at a visual target for 10 seconds in light. The slow phase eye velocity of the caloric nystagmus should reduce, and the reduction ratio is used as the evaluation index in the visual suppression test. In this review, the history, basic neurophysiological findings, recording methods, data interpretation, and future of the caloric and visual suppression tests are described.

Key words: caloric response, visual suppression test, lateral semicircular canal, nystagmus, Nobel prize

はじめに

温度刺激検査は、外耳道へ温水または冷水を注入することで外側半規管に対流による内リンパ流動を引き起こし、その結果解発される眼振を指標として左右の外側半規管の機能を個別に評価する検査である。この検査はウィーンの耳鼻咽喉科医 Robert Bárány により確立され、彼はこの功績により1914

年にノーベル生理学・医学賞を授与された。温度刺激検査中に、被験者に視標を固視させ、固視抑制 (visual suppression) による温度眼振の抑制を観察することにより、中枢性前庭機能を評価することができる。本稿では、Bárány の温度刺激検査の確立までの歴史を振り返り、温度刺激検査、固視抑制の神経回路、検査の実際について述べ、今後の臨床応用について解説する。

図1 温度刺激検査の神経回路
右外耳道に温水を注入した際に解発される温度眼振の神経回路を示す。
(文献5より引用)

温度刺激検査に至る歴史

外耳道の冷水刺激によってめまいが生じることは、Bárányによる温度刺激検査の確立の約30年前から知られており、脊髄半切障害で有名なモーリシャスの神経科医、生理学者であるBrown-Séquard CEが自著の中でその現象に関し記載している¹⁾²⁾。しかし、このめまいが生じる機序は全く解っていなかった。

イタリアの解剖学者、外科医であるAntonio Scarpaやスウェーデンの生理学者、解剖学者であるGustav Retziusによって前庭器官は三つの半規管と球形嚢、卵形嚢の二つの耳石器から構成されていることが示されたが、これらがどのような刺激を感受しているのかはわかっていなかった。フランスの生理学者であるMarie Jean Pierre Flourensは鳩において外側半規管を破壊すると水平に回転し、垂直半規管を破壊するとでんぐり返しをするという異常行動が出現することを発見し³⁾、半規管が平衡維持に関与している器官であることを示した。しかし、半規管が障害されるとめまい症状が生じるという考えには至らなかった。チェコの生理学者、解剖学者

であるJan Evangelista Purkinjeは彼自身、および精神病患者が狂暴になっているときに吐き気が生じるまで回転させめまいを起こさせると、狂暴性が治まり従順になることを示し、また、めまいが生じているときに眼振が解発されていることを発見した。Purkinjeは感覚器が回転感覚を感じているという考えには至らず、めまい症状には頭位が影響するので、めまい症状は脳によって直接生じていると考えていた。このように脳の障害によって起こることをフランスの医師であるProsper Ménièreが示した。オーストリアの生理学者、内科医、精神科医であるJosef BreuerはFlourensが示した半規管破壊時に出現する鳩の異常行動が、半規管を破壊することなく回転刺激を与えた際にも一過性に出現することを発見し、半規管の内リンパ流動が異常行動を誘発していることを示した。また、この異常行動は鳩が回転性めまいを感じている結果生じていると考えた。Breuerはまた、両側の三半規管を破壊して回転させると鳩の異常行動が出現しないことを発見し、三半規管は回転刺激を感受する感覚器で、三半

図2 固視抑制 (visual suppression) の神経回路
 視覚情報が小脳片葉皮質を介し温度眼振の固視抑制を起こす。
 (文献6より引用)

規管が強く刺激されると回転性めまいに伴う異常行動が出現することを示した。

オーストリアの物理学者である Ernst Mach はヒトで半規管以外が回転感覚を起こすことはありえないことを証明し、その形態からも半規管が回転感覚を感じるのに適していることを示した。スコットランドの化学者である Alexander Crum Brown は、めまい症状のある人となない人を比較し、半規管が回転感覚を感受する感覚器であることを Breuer や Mach と同時期に示した。

ハンガリーの医師である Endre Högyes がうさぎにて回転時に解発される眼振の形成に延髄の聴神経の接合部位と四丘体の間の脳幹が関与しており、脳幹のその他の部位は関与していないことを示した。また、Högyes は動物の一侧および両側の三半規管を破壊すると破壊直後に著しい異常行動が出現し、それは徐々に治まっていくことを示した。また、一侧の三半規管破壊後に生じた異常行動は反対側の三半規管を破壊することにより弱まることを発見し、両側の三半規管が互いに影響し合っていることを示した。ドイツの生理学者である Ernest Julius Richard Ewald は、動物の頭部の回転により誘発される半規管の内リンパ流動により眼振が生じることを示した。ドイツの耳科医である Jansen は化膿性中耳炎に対し、半規管を除去した際に解発される眼振を

詳細に観察し報告した。観察された眼振は中耳炎により生じたと考えており、半規管を除去したために生じたとは彼は考えていなかったが、この報告により、ヒトの三半規管の障害により眼振が生じることが明らかになった。

二つ一組である感覚器により感受される視覚や聴覚に関しては感覚器の一侧だけを刺激することにより、一侧ごとの機能検査を行うことができる。しかし、回転を感受する感覚器である三半規管に関しては回転により一侧だけを刺激することは不可能であるので、Breuer は回転刺激を用いた三半規管の機能検査を行っていたが、一侧ごとの機能を評価することができなかった。Purkinje やドイツの神経精神科医の Eduard Hitzig がガルバニック検査を開発し、前庭の一侧だけを刺激することに成功したが、ガルバニック刺激は臨床検査に用いるには適しておらず、現在に至っても使用されていない。左右の三半規管機能を別々に評価することができる臨床検査の開発が望まれていた。

Bárány は上記の研究者らの研究から、外耳道への注水により半規管が刺激される結果、温度眼振やめまいが誘発され、温度眼振を指標にすることにより半規管機能を左右別々に評価できる、という考えに至っていた。Bárány は半規管機能が障害されると考えられるひどい化膿性中耳炎患者の外耳道に注

水を行い、めまいおよび眼振が誘発されないことを示し、温度眼振が半規管機能の指標になることを証明した。しかし、外耳道への注水により半規管が刺激される機序が解らなかった。Bárány は自分自身と患者の外耳道に体温の水を注入した際にはめまいおよび眼振が生じないことと、体温より高い温度もしくは低い温度の水を注入するとめまいおよび眼振が生じることを確認し、めまいおよび眼振の誘発には注入水の温度が重要であることに気付いた。お風呂を沸かした際に対流が起こることから、外耳道への注水により半規管に対流が生じていると考えた。体温より高い温度の水を注入した場合に半規管内に生じる対流の向きは低い温度の水を注入した場合とは逆向きになるので、解発される温度眼振の向きは逆向きになると考えられる。また、頭位を180°回転させて外耳道へ注水すると半規管内に生じる対流の向きは相対的に逆向きになるので、頭位を180°回転させると温度眼振の向きが逆転すると考えられる。注水の温度や頭位を変化させ解発された温度眼振の方向の変化を示すことにより、対流による半規管の内リンパ流動が生じた結果、温度眼振が解発されるという内リンパ対流学説を提唱し温度刺激検査を確立させた⁴⁾ (<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1914/barany/lecture/>)。

温度刺激検査の基礎となる神経経路

外耳道への注水により三半規管の内、最も外耳道に近い位置に存在する外側半規管に対流が生じ温度眼振が解発されるので、温度眼振は外側半規管の機能を主に反映している。外側半規管は回転刺激に反応する平衡器官である。頭部を右に回転させると慣性力により右外側半規管の内リンパ液が膨大部方向（向膨大部方向）に流れ、クプラが偏倚し有毛細胞が興奮する結果、右向きの水平性眼振が解発される。臥位にて右外耳道に温水を注入すると対流により右外側半規管に向膨大部方向の内リンパ流動が生じるので頭部を右に回転させた場合と同様の右向きの水平性眼振が解発される。以下に右外耳道に温水を注入した際の右向きの温度眼振形成の神経回路について説明する（図1）⁵⁾。被験者が臥位にて頭部を30°前屈させると外側半規管の形成する平面は重力軸と平行になるので外側半規管に対する対流の効果が最も大きくなる。この頭位にて右外耳道に温水を

注入すると外耳道に一番近い位置にある外側半規管の図1①で示した部位の温度が上昇する。するとその近辺にある内リンパ液の温度も上昇し、その比重が小さくなる結果、内リンパ液が重力に逆らい上昇し、対流が起こる（図1②）。この対流により向膨大部方向の内リンパ流動が生じるので右外側半規管の有毛細胞は興奮し、右前庭一次神経の活動が増加する。右前庭一次神経の活動の増加により右前庭神経内側核の興奮性および抑制性 type I ニューロンが刺激される。右興奮性 type I ニューロンは右動眼神経核内の運動ニューロン、および左外転神経核内の運動ニューロンと介在ニューロン（このニューロンは右動眼神経核内の運動ニューロンと連絡している）を興奮させることにより、左眼の外直筋と右眼の内直筋を収縮させる。右抑制性 type I ニューロンは右外転神経核内の運動ニューロン、および左の介在ニューロン（このニューロンは左動眼神経核内の運動ニューロンと連絡している）を抑制することにより、右眼の外直筋と左眼の内直筋を弛緩させる。また右抑制性 type I ニューロンは左前庭神経核内に存在する、左外転神経核内の運動ニューロンおよび右の介在ニューロン（このニューロンは右動眼神経核内の運動ニューロンと連絡している）と連絡している抑制性 type I ニューロンを抑制することにより、左眼の外直筋と右眼の内直筋を収縮させる。このように左眼の外直筋と右眼の内直筋の収縮とその拮抗筋である左眼の内直筋と右眼の外直筋の弛緩が起こり、結果として左へ向かう両眼球の緩徐相が生じる（図1③）。この左向きの緩徐相に引き続き、右向きの急速相が生じる。すなわち、右外耳道に温水を注入した場合、右向きの水平性眼振が解発される。

右外耳道に冷水を注入した場合、外耳道に一番近い位置にある外側半規管の図1①で示した部位の温度が低下する。するとその近辺にある内リンパ液の温度が低下し、比重が大きくなる結果、内リンパ液が重力に従って下降し対流が起こる（図1②）。この対流により膨大部から遠ざかる方向に流れる（反膨大部方向）内リンパ流動が生じるので右外側半規管の有毛細胞は抑制され、右前庭一次神経の活動が減少し、右前庭神経内側核の興奮性および抑制性 type I ニューロンが抑制される。興奮性 type I ニュ

ーロンの抑制により、右内直筋、左外直筋の弛緩が生じ、抑制性 type I ニューロンの抑制により、右外直筋、左内直筋の収縮が生じ、結果として右へ向かう両眼の緩徐相が生じる。この右向きの緩徐相に引き続き、左向きの急速相が生じる。すなわち、右外耳道に冷水を注入した場合、左向きの水平性眼振が解発される。左外耳道に温水を注入すると対流により左外側半規管に向膨大部方向の内リンパ流動が生じるので左向きの水平性眼振が解発され、冷水を注入すると対流により左外側半規管に反膨大部方向の内リンパ流動が生じるので右向きの水平性眼振が解発される。

固視抑制 (visual suppression) の基礎となる神経経路

温度刺激検査中に被験者に指標を見てもらったときの固視抑制から中枢性前庭機能を評価することができる。前庭動眼反射、温度眼振を制御する主要な神経回路は脳幹に存在する (図 1)。一方、視覚情報は網膜で検出され、視蓋前野・橋被蓋網様核を介して小脳片葉皮質へと伝わる。また、副視索、中心被蓋路、下オリブ核を介して小脳片葉皮質へと伝わる。小脳片葉皮質はこれらの視覚入力を苔状繊維経路で受け、顆粒細胞、プルキンエ細胞経路で前庭神経核へ抑制性出力を送っている (図 2)⁶⁾。すなわち、温度眼振が出現している際、被験者に指標を見せることにより、視覚情報が小脳片葉皮質を介し固視抑制を起し、眼振の強度が減弱する。

温度刺激検査の実際

1. 冷温交互刺激検査

冷温交互刺激検査は温度刺激検査の国際標準法である。被験者を仰臥位にし、枕をあてて頭を30°前屈させ、外側半規管の形成する平面が重力軸と平行になるようにする。注射器の先に軟性チューブを付け、外耳道に注射器内の水を注水する。注水する温水の温度は44℃、冷水の温度は37℃である。50 mlの水を20秒間かけて注水する方法と20 mlの水を10秒間かけて注水する方法の二種類があるが、前者の方が再現性がよい。また、水ではなく、温風、冷風を外耳道に送風するエアーカロリック法と呼ばれる方法もある。エアーカロリック法ではエアーカロリック刺激装置を用いて外耳道に送風し、送風する温風の温度は46℃以上、冷風の温度は26℃以下に設定

する。流速6～8リットル/60秒で60秒間送風する。

上記刺激により解発された温度眼振を暗所開眼、遮眼または閉眼により視覚を遮断した状態で、フィレンツェル眼鏡、ENG (electronystagmography, 電気眼振計) や赤外線カメラ (CCD/C-MOS) を用いて記録、観察する。検査中は被験者に暗算負荷を行う。温度眼振の最大緩徐相速度、もしくはストップウォッチで計測した眼振の開始から終了までの持続時間を指標にする⁷⁾。以下の Jongkees の式から CP% (canal paresis, 半規管麻痺)、DP% (directional preponderance, 方向優位性) を算出する⁸⁾⁹⁾。Jongkees の式：

$$CP\% = \frac{|(RC + RW) - (LC + LW)|}{(RC + RW + LC + LW)} \times 100$$

$$DP\% = \frac{|(RC + LW) - (LC + RW)|}{(RC + RW + LC + LW)} \times 100$$

(RC = 右耳冷刺激, RW = 右耳温刺激, LC = 左耳冷刺激, LW = 左耳温刺激時のそれぞれの眼振の最大緩徐相速度または持続時間)

最大緩徐相速度を用いて計算する際、CP%は自発眼振の影響を受けないので、CP%の計算時、自発眼振の有無に留意する必要はない。

2. 少量注水法 (20℃, 5 ml, 20秒法)

少量注水法は、日本で発達した検査法であるので、日本では頻繁に用いられているが¹⁰⁾、海外からの報告は少ない。冷温交互刺激検査では四回刺激する必要があるが、この方法では二回で済むので患者への負担が少ない。20℃の冷水を左右の外耳道に注入し、ENGにて測定した温度眼振の最大緩徐相速度を指標とする。自発眼振を認める場合、この最大緩徐相速度は温度眼振に自発眼振が加算されたものになるので、自発眼振を除外した推定値を指標とする。例えば右向き A°/秒の自発眼振を認め、右耳刺激時の最大緩徐相速度が B°/秒で左耳刺激時が C°/秒であれば右耳の温度眼振は B + A°/秒、左耳の温度眼振は C - A°/秒とする。しかし、自発眼振の強さは変化しやすいため、自発眼振が消失してから再検査することが望ましい⁷⁾。

3. Visual suppression 検査

視覚系と前庭系は図2に示すように小脳を介して互いに干渉するため、Visual suppression (VS) 検

査は視覚系による前庭系の抑制を調べ、中枢性前庭機能を評価する検査である。温度刺激検査中の温度眼振を、暗所開眼または遮眼下で ENG により記録する。注水もしくは送風開始 1 分後に温度眼振の緩徐相速度は最大値をとるので、1 分後の 10 秒間、明所開眼とし、検者の指先などの眼前約 50 cm に存在する視標を被験者に固視してもらう。固視の直前の 10 秒間の眼振緩徐相速度の平均値 ($a^{\circ}/\text{秒}$) に対する固視中の眼振の緩徐相速度の平均値 ($b^{\circ}/\text{秒}$) の割合を 100% から引いた値が温度眼振の視覚による抑制率 (VS%) である ($\text{VS}\% = 100 - 100 \times b/a$)⁷⁾。

温度眼振検査のデータの解釈

1. 冷温交互刺激検査

CP% が 20% 以上の場合 CP と判定する。CP を認めれば、末梢性前庭機能障害と診断する。CP を認める耳が患側耳である。温度眼振が解発されない場合は、さらに氷水 (5℃ 以下) 20~50 ml を 20~30 秒で外耳道に注入し、それでも温度眼振が解発されない場合は、温度刺激検査で無反応と判定する。これは外側半規管機能の高度低下もしくは消失を意味するが、内耳機能の廃絶と判定することはできない⁷⁾。

DP% が 20% 以上を DP と判定する¹¹⁾。DP は中枢神経系障害、第Ⅷ脳神経および卵形囊などの末梢器官の障害により出現すると考えられているが、その起源は単一の部位ではなく、内耳の複数の部位または内耳と中枢神経系の両者が作用している可能性も考えられており、DP の有無による障害部位の診断は困難である¹²⁾。

2. 少量注水法

温度眼振の最大緩徐相速度が $20^{\circ}/\text{sec}$ 以上の場合、正常と判定し、 $10^{\circ}/\text{sec}$ 以上、 $20^{\circ}/\text{sec}$ 未満の場合、CP 疑いと判定し、 $10^{\circ}/\text{sec}$ 未満の場合、中等度 CP と判定する。温度眼振が解発されない場合、高度 CP と判定する。CP を認めれば、末梢性前庭機能障害と診断する。CP を認める耳が患側耳である。

$\text{CP}(\%) = |R - L| / (R + L) \times 100$ (R , L はそれぞれ右, 左耳刺激時の眼振の最大緩徐相速度または持続時間) により CP% を求め、CP を判定する報告がある。しかし、この CP% の値は自発眼振に影響を受け、またこの CP の判定基準は確立されていない

いことに注意する必要がある⁷⁾。

3. Visual suppression 検査

VS% の値が $66 \pm 11\%$ の場合、正常と判定し、40~10% の場合、VS の減少と判定し、10% 以下の場合、VS の消失と判定する。暗所開眼時に温度眼振の解発が不十分であるが、明所固視時によく解発される場合、明所固視時の温度眼振の増強と判定する。一側性前庭障害の前庭代償期やスポーツ選手などで VS% が正常範囲を超えて抑制される場合があるが異常ではない。VS の減少、消失、もしくは明所固視時に温度眼振の増強を認めた場合は中枢性前庭障害と診断する。一側向きの温度眼振に対し VS の減少を認め、反対側向きの温度眼振に対する VS が正常の場合、VS の減少を認める温度眼振の方向の小脳片葉または小節の障害が考えられる。両側向きの温度眼振に対し VS の減少を認めた場合、両側の片葉または小節の障害が考えられる。VS の消失を認めた場合、橋障害の初期または回復期、もしくは下頭頂葉障害の初期または回復期が考えられる。明所固視時の温度眼振の増強を認めた場合、橋の障害もしくは下頭頂葉の障害が考えられる⁷⁾。

温度眼振検査の将来展望

1. 内リンパ対流学説の宇宙での検討

Coats は頭位を変化させた際の温度眼振の最大緩徐相速度の変化を解析し、内リンパ対流学説を強く支持する研究結果を示した¹³⁾。外側半規管の形成する平面の法線ベクトルと重力とのなす角を θ とすると、温度刺激により生じた対流がクプラを偏倚させる力は $\sin\theta$ に比例するので、外耳道に注水する際の θ の値に応じて、温度眼振の最大緩徐相速度は変化する。Coats は立位から背臥位・逆立ち・腹臥位を経て立位まで 360° 頭位を変えた際の温度眼振の最大緩徐相速度の変化を調べ、それが $\sin\theta$ に比例することを示した。しかし、1983 年、スペースシャトル・コロンビアに積み込まれた宇宙実験室である Spacelab-1 にて行われた微小重力環境でのエアーカーリック刺激を用いた温度刺激検査にて驚くべき結果が発表された²⁾。微小重力環境下では対流は生じないので、内リンパ対流学説に従うと温度眼振は解発されないはずである。ところが、二人の被験者で温度眼振が観察された¹⁴⁾。この結果より、半規管の内リンパ液の対流以外の温度眼振を解発させる

発現機序の存在が示唆された。その機序として、「内リンパの温度による体積変化説」や、「有毛細胞および半規管神経自発放電の温度による変化説」が提唱されている。

「内リンパの温度による体積変化説」とは温度変化により内リンパ液の体積が変わるので、クブラが偏倚し、その結果、半規管の有毛細胞の興奮、もしくは抑制が生じることで温度眼振が解発されるという説である。カエルの摘出外側半規管を水平に置くことによりクブラ方向への対流が生じないようにして管部に温度刺激を加えた際、半規管神経放電の頻度に変化したことからこの説が支持された¹¹⁾¹⁵⁾。

「有毛細胞および半規管神経自発放電の温度による変化説」とは有毛細胞と半規管神経は安静時の自発放電頻度が極めて高く、これが温度によって鋭敏に変化するため、温度刺激による自発放電頻度の変化が温度眼振を解発させるという説である。六つの半規管すべてに遮断手術を施し半規管内の内リンパ液が動かないようにしたサルにて温度眼振を認め、さらに、このサルの頭位を180°変化させても温度眼振の方向の逆転を認めなかったことからこの説が支持された¹⁶⁾。

頭位の違いによる温度眼振の最大緩徐相速度の変化を合理的に説明できる説は内リンパ対流学説だけであり、「内リンパの温度による体積変化説」や「有毛細胞および半規管神経自発放電の温度による変化説」では説明できない。よって温度眼振の生成に半規管の内リンパ液の対流が関与していることは確かであるが、それ以外の機序も確実に存在する。

2. 垂直半規管機能検査への応用

外側半規管刺激時の前庭動眼反射により解発される眼振は水平成分が主体であるので、外側半規管が最も関与している温度眼振は水平成分が主体である。しかし、温度刺激により垂直半規管の内リンパ液の温度も多少は変化するので、垂直半規管も温度眼振の生成に関与しており、その結果、温度眼振の垂直成分や回旋成分が解発される。その温度眼振の垂直成分や回旋成分を解析することにより、垂直半規管の機能を評価しようという試みがある。温度眼振を三次元解析し、水平成分、垂直成分、回旋成分の割合から各半規管の関与の度合いを計算したところ、外側半規管が60%、前半規管が30%、後半規管

が10%であったと報告されている¹⁷⁾。すなわち温度眼振の生成に垂直半規管が四割程関与している。

臥位にて頭部を45°後屈させ、前半規管の膨大部が最も高い位置に来るようにし、両側外耳道に同時に24℃の冷水を注入すると、左右の外側半規管による温度眼振の水平成分が打ち消されるので、両側の前半規管刺激による上眼瞼向きの垂直成分だけが残し、純垂直性の温度眼振が解発される。この垂直成分を解析することにより、前半規管機能が評価できると考えられる¹⁸⁾。また、臥位にて頭部を45°右に傾けると左前半規管と右後半規管の形成する平面が重力軸と平行になるので、この頭位で右耳に注水した際に解発される温度眼振の垂直成分は右後半規管の機能を反映し、左耳に注水した際に解発される温度眼振の垂直成分は左前半規管の機能を反映している。よってこの頭位で温度刺激検査を行い、解発された眼振の垂直成分を解析することにより左前半規管と右後半規管の機能を検査することができる。同様に臥位にて頭部を45°左に傾け温度刺激検査を行うことにより、右前半規管と左後半規管の機能を検査することができる。臥位にて頭部を45°右に傾け右耳に20℃冷水を注入した際には右後半規管抑制による下眼瞼向き眼振が、頭部を45°左に傾け右耳に20度冷水を注入した際には右前半規管抑制による上眼瞼向き眼振が観察されることが報告されている¹⁹⁾²⁰⁾。現在、温度眼振は主にENGにて記録されており、三次元解析ができない。VOG (video-oculography) で温度眼振を記録し、三次元解析ができれば温度刺激検査にて垂直半規管機能の評価が可能になると考えられる。

3. 平衡感覚の中枢での処理に関する研究への応用

平衡感覚の中枢での処理に関する研究は他の感覚情報に比べ研究が進んでいない。その原因として、平衡器官である三半規管や耳石器を刺激するための回転刺激や直線加速度刺激を生成するには大掛かりな装置を必要とし、刺激中の脳機能画像検査ができないということが挙げられる。しかし、温度眼振刺激により、実際に回転させなくても回転時と同じ刺激を半規管に加えることができ、温度刺激検査中の脳活動を fMRI (functional magnetic resonance imaging), PET (positron emission tomography),

MEG (magnetoencephalography), fNIRS (functional near-infrared spectroscopy) などの脳機能画像にて解析することにより, 回転感覚の中枢での処理に関する研究が可能となる。前庭画像研究にて前庭情報が処理される中枢は島および弁蓋部, 下頭頂葉, 帯状皮質, 運動前野, 帯状溝の視覚野であることが明らかにされた。半規管や耳石器からの前庭情報の入力だけでなく, 視覚や体性感覚からの入力があるこれらの領域で統合され, 平衡に関する情報形成が行われている。

おわりに

温度刺激検査の歴史, 神経回路, 検査の実際, 将来展望を紹介した。冷温交互刺激検査が温度刺激検査の国際標準法であり, 前庭神経炎, bilateral vestibulopathy²¹⁾ や presbyvestibulopathy²²⁾ の診断に必須の検査であるので, その原理, データの採取法に関し十分な知識を備えておくことが必要である。

文 献

- 1) Brown-Séquard C: Cause of rotatory convulsions. In Course of lecture on the Physiology and Pathology of the Central Nervous System. pp 195, Collins Printer, Philadelphia, 1860
- 2) 肥塚 泉: 温度刺激検査. Equilibrium Res 78: 288-294, 2019
- 3) Wiest G, Baloh R: Sigmund Freud and the VIIIth Cranial Nerve. Otol Neurotol 23: 228-232, 2002
- 4) Bárány R: Untersuchungen über den vom Vestibularapparat des Ohres reflektorisch ausgelösten rhythmischen Nystagmus und seine Begleiterscheinungen. Monatsschrift für Ohrenheilkunde 40: 193-297, 1906
- 5) 肥塚 泉: 眼振のみかた—眼振の発現機構—。日耳鼻 117: 1321-1328, 2014
- 6) 平野丈夫: 前庭動眼反射と視運動性眼球運動の適応への小脳シナプス可塑性の関与. Equilibrium Res 70: 104-109, 2011
- 7) 日本めまい平衡医学会診断基準化委員会: 平衡機能検査基準化のための資料 Ⅲ迷路刺激検査 1. 温度刺激検査 2016年改定. Equilibrium Res 75: 241-245, 2016
- 8) Jongkees L, Philipszoon A: The caloric test. Acta Otolaryngol Suppl 189: 45-54, 1964
- 9) Halmagyi G, Cremer P, Anderson J, et al.: Isolated directional preponderance of caloric nystagmus: I. Clinical significance. Am J Otol 21: 559-567, 2000
- 10) 日本めまい平衡医学会診断基準化委員会: 温度刺激検査 (カロリックテスト) に関するアンケート調査結果. Equilibrium Res 74: 126-133, 2015
- 11) 新井寧子: ENG (温度刺激検査) —3つの半規管機能, 耳石器機能および脳幹機能の検査—. Equilibrium Res 70: 456-464, 2011
- 12) 池田元久, 渡辺 勲, 武藤二郎: 各種内耳障害の温度眼振検査でみられた DP の検討. Equilibrium Res 53: 247-251, 1994
- 13) Coats A, Smith S: Body position and the intensity of caloric nystagmus. Acta Otolaryngol 63: 515-532, 1967
- 14) Scherer H, Brandt U, Clarke A, et al.: European vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 3. Caloric nystagmus in microgravity. Exp Brain Res 64: 255-263, 1986
- 15) Harada Y, Ariki T: A new theory for thermal influences on endolymphatic flow. Arch Otorhinolaryngol 242: 13-17, 1985
- 16) Arai Y, Yakushin S, Cohen B, et al.: Spatial orientation of caloric nystagmus in semicircular canal-plugged monkeys. J Neurophysiol 88: 914-928, 2002
- 17) Aw S, Haslwanter T, Fetter M, et al.: Contribution of the vertical semicircular canals to the caloric nystagmus. Acta Otolaryngol 118: 618-627, 1998
- 18) Nehme J, Saliba I: Bilateral simultaneous caloric test for superior semicircular canal evaluation. Otol Neurotol 32: 1473-1479, 2011
- 19) 青木佐知子, 新井寧子, 余田敬子, 他: 簡便な垂直半規管検査としての頭傾け温度刺激検査の実用性. Equilibrium Res 68: 199-207, 2009
- 20) Aoki S, Arai Y, Yoda K, et al.: A head-tilt caloric test for evaluating the vertical semicircular canal function. Acta Otolaryngol 129: 1226-1231, 2009

- 21) Strupp M, Kim J, Murofushi T, et al.: Bilateral vestibulopathy: Diagnostic criteria Consensus document of the Classification Committee of the Bárány Society. J Vestib Res 27: 177–189, 2017
- 22) Agrawal Y, Van de Berg R, Wuyts F, et al.: Presbyvestibulopathy: Diagnostic criteria Consensus document of the classification committee of the Bárány Society. J Vestib Res 29: 161–170, 2019
- 利益相反に該当する事項はない。