

原 著

サル骨半規管のコンピューターによる三次元再構成と計測

東京女子医科大学 耳鼻咽喉科学教室 (主任: 石井哲夫教授)

ヨシ カワ カ スミ
吉 川 香 澄

(受付 平成6年11月22日)

Three-dimensional Reconstruction and Measurement of the Angular Relationship and the Diameter of Semicircular Canals**Kasumi YOSHIKAWA**Department of Otolaryngology (Director: Prof. Tetsuo ISHII)
Tokyo Women's Medical College

Recent advances in three-dimensional studies of the vestibulo-ocular reflexes in the monkey have led to more detailed knowledge of the anatomical structures of the semicircular canals (SCCs). In this regard, using a newly developed three-dimensional reconstruction method and a personal computer, the author has determined the longitudinal and transverse diameters and angles of the three SCCs in 3 Maccaca monkeys. In brief, the contours of the bony SCCs were outlined on serial sections of the temporal bone and then fed into the computer for analysis. Two planes, a standard plane (S-P) and the torsion plane (T-P), were used to represent the planes of the SCCs.

Results revealed that the anterior SCC (AC) twists posteromedially on the non-ampullated side. Further, the mean AC angle between the S-T and T-P amounted to 16.1 degrees, which was two times greater than the angles of the other two canals. It was also found that the angles formed with two of the three SCCs varied from 70 to 110 degrees. With regard to AC plane angles, the mean about 30 degrees, great individual angle differences were noted on both sides, although the angle differences in the synergistically functioning canal planes were less. Also, the synergistically functioning S-P canal plane angles varied from 160 to 170 degrees, whereas the T-P angles mainly consisted of a single plane. Finally, the means of the longitudinal and transverse diameters of the AC, PC, and lateral SCC were 4.77×4.31 mm, 4.75×3.79 mm, and 4.73×3.98 mm, respectively. These anatomical relationships, when analyzed with the corresponding physiological findings, may yield important data, although the number of samples studied in this series is not enough to draw final conclusion.

緒 言

前庭眼反射は頭部の回転運動中にも静止した外界の像を網膜上に安定するために、下等動物からヒトまで広く存在する。前庭眼反射は一つの前庭反射に対し一つの眼運動が生ずる反応であり、正確に機械的に行われる。数多くの平衡機能検査の中で、前庭眼反射を利用した検査は、結果を容易

に定量的に表現できるために、平衡機能検査の中心的存在である。

ヒトと同じ霊長類に属するサルでは、詳細な前庭眼反射の研究が積み重ねられ、ヒトの前庭眼反射の解明に寄与してきた。実験から定性的には半規管神経を電気刺激すると眼球はその半規管の面で働くことが知られている¹⁾。1950年代より水平

性の眼球運動は電氣的に記録できるようになり、定量的な前庭眼反射の分析が行われてきた。しかし垂直・回旋性の眼球運動も電氣的な記録が可能になったのは1980年代である²⁾。これ以後サルにおいては前庭眼反射の三次元的な研究が行われるようになり、ヒトにおいては三次元的前庭眼反射の研究は緒についたばかりである。しかしその基盤となる内耳迷路の三次元的な解剖学的解明は十分なされていない。

1980年代に入り正常内耳のコンピューターによる三次元再構成の報告がみられるようになった。内耳構造の理解を容易にするためのコンピューターによる再構成の報告はみられるが、計測に至る研究は文献上少ない。半規管は機能的に左右が一对となって頭部回転を検知しているが、コンピューターによる再構成で左右の半規管の関係を計測した報告はみられない。現時点で位置関係を変えずに左右両側共に側頭骨切片標本を用いて再構成、計測することは困難である。サルは解剖学的にヒトに近似していること、生理学的研究の対象として用いられていること、頭蓋の大きさから左右の錐体骨を一塊として連続切片にすることが可能であるため、迷路の三次元構造を研究する対象として適している。

そこで半規管眼反射の入力を規定する基本的情報を得るために、本研究ではパーソナルコンピューターにより、サルの半規管骨迷路を再構成しその大きさ、角度、両側の骨半規管のなす角度について計測し形態学的な検討を行った。

対象および方法

1. 標本の作製法

材料は、神経生理学的研究に使われた後、提供された動物の摘出側頭骨である。実験動物は3歳のアカゲザル *Macaca mulatta* 2頭 (M1: 頭蓋骨横径52mm, M2: 頭蓋骨横径53mm) およびカニクイザル *Macaca fascicularis* 1頭 (F1: 頭蓋骨横径56mm) で、計3頭6耳を材料とした。動物は深麻酔下に頭部を生理食塩水および10%ホルマリン液にて還流固定されていた。両側の側頭骨は一塊として採取されたもので、5%トリクロール酢酸にて脱灰した。30%エタノールから脱水を開始し

無水エーテルアルコールにて脱水を終了した。その後1.5%の低濃度セロイジンから開始し10%セロイジンで包埋、硬化した。ブロック標本の薄切の上面を両側前半規管が同時に切れ始めるようにトリミングした。後に各組織切片をトレースしたものを三次元データとして入力する際に、上下の切片相互間において位置のずれを防ぐため、ブロック標本に基準穴を作製した。ブロック標本の上面の割面に対し垂直になるように、0.7mm径のドリルで基準穴を側頭骨周囲に数カ所あけた。この穴内に26ゲージ注射針を用いて墨汁を数回流し入れ、セロイジンを着色させ基準点とした。セロイジン上の墨汁色を保持するため、切片の厚さを25 μ mとして水平断連続切片標本を作製した。10枚毎にヘマトキシリン・エオジン染色を行い計測のための資料とした (図1)。

2. コンピューターへの入力

各切片標本をプレパラート用エンラージャーにて7倍に拡大投影し、基準点を参考にして標本を重ね合わせるようにし、左右の骨迷路および前庭を1枚の紙上にトレースした。膜迷路は骨迷路内に粗な結合組織で支持されているため、標本作製の際に膜迷路が骨迷路内においてずれを生じたと考えられる標本が存在した。内リンパ流は膜迷路内で生じているが、正確な計測を期するためには、膜迷路よりむしろ半規管骨迷路をトレースするべきであると判断した。

これをグラフィックディジタイザー (Hitachi HDG-1515B) にて、パーソナルコンピューター (NEC PC-9801RA) に入力した。この際、側頭骨切片標本の左右方向を X 軸 (+方向: 右側)、前後方向を Y 軸 (+方向: 鼻側)、また連続標本の間隔すなわち上下方向を Z 軸 (+方向: 尾側) として入力した。再構成および計測には、Takagi ら³⁾により開発されたプログラムを使用した。半規管骨迷路および前庭の一部を入力し、モニター上でワイヤーフレームの線画として立体的に表示した。これらの像を5°単位で回転することにより任意の方向から観察し、また視点の位置を変えることにより拡大縮小した画像を作製した。

モニター上に再構成した三次元座標を有する骨

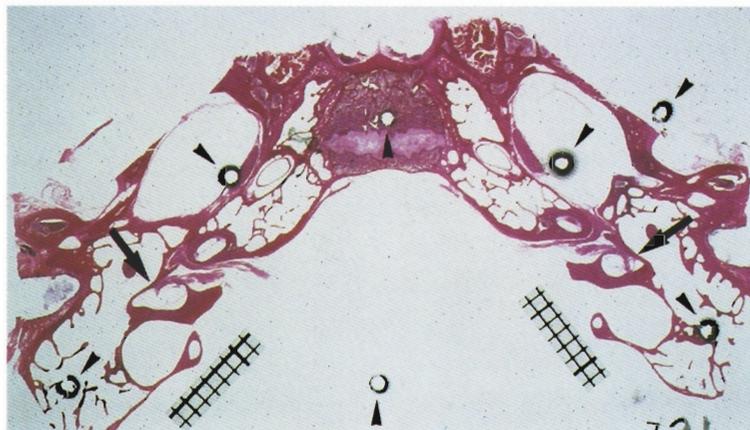


図1 サル側頭骨組織切片
両側外側半規管膨大部 (←) と基準点 (▲) を示す。HE 染色1×

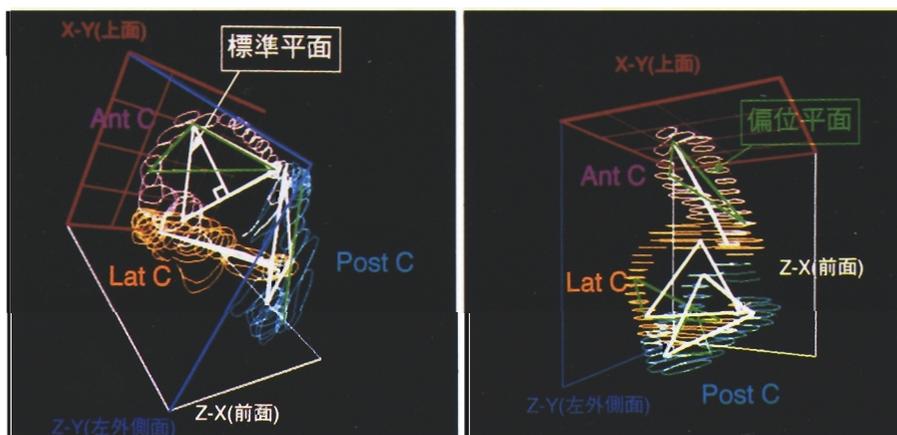


図2 半規管の標準平面と偏位平面の定義。F1 monkey の左耳前半規管を示す。
Ant C : 前半規管, Post C : 後半規管, Lat C : 外側半規管。
左：前半規管の標準平面 (S-P, 白線) と偏位平面 (T-P, 緑線) を示す。外側半規管をみると S-P と T-P はほぼ同一平面上にあり、画面上分離されない。
右：前半規管の T-P を示す。線で示した S-P を一直線に見えるように回転させた。前半規管の S-P と T-P の角度は平均16.1°であった。

迷路の立体像に、任意の点・線または面を規定することにより、各々の一側の三つの半規管が互いになす角度、左右の半規管が互いになす角度、各半規管の縦径および横径を計測した。

3. 計測法

1) 半規管の角度の計測

再構成した半規管の立体像を回転して一つの半規管を、半規管を含む平面の接線方向と平行な方

向から観察すると、半規管には一平面上から逸脱する部分、すなわち捻れのあることがわかる。そこで本研究では、Sato ら⁴⁾の定義に準じて、半規管を含む二つの平面“標準平面” (standard plane, 以後 S-P) と“偏位平面” (torsion plane, 以下 T-P) を以下のごとく定義した。膨大部の中心点と膨大部の対側終点を結ぶ線を骨半規管内腔の中央を座標系によって求めた。この2点を結ぶ線を“stan-

dard line”と定義した。standard line の中点を通過する垂線が、座標系によって求められた半規管内腔の中央に交わる点を“standard point”とした。半規管の大部分を代表する平面としてのS-Pは、standard line を一辺として standard point を残る一頂点とする三角形を含む平面として定義した(図2左)。捻れを含む平面 T-P は、standard point を一頂点とし、モニター上で半規管を回転させた時に最も S-P から逸脱する半規管上の2点を残る二頂点とする、3点により規定される平面と定義した(図2右)。

角度に関する計測項目としては、

- ① 各々の半規管の S-P と T-P がつくる角度
- ② 一側の3つの半規管の平面が互いにつくる角度、すなわち、
 - (A) 前半規管と後半規管、後半規管と外側半規管、および外側半規管と前半規管の S-P が互いにつくる角度
 - (B) 前半規管と後半規管、後半規管と外側半規管、および外側半規管と前半規管の T-P が互いにつくる角度
- ③ 左右の同名半規管の平面が互いにつくる角度
- ④ 左右の対になった半規管の平面が互いにつくる角度、すなわち右前半規管と左後半規管、左前半規管と右後半規管とがつくる角度について計測した。

2) 縦径および横径の計測

半規管の大きさについてヒトと比較するために各々の半規管の縦径および横径を計測した。三次元のワイヤーフレームの画像を回転して、半規管の最大正面像をコンピューター画面上に得られるようにし、半規管骨迷路の最長距離を縦径として計測した。縦径の中点を通過し直交する線が骨迷路に至るまでの距離を横径として測定した(図3)。横径の一端が前庭に至る場合、縦径の中点から横径と直交する線が骨迷路に至るまでの距離の2倍を横径とした。各径を測定する際、骨迷路内腔の切断面の中心を座標系で求め計測点とした。

結 果

1. 半規管の角度

1) 各々の半規管の S-P と T-P がつくる角度

モニター上で、再構成した半規管像を回転させながら観察すると、後半規管の6耳中5耳および外側半規管の6耳中4耳は、前記のごとく定義した S-P が、骨迷路の作る画像の中央に重なって認められた。すなわち後半規管と外側半規管は、膨大部を含め半規管全体がほぼ一つの平面上にあった。しかし前半規管には全耳で捻れがあり、特に総脚寄りでは途中から後内方へ捻れていた(図2右)。

表1に各々の半規管と S-P と T-P が互いにつくる角度を示した。S-P と T-P がなす角度の平均は前半規管、後半規管、外側半規管の順に大きかった。前半規管の S-P と T-P の互いになす角度の平均は、他の半規管に較べ約2倍大きかった。後半規管および外側半規管の S-P と T-P が互いになす角度には、差に一定の傾向はなかった。

S-P と T-P との角度の個体差は前半規管では右側13.8°、左側14.8°、後半規管では右側1.2°、左側7.8°、外側半規管では右側9.1°、左側2.7°であった。他の半規管に較べて前半規管において個体差が大きく、F1サルにおいて他のサルよりも左右とも大きかった。

2) 3つの半規管が互いにつくる角度

(1) S-P の角度

各半規管の S-P が互いになす角度を表2に示した。前半規管と後半規管の S-P がなす角度は87.6~107.3°、6耳平均99.6°であった。個体差は大きかったが種差とはいえず、また左右差は1.7~4.7°で小さかった。後半規管と外側半規管の

表1 標準平面と偏位平面がなす角度

		M1	M2	F1	6耳平均
前半規管	右	16.2	12.4	26.2	16.1
	左	12.4	7.4	22.2	
後半規管	右	7.4	8.6	8.6	8.5
	左	4.6	9.4	12.4	
外側半規管	右	6.5	10.0	15.6	7.4
	左	3.3	6.0	3.4	

M: *Macaca mulatta*, F: *Macaca fascicularis*. (単位 °)

表2 半規管の標準平面と偏位平面の角度

		標準平面				偏位平面			
		M1	M2	F1	6耳平均	M1	M2	F1	6耳平均
前半規管 -後半規管	右	87.6	105.8	107.3	99.6	84.6	103.1	83.7	90.3
	左	90.1	104.1	102.6		78.3	97.0	95.4	
後半規管 -外側半規管	右	93.1	88.5	76.8	87.4	75.9	88.6	72.6	82.1
	左	92.7	93.7	79.6		88.4	82.3	84.6	
外側半規管 -前半規管	右	100.9	90.5	107.6	97.0	89.1	108.8	108.1	96.6
	左	96.7	89.5	96.9		78.0	97.4	98.1	

M: *Macaca mulatta*, F: *Macaca fascicularis*.

(単位 °)

S-P がなす角度は76.8~93.7°, 6耳平均87.4°であった。左右差は0.4~5.2°であった。外側半規管と前半規管のS-P がなす角度は89.5~107.6°, 6耳平均97.0°であった。左右差は1.0~10.7°であった。

後半規管と外側半規管のS-Pのつくる角度は90°よりも平均2.6°小さいのみで、機械的に期待される直角に近似していた。前半規管と後半規管、外側半規管と前半規管のS-Pがつくる角度は直角より各々9.6°, 7.0°大きく100°に近似していた。

(2) T-Pの角度

各半規管のT-Pが互いになす角度を表2に示した。前半規管と後半規管のT-Pがなす角度は78.3~103.1°, 6耳平均90.3°であった。左右差は6.3~11.7°であった。後半規管と外側半規管では72.6~88.6°, 6耳平均82.1°であった。左右差は6.3~12.0°であった。外側半規管と前半規管では78.0~108.8°, 6耳平均96.9°であった。左右差は10~11.4°であった。

前半規管と後半規管のT-Pのつくる角度の平均はほぼ直角に近似していた。後半規管と外側半規管のT-Pのつくる角度は直角より平均7.9°鋭角であった。外側半規管と前半規管のT-Pのつくる角度は直角より平均6.6°大きくほぼ100°に近似していた。

(3) S-PとT-Pによる計測の差

T-Pがなす角度の平均はS-Pがなす角度よりも鋭角であった。前半規管と後半規管がなす角度では、S-Pによる計測値とT-Pの計測値との間に平均9.3°の差があり、T-Pの計測値はより直角に近似していた。後半規管と外側半規管のなす角度、

表3 左右の半規管の平面がなす角度

		M1	M2	F1	平均 (n=3)
両側前半規管	S-P	96.0	60.0	65.2	73.8
	T-P	101.9	68.8	75.2	81.9
両側後半規管	S-P	80.7	91.6	86.5	86.3
	T-P	85.9	90.1	80.9	85.6
両側外側半規管	S-P	172.4	168.9	163.3	168.2
	T-P	175.1	164.7	158.3	166.0
右前半規管 -左後半規管	S-P	161.3	162.4	157.8	160.5
	T-P	174.2	165.9	172.6	170.9
左前半規管 -右後半規管	S-P	158.3	161.7	170.0	163.3
	T-P	161.1	169.7	171.6	167.5

M: *Macaca mulatta*, F: *Macaca fascicularis*, (単位 °)

S-P: 標準平面, T-P: 偏位平面。

および外側半規管と前半規管のなす角度のT-Pの計測値はS-Pの計測値よりも各々平均5.3°, 0.4°鋭角であった。

3) 左右の同名半規管が互いにつくる角度

表3に各々の左右の半規管がなす角度を示した。

側頭骨錐体部後面は矢状面に対しほぼ45°の角度をなし、同名の前・後半規管の面のなす角度は90°であることが期待される。しかし左右前半規管のなす角度はS-Pでは60.0~96.0°, 3頭平均73.8°, T-Pでは68.8~101.9°, 3頭平均81.9°であった。個体差は他の二つの半規管に較べ大きく、S-Pでは36.0°, T-Pでは33.1°であった。左右後半規管のなす角度はS-Pでは80.7~91.6°, 3頭平均86.3°, T-Pでは80.9~90.1°, 3頭平均85.6°であった。個体差は前半規管に較べ小さく、S-Pでは10.9°, T-Pでは9.2°であった。S-PおよびT-Pの

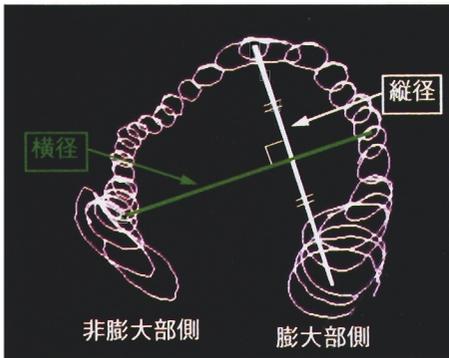


図3 前半規管の縦径・横径 (M1 monkey 右耳を後下方より見る)

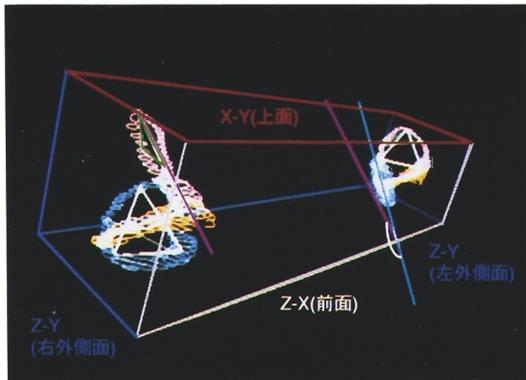


図4 右前半規管と左後半規管の標準平面がなす角度
M1 monkey の半規管を右外側前方より見る。右前半規管と左後半規管の角度を示すため、右前半規管 S-P を一直線となるように回転させ(赤紫線の直線)、左側へ平行移動させた。左後半規管の T-P (青線) とのなす角度は平均 160.5° であった。

計測値は直角より各々平均 7.3° , 4.4° 小さく、前半規管に較べ直角に近似していた。

各個体内でみると、両側前半規管がなす角度と両側後半規管がなす角度が一致する個体はなかった。

動物の自然な体位において、左右への頭部の回転時に最も強く刺激される半規管は外側半規管であり、互いに同一平面上にあることが期待される。計測の結果、左右外側半規管のなす角度は頭側で凸状の角度をなしており、S-P $163.3\sim 172.4^\circ$ 、3頭平均 168.2° 、T-P $158.3\sim 175.1^\circ$ 、3頭平均 166.0° であった。両側外側半規管の S-P と T-P の平均の



図5 後半規管の膨大部の組織切片標本
M2 monkey の右後半規管の膨大部 (黒矢) と膨大部の対側半規管腔 (白矢) がみられる。後半規管の縦径は膨大部とほぼ同じ切片で同時に見られる対側の半規管腔を結ぶ直線であった。HE 染色 $1\times$

角度の差は 2.2° と小さく、個体差は S-P で 9.1° 、T-P で 16.8° で両側前半規管のなす角度より小さかった。

4) 左右の対になった半規管が互いにつくる角度

右前半規管と左後半規管、および左前半規管と右後半規管の組み合わせは生理学的に対をなし共役関係にあるため、これらの角度を計測した(表3)。右前半規管と左後半規管のなす角度は S-P では $157.8\sim 162.4^\circ$ 、3頭平均 160.5° 、T-P $165.9\sim 174.2^\circ$ 、3頭平均 170.9° であった。個体差は S-P 4.6° 、T-P 8.3° であった。S-P および T-P による計測値は平面より各々 19.5° 、 9.1° 小さく(図4)、T-P による計測値はより平面に近い傾向があった。左前半規管と右後半規管のなす角度は S-P では $158.3\sim 170.0^\circ$ 、3頭平均 163.3° 、T-P $161.1\sim 171.6^\circ$ 、3頭平均 167.5° であった。個体差は S-P 11.7° 、T-P 10.5° であった。S-P および T-P による計測値は平面より各々 16.7° 、 12.5° 小さく、各個体をみても T-P による計測値はより平面に近づく傾向があった。

各個体において右前半規管—左後半規管のなす角度と左前半規管—右後半規管のなす角度の差は、M1サル の T-P および Fサル の S-P で 10° 以上

表4 半規管の縦径と横径

		縦 径				横 径			
		M1	M2	F1	6耳平均	M1	M2	F1	6耳平均
前半規管	右	5.43	4.65	4.16	4.77	5.24	4.01	3.80	4.31
	左	5.48	4.90	4.00		4.54	4.01	4.24	
後半規管	右	5.15	4.92	4.46	4.75	4.36	4.04	3.08	3.79
	左	5.07	4.78	4.09		3.90	4.18	3.81	
外側半規管	右	4.95	5.15	4.54	4.73	4.35	4.22	3.19	3.98
	左	5.07	4.55	4.12		4.66	3.96	3.60	

M: *Macaca mulatta*, F: *Macaca fascicularis*.

(単位 mm)

であったが、それ以外は0.7~3.8°と小さく、個体内ではほぼ一致した。

2. 各半規管の縦径および横径

縦径が膨大部を通らなかった半規管は18半規管のうちの5半規管、すなわち6耳のうち3耳前半規管、1耳後半規管、1耳外側半規管であった。それ以外の縦径では膨大部を通る径であった。横径が前庭を通った半規管は18半規管のうちの6半規管、すなわち6耳のうち1耳前半規管、1耳後半規管、4耳外側半規管であった。

1) 縦径

表4に3頭6耳の各半規管の縦径の計測値を示した。前半規管の縦径は4.00~5.48mm、6耳平均4.77mmであった。後半規管の縦径は4.09~5.15mm、6耳平均4.75mmであった。外側半規管の縦径は4.12~5.15mm、6耳平均4.73mmであった。個体による差は前半規管で1.43mm、後半規管では1.06mm、外側半規管では1.03mmで、各々平均値の30%、22%、22%であった。しかし各個体の左右差は0.60mm以内で小さく、前半規管0.05~0.25mm、後半規管0.08~0.37mm、外側半規管0.12~0.60mmであった。縦径の平均は前半規管、後半規管、外側半規管の順に長かったが、差は0.05mm以内であった。後半規管の縦径は膨大部とほぼ同じ切片で同時にみられる対側の半規管腔を結ぶ直線であった(図5)。

2) 横径

表4に縦径と同様に3頭6耳の各半規管の横径の計測値を示した。前半規管の横径は3.80~5.24mm、6耳平均4.31mmであった。後半規管の横径は3.08~4.36mm、6耳平均3.79mmであった。外

側半規管の横径は3.19~4.66mm、6耳平均3.98mmであった。個体による差は前半規管で1.44mm、後半規管では1.28mm、外側半規管では1.47mmで、各々平均値の33%、34%、37%と大きかった。しかし各個体の左右差は前半規管0.00~1.16mm、後半規管0.14~0.73mm、外側半規管0.26~0.41mmで、各々の平均値の0~30%、4~19%、7~10%と小さかった。横径は前半規管、外側半規管、後半規管の順に長かった。前半規管と後半規管、および前半規管と外側半規管の平均の横径の差は各々0.52mm、0.35mmであったが、後半規管と外側半規管の差は0.19mmで小さかった。

前半規管の縦径×横径は平均4.77×4.31mmで、縦径と横径との差は0.46mmであった。前半規管はほぼ正円に近い3/4円の形態であった(図2)。

後半規管の縦径×横径は平均4.75×3.79mmで、縦径と横径との間に1.04mmの差があった。後半規管の縦径は5耳で膨大部を通過し、膨大部からの距離が長い楕円形であった。

外側半規管の縦径×横径は平均4.73×3.98mmで、縦径と横径との間に0.75mmの差があった。外側半規管の縦径は5耳で膨大部を通過し、外側半規管も膨大部からの距離が長い楕円形であることがわかった。

考 察

1. コンピューターによる再構成と計測

半規管は頭部の回転速度および重力を検出するための力学的な受容器であり、半規管の三次元構造の解析は、生理機能を理解する上で重要である。

内耳は側頭骨内に存在し、複雑な構造を呈している。骨迷路は体内で最も強固な骨組織の一つであるため、内耳構造の形態、空間的位置関係を正確に測定することは困難であった。1953年 Schuknecht⁵⁾は Guild⁶⁾の方法を修正し、蝸牛基底板の長さを二次元的に計測する graphic reconstruction 法を考案した。これは蝸牛回転が半真円の結合からできているものと仮定し、切片の厚みから蝸牛の回転径を計測する方法であり、側頭骨の研究者らにより伝統的に利用されてきた。

Takagi ら³⁾⁷⁾⁸⁾は正確さを期するために基準点を作製した側頭骨の連続組織切片標本から、側頭骨をコンピューター画像で三次的に再構成し、計測する方法を開発した。その研究の一環として蝸牛基底板の長さを計測し、Schuknecht による方法と比較検討した⁸⁾。同一標本で Schuknecht 法では30.8mmで、Takagi らの方法による計測では36.4mmであった。この差が生じる最大の原因は、Schuknecht 法では蝸牛軸と組織切片面との角度を考慮に入れていないためであり、蝸牛軸に直角に切った連続切片から Schuknecht 法により計測した結果は36.6mmで、Takagi らの方法とより一致した。

内耳構造は二次元上にはなく、真の形態を明らかにするためには、三次元空間上での計測が要求される。

原田・田山^{9)~13)}は基準点を作製していないが独自の方法で三次元的に骨迷路および膜迷路を再構成し、視覚的に捉えやすい画像として構造を提示している。Green ら¹⁴⁾はコンピューターにより内耳の各構造をカラーで分け遠近感のある像を作成し、非常に理解しやすい画像を示している。ヘリカルCT スキャンによる三次元再構成¹⁵⁾によっ

てもヒト内耳の細部を立体的に表示する試みがなされてきているが、半規管の計測はまだ行われていない。

2. 半規管の捻れ

様々な動物で半規管の捻れが指摘されている¹⁶⁾¹⁷⁾。Sato ら⁴⁾はヒト半規管が単一平面では表すには無理があり、捻れ“torsion”があることに着目し、半規管の捻れについて初めて計測した。

本研究における半規管の平面の定義は Sato ら⁴⁾の定義に準じた。Sato ら⁴⁾のヒト半規管の捻れの角度の計測値と比較すると、表5のごとく各々の半規管の捻れの角度は、サルではヒトの計測値に極めて近い値であった。前半規管の捻れの程度は、ヒトおよびサルとともに後半規管と外側半規管の2倍であった。

半規管部の管腔部に生じた長軸方向の内リンパ流と、方向性を持たない圧変化はすべてクプラに伝えられる。従って半規管部の膜迷路全体が最もよく重なる一つの平面で半規管の知覚平面を代表すべきであるが、半規管面は平面にはなく、単一平面で代表するには無理がある。サルにおいても、半規管の角度を計測するために三次元画像を自在に回転して様々な方向より半規管を観察した結果、後半規管および外側半規管はほぼ単一平面上にあったが、前半規管は総脚側で後内方に捻れ、単一平面上にはなかった。これは Bohmer ら¹⁸⁾の実験で、水平性前庭眼反射の最大となる面は外側半規管のみを外科的に遮断して不活化させたときの最小反応面ではないこと、すなわち垂直半規管も水平性の頭部の運動の検出に関与することを支持する。

3. 一側半規管の互いになす角度

サルの三つの半規管が互いになす角度は、T・P

表5 Sato らのヒト半規管の角度との比較

	標準平面-偏位平面			標準平面		偏位平面	
	Sato ら ヒト (n=10)	著者 サル (n=6)		Sato ら ヒト (n=10)	著者 サル (n=6)	Sato ら ヒト (n=10)	著者 サル (n=6)
前半規管	16.4±3.6	16.1	前半規管-後半規管	107.9±5.5	99.6	95.8±11.2	90.3
後半規管	8.5±4.2	8.4	後半規管-外側半規管	87.3±6.9	87.4	90.9±8.3	82.1
外側半規管	9.5±6.7	7.4	前半規管-外側半規管	78.7±10.0	97.0	92.6±15.4	96.6

(単位 °±SD)

表6 半規管角度の文献との比較

	Blanks ら ヒト (n=20)	アカゲザル (n=18-20)	Beck ら ヒト	Takagi ら ヒト (n=1)	Sato ら Standard plane ヒト (n=10)	著者 Standard plane サル (n=6)
前半規管-後半規管	81.16±4.72	86.48±3.43	83~88	108.2	107.9± 5.5	99.6
後半規管-外側半規管	95.75±4.66	88.49±3.91	80~92	101.3	87.3± 6.9	87.4
前半規管-外側半規管	111.76±7.55	98.73±5.39	83~85	101.8	78.7±10.0	97.0
両側外側半規管	19.82±14.93	2.24±0.77				(180-)11.8
右前半規管-左後半規管	23.73± 6.71	11.18±3.12				(180-)19.5
左前半規管-左後半規管	24.56± 7.19	10.67±3.55				(180-)16.7

(単位 °±SD)

による計測では全体的に S-P による計測よりも小さくなる傾向にあり、各個体をみても S-P, T-P と必ずしも直交していなかった。

ヒト半規管がなす角度についてはいくつか報告されている^{4)19)~21)}。表6に示すごとく各々の半規管のなす角度の計測値には20°から30°に近い幅がある。これは計測方法や半規管を代表とする面の定義による違いと考えられる。Beck & Bade²⁰⁾による報告が最も直角に近く、各々のなす角度は直角よりも僅かに小さい。Takagi ら²¹⁾は本研究と同様の方法でヒト半規管骨迷路の計測を行い検討している。Takagi ら²¹⁾の報告では各々の半規管が最も重なる一平面をその半規管を代表する面と定義し計測した。一側の各々の半規管面がなす角度は100°を越えいづれも互いに直交せず、また膨大部稜長軸および半規管と膨大部稜長軸のなす角度も直交していなかったと述べている。

Sato ら⁴⁾は三つの半規管平面の互いになす角度は S-P に較べ T-P では90°に近づくことから、torsion 発生メカニズムによらず、捻れによってヒトの半規管の角度関係が直角に近づくことにより、前庭機能が最適な状態になるであろうと推察している。すなわち T-P を半規管の機能的な受容平面としていると考えられる。この結果に反しサルでは T-P による角度の関係は S-P による関係より鋭角で、むしろ直角から逸脱する角度が出現した。半規管の代表的な受容平面を決定するためには、再考の必要があると考えられる。

サルの各々の半規管が存在する面によってつくられる座標系は、必ずしも直交座標系ではなかった。半規管の互いになす角度が直角であれば、一

半規管が最大の入力を受けるとき、他の二つの半規管は全く入力を受けない。しかし直角ではない場合には、一半規管が最大の入力を受けるときにも、他の半規管は入力を受け、入力量は全体として加算されることになる。直角の関係ではないことが、一側の半規管の感受性をより鋭敏にしていることが推察される。しかし一方では直交座標系でない場合、刺激の方向に対して、感受する側の方向に関する特異性が減少することも考えられる。刺激を直交座標系として変換し感知する機構はより中枢で行われていることが推察される。

半規管において膨大部、膨大部の対側終点、およびこの二頂点より最長の頂点からなる三角形は、半規管の主たる機能の部位を含む三角形である。いいかえれば S-P は形態的には一半規管を含み、その半規管の平面を代表とする面のうちの一つといえる。サルにおいて各々の半規管の代表面が互いになす角度はほぼ直角から110°の関係であり、この関係に較べ相対的に捻れの方向は半規管の内側にわずかに捻れる傾向にあった。半規管面の捻れは前庭機能の感受性を向上することが推察されている²²⁾。半規管に捻れがあることにより、多様な方向のベクトルをもつ刺激に対し、最大に感受できる多様な面を備えられることが推察される。

材料の作製法や半規管を代表する面の定義は諸家により異なり、種属の違いによる厳密な意味での比較検討は困難である。最も生理的機能的な代表面の決定においては問題が残されている。生理学的な実験との対比より明らかとなるであろう。

4. 両側半規管の互いになす関係

同一個体の左右の半規管を再構成・計測した報告は少ない。Blanks ら¹⁹⁾はヒト頭蓋骨を削開し三つの半規管を露出させ、マイクロメーターにて半規管腔の各点を記録し、大型コンピューターによって半規管の面を決定して、各々の半規管と Ried stereotaxic system との角度、両側の半規管面がなす角度について計測した。同様の方法でサルについても計測している²³⁾。Blanks ら¹⁹⁾によると、両側外側半規管を含め左右で対となる半規管の角度は、ヒトでは19.82~27.73°平面と角度をなしていたが、サルではヒトの計測値に較べ180°に近付いていた(表6)。しかしこの研究において半規管腔のどの点を記録していたのか、またコンピューター処理の計算原理は示されておらず骨半規管腔径の誤差を生ずる可能性が考えられる。

本研究の結果サルでは、両側前半規管のなす角度はS-P, T-P 共に約40°の個体差があり、各個体で両側前半規管角度と両側後半規管角度は一致しなかった。

左右外側半規管、前半規管と対側後半規管はそれぞれ一対となって一つの平面を形成し、この面に沿った前庭眼反射が生ずる。本研究の結果、両側外側半規管のなす角度、前半規管と対側の後半規管との角度は平面より10~20°の角度をなし、単一平面上にはなかった。個体差は両側前半規管のなす角度に較べ小さく、各個体をみても、前半規管と対側半規管のなす角度は左右でほぼ一致した。また各個体内で左右で対をなす半規管の角度は、両側外側半規管を除き、T-P ではより平面に近付いた。これは両側前半規管角度、後半規管角度によらず、左右で対をなす半規管角度が数学的

な同等性を保ち、さらに捻れにより平面に近付くことによって、左右で協同的な機能を保持することが推察される。

本研究の結果はBlanks らのヒトの計測値に比べ約10°平面に近似していた。サルにおいて両側の対となる半規管がより平面に近付く傾向にあることは、運動機能においてヒトより敏捷であるサルの優れた機能を引き出すことに役立つことが考えられる。

5. 半規管の長さ

Macaca の三つの半規管の長さを実測した報告はみられない。他種の半規管距離の報告を表7に示す。

Igarashi²⁴⁾は外側半規管と平行になるように薄切面をとった組織切片標本により、ヒト、リスザルおよびネコの外側半規管の径、膨大部、クブラの高さや厚さ等について計測した。卵形囊から外側半規管の最長径はヒトで6.4mm(頭蓋骨の大きさ:180×135mm)、リスザルでは3.6mm(頭蓋骨の大きさ:47×35mm)(表7)で、頭蓋骨の大きさに対する後半規管の径はリスザルではヒトの約2倍であると報告している。Sato ら²⁵⁾は、本研究において使用したコンピュータープログラムを用いてヒトの骨半規管の最長距離を計測している。膨大部中央から骨迷路の外側縁までの最長距離を半規管の径と定義し、性差について検討している。三つの半規管の最長径の平均は6~8mmで、前半規管において男女間に有意差があったと報告している。これによるとヒトでは後半規管は他の半規管に較べ約1mm長い。

本研究の対象としたサルでは両側外耳道口間の距離は52~56mmであった。各々の文献の最長径

表7 半規管の縦径の比較

	Sato ら 男性 (n=9)	女性 (n=9)	Igarashi ヒト (n=10)	ネコ (n=5)	リスザル (n=10)	著者 サル (n=6)
前半規管	7.62±0.44	6.78±0.56				4.77
後半規管	8.33±0.74	7.78±0.89				4.75
外側半規管	6.26±0.56	6.09±0.50	6.4	4.1	3.6	4.73
頭蓋骨横径			135	40	35mm	52~56

(単位 mm±SD)

と、本研究の最長径である縦径では定義が異なるが、サルの方々の半規管の最長径は前、後、外側半規管で差はなかった。Igarashi の報告と較べると頭蓋径が大きいほど半規管径は長い。しかし頭蓋骨の大きさに対する半規管の大きさは、ヒトでは4.7%、本研究のサルでは8.7~9.1%で、サル半規管の頭蓋に対する大きさはヒトに比して約2倍大きいことがわかる。本研究では半規管骨迷路の長径と短径を測定したが、前半規管以外のほとんどの半規管で最長径が膨大部を一起点とする径であったことは、膨大部において回転刺激を感知しこれに相当する電気信号を出力する上で、生理学的に重要な意味を持つものと考えられる。

結 語

1. 3頭のMacacaサル側頭骨の連続組織切片標本により半規管骨迷路をトレースすることにより、コンピューターにより三次元再構成し、半規管面がなす角度および径を計測した。

2. 前半規管は総脚側で後内方に捻れており、単一平面上にはなかった。後半規管と外側半規管は前半規管に比べ捻れの程度は小さく、ほぼ単一平面内にあった。

3. 一側の各々の半規管が存在する面によってつくられる座標系は、必ずしも直交座標系ではなかった。

4. 左右の前半規管のなす角度には約40°の個体差があり、個体内で両側前半規管角度と後半規管角度が一致する個体はなかった。

5. 左右の外側半規管のなす角度は、前半規管と対側の後半規管がなす角度は平面より10~20°小さく同一平面上にはなかった。しかし個体差は小さく、各個体内において前半規管と対側後半規管のなす角度は左右でほぼ一致し、さらにT-Pによる計測値ではより平面に近付いた。これより左右で対をなす半規管角度が数学的な同等性を保ち、さらに捻れにより平面に近付くことによって、左右で協同的な機能を保持することが推察された。

6. 後半規管および外側半規管の最長距離は膨大部を一起点としていた。半規管の最長距離は4.0~5.5mmで、前半規管、後半規管および外側半規管の最長距離には差がなかった。前半規管は

正円に近い形態であったが、後半規管および外側半規管は膨大部を含む径が最長距離の楕円形であった。

稿を終えるにあたり本研究の機会を与えて戴き、御校閲、御助言を賜りました東京女子医科大学耳鼻咽喉科学教室石井哲夫教授、東京女子医科大学附属第二病院耳鼻咽喉科荒牧 元教授、本研究の機会を与えて戴き御助言を賜りました帝京大学耳鼻咽喉科鈴木淳一教授、直接御指導戴きました新井寧子助教授に深く感謝致します。また解析プログラムの使用ならびに御助言を戴きました静岡県立総合病院耳鼻咽喉科高木明先生、標本作製の際に多大な御協力を戴いた帝京大学耳鼻咽喉科側頭骨病理研究室斎藤江美氏ならびに馬場雅子氏、御協力戴きました東京女子医科大学附属第二病院耳鼻咽喉科の諸先生に深謝致します。

本論文の要旨は第53回日本平衡神経科学学会総会(1994年)において報告した。

本研究の一部は平成5年度文部省科学研究費補助金一般研究C課題番号04807125, および平成3年度東京女子医科大学山川寿子研究奨励金により遂行された。

文 献

- 1) Suzuki J, Cohen B, Bander M: Compensatory eye movements induced by vertical semi-circular canal stimulation. *Exp Neurol* 9 : 137-160, 1964
- 2) Robinson DA: The use of matrices in analyzing the three-dimensional behavior of the vestibulo-ocular reflexes. *Biol Cybern* 46 : 53-66, 1982
- 3) Takagi A, Sando I: Computer-aided three-dimensional reconstruction and measurement of the vestibular end-organs. *Otolaryngol Head Neck Surg* 88 : 195-202, 1988
- 4) Sato H, Sando I, Takahashi H et al: Torsion of the human semicircular canals and its influence on their angular relationships. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 113 : 171-175, 1993
- 5) Schuknecht HF: Techniques for study of cochlear function and pathology in experimental animals. *Arch Otolaryngol* 58 : 377-397, 1953
- 6) Guild SR: A graphic reconstruction method for the study of the organ of Corti. *Anat Rec* 22 : 141-157, 1921
- 7) 高木 明: 内耳のコンピューター三次元再構成—

- その形態と計測について一. 耳鼻臨 83(6) : 833-840, 1990
- 8) **Takagi A, Sando I** : Computer-aided three-dimensional reconstruction : A method of measuring temporal bone structures including the length of the cochlea. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 98 : 515-522, 1989
 - 9) **原田勇彦, 管澤 正, 田山二郎** : 側頭骨の三次元再構成. *Ear Res Jpn* 18 : 404-406, 1987
 - 10) **Harada T, Ishii S, Tayama N** : Three-dimensional reconstruction of the temporal bone from histologic section. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 114 : 1139-1142, 1988
 - 11) **田山二郎, 原田勇彦, 管澤 正ほか** : 側頭骨組織切片の三次元再構成. *耳鼻臨* 81(1) : 131-135, 1988
 - 12) **原田勇彦, 田山二郎** : 側頭骨切片からの骨迷路, 膜迷路の三次元再構成. *Ear Res Jpn* 19 : 52-54, 1988
 - 13) **Harada T, Tayama N, Sugawara M et al** : Computer-aided three-dimensional reconstruction of the osseous and membranous labyrinths. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 247 : 348-351, 1990
 - 14) **Green JDJ, Marion MS, Hinojosa R et al** : Three-dimensional reconstruction of the temporal bone. *Laryngoscope* 100 : 1-4, 1990
 - 15) **米川博之, 大橋正真, 菊池秀樹ほか** : ヘリカルスキャンによる3次元CTの側頭骨への応用. *日耳鼻* 96 : 1465-1470, 1993
 - 16) **Reisine H, Simpson JI, Henn V et al** : Combined anatomical and physiological study of semicircular canal orientation in the rhesus monkey. *Neurosci Abstr* 11 : 319, 1985
 - 17) **土屋由子, 新井寧子, 荒牧 元ほか** : ハト内耳の3次元再構築. *日耳鼻* 95 : 1510-1511, 1992
 - 18) **Bohmer A, Henn V, Suzuki JI** : Vestibulo-ocular reflexes after selective plugging of the semicircular canals in the monkey-response plane determinations. *Brain Res* 326 : 291-298, 1985
 - 19) **Blanks RHI, Curthoys IS, Markham CH** : Planer relationship of the semicircular canals in man. *Acta Otolaryngol* 80 : 185-196, 1975
 - 20) **Beck C, Bader J** : Ein Beitrag zur feineren Anatomie des menschlichen Innenohres, Zusammengefaßt dargestellt in einem neuen Labyrinthmodell. *Archiv Ohren-usw. Heilk. u.Z. Hals-usw Heilk* 181 : 245-267, 1963
 - 21) **Takagi A, Sando I, Takahashi H** : Computer-aided three-dimensional reconstruction and measurement of semicircular canals and their cristae in man. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 107 : 362-365, 1989
 - 22) **Muren C, Ruhn G, Wilbrand H** : Anatomic variations of the human semicircular canals. A radioanatomic investigation. *Acta Radiol Diagnosis* 27 : 157-163, 1986
 - 23) **Blanks RHI, Curthoys IS, Markham CH et al** : Planer relationship of the semicircular canals in rhesus and squirrel monkeys. *Brain Res* 340 : 315-324, 1985
 - 24) **Igarashi M** : Dimensional study of the vestibular apparatus. *Laryngoscope* 77 : 1806-1817, 1967
 - 25) **Sato H, Sando I, Takahashi H** : Computer-aided three-dimensional measurement of the human vestibular apparatus. *Otolaryngol Head Neck Surg* 107 : 405-409, 1992