

経錐体到達法における3次元画像の有用性に関する研究

石井 則宏

経錐体到達法は、斜台部や脳幹前外側面などの頭蓋底部へ最短距離で到達できること、広い術野が得られること、脳圧排が少ないこと等の特徴を有する優れた手術到達法である。しかし、重要構造物が密集する錐体骨の骨削除を要するため、脳神経外科手術の中でも特に難易度の高い手術とされている。

解剖用屍体10体の頭部を手術用顕微鏡下に解剖し、骨削除を安全に行うための問題点について検討した。その結果、従来用いられてきた解剖学的指標は、その個体差によって必ずしも信頼できる指標とはなり得なかった。

そこで、手術に必要な錐体骨内部の重要構造物である顔面神経、三半規管、蝸牛、前庭水管、耳小骨、内頸動脈、S状静脈洞、頸静脈球のみを選択した3次元画像を作成し、その有用性と精度について検討した。錐体骨3次元画像は、錐体骨内部構造を立体的に理解する際に有用であり、十分な精度を有していた。術前の手術シミュレーションを行う際においても、任意の侵入角度から観察した錐体骨内部構造を描出することができた。

また、この3次元画像を navigation system に応用して骨削除を行ったところ、錐体骨内部の重要構造物を確実に温存しつつ、かつ速やかに骨削除を行うことが可能であった。

(平成16年9月21日受理)

Three Dimensional Images of Microsurgical Anatomy for a Transpetrosal Approach

Norihiro ISHII

A transpetrosal approach can provide neurosurgeons with excellent exposure of lesions of the clivus and the anterolateral portion of the brain stem, because they can be approached perpendicularly with a short working distance, various angles for dissection are available, and minimal retraction of the temporal lobe and cerebellum is necessary. The operative procedure through this approach, however, is an extremely difficult one, because the petrous bone is anatomically complicated and maximized drilling is needed.

Ten cadavers were dissected under an operative microscope and the problems involved in safe drilling of the petrous bone were examined. The anatomical milestones, which are usually used during this procedure, were not necessarily reliable.

Selective three dimensional images of the petrous bone involving such important structures as the facial nerve, semicircular canals, cochlea, vestibular aqueduct, sigmoid sinus and internal carotid artery were made using the workstation (Advantage Windows). These three dimensional

images were very accurate and could be used as a preoperative simulation, which was useful for preserving important structures. They were also applied to a navigation system during a posterior petrosectomy. This method was also extremely useful when drilling into the petrous bone as rapidly and safely as possible. (Accepted on September 21, 2004) *Kawasaki Igakkaishi* 30(2): 69-81, 2004

Key Words ① Petrous bone ② Temporal bone ③ Skull base surgery
④ Anatomy ⑤ Three dimensional image

はじめに

側頭骨 (temporal bone) は、その発生から squamous portion, tympanic portion, petrous portion の3つに分けられる。錐体骨 (petrous bone, petrous pyramid) はこの petrous portion にあたり、内部には三半規管、蝸牛、前庭、顔面神経、内頸動脈などの重要な構造物が密集し、頭蓋骨のみならず人体の骨組織の中でも最も複雑な構造を有している部分であるとされる¹⁾。

経錐体到達法は、この錐体骨の骨削除を行うことにより、斜台部や脳幹前外側面などの頭蓋底深部の病変に到達する手術法で、歴史的には耳鼻科領域における拡大中頭蓋窩法から発展したものである^{2), 3)}。手術用顕微鏡の導入と頭蓋底外科技術の発達に伴い顔面神経や聴覚器などの温存が可能となったため、脳神経外科領域では、聴覚器の前方の錐体先端部を中頭蓋窩経由で削除し侵入する anterior transpetrosal approach^{4), 5)}と、聴覚器の後方を削除し Trautman 三角を経由する posterior transpetrosal approach^{6), 7)}が行われるようになり、頭蓋底の腫瘍性病変のみならず脳動脈瘤や脳動脈奇形などの様々な手術に応用されるようになった。これらの方法は、通常到達が困難な深部病変に最短距離で到達できるのみでなく、比較的術野が広く、脳圧排が少ない点で優れている^{8)~10)}。

経錐体到達法を安全に行うためには、錐体骨の微小外科解剖に十分に精通していなければならず、侵入角度、到達部位、削除する範囲によって様々に変化する顔面神経、三半規管、内頸動脈、頸静脈球などの相対的な位置関係を3次元

的に理解しておく必要がある¹¹⁾。しかし、近年の飛躍的に発達した画像診断技術をもってしても、錐体骨内部の微小構造を3次元的に理解することは必ずしも容易ではない。そこで、high resolution CTより得られた錐体骨の2次元データから、workstationを用いて手術に必要な重要構造物のみを選択し、これらを3次元画像化した。得られた3次元画像を手術用顕微鏡下に観察した解剖所見と比較し、その精度と有用性について検討した。

今回の分析には、経錐体到達法の中でも、顔面神経や三半規管近傍の骨削除を要し、特に3次元画像が有用であると思われる posterior transpetrosal approachを用いた。

方 法

1. 経錐体到達法における骨削除および局所外科解剖の分析には、メタノールアルコール、ホルマリンを主体とする防腐液によって頸動脈法で乾式防腐保存¹²⁾された解剖用屍体10体の頭部20側を用いた。手術用顕微鏡下に経錐体到達法を行い、顔面神経、三半規管、蝸牛、前庭水管、耳小骨、内頸動脈、S状静脈洞、頸静脈球の相対的な位置関係の評価を行い、骨削除時の解剖学的指標および手技上の問題点について検討した。なお骨削除を行うにあたり、high resolution CTで側頭骨35側を撮影し、内耳道の深さや内耳道後壁から後半規管までの距離を測定し、重要構造物のサイズや各構造物間の距離の個体差についても検討した。

2. 錐体骨内部の詳細な3次元画像の作成は、8症例におけるCT scanの2次元データを

workstation (Advantage Windows) へ入力し、錐体骨内部の重要構造物のみを選択的に3次元画像化した。CT scanはProseed SA Libra (GE横河)を用い、撮像条件は140 kv, 160 mA, 1 secで、FOVは6から8 cm, スライス幅は1 mmとした。3次元化した構造物を正確に選択しなければならないので、造影剤の点滴静注により内頸動脈、横静脈洞からS状静脈洞、頸静脈球などの脈管系にコントラストを付け、Hounsfield unit (HU)のthresholdを80から120に設定することにより脈管系を自動的に選択した。次に、錐体骨内部の微小な構造物の中で、手術時に解剖学的指標となり得たり、温存をしなければならない構造物である顔面神経、内耳道、三半規管、蝸牛、耳小骨、前庭水管を選択した。これらの構造物のHUには大きな差がなく、thresholdの設定による自動的な選択ができないため、すべての撮影スライスにおいてマニュアルで各構造物を選択する必要があった。その後、各構造物を一つずつ volume rendering法を使用し3次元画像化し合成した。この3次元画像を用いて、骨削除時のそれぞれのステップに応じた侵入角度の変化や手術視野の変化などをシミュレーションし、実際の骨削除時のものと比較検討した。

3. 錐体骨の3次元画像を navigation system を

用いた骨削除に応用するため、メタノールアルコール、ホルマリンを主体とする防腐液によって頸動脈法で乾式防腐保存¹²⁾された解剖用屍体1体の頭部を high resolution CTで撮影し、このデータを Stealth station navigation system (Kobayashi Sofamor Danek) へ入力した。この navigation system は、workstation (Silicon Graphics)、高解像度グラフィックスモニター、赤外線カメラおよびデジタルカメラからなる。workstation へは、CTで撮影したDICOM規格の画像データを入力する。入力したCTのイメージデータセットと、

実際の頭部のサージカルデータセットの整合 (レジストレーション) をまず行う。この navigation system では、ポイントレジストレーションとサーフェイスレジストレーションの2つの方式を併用してその精度を高めている¹³⁾。ポイントレジストレーションは、術前に4から6個の円形のフィデュシャルマーカーを頭皮に貼り付けCTを撮影、CT上のマーカーと実際の頭皮上のマーカーの位置を計算して、それぞれのデータセットの整合を行うためである。サーフェイスレジストレーションは、ランダムに30から40箇所の点を入力して対象の容積整合を行い、ポイントレジストレーションの精度を向上させるためである。手術操作部位が術前に撮影したCT上のどの位置にあたるかは、オプティカルトラック方式¹⁴⁾を用いて計算している。すなわち、手術器具 (ドリル先など) に取り付けた小型発光ダイオードの光の位置を、2つのCCDカメラで三角計測の原理で測定することにより手術器具の先端の座標を計算するというものである。術中の操作部位が作成した3次元画像、再構成した水平断面画像、冠状断面画像のどの位置にあたるかを高解像度グラフィックスモニター上にリアルタイムに表示する。経錐体到達法において、これらのモニター画面を参

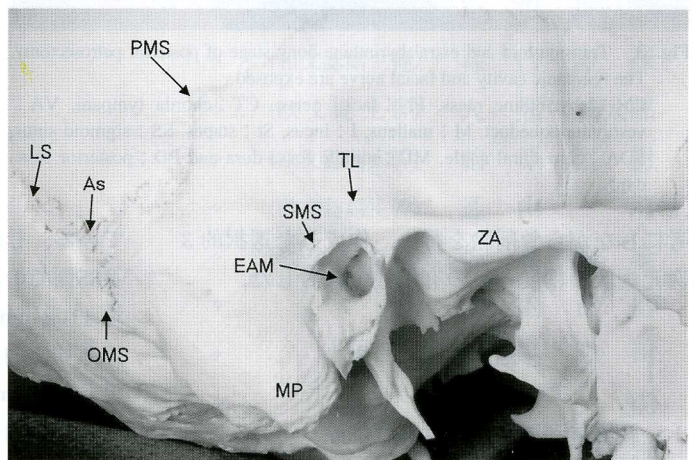


Fig. 1. Lateral aspect of the right temporal bone.

As : asterion, LS : lambdoid suture, PMS : parietomastoid suture, OMS : occipitomastoid suture, MP : mastoid process, SMS : suprameatal spine, EAM : external auditory meatus, ZA : zygomatic arch and TL : temporal line.

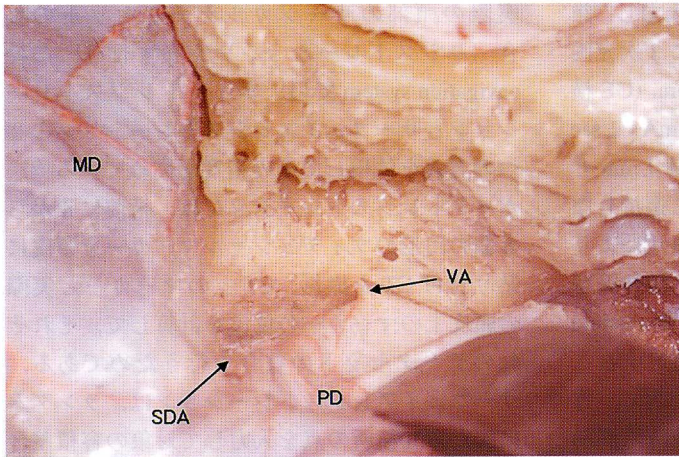


Fig. 2. Transmastoid and extralabyrinthine bony stage of posterior petrosectomy. The vestibular aqueduct and sino-dural angle are exposed. VA : vestibular aqueduct, SDA : sino-dural angle, MD : middle fossa dura and PD : posterior fossa dura.

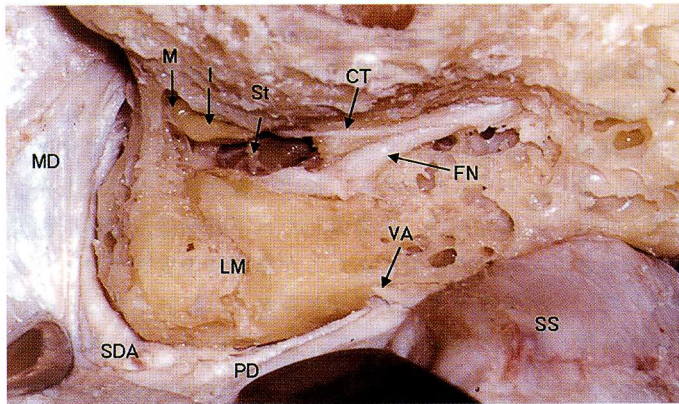


Fig. 3. Transmastoid and extralabyrinthine bony stage of posterior petrosectomy. The tympanic cavity and facial nerve are exposed. LM : labyrinthine mass, FN : facial nerve, CT : chorda tympani, VA : vestibular aqueduct, M : malleus, I : incus, St : stapes, SS : sigmoid sinus, SDA : sino-dural angle, MD : middle fossa dura and PD : posterior fossa dura.

考にしながら骨削除を行い、作成した選択的3次元画像の精度とその有用性を検討した。

結 果

1. 経錐体到達法における骨削除

錐体骨の骨削除にあたっては、骨表面にいくつかの解剖学的指標が認められた (Fig. 1)。temporal line は頬骨弓 (zygomatic process) の後端からはじまり後上方へと伸びており、中頭蓋窩

底のおおよその位置を示した。外耳孔 (external auditory meatus) の上端にある道上棘 (suprameatal spine, spine of Henle) は、その直下に乳突洞 (mastoid antrum) があり、mastoidectomy の際に確認すべき指標の一つであった。後頭乳突縫合 (occipitomastoid suture)、頭頂乳突縫合 (parietomastoid suture)、ラムダ縫合 (lambdoid suture) の合する点である asterion は、そのやや前方に穿った burr hole が後頭蓋窩に開き、かつ transverse-sigmoid junction のおおよその位置を示した。しかし、いずれもおおよその指標にすぎず、特に asterion と transverse-sigmoid junction の位置関係は個体差が著しく、信頼できる指標とはなり得なかった。

次に錐体後部を削開し上錐体静脈洞を露出した。この部は sino-dural angle と呼ばれ、中頭蓋窩硬膜と後頭蓋窩硬膜との折り返し部分にあたる。S 状静脈洞の前方の骨削除を進めると前庭水管口がある (Fig. 2)。Lang ら¹⁵⁾によると前庭水管口から平均 4.2 (1.2-7.5) mm 奥には後半規管があるとされており、これは骨条件 CT でも確認できるため後半規管の位置を知るためのよい指標となるとされている。

しかし、high resolution CT による側頭骨35側での計測では、例えば内耳道の深さは平均 11.2 mm で、最小 6.4 mm、最大 17.0 mm であり、内耳道後壁から後半規管までの距離は平均 14.0 mm で、最小 12.2 mm、最大 18.2 mm と錐体骨内部構造物のサイズや各構造物間の距離には個体差が著しかった。そのため、過去に報告された計測データは、個々の症例において骨削除を安全に行うための指標として問題があった。

次にS状静脈洞から頸静脈球部付近へ骨削除を進めた。S状静脈洞壁は脆弱であり容易に損傷され得るが、頸静脈球部に近づくときらに静脈洞壁は薄くなった。この部分を骨削除する際には、ダイヤモンドドリルを使用して薄い骨を静脈洞壁に残しておくことが重要であった。ここまで骨削除を行うと、中頭蓋窩硬膜、後頭蓋窩硬膜、乳突洞、S字状静脈洞から頸静脈球部に囲まれた術野が完成した (Fig. 3)。顕微鏡の侵入角度を変化させた際に顔面神経や三半規管の位置関係も変化した。この4つの指標を術野の枠としてとらえることで侵入角度の変化にある程度対応可能であった。

次に、三半規管の中に含む labyrinthine massを残すように骨削除を行った。labyrinthine massの大きさに個体差があるため、これが大きい場合には三半規管周囲の硬い緻密骨の骨削除が不十分となることがあった。三半規管を損傷せずに緻密骨をできるだけ削除するためには、それぞれの三半規管の位置を把握する必要があった。前庭水管、弓状隆起、鼓室の位置からある程度の位置を把握することは可能ではあったが、骨削除の途中で三半規管の一部を損傷する場合があった。

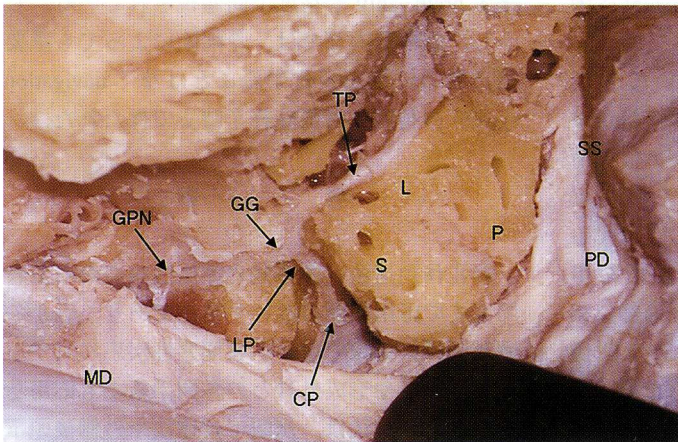


Fig. 4. Transmastoid and labyrinthine bony stage. The semicircular canals and internal auditory canal are opened.

S : superior semicircular canal, L : lateral semicircular canal, P : posterior semicircular canal, CP : canalicular portion of facial nerve, LP : labyrinthine portion of facial nerve, GG : geniculate ganglion, GPN : greater petrosal nerve, TP : tympanic portion of facial nerve, MD : middle fossa dura, PD : posterior fossa dura and SS : sigmoid sinus.

顔面神経も錐体骨内部では硬い骨に囲まれて走行しており、安全に全てを露出することは容易ではなかった。特に、内耳道底から膝神経節の間 (labyrinthine portion) は、細く脆弱なために骨削除を慎重に行う必要があった。

内耳道開放時の顕微鏡写真を Figure 4 に示す。三半規管を除去して内耳道を開放する translabyrinthine approach においては、三半規管を除去した後に錐体骨後面を後頭蓋窩硬膜を露出するように骨削除を行っていくと内耳道底に連続するため、内耳道の同定は比較的容易であった。しかし、内耳道底付近では硬膜が薄いため注意が必要であった。内耳道硬膜を露出するためには、ダイヤモンドドリルを使用して硬膜や神経と平行にドリルを操作し骨削除することが安全に露出させる上で重要であった。

2. workstation で作成した錐体骨3次元画像

まず、CT scan の2次元データ上の各スライスにおいて、それぞれの構造物を同定した。三半規管を同定する際の例として、その一部である6スライスを Figure 5 に示す。実際にはそれぞれの構造物について連続した20から30スライスが必要のため、3次元化画像の作成にはおおよそ20分から30分を要した。Figure 6 の如

く、耳小骨、顔面神経、内耳道、S状静脈洞から頸静脈球部、三半規管、蝸牛、前庭水管を個々に3次元画像化した後、これらを半透明にした錐体骨と合成した (Fig. 7)。この3次元画像は、任意の角度から観察可能であり (Fig. 8)、拡大縮小も自在であった。これらの画像は、錐体骨内部の解剖的理解、中でも各構造物の相対的かつ立体的な位置関係の理解に有用であった。特に、これらの3次元画像による任意の角度からの立体的な位置関係の理解は、錐体骨内部を安全に骨削除するためには不可欠であると考えられた。また、手術法の違いによって、もしくは各

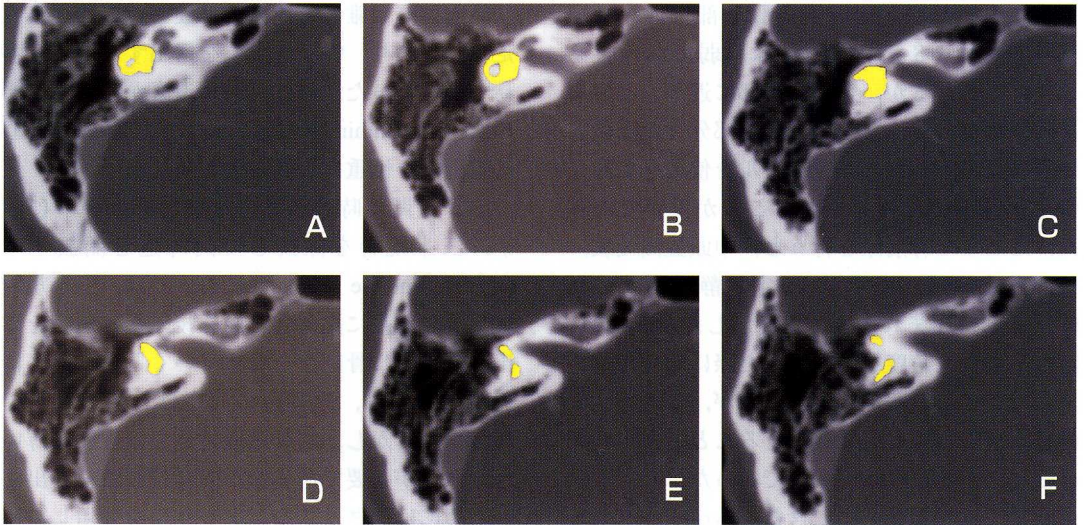


Fig. 5. Two dimensional (2D) images (A~F) of the petrous bone at the level of the internal auditory canal. The semi-circular canals at each section of the 2D images are shown in yellow.

骨削除の段階の違いによって不要な構造物を合成画像より省くことも可能であった。Figure 9-Aのように錐体骨を表示しない場合には、錐体骨内部の顔面神経と三半規管の相対的な位置関係の細かな評価を行うのに適していた。Figure 9-Bのように半透明の錐体骨を同時に表示すると、錐体骨の中のどの位置を顔面神経が走行しているかを検討するのに適していた。

3. 錐体骨3次元画像のnavigation systemへの応用

Figure 10にnavigation systemを用いて骨削除する際の実際のモニター画面を示す。Figure 10-AにはCTで撮影した水平断画像から再構成した冠状断、Figure 10-CにはCTの水平断が表示されているが、2本の赤線の交叉する点が、Figure 10-Bの手術用顕微鏡画面でポインターが指している顔面神経膝神経節部に相当する。同部は、Figure 10-Dの3次元画像上に白矢印でリアルタイムに示されるため、安全に骨削除を行うことができた。

この3次元画像を用いたnavigation systemは、我々の解剖用屍体を用いた骨削除の検討では1mm以下の精度であり、三半規管や顔面神経を露出する際の精密かつ安全な骨削除を行うために極めて有用であった。また、各構造物

の位置関係を正確に把握できるため、骨削除時間を大幅に短縮することができた。ただし、作成した3次元画像の角度と手術用顕微鏡の角度は必ずしも一致していないため、顕微鏡の侵入角度を変えた際には3次元画像の角度を修正する必要があった。このnavigation systemを脳内手術に用いる場合には、開頭、髄液の排除、病変部操作などに伴い脳組織の形状と位置に変化を来すbrain shiftが精度上問題視されている。しかし、錐体骨内部では、骨削除によっても重要構造物の位置が変化することはなくnavigation systemの精度は骨削除終了時まで保たれた。

考 察

経錐体到達法は頭蓋底の腫瘍性病変から血管障害まで応用範囲の広い手術法であり、近年の頭蓋底外科領域では、頭頸部悪性疾患に対する耳鼻咽喉科や形成外科との合同手術でも応用されている。本法は、側頭下到達法や外側後頭下到達法と比較すると、脳をほとんど圧排せずに深部へ到達可能であり、脳に対して低侵襲な手術法である。しかし、重要構造物が密集する錐体骨の骨削除が必要であり、その難易度の高さから一部のエキスパートによってのみ行われて

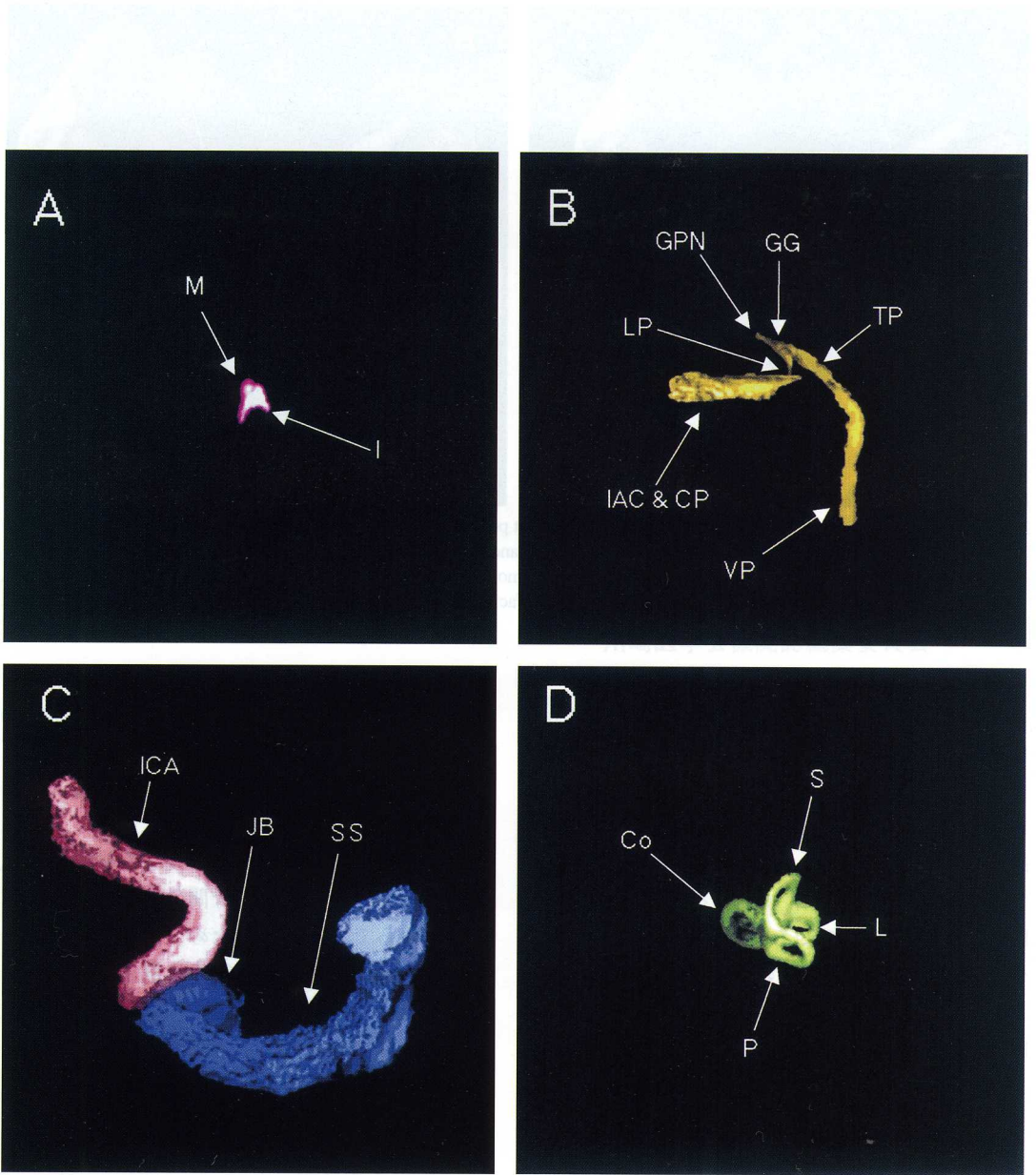


Fig. 6. Three dimensional (3D) images of each selective microstructure of the petrous bone.

A : the malleus and incus. **B :** the facial nerve. **C :** the vessels. **D :** the labyrinth.

M : malleus, I : incus, IAC & CP : internal auditory canal and canalicular portion of facial nerve, LP : labyrinthine portion of facial nerve, GG : geniculate ganglion, GPN : greater petrosal nerve, TP : tympanic portion of facial nerve, VP : vertical portion of facial nerve, ICA : internal carotid artery, JB : jugular bulb, SS : sigmoid sinus, Co : cochlea, S : superior semicircular canal, L : lateral semicircular canal and P : posterior semicircular canal.

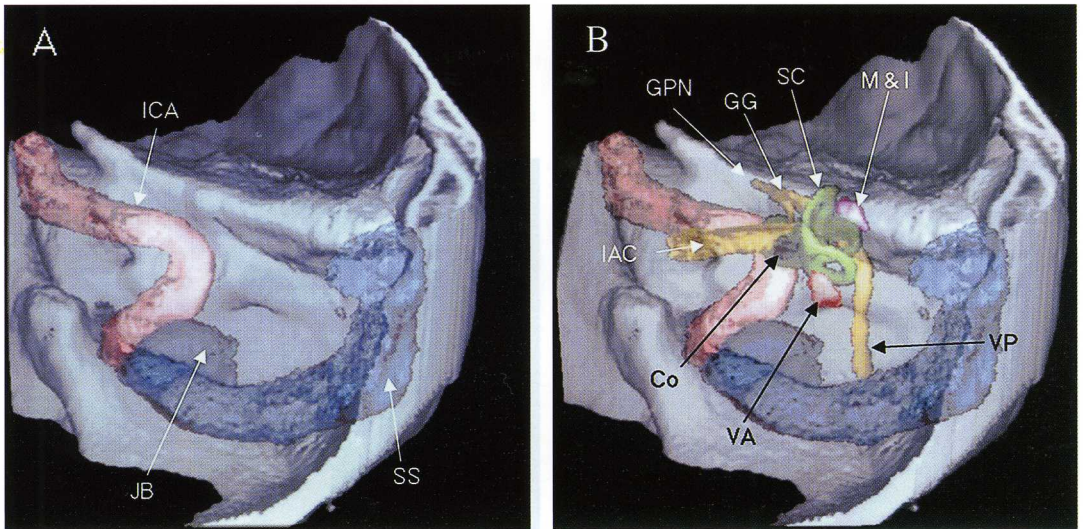


Fig. 7. Posterior aspects of the selective 3D images of the right petrous bone.

A : 3D images of the internal carotid artery, sigmoid sinus and jugular bulb. B : final images of the selective 3D images.

ICA : internal carotid artery, JB : jugular bulb, SS : sigmoid sinus, SC : semicircular canal, GG : geniculate ganglion, GPN : greater petrosal nerve, VP : vertical portion of facial nerve, VA : vestibular aqueduct, M : malleus, I : incus, Co : cochlea and IAC : internal auditory canal.

いるのが現状である。

そこで、解剖用屍体を用いて、特に骨削除が複雑な posterior transpetrosal approach を行い、その問題点について検討した。錐体骨の微小外科解剖に習熟し、ドリリングによる骨削除の経験を重ねることによって比較的安全的な骨削除を行うことができた。ドリリングに際しては、high resolution CT による骨条件画像は、錐体骨内部の詳細な評価をする際に極めて有用であった。神崎ら¹⁶⁾は、ヒト側頭骨において high resolution CT を用いて詳細な計測を行っており、例えば内耳道の深さは平均 11.8 mm であるが、最小 8.9 mm、最大 15.3 mm と 6.4 mm も個体差があった。内耳道後壁から後半規管までの距離は平均 15.4 mm であるが、最小 12.6 mm、最大 19.1 mm と 6.5 mm もの個体差があった。これらの結果は、high resolution CT で側頭骨 35 側において計測した今回の値とほぼ同様であった。このように各構造物のサイズや構造物間の距離に 5 mm を越える個体差があるということは、骨削除を行う際には大きな問題となる。すなわち、これらの計測値はおおよその目安となる点では有用であるが、骨削除を安全に

行うための指標とはなり得ないことを示している。また、臨床症例における high resolution CT 上の測定値も、骨削除中には 3 次元的空間での見かけ上の距離が問題となるため、これらはあくまでも参考値にすぎない。例えば、侵入角度の違いによって内耳道の長さも異なって見えるし、三半規管と耳小骨間の距離も異なって見えるからである。そのため、いかに錐体骨の微小外科解剖に精通し、術中に解剖学的指標を同定し得たとしても、骨削除中に三半規管や顔面神経の位置をミリ単位で正確に推定することは不可能であり、骨削除に時間を要する結果となった。

以上のことから、錐体骨内部の重要な構造物のみを選択的に 3 次元化し、得られた画像を術前シミュレーションと術中の navigation system に応用することを試みた。近年 3 次元画像作成技術の発達はめざましく、脳神経外科領域のみならず全身の様々な部位で応用されている。Takagi ら^{17)~21)}は、側頭骨の組織切片の 2 次元データをコンピューターに取り込み、独自のプログラムで詳細な錐体骨内部の 3 次元化に成功した。神崎ら¹⁶⁾はヒト側頭骨の high resolution

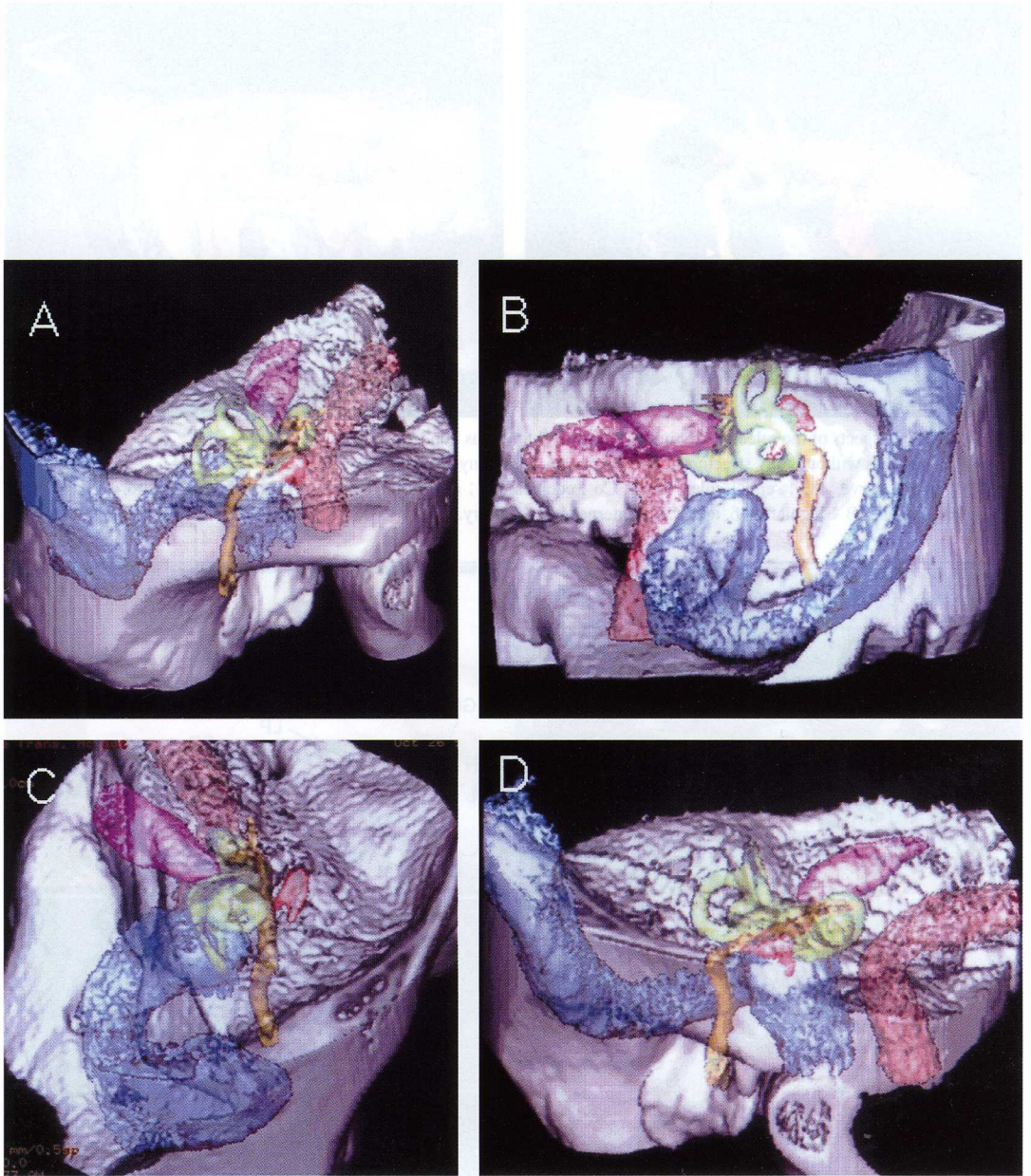


Fig. 8. Various aspects of the selective 3D images of the right petrous bone.

A : superolateral aspect. B : medial aspect. C : superior aspect. D : lateral aspect.

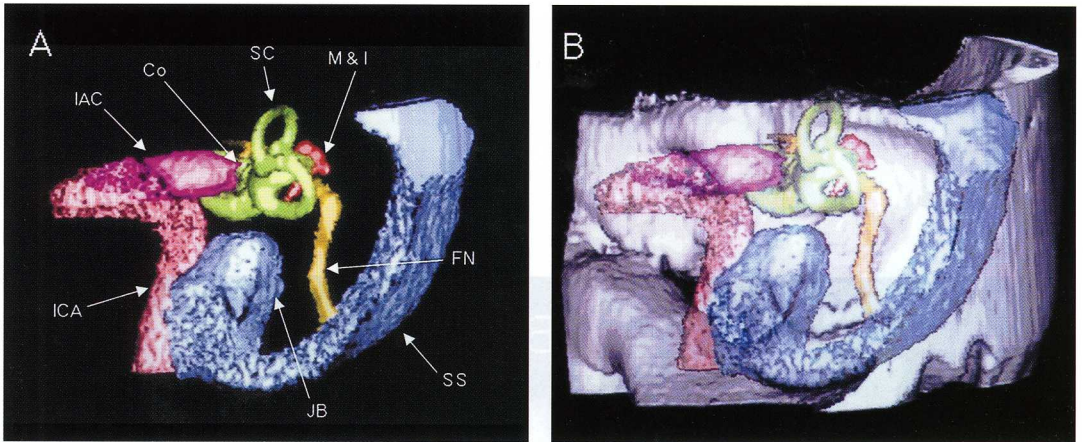


Fig. 9. Medial aspects of the selective 3D images of the right petrous bone.

A : 3D images without bony structures. B : 3D images with bony structures.

FN : facial nerve, SC : semicircular canal, Co : cochlea, M : malleus, I : incus, IAC : internal auditory canal, SS : sigmoid sinus, JB : jugular bulb, and ICA : internal carotid artery.

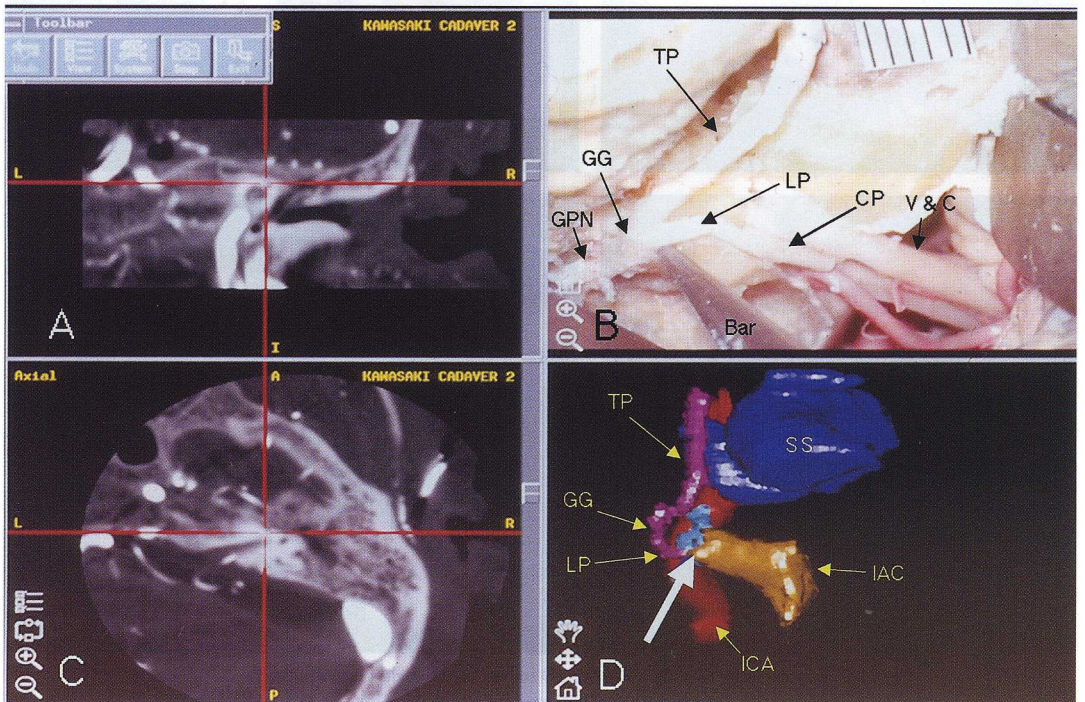


Fig. 10. Four screens of the navigation system during a drilling procedure.

A : a coronal reconstructive CT image showing an operative point (the crossed point of the two red lines). B : intraoperative microscopic view (the tip of the bar pointing at the genu of the facial nerve). C : axial CT image showing an operative point (the crossed point of the two red lines). D : selective 3D images of the petrous bone showing an operative point (white arrow).

CP : canicular portion of facial nerve, LP : labyrinthine portion of facial nerve, GG : geniculate ganglion, GPN : greater petrosal nerve, TP : tympanic portion of facial nerve, V & C : vestibular and cochlear nerve, IAC : internal auditory canal, SS : sigmoid sinus and ICA : internal carotid artery.

CTの2次元データを元に内耳道の3次元化を行ったが、その後も錐体骨内部の3次元画像に関する報告がある^{22)~25)}。しかし、経錐体到達法における錐体骨の3次元画像について詳しく検討した報告はこれまでにない。錐体骨内部の構造は複雑であり、3次元画像の作成に一般的に使用されているthresholdの設定のみでは3次元化はできないため、詳細な2次元画像の読影のもとに錐体骨内部の重要構造物を一つずつ同定し、マニュアルで選択して精密な3次元画像を作成しなければならない。今回はこの方法により錐体骨内部の三半規管や顔面神経などの通常描出困難な微細構造物も高い精度で作成することができたが、この作成法では撮影したすべてのスライスで各構造物を選択する必要があるために多くの時間を要する。Rodtら²⁶⁾は耳小骨を同様の方法で3次元化しているが、作成には6時間を要したと記載されている。今回は頸動脈や頸静脈に関しては造影剤を使用することによってthresholdを設定し自動的に3次元化し、時間を短縮することができた。また、頭蓋深部に到達するために必要十分な骨削除を速やかに行うことが目的であるため、その際に必要なもののみを3次元化することで作成時間を短縮できた。この3次元画像の総作成時間はいずれも30分以内であり、臨床例においても十分実用可能であった。

錐体骨内部の重要構造物の3次元的位置関係を把握しておくことは、術前シミュレーションとしても極めて有用であった。脳神経外科領域においては、通常のCTやMRIの平面画像から術野を想像し手術計画を立てるが、結果的には部分的に異なったイメージを術前に描いていることもしばしば経験される。今回の選択的3次元画像は、あらゆる角度から必要なもののみを表示し観察することが可能であり、その精度にも問題はなかった。3次元画像のnavigation systemへの応用は、今までに報告されているCTやMRIの平面画像データを使用するのと比較し格段に有用であった。Van Havenberghら²⁷⁾は、従来の2次元画像のみをnavigation

systemで使用しつつ錐体骨の骨削除を行い、その有用性について報告している。しかし、この方法では、操作位置をモニターで確認する度にCT画像を読影する必要がある。今回は、手術操作を行う際に必要な構造物のみを3次元的に術中navigation systemに表示することによって、現在の骨削除位置を瞬時に知ることができるとして特に有用であった。さらに、3次元的に表示したことで、周囲の温存すべき構造物との見かけ上の距離や侵入角度の変化に伴って様々に変化する各構造物の位置関係を瞬時に把握することが可能であり、骨削除が安全に行えるだけでなく、速やかに行えるという点でも有効であった。この3次元画像のnavigation system上の精度に関しては、解剖用屍体の骨削除を行う際に実際に検討したが、1mm以内の誤差で安全に骨削除を行うことができた。使用するnavigation systemによっても異なるが、今までの報告では0.67~6.6mmの精度であり、今回の3次元化した画像を使用することにより精度が低下することはないものと考えられた^{28), 29)}。

3次元画像作成にあたっては、2次元画像上で各構造物を誤って選択すると、誤った3次元画像を作成してしまう結果となるため、作成者は錐体骨の画像読影に十分に精通している必要がある。また、2次元画像において同定困難であった部位に関しては信頼性が低くなるので、術者はこのことを心にとどめ手術をする必要がある。特に問題になるのは顔面神経管であり、時に乳突蜂巣内の液体貯留は顔面神経管の同定を困難にすることがあるので注意すべきである。

以上、錐体骨の骨削除を行う際において、high resolution CTの2次元画像から作成した3次元画像が、錐体骨内構造物の同定に極めて有用であることと、これを応用する際の注意点を明らかにした。しかし、これらの3次元画像が骨削除を行う際にいかに有用であるとはいえ、あくまで手術支援法の一つに過ぎない点を忘れてはならない。術者は、錐体骨内部の微小解剖を立体的に把握していることを当然要求される

が、ドリリングによる骨削除技術にも十分習熟している必要がある。そのためには、解剖用屍体を用いての microsurgical dissection が最も有効な方法である。

また、錐体骨の3次元画像は、これから経錐体到達法を初めて行う術者、あるいは手術トレーニング中の若い外科医にとっても、立体的な微小解剖を理解する上で有用であると考えられた。

結 語

経錐体到達法において、錐体骨内の重要構造物のみを選択的に3次元化した画像は、内部構造を立体的にかつ正確に把握する上で極めて有用であった。この3次元画像を navigation system

に応用することによって、より精度の高い、安全な骨削除を行うことが可能であった。

謝 辞

稿を終えるにあたり、ご指導とご校閲を賜りました川崎医科大学脳神経外科学教室 石井鎌二教授に深謝いたします。また本研究の遂行に御助言、御協力頂いた川崎医科大学解剖学教室 吉井 致講師ならびに解剖学教室の皆様へ深謝いたします。

本研究の一部は、平成14年度川崎医科大学プロジェクト研究費(14-602)の援助において行われた。

尚、本研究の要旨の一部は、第59回脳神経外科学会総会(2000年10月、福岡)、第60回脳神経外科学会総会(2001年10月、岡山)、第61回脳神経外科学会総会(2002年10月、松本)、3次元画像研究会(2003年2月、札幌)において発表した。

文 献

- 1) Pellet W, Cannoni M, Pech A : Otoneurosurgery. Berlin ; Springer-Verlag, 1990, pp 7-8
- 2) House WF, Hitselberger WE, Horn KL : The middle fossa approach to the anterior-superior cerebellopontine angle. Am J Otol 7 : 1-7, 1986
- 3) Shiobara R, Ohira T, Kanzaki J, Toya S : A modified extended middle cranial fossa approach for acoustic nerve tumors. J Neurosurg 68 : 358-365, 1988
- 4) Kawase T, Toya S, Shiobara R, Mine T : Transpetrosal approach for aneurysms of the lower basilar artery. J Neurosurg 63 : 857-867, 1985
- 5) Kawase T, Shiobara R, Toya S : Anterior transpetrosal-transtentorial approach for sphenopetro-clival meningiomas : surgical method and results in 10 patients. Neurosurgery 2 : 869-876, 1991
- 6) Hakuba A, Nishimura S, Jang BJ : A combined retroauricular and preauricular transpetrosal transtentorial approach to clivus meningiomas. Surg Neurol 30 : 108-116, 1988
- 7) 河野輝昭, 森 和夫, 横山博明, 上之 郷, 真木 雄, 堤 健二, 西村修平 : 脳底動脈駆幹部動脈瘤に対する手術アプローチ, Trautman 三角経路による到達法について. 脳卒中の外科 20 : 18-23, 1992
- 8) 石井鎌二, 平野一宏, 吉井 致 : Posterior Transpetrosal Approach に必要な外科解剖. 「顕微鏡下手術のための脳神経外科解剖Ⅶ」, 東京, サイメッド・パブリケーションズ. 2001, pp 139-146
- 9) 石井鎌二, 吉井 致 : 経錐体到達の外科解剖. 「顕微鏡下手術のための脳神経外科解剖Ⅴ」, 東京, サイメッド・パブリケーションズ. 1992, pp 137-148
- 10) 石井鎌二, 平野一宏, 岡村大成, 吉井 致 : Presigmoidal-Transtentorial Approach -解剖学的指標, 骨削除範囲と手術視野-. 「顕微鏡下手術のための脳神経外科解剖Ⅷ」, 東京, サイメッド・パブリケーションズ. 1997, pp 126-136
- 11) 石井則宏, 鎌田昌樹, 石井鎌二, 吉井 致 : Posterior Transpetrosal Approach の3次元的解剖. 「顕微鏡下手術のための脳神経外科解剖Ⅷ」, 東京, サイメッド・パブリケーションズ. 2001, pp 55-61
- 12) 池田 章, 藤本勝邦, 吉井 致, 松本 真, 西谷耕二, 池田一夫 : 全身の灌流液固定法による解剖体の防腐保存方法とその応用. 解剖学雑誌 68 : 410-421, 1993

- 13) Henderson JM, Smith KR, Bucholz RD : An accurate and ergonomic method of registration for image guided neurosurgery. *Compute Med Imaging Graph* 118 : 273–277, 1994
- 14) Bucholz RD, Smith KR, McDermott L : Frameless image guided surgery utilizing an optical digitizer. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Proceedings* 2132 : 78–89, 1994
- 15) Lang J : *Clinical Anatomy of the Posterior Cranial Fossa and its Foramina*. Stuttgart ; George Thieme Verlag, 1991, pp 90–91
- 16) 神崎 仁 : 聴神経腫瘍の外科的治療. 耳展33 (補3) : 209–224, 1990
- 17) Takagi A, Sando I : Computer-aided three-dimensional reconstruction and measurement of the vestibular end-organs. *Otolaryngol Head Neck Surg* 88 : 195–202, 1988
- 18) Lutz C, Takagi A, Janecka IP, Sando I : Three dimensional computer reconstruction of a temporal bone. *Otolaryngol Head Neck Surg* 101 : 522–526, 1988
- 19) 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
- 20) Ishijima K, Sando I, Balaban C, Suzuki C, Takasaki K : Length of the eustachian tube and its postnatal development : computer-aided three dimensional reconstruction and measurement study. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 109 : 542–548, 2000
- 21) Yasumura S, Takahashi H, Sando I, Aoki H, Hirsch BE : Facial nerve near the external auditory meatus in men : computer reconstruction study—preliminary report. *Laryngoscope* 103 : 1043–1047, 1992
- 22) Hermans R, Marchal G, Feenstra L, Baert AL : Spiral CT of the temporal bone : value of image reconstruction at submillimetric table increments. *Neuroradiology* 37 : 150–154, 1995
- 23) Himi T, Kataura A, Sakata M, Odawara Y, Satoh J, Sawaishi M : Three dimensional imaging of the temporal bone using a helical CT scan and its application in patients with cochlear implantation. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 58 : 298–300, 1996
- 24) Shibata T, Nagano T : Applying very high resolution microfocus X-ray CT and 3-D reconstruction to the human auditory apparatus. *Nature Med* 2 : 933–935, 1996
- 25) Schubert O, Sartor K, Forsting M, Reisser C : Three dimensional computed display of otosurgical operation sites by spiral CT. *Neuroradiology* 38 : 663–668, 1996
- 26) Rodt T, Ratiu P, Becker H, Bartling S, Kacher DF, Anderson M, Jolesz FA, Kikinis R : 3D visualization of the middle ear and adjacent structures using reconstructed multi-slice CT datasets, correlating 3D images and virtual endoscopy to the 2D cross-sectional images. *Neuroradiology* 44 : 783–790, 2002
- 27) Van Havenbergh T, Koekelkoren E, De Ridder D, Van De Heyning P, Verlooy J : Image guided surgery for petrous apex lesions. *Acta Neurochir* 145 : 737–742, 2003
- 28) Samii A, Brinker T, Kaminsky J, Lanksch WR, Samii M : Navigation-guided opening of the internal auditory canal via the retrosigmoid route for acoustic neuroma surgery : cadaveric, radiological, and preliminary clinical study. *Neurosurgery* 47 : 382–388, 2000
- 29) 平林秀裕, 内山佳知, 星田 徹, 中瀬裕之, 森本哲也, 榎 寿右 : Navigation手術の誤差に関する検討. *CI研究* 22 : 173–180, 2000