Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

バイオメカニズム学会誌, VOL. 7, No.3 (1983)

解　説

平　衡　感　覚　の　あ　い　ま　い　さ

松　岡　　出*

1. はじめに

動物が自然界での生存競争に生き抜くために、又、人間が日常生活を営むためには、身体の姿勢や運動はほとんど意識する事なく反射的に働かせる必要が有る。即ち身体がある姿勢を保ったり運動を行うためには、骨、筋、関節のみならず各種の神経機構が秩序正しく働く必要がある。それには大脳皮質、錐体路、錐体外路系などを含めた系が合目的に働くと共に、これらの運動系を制御する制御系又これらの運動系への感覚系の情報の入力も必要となる。

即ち、この姿勢と運動に関与する感覚系としては、外界を認識し身体の位置を把握する視覚系、位置を認識する皮フ、筋、腱、関節等の深部知覚系、回転運動、直線運動、重力等の入力についての前庭迷路系などがある。さらに運動神経系の情報と各種感覚系の情報を統合調整し、合目的な運動の協調をはかる小脳、脳幹などが姿勢、運動に関与している。

これらの神経系の内でMagnus[1]の平衡反射説について述べると次の様な平衡反射が存在する。（表Ⅰ）

即ち立ち直り反射は頭部、躯幹を重力に対して正しい位置に復元、維持させる反射である。構え反射は空間における頭の位置により、又眼、頭部、四肢、躯幹の相対的関係（構え、attitude）により局所的、あるいは全身的に一定の筋緊張を惹起する反射である。運動反射は時間推移とともに変化する動きを誘発する反射である。これらの平衡反射は視器、迷路、自己、外受容器への刺激で誘発され、眼筋、頸筋、四肢、躯幹筋に現われる。この反射には大脳、脳幹、脊髄、小脳がその中に重要な反射路、反射中枢をもつことにより密接に関係する事は当然である。[2]

表Ⅰ

立ち直り反射 righting reflex	視性、迷路性、頸性、体幹性立ち直り反射、代償性眼球偏位 踏み立ち反射、跳び立ち反射、把握反射
構え反射 attitude reflex	緊張性迷路反射、緊張性頸反射、支持反射、伸展反射
運動反射 movement reflex	迷路性直線運動反射 迷路性回転運動反射 視運動性反射

2. 前庭迷路の解剖と生理

平衡感覚について述べる前に、他の感覚系について述べると、皮膚表面知覚、視覚、聴覚、嗅覚、および味覚がある。これらの感覚器は大脳皮質に連絡する。

即ち、表面知覚は皮質中枢の中心後回、及びこれらに接する頭頂葉に、視覚は後頭葉内側の視覚皮質に、聴覚は聴覚皮質に、そして嗅覚は前頭下回に、そして味覚も前頭下回の皮質中枢に終る。人間の感覚は外界の情報を統合判断する最終器官として大脳皮質が存在する。勿論末梢の感覚器から大脳皮質に到る神経線維連絡はそれぞれ複雑さは異なる。ところが前庭迷路の中枢における終技は視床、視床下部迄で大脳皮質迄の神経投射路はないとされている。この点が他の感覚系と全く異なる点であり、大脳皮質が関与する事が少ない純然たる反射系であると言う事が出来る。

内耳には平衡感覚を受容する前庭（耳石系）および迷路（三半規管）と音刺激を受容する蝸牛とが有る。前庭、迷路器及び蝸牛が左右と一対存在する。その位置は頭蓋底、側頭骨錐体部に存在する。

A：迷路の刺激受容機構

眼球と外耳道を結ぶ水平面に位置する、外側半規管、前半規管と後半規管とが三平面への回転角

* 京都大学医学部耳鼻咽喉科教室
〒606　京都市左京区聖護院川原町54

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

速度刺激を受容する。即ち身体や頭部に回転角加速度が加わると半規管内の慣性による内リンパ流動を生ずる。水平面での回転においては水平半規管に内リンパ流動を生ずる。右への回転においては、右外側半規管には膨大部より遠ざかる反膨大部性（ampullo fugal）の流れを生ずる。内リンパ流動がクブラを偏位させ感覚上皮細胞に刺激を与える。これが自発放電となり、第一次前庭神経へとミナップスを介して中枢へ伝達する。

B：前庭の刺激受容機構

前庭としては、所謂る、卵形嚢と球形嚢が有る。これらは三半規管に隣接する卵形嚢は水平半規管とほぼ同一平面に、球形嚢は矢状面に一致して存在する。頭部が重力に対して傾斜したり、頭部に直線加速が加わると耳石膜はその重さ、慣性によってずれ、感覚毛に圧迫を起し、感覚上皮が興味して、第一次前庭神経のシナップスを介し中枢へ伝達する。

C：前庭神経上行路

前庭、迷路で受容された刺激は神経性インパルスとして交換され前庭神経（vestibular nerve）を通り上行する。前庭神経は蝸牛から出て来た聴神経と共に第8脳神経を作る。即ち、外側部に卵形嚢、球形嚢からの神経技が集まり、次いで、迷路からの神経技が合流する。更に、その内側を下オリーブ核からの遠心性神経線維が束となり、聴神経が最後に合流する。前庭神経はその走行の途中で双極細胞の集まりである。Scarpa's ganglionを形成し脳幹部に入る。

脳幹部に入ったvestibular nerveは第一次中継部である前庭神経核の4つの核に入る。即ち、①前庭神経上核（vestibular nucleus superior）、②前庭神経外側核（vestibular nucleus lateralis）、③前庭神経内側核（vestibular nucleus medialis）、および④前庭神経下核（vestibular nuclcus inferior）である。4つの前庭神経核に入った前庭迷路の情報はシナップスを変え更に上行し、動眼神経核、滑車神経核、外転神経核等の所謂る前庭眼反射（vestiblo－ocular refex）1系を作る（図1）。

一部は脳幹網様体（reticular formation）や迷路

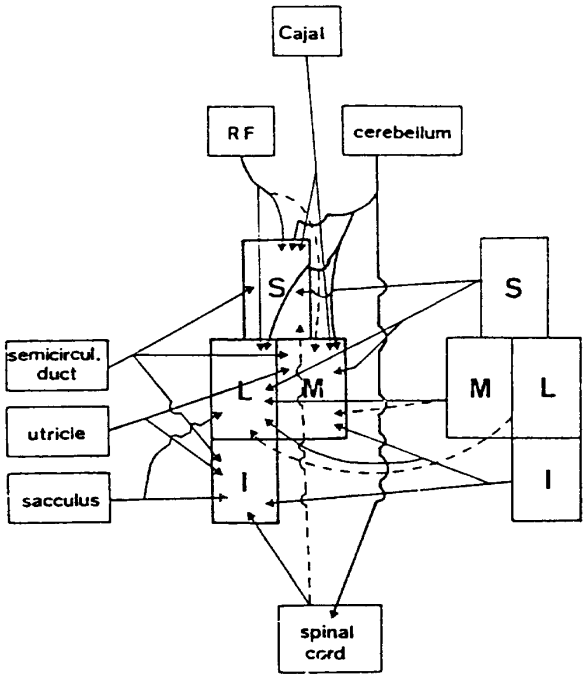


図1 Main afferent fibers to vestibular nuclei. S：superior vestibular nucleus, M：medial vestibular nucleus, L：lateral vestibular nucleus, I：inferior vestibular nucleus, Cajal：Cajal interstitial nucleus, RF：reticular formation.

神経核等へ入り、前庭自律神経反射系（vestibulo－vegetative reflex）を形成する。又下行路としては前庭脊髄路（vestibulo－spinal reflex）として四肢への反射を司る。一部前庭神経は前庭神経核で終技せず直接小脳に終技する上行路も存在するが、この役割については充分に解明されていない。

更に、最近の松岡ら[3-4]の微小電極法による単一神経細胞の電気生理学的実験やhorseradish pcroxidase（HRP）を用いた組織学的実験では左右前庭神経核間に複雑な線維連絡が存在する事が判明している。又迷路への遠心路のHRPの実験でも、脳幹網様体、前庭核からの複雑な抑制回路が存在する（図2）。

以上の事は前庭核が単なる前庭迷路からの情報の中継路だけでなく、情報の統合中枢でも有り前庭迷路の情報をコントロールする機能が存在するものと言う事が出来る。

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

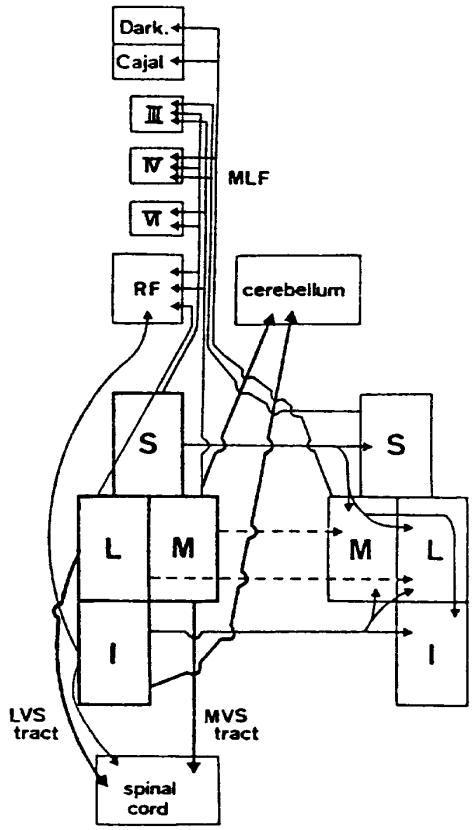


図2　Main afferent fibers from vestibular nuclei. Dark : Darkschewitsch nucleus, Ⅲ : oculomotor nucleus, Ⅳ : trochlear nucleus, Ⅵ : abducens nucleus, MLF : medial longitudinal fasciculus, LVS tract : lateral vestibulospinal tract, MVS tract : medial vestibulospinal tract. Other abbreviations are the same as in the Fig. 1 (図 1).

3.　めまいの発現機序

めまいの感覚の発現に対し、各種前庭迷路反射が原因となる事は疑う余地はない。前庭迷路反射が先性刺激となり、めまいを起すのであろう。即ち、前庭眼反射による眼球偏位による眼振（ nystagmus ）が身体の空間の異常認知、前庭自律神経反射による種々の不快感、主たるものは前庭迷走神経背側核（ tractus soritalius vagi ）を経由する消化器への反射が悪心、嘔吐をひき起す。更に前庭脊髄反射による筋トーマスの異常、深部知覚の異常な感覚がめまいを一層助長する。しかしながら、高所性眩暈の様に前庭迷路が関与しなくても眩暈、悪心や嘔吐が起る事が有る。これは後で述べる様に眼が視覚を司るための動く物体を素早く網膜上に固定する必要が有る。これには前庭迷路が重要な働きをする。即ち、この系の異常が前庭迷路刺激がなくてもめまいを起す原因となるであろう。

4.　平衡反射の異常あいまいさについて

感覚器に刺激が加わると受容器の神経細胞が反応し、刺激の域値が一定量以上になると刺激として中枢に伝達され感覚器の情報として処理される。しかしながら、刺激が受容器に対して一定の大きさにならないと神経細胞は反応しない。（ all or none response）。又、刺激が増大すると受容器の、反応も当然大きくなるが、或る一定の大きさになると反応は増加しなくなる。

即ち、視覚における光の反応、痛覚や皮膚の圧覚反応、聴覚に対する音反応、味覚反応、嗅覚反応など全てこの法則が適応するが当然その域値には個体がある。しかしながら、平衡感覚ではこの法則が必ずしも適応されない。

前庭に域る一定以上の刺激の大きさで直線加速度や傾斜刺激を与えると前庭器は、その刺激に応じて反応する。しかしながら、直線加速度や傾斜刺激を極く小さな増加率で加速するとこれらは、前庭器の刺激として反応しない。

三半規管系でも回転角加速度が或る一定以上では回転角加速に対して回転感覚として又眼球反応（眼振）として反応する。

図3は暗室内で電気眼振図（ electro－nystagmogram:ENG）を記録しながら閉眼でスムーズに回転する装置である。回転椅子の回転は図4に示す様にコンピューターでコントロールし回転する。即ち毎秒 $1°/s^2$ 以上の等角加速度や等角速度で回転すると回転と同時に回転眼振が出現する。図5は $1.13°/s^2$ の等角加速度で加速した場合で、(A)は $0°-90°/s$ を示す。

等速に移行すると約10秒程で回転眼振は消失する (B)、しかしながら、(C)の様に急速に回転を停止すると眼振が逆転する回転後眼振が出現する（図 5）。

しかるに、極く小さな一定の加速度で回転した場

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

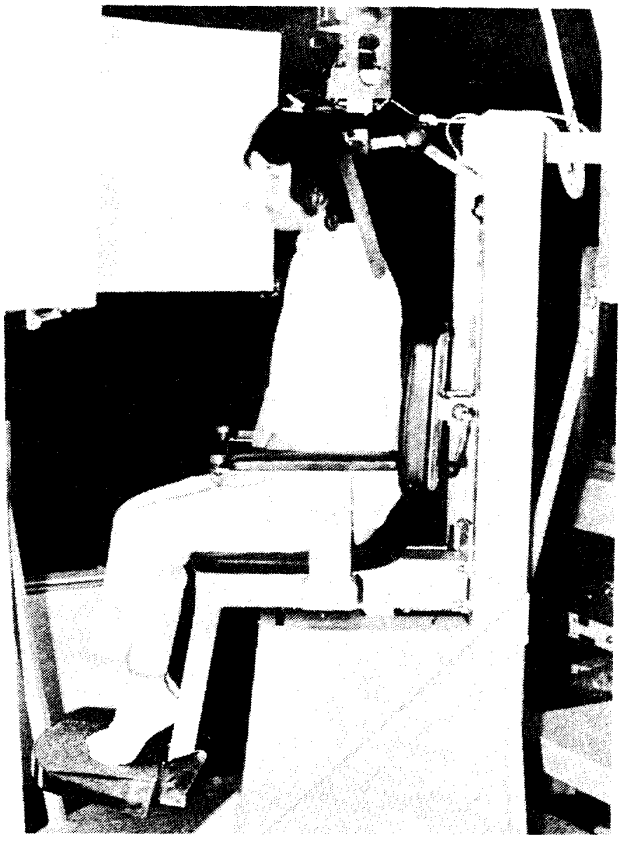


図3　体軸を回転の中心として回転する回転椅子上に被検者を固定する。前のスクリーンは頭上の投影器より視機刺激を与えるようにしてある。

合や小さな角速度（0.3～0.5°/s²）で加速回転すると最大回転速度が90°/s－180°/sになって回転感として感じられない。

図6は極く小さな0.339°/s²の等角加速度で90°/s迄加速(B)、次いで減速した場合である。回転加速中被検者は回転感も眼振も誘発されない。回転角速度が増加するにつれて眼偏位が認められるのみである。勿論回転を感じたり眼振を出現する域値には個人差がある。一般にはこの域値は0.2～0.5°/s²とされているが、運動選手はこの域値が小さい。

図5および図6の下段の較正は検者の左右30°の眼球運動を示す　しかしながら、ここで大切な事は前庭迷路がこの条件で刺激されていないのでなくて、眼振が解発されないと言う点である。[5)]

5. 平衡反射の病的反応

以上の平衡感覚の異常は正常人においてみられ

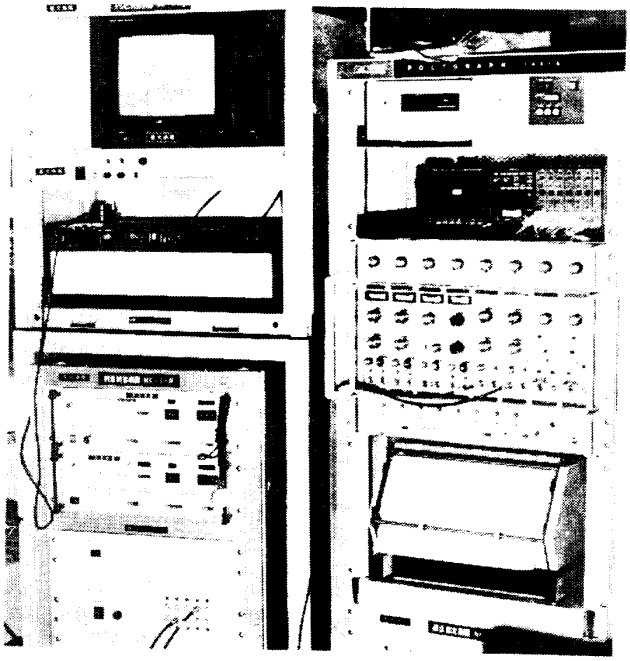


図4　ENGの増巾および記録装置（図右）。暗室内での眼球運動をモニターする赤外線用ブラウ管（図左上）。コンピューターによる等速加速および等角速度コントローラー（図左下）。

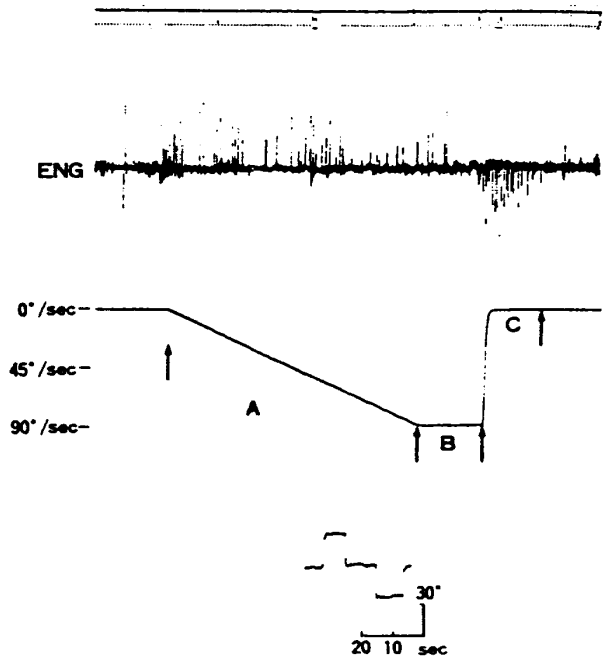


図5　1.13°/s²等角加速度回転時のENGおよび実際の加速度を示す。A：0°－90°/s、B：90°/s等速回転、C：急速停止時の回転後眼振を示す。

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

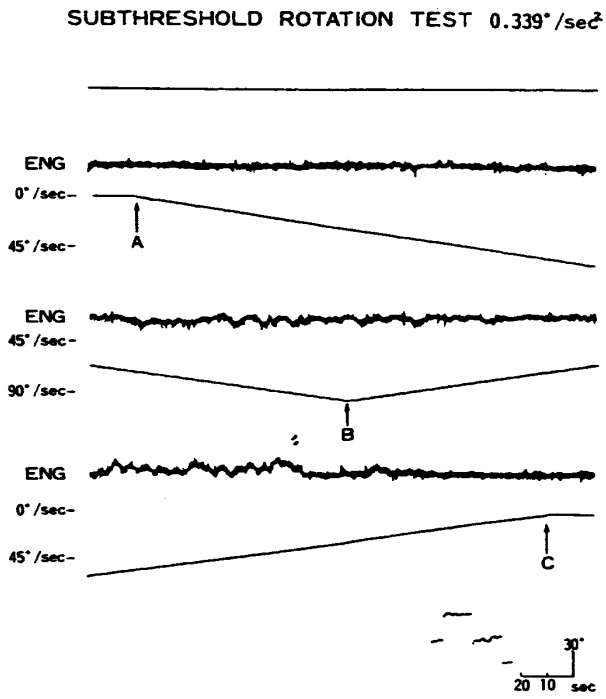


図6　0.339°/s² 等角加速度回転時のENG。
A：回転開始、B：90°/s、C：停止。

る前庭迷路反応があるが、前庭迷路の異常においても同様の感覚が出現する。

A：メニエール病（Meniere's disease）

1861年P. Menieresは突然のめまいと難聴、耳鳴を伴う発作を来す疾患を報告し、以来この疾患をメニエール病と命名されて来た。この病気の本態は前庭迷路、蝸牛の内リンパ水腫とされている。本疾患は内リンパ水腫、即ち、末梢迷路疾患である。発症初期においては絶粋な回転性めまい、耳鳴、難聴、悪心、嘔吐を伴う発作が出現するが、発作をくり返す内に症状が変り、著明な症状が出現しなくなる。即ちふらふら感や浮動感となり、他の症状が必ずしも出現しなくなる。この事は迷路での病的刺激の受容のメカニズムに異常が起きている事を示している。この事はメニエール病の原因に内リンパ水腫を減圧するPortman手術を行うと症状が消失し正常に回復する事からもうかがう事が出来る。

B：良性発作性頭位眩暈（Benign paroximal positinal vertigo：BPPN）

中耳炎、感染症、頭部外傷などに続発して起る症状で、発作的にある時期、頭位の変化に伴い回転性のめまいを生ずる。この病気の特徴は或る特定の頭位で必ずめまいが起り、そのままの頭位で放置するとやがてめまいは消失する。メニエール病の様な耳鳴、難聴等の症状を伴なわない。原因としては耳石系と考えられているが、頭位を保って一定の刺激を与え続けても眼振が減衰する事は一般の感覚系の反応と異なる性質のものである。

C：高所性めまいと視性めまい

（Hight vertigo and visual vertigo）

視覚が身体平衡の保持に必要な事は、閉眼で円滑な運動出来ない事で誰でも容易に理解出来る事である。乗り物に乗って車窓から外の景色を眺めると所謂る鉄道眼振と呼ばれる視性眼振が出現する。この場合、個々の人々には特にめまい感を訴える事はない。又眼振が出現しているが、この事は眼振の出現が必ずしもめまいを来すわけではない。しかし眼前に回転する視刺激を与えると眼振が出現しめまいを訴え身体の保持が出来なくなる事がある。

或る高さに居るだけでめまいを訴える、更には高い所から写したスライドを見るだけでもめまい感を持つ人もいる。これからは視覚系の情報が平衡系に過大に作用した結果である。

D：浮動視（Jumdling of objects.）

両側迷路機能喪失例において眼に現われる障害で運動中の固視障害がある。即ち、静止時には外界の明視が可能で視線固定（固視）が可能であるが、歩行や運動時に外界がゆれ動く現象である。ちょうど撮写機で歩きながら撮影する時のような像を作る。これらの例では回転性眼振は勿論出現しない。

これは前庭迷路が視覚機能、特に固視を助けているための働きを示している。

6. 運動と平衡系

一般にスポーツと平衡系とは密接な関係がある事は周知の事実である。運動を円滑に行うには訓練が大切であるが、勿論、優れた骨、筋、深部知覚の反射、小脳機能等が更には優秀な頭脳が要求される事は当然である。

しかしながら忘れてならない事は視覚を支える迷

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

路機能が優れている事が必要である。
福田ら[5]のスポーツと平衡反射の研究によれば、優れた運動選手では偏倚、立ち直り反射は勿論、迷路機能も優れたものが多いと言う。更に視機刺激時の姿勢に及ぼす影響も優れたものが有ると言う。例えば有名な野球選手では視刺激の負荷時に姿勢反射や重心の動揺度も少なく、視器の訓練により迷路反射を抑制している。ジャンブリングの項で述べた様に迷路の機能が視器の機能を強くささえる事がスポーツの世界でも必要な要因となりうる。

7. 結　語

迷路器は回転運動や直線加速度運動を刺激として受容し、これを眼運動系の、脊髄系へ更に自律神経系へと反射として伝え、姿勢保持を保つ。しかしながら両側迷路廃絶例でみられる様に前庭迷路からの刺激が消失すれば、各種運動刺激の入力が消失し、これが眼球運動の円滑な働き及び固視機能を消失せしめる。即ち、前庭迷路は視覚の働き、眼球運動を支える大きな働きをしている。これらの働きを統合する所は恐らく前庭神経核であり、この核の複雑なネットワークはこのために存在するものであろう。この事は大脳皮質にこれらの情報を統合する中枢が存在しない事及び視器を前庭迷路機能が助けている点に起因する。
姿勢と運動のメカニズムについては福田精名誉教授の“運動と平衡の反射生理”と言う本に複雑な運動と平衡のメカニズムについて詳細に述べられている。是非一読される事をおすすめする。

文　献

1) Manus, R. : Korperstellung, Springer (1923)
2) 時田　喬：現在の耳鼻咽喉科学（松　学　編），104～114, 金原出版，東京 (1979)
3) Matsuoka, I. : Vestibular pharmacology, Japan J. Pharmacol., 77, 337～346 (1981)
4) Matsuoka, I., Ito, J., Sasa, M., Fujimoto, S., & Takaori, S. : Neuronal between ipsilateral medial and lateral vestibular nuclei, Vestibular and Oculomotor Physiology, Cohen, B. (ed.), Ann. N.Y. Academy Sci., 93～101 (1981)
5) 福田　精：運動と平衡の反射生理，医学書院，東京 (1982)

NII-Electronic Library Service