コンピュータによる前庭水管及び傍前庭小管 の三次元再構成

岡山大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：増田 游教授）

藤 本 政 明

COMPUTER-AIDED THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF THE HUMAN VESTIBULAR AQUEDUCT AND THE PARVESTIBULAR CANALICULUS

MASAAKI FUJIMOTO, M.D.

Department of Otolaryngology, Okayama University Medical School, Okayama

The vestibular aqueduct (VA) and paravestibular canaliculus (PVC) were reconstructed using a computer-aided three-dimensional reconstruction system (SERSERS) from five series of the serial, histopathological sections of the human temporal bones without alignment markers. In order to align the serial sections, more than ten sectional tissue structure images on a section such as the cochlea, VA, PVC, semicircular canals, ossicles and facial canal were compared with those on the consecutive section and the position was determined where the deviation of each sectional image pair would be the minimum in every direction. Repeating this procedure throughout the series of the sections, we could perform the overall alignment of the sections. As the standard viewing axis of reconstruction, we used the modiolus and constructed a triplet of images; posteromedial view image viewing from posterior surface side of the pyramis parallel to the modiolus, superior view image viewing from anterior surface side of the pyramis perpendicularly to the modiolus, anteromedial view image viewing from the internal carotid artery side perpendicularly to the modiolus. The triplet images of the cochlea, VA and PVC presented us their three-dimensional configuration and the spatial relationship among them. Superior view showed that the angle between the plane of the proximal portion of the VA and that of the basal turn of cochlea varied in a wide range from 53 degrees to 68 degrees. Anteromedial view showed that the angle between the plane of the distal portion of the VA and that of the posterior semicircular canal also varied in a wide range from 22 degrees to 49 degrees. In comparison with a medial view graphic reconstruction method developed by Egami and Sando (1984), computer-aided three-dimensional reconstruction gives us more precise configurations of the VA and PVC and their spatial relationships to the posterior semicircular canal.

Key words: 前庭水管, 傍前庭小管, 三次元再構成, コンピュータ

A 94—0316—24510

1. はじめに

原因不明の内リンパ水腫（メニエール病）の側頭骨において、前庭水管の低形成が認められることが報告されてより^{1)~3)}、前庭水管の形態と内リンパ水腫との

関係が注目されている。また内リンパ嚢手術を行うに際し、前庭水管の形態と周囲器官、特に傍前庭小管との関係について正確に知っておくことは重要である。しかし、前庭水管と傍前庭小管は骨迷路の中で最も

図1 蝸牛, 前庭水管, 傍前庭小管, 後半規管の三次元再構成像 (Posteromedial View)
 図1-5におけるA, B, C, D, Eは, 症例1, 2, 3, 4, 5に対応する.
 VA: 前庭水管, PVC: 傍前庭小管, PSC: 後半規管.

形態的に個体差に富む小骨管であるため, 従来の検討方法では種々の問題点があった。つまり臨床に行われる tomography²⁴⁾ や CT scan⁵⁾ では詳細な描出ができない, microdissection⁶⁾ では裏面の形態が得られない, plastic mold²⁾ では内リンパ水腫との関係が判定できない。また, 特に側頭骨病理組織切片⁷⁾⁸⁾ は病理組織学的検討には必須であるが, 立体的形状と位置関係は把握しにくい等の問題である。

江上と山藤 (1979) は連続組織切片から前庭水管の立体的形状を再構成する簡便な方法 (Medial View Graphic Reconstruction 法) を考案した⁹⁾。この方法は, Schuknecht により考案された蝸牛の hook portion の Graphic Reconstruction 法¹⁰⁾ を応用したもので, 前庭水管と後半規管とを仮想面上 (下部基底回転コルチ器が成す面) に張り付けた状態として作図するものである。Sando と Ikeda は, この方法で前庭水管の面積, 拡大度, 後半規管に対する長さ, 外口の位置などを求め, メニエール病症例においては低形成の前庭水管が多いことを報告している⁸⁾。また, Ikeda と

Sando は傍前庭小管の走行と前庭水管, 後半規管との位置関係についての検討を行い, メニエール病症例においては傍前庭小管が直接後頭蓋窩に出ることが多いとしている¹¹⁾。しかし, この方法は簡便ではあるが, 薄切角度, 基準点のとりかたの問題などにより前庭水管と傍前庭小管の再構成に歪を生じることが予想される。

近年急速に発展してきているコンピュータを用いた再構成法は, 前庭水管や傍前庭小管のように多様な走行を示す小骨管の比較検討には最も優れ, 臨床的にも手術角度からの立体像 (stereo illustration) が得られるなど有用性が高いと考えられる。しかし, 切片を重ね合わせ際のマーカーがない従来の連続切片からは, ずれが生じると考えられ, また切片を重ねあわす明確な基準が記載されたものもない。著者は, このような連続切片からも十分再構成できる標準的コンピュータ再構成法を確立することにより, ヒト側頭骨水平連続切片から前庭水管と傍前庭小管を中心とした骨迷路の三次元的形態の再構成を行った。

図2 蝸牛、前庭水管、傍前庭小管の三次元再構成像 (Superior View)

2. 材料および方法

前庭水管および傍前庭小管の側頭骨連続切片よりの三次元再構成は、菊田らが作成した Computer-aided Serial Section Reconstruction System (SERSERS)¹²⁾¹³⁾を用いて行った。

生前耳疾患のない正常成人ヒト側頭骨5症例5耳(右耳4, 左耳1)について行った。剖検時に側頭骨を採取、ただちに10%ホルマリン緩衝液にて固定、5%トリクロロ酢酸にて脱灰、アルコール上昇法にて脱水した後セロイジンにて包埋、25 μ mで薄切した後、10枚おきにHE染色し封入した。この切片を写真現像用投影機にて約10倍となるよう投影し、蝸牛、前庭水管、傍前庭小管、半規管、外耳道、耳小骨、鼓室、後頭蓋窩、顔面神経管、内耳道などの10以上の構造物の各断面像をA4(210mm×297mm)の紙に複写した。位置合わせは、連続する切片においてこれらすべての構造物の連続性を検討し、一定方向へのずれが最小となる

ような位置を求めることにより行った。これをTVカメラにより512×512画素の濃淡画像として岡山大学情報処理センターの大型コンピュータ(ACOS-1000)に入力し、以後目的像の抽出と抽出像の修正、隣接切片間での各領域の連続性の検討、連続領域の分類、分枝、吻合状態の検討を行った後、三次元再構成を行った。再構成像の作製は、日本語ページプリンターによる線画像とディスプレイ上への陰影画像とを行った。また、陰影画像においては、10度回転させた陰影画像も求めstereo illustrationとして表した。

また、同じ5症例においてMedial View Graphic Reconstruction⁹⁾を求め、三次元再構成像との比較検討を行った。Medial View Graphic Reconstructionは、まず蝸牛のGraphic Reconstructionを行ったのち、各切片において後頭蓋窩側コルチ器と前庭水管前端、傍前庭小管前端、後半規管前端までの距離をそれぞれ後頭蓋窩側コルチ器より下部基底回転内外側コル

図3 蝸牛，前庭水管，傍前庭小管，後半規管の三次元再構成像（Anteromedial View）

チ器を結ぶ線（L線）上にとり，そこから各々の実際の長さを引くように作図することによって得られる。基底回転が消失した切片においては後半規管中点を後頭蓋窩側コルチ器に代わる基準とし，中耳側基底回転が消失した切片においては中回転の内外コルチ器を結ぶ直線と平行に後頭蓋窩側コルチ器より引いた直線をL線として作図した。

3. 結 果

三次元再構成像は，任意方向への投影像として作製が可能である。投影方向の基準を蝸牛軸とし，蝸牛，前庭水管，傍前庭小管及び後半規管の三次元再構成像を，蝸牛軸と平行に錐体後頭蓋窩側より見た状態（Posteromedial View），蝸牛軸と垂直に錐体中頭蓋窩側より見た状態（Superior View），蝸牛軸と垂直に内頸動脈側より見た状態（Anteromedial View）の線画像として図1，2，3に示した。また内リンパ嚢手術時の方向から見た状態として中耳側後下方から見た蝸牛，前庭水管，傍前庭小管，後半規管，外側半規管及び前庭の三次元再構成像を stereo illustration 陰影画像として図4に示した。

Posteromedial View においては，前庭水管の拡大度は症例1，3では，35度，36度であったが，症例2，

表1 三基準再構成像と Medial View Graphic Reconstruction の検討

症例	Posteromedial View における前 庭水管の拡 大度(度)	Superior View におけ る近位前庭 水管と蝸牛 基底回転と の角度(度)	Anterome- dial View における遠 位前庭水管 と後半規管 との角度(度)	Medial Vi- ew Graphic Reconstruction における前庭水管 の拡大度(度)
1	35	63	47	27
2	53	53	36	50
3	36	63	30	25
4	47	62	22	43
5	53	68	49	62
平均	44.8	61.8	36.8	41.4

4，5では53度，47度，53度とあきらかに大きな広がりを示した。その平均は44.8度であった（表1）。前庭水管外口の位置は症例2，3，4では後半規管の最下端付近に認められるが，症例1，5ではあきらかにそれより後方に認められた。また，前庭水管の長さは症例2，4，5では後半規管の最下端までであるが，症例1，3ではこれより長かった。前庭水管前縁は症例1では後半規管の最下端にあるが，それ以外の症例においてはそれより前にあった。前庭水管後縁は症例1，

図4 中耳側後下方より見た内耳骨迷路の stereo illustration 陰影画像

5では後半規管の後端より後方に認めるが、症例2, 3, 4においては後半規管後端までとなっていた。傍前庭小管は、症例3のみ近位前庭水管付近で2本であ

るが、その他の症例では全長にわたり1本であった。また、症例2では近位前庭水管の後方より前方に出るよう走行するが、その他の症例ではほぼ全長にわた

図5 蝸牛、前庭水管、傍前庭小管、後半規管の Medial View Graphic Reconstruction
II線：蝸牛基底回転下端とPSC内側縁下端を結ぶ線

り前庭水管前方に存在し、極端に前庭水管から離れるものは認めなかった。症例4では、後頭蓋窩に達する前に前庭水管と合流していたが他の症例では合流していなかった。

Superior View においては、近位前庭水管のなす面と蝸牛基底回転のなす面との角度を求めたところ、最小は症例2の53度、最大は症例5の68度と15度の差が認められ、平均は61.8度であった(表1)。前庭水管は、全症例において全体に滑らかな弧を描いており、その長さは症例5は症例2の約1.5倍であった。傍前庭小管は、症例1, 4では前庭水管に重なるように走行しており、症例2, 3, 5では前庭水管と分かれていた。つまり、症例2, 5では前庭水管中耳側より後頭蓋窩側に、症例3では常に前庭水管後頭蓋窩側に認められた。傍前庭小管が前庭水管後頭蓋窩側から中耳側に向かって走行するものは認めなかった。

Anteromedial View においては、後半規管のなす面と遠位前庭水管のなす面との角度を求めたところ、最小は症例4の22度、最大は症例5の49度と27度の差が認められ平均は36.8度であった(表1)。症例2の前庭水管は Superior View では中央付近で折れ曲がって

いるが、Anteromedial View では滑らかな弧を描いており、症例3の前庭水管は Superior View では滑らかな弧を描いているが、Anteromedial View では峡部でかなり折れ曲がっていた。傍前庭小管は、全症例において前庭水管中耳側に位置していた。

内リンパ嚢手術の際参考となるように、蝸牛、前庭水管、傍前庭小管、後半規管、外側半規管及び前庭の中耳側後下方より見た stereo illustration 陰影画像を作製した(図4)。前庭水管外口は、外側半規管の延長線上かそのやや下方に位置していた。傍前庭小管は、遠位前庭水管前方中耳側に位置していた。今回の5症例では、前庭水管外口が後半規管により経乳突洞的に達することができないほど低形成の前庭水管は認めなかった。

Medial View Graphic Reconstruction (図5) においては、前庭水管の拡大度は症例1, 3では27度、25度とあまり強い拡大を示さないが、症例2, 4, 5では50度、43度、62度と強い拡大を示した。面積は症例1, 2, 3では15.2mm²、15.8mm²、14.8mm²であるが、症例4では23.8mm²と大きく、症例5では45.3mm²と更に大きくなっていた。三次元再構成像の

Posteromedial View と比較すると症例3の前庭水管の長さは、三次元再構成像では後半規管下端より下方にあるが、Medial View Graphic Reconstruction では後半規管下端までとなっていた。また症例5の前庭水管の長さは、三次元再構成像では後半規管下端であるが、Medial View Graphic Reconstruction では後半規管下端より下方までのびていた。Medial View Graphic Reconstruction における前庭水管の拡大度は、三次元再構成より小さく、その形態は後方に延長されて表されていた。すべての症例において Medial View Graphic Reconstruction の前庭水管及び傍前庭小管は三次元再構成像より後半規管に対し後方に位置するように表されていた。

4. 考 察

側頭骨水平連続切片よりの三次元再構成は、過去 wax plate¹⁵⁾ や plexiglass sheet¹⁶⁾ を用いることにより行われていたが、最近ではコンピュータを用いた再構成システムによる報告が多くなされている^{17)~20)}。この方法の利点は、薄切の角度に関係なく対象構造物の立体的形態を再構成できること、あらゆる方向からの前庭水管、傍前庭小管の形態学的検討とその周囲構造物との位置関係の把握が可能なことである。問題点は、マーカーを持つ連続切片でしか行われていなかったり、切片を重ねあわす明確な基準が記載されていないことである。著者は、マーカーのない連続切片での三次元再構成を正常側頭骨5症例において検討したが、蝸牛、前庭水管、傍前庭小管、半規管、外耳道、耳小骨、鼓室、後頭蓋窩、顔面神経管、内耳道などの構造物の連続性を検討し特定方向へのずれが最小となるように各切片を重ねれば多少の歪はあるものの過去の wax plate や plexiglass sheet による三次元再構成、microdissection, plastic mold と比較してもほぼ満足できる三次元再構成像が得られることが確認できた。

マーカーとしては、ブロック作製時に薄切面に垂直な2平面にて中耳、内耳を避けるように切断し、この切片の2辺を使用する方法が、対象構造物の損傷を回避し、またそのマーカー作製の容易さから優れていると考えられる。しかし、マーカーが確実に作られた切片においてもセロイジン自体の収縮や薄切時のずれがあるため、そのままの再構成では表面不整な像となってしまうため、著者の方法による連続性の検討及び修正は有用であると考えられる。

一方、三次元再構成により症例の比較検討を行うに

は、投影方向を同一にする必要があるが、従来の報告には明確な基準投影法が提起されていなかった。著者は、連続切片作製時の基準軸である蝸牛軸を投影方向の基準として用いるのがよいと考え、蝸牛軸と平行に錐体後頭蓋窩側から見た再構成像 (Posteromedial View)、蝸牛軸と垂直に錐体中頭蓋窩側より見た再構成像 (Superior View)、蝸牛軸と垂直に内頸動脈側より見た再構成像 (Anteromedial View) の三再構成像を基準再構成像とし正常5症例の比較検討を行った。

Posteromedial View では、前庭水管の形態特に遠位前庭水管の広がりや後半規管との位置関係を理解することができる。Superior View は、近位前庭水管が前庭から出る角度がよく理解でき、この方向から見た前庭水管の長さにも差が認められることがわかった。また症例1, 5の Posteromedial View では傍前庭小管は常に前庭水管の前方に位置していることしか理解できなかったが、Superior View ではその走行に明らかな差が認められた。Anteromedial View では、遠位前庭水管が後頭蓋窩に向かってどのような角度で広がっているかが理解でき、Superior View では滑らかな弧を描いても Anteromedial View では折れ曲がっている症例やその反対の症例もあること、傍前庭小管がすべての症例で前庭水管の中耳側に位置していることも明らかになった。このように三基準再構成像を作製することによりはじめて前庭水管の形態、傍前庭小管の走行及び周囲器官との位置関係を立体的に正確に理解し比較検討することができる。

また、中耳側後下方からの stereo illustration 陰影画像を作製することにより、内リンパ嚢手術経路としての解剖学的位置関係を立体的に示すことができる。これらの再構成像 (図4) を検討することにより、内リンパ嚢手術における傍前庭小管や後半規管の損傷を避けることができ得る。この方法は、外耳道造設術、cochlear implant、聴神経腫瘍の経迷路的摘出術、singular neurectomy などにおいても、前もって立体的に手術経路を検討できる点で非常に有用である。

Sando らの Medial View Graphic Reconstruction と SERSERS による三次元再構成像の Posteromedial View と比較すると、前庭水管の後半規管に対する長さが異なる症例が認められること、前庭水管と傍前庭小管は後半規管に対しより後方に表されること、前庭水管は拡大度が小さく、また後方に延長されて表されることが判明した。これらの違いは Medial View Graphic Reconstruction が以下の問題を持って

図6 Medial View Graphic Reconstructionの検討

A, A': 基底回転後頭蓋窩側コルチ器, B, B': 基底回転中耳側コルチ器, C: VA1, VA2 前端, C': $AC=AC'$ となるような L 線上の点, C'': $A'C=A'C''$ となるような L 線上の点, D: VA3, VA4 前端, V 線: C を通り薄切面に垂直な線, V' 線: 基準点が円を描くために V 線はこの線のように歪む。形態や位置の異なる前庭水管 (VA1, 2, 3, 4) も、その前端が A から等距離で前庭水管自体の長さが同じであれば、L 線上に投影されると区別できない。

図7 Medial View Graphic Reconstructionの検討

A: 下部基底回転中耳側コルチ器が消失
B: 基底回転後頭蓋窩側コルチ器を基準とする
C: 基底回転が消失
D: 後半規管が消失
E 線: 後半規管の中線

いるためと考えられる。1) Medial View Graphic Reconstruction の基礎となる蝸牛の Graphic Reconstruction は、Takagi と Sando の報告¹⁷⁾ にもあるように薄切の角度によりかなり変わる。2) 基準としている基底回転後頭蓋窩側コルチ器が円を描くため、図6のように薄切面と垂直な V 線は、V' 線のように歪んで表される。そしてこの歪は、基底回転後頭蓋窩側コルチ器と前庭水管前端を結ぶ線と L 線との角度が大きいほど著しい。3) 実際には位置や形態が異なる前庭水管(図6の VA1, VA2, VA3, VA4)でも、その前端

と蝸牛基底回転後頭蓋窩側コルチ器との距離が等しくその長さが同じであれば、すべておなじものとして表される。4) 基底回転中耳側コルチ器が消失した切片(図7の A)、後半規管も消失した下方の切片(図7の D)では基準点とするものがない等である。

6. 結 語

1) 位置合わせのためのマーカーをもたない正常ヒト頭骨水平連続切片 5 症例について、コンピュータ再構成システム (SERSERS) を用いて、前庭水管、傍前庭小管の再構成を行った。連続する蝸牛、前庭水管、傍前庭小管、後半規管、外耳道、耳小骨、鼓室、後頭蓋窩、顔面神経管、内耳道等の特定方向へのずれが最小となるように、切片間の位置合わせを行うことにより歪の少ない三次元再構成を行い得た。

2) 蝸牛軸を投影の基準とし、Posteromedial View, Superior View, Anteromedial View の三再構成像を前庭水管、傍前庭小管再構成時の基準再構成像とすることにより、前庭水管、傍前庭小管の立体的形態、空間的位置関係が明瞭に示された。Superior View では、近位前庭水管のなす面と基底回転のなす面との角度に53度から68度の変位が認められること、Anteromedial View では、遠位前庭水管のなす面と後半規管のなす面との角度が22度から49度まで変位に富むことが示された。

3) 中耳側後下方からの stereo illustration 陰影画像を作製し、コンピュータによる三次元再構成が、内リンパ嚢手術の際に有用であることを示した。

4) Medial View Graphic Reconstruction を SERSERS による三次元再構成像と比較した結果コンピュータによる三次元再構成像は、前庭水管の正確な形態、前庭水管や傍前庭小管の後半規管に対する立体的位置関係をよりよく表していた。

参考文献

- 1) Clemis JD, Valvassori GE: Recent radiographic and clinical observations on the vestibular aqueduct: a preliminary report. Otolaryngol Clin North Am 1: 339-446, 1968.
- 2) Stahle J, Wilbrand H: The vestibular aqueduct in patients with Meniere's disease. Acta Otolaryng 78: 36-48, 1974.
- 3) Egami T, Sando I, Black FO: Hypoplasia of the vestibular aqueduct and endolymphatic sac in en-

- dolymphatic hydrops. ORL 86: 327-339, 1978.
- 4) Wilbrand HF, Rask-Andersen H, Gilström D: The vestibular aqueduct and the para-vestibular canal. Acta Radiologica 15: 337-335, 1974.
 - 5) Nidecker A, Pfaltz CR, Matefi L et al: Computed tomographic findings in Meniere's disease. ORL 47: 66-75, 1985.
 - 6) Ogura Y, Clemis JD: A study of the gross anatomy of the human vestibular aqueduct. Annals of Otol Rhinol Laryngol 80: 813-825, 1971.
 - 7) Gussen R: Vascular mechanisms in Meniere's disease. Arch Otolaryngol 108: 544-549, 1982.
 - 8) Sando I, Ikeda M: The vestibular aqueduct in patient with Meniere's disease. Acta Otolaryngol 97: 558-570, 1984.
 - 9) 江上徹也, 山藤 勇: 前庭水管の Graphic Reconstruction, 日耳鼻 82: 895-898, 1979.
 - 10) Schuknecht HF: Techniques for study of cochlear function and pathology in experimental animals: Development of the anatomical frequency scale for the cat. Arch Otolaryngol 58: 377-397, 1953.
 - 11) Ikeda M, Sando I: Paravestibular canaliculus in Meniere's disease. Annals of Otol Rhinol Laryngol Suppl. 118: 11-16, 1985.
 - 12) 菊田彰夫, 村上宅郎: 電算機を用いたラット副腎髄質の血管系の再構築とそれに基づく髄質微細構造の解析, 解剖学雑誌 61: 551, 1986.
 - 13) 菊田彰夫: 連続切片画像からの立体画像構成システム (SERSERS), Rep. Research and Development, Okayama Univ. Comp. Center 2: 1-14, 1988.
 - 14) 児玉 章, 山藤 勇: ヒト側頭骨の前庭水管と内リンパ嚢の形態, Equilibrium Res 42: 261-267, 1983.
 - 15) Anson BJ, Nesselrod JP: Endolymphatic and associated ducts in man. Arch Otolaryngol 24: 127-140, 1936.
 - 16) Waldorf RA: A three dimensional model of the cat labyrinth. Acta Otolaryng 78: 49-50, 1974.
 - 17) 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.
 - 18) Antunez JM, Galey FR, Linthicum FH et al: Computer-aided and graphic reconstruction of the human endolymphatic duct and sac. Ann Otol Rhinol Laryngol 89: 23-32, 1980.
 - 19) Saito R, Fujimoto M, Kikuta A et al: Visualization of human vestibular aqueduct with computer-aided serial section reconstruction system. Acta Otolaryngol Suppl 447: 100-104, 1988.
 - 20) Galey FR, Rosenblatt S, Motta G et al: Morphometric analysis of the human endolymphatic sac. Acta Otolaryngol Suppl 459: 27-37, 1988.
-
- 稿を終えるに当たって、ご指導とご校閲を賜りました増田 游教授、並びに恩師小倉義郎名誉教授に深甚なる謝意を表します。また本研究に際し、懇切なるご指導を頂きました第二解剖学教室菊田彰夫講師に心から感謝致します。
- 本文の要旨は第37回日本基礎耳科学会(大阪)において発表した。
- 本論文は「岡山大学審査学位論文」として印刷公表する。
-
- (1990年 8 月 2 日受稿 1990年10月20日受理)
- 別刷請求先 〒700 岡山市鹿田町2-5-1
岡山大学医学部耳鼻咽喉科学教室 藤本政明