

側頭骨含気容量の測定
——CT およびコンピューター画像処理を用いて——

近畿大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：村田清高教授）

磯野道夫, 村田清高, 東博二, 伊東明彦
田中久哉, 川本亮

ASSESSMENT OF THE VOLUME OF THE MASTOID AIR CELL SYSTEM
USING DIGITAL IMAGE PROCESSING

MICHIO ISONO, M.D., KIYOTAKA MURATA, M.D., HIROJI AZUMA, M.D.
AKIHIKO ITO, M.D., HISAYA TANAKA, M.D. and MAKOTO KAWAMOTO, M.D.

Department of Otolaryngology, Kinki University School of Medicine, Osaka

There has been a great deal of controversy concerning the development of pneumatization in the temporal bone. Many reports on the size of the mastoid air cell system have been discussed a planimetric X-ray method, however, there have been no techniques for direct volume measurement based on high-resolution computed tomography (CT). Discussion of the relationship between ear disease and pneumatization of the temporal bone requires three-dimensional measurement of the temporal bone in vivo. Recently, we developed such a technique by using digital image processing to measure the volume of the mastoid air cell system. With this technique, only the air cells and tympanic cavity, with a gray scale level similar to air outside the skull were easily selected on the CT films. Then, after image processing called "thresholding", only the areas and volumes of these extracted pneumatized parts were calculated. The volumes of the pneumatized parts of the temporal bone were calculated separately as partial volumes divided by several CT planes. The sum of the partial volumes was calculated as the total volume of the aerated cavity. This technique also made it possible to reconstruct a three-dimensional (3D) model of the air cell system for visual presentation.

CT images of 43 normal temporal bones were analyzed. The average volume temporal bone pneumatization (including air cells and tympanic cavity) was about 6ml. There were no differences between pneumatization on the two sides in either sex. Comparisons of partial volumes of pneumatization in the temporal bone revealed that the volumes of portions including the tympanic cavity and its surrounding air cells and those of the antrum and its surrounding air cells were larger than those of other portions. 3D models of the air cell system revealed a variety of shapes. These findings indicated that this technique is not only useful for quantitative analyses but for easy subjective morphological analyses.

Key words: 側頭骨含気蜂巢, 正常側頭骨, 容積測定
三次元構築, 画像処理, 二値化

A97-2103-22116

1. はじめに

側頭骨含気峰巣に関連して多くの報告がなされていた。含気部の容積を定量的に検討したものの中には物理的原理を用いて測定したもの¹⁾や単純耳 X 線で基準をつくり大体の容積を算出したもの^{2)~5)}などがあった。しかし、前者に関する方法では鼓膜に何らかの処置を行う必要があり実地臨床での施行が難しい。また、後者の計測は二次元的写真からの経験的概算であり事実とどれくらい合致するか不確かである。耳疾患と含気峰巣の関連を議論するには、生体において、しかも三次元的な測定が必要である。この要求に答える技術の発達が側頭骨高空間分解能 CT の発達と、コンピュータによる三次元的計測の実現により可能となった。本論文はデジタル画像処理の手法を用いて CT 画像からその容量を計算する方法を開発したものである。本論文では主にこの容量の計算方法について述べる。本法による結果を諸家の報告と比較検討し、本法の有用性についても言及する。

2. 対象

対象は成人の男女26例43耳で、顔面神経麻痺、軽度の感音難聴、めまいなどの何らかの理由で側頭骨高空間分解能 CT（以下 CT と略す）を撮影した症例である。中耳炎症例、奇形症例、診断が確定したメニエール病の症例等は除外した（図 1）。

3. 方法

(1) 使用機器

CT 撮影装置には横河メディカルシステム社製 PreSage を使用した。本研究に用いたパーソナルコンピュータはアップル社製 Macintosh Quadra 700, Vi, Centris650 で、画像入力装置には透過原稿ユニットをつけたエプソン社製 GT-8000 を使用した。使用ソフトウェアは、adbe 社製 photoshop, NIH が開発した image, マイクロソフト社製エクセルおよび Spy-glass 社製 Dicer である。

(2) 方法

a. 側頭骨高空間分解能 CT の撮影

側頭骨含気峰巣全体を描出するため、軸位で外側半規管に平行な断面を 2mm スライス厚、2mm スライス間隔で含気峰巣の上から下まで完全に含まれるように撮影した。撮影条件をウィンドウ幅4000、ウィンドウレベル+180とし、常に A3 サイズのフィルムに12断面写し込むように設定した。

b. 画像の入力および画像処理

撮影された CT フィルムを透過原稿用スキャナーにて 144dpi でパーソナルコンピュータに取り込んだ。取り込まれた画像は画像処理用ソフトウェアにて前処理を行った。CT 画像は上記したように12断面が同一ファイル上にあるが、これを1断面あたり512×512ピクセルずつのファイルに分ける。このファイルを用い含気部の抽出を行う。CT 画像の頭蓋外の空気の部分を30×30ピクセル選び、そのグレースケールレベルと近似したグレースケールレベルの部分をコンピュータに側頭骨内から選ばれる。こうすることにより、側頭骨内の含気峰巣および鼓室内などの含気部のみが

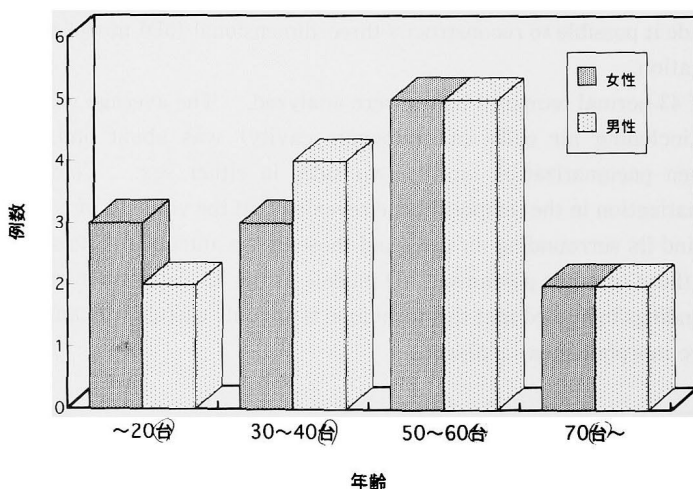


図1 性差年齢

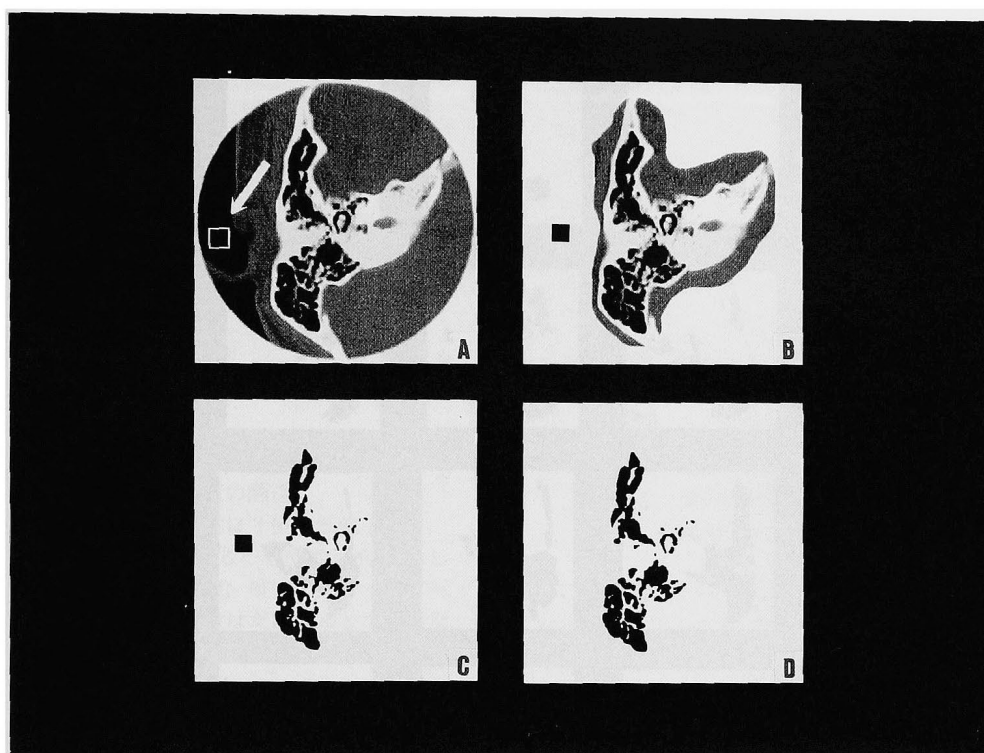


図2 含気部の抽出方法とその過程

まず、頭蓋外の空気に相当する部分を選び(A)、計測に不要な部分を除去し(B)、この画像から先に選んだ空気の部分に近似するグレイスケールレベルを示す部分のみコンピュータに選ばせ抽出する(C)、この画像から2値化を行って(D)これらの面積そして容積を計算する。

選ばれる(図2)。この操作により一断面ずつの含気部のみの情報を含むデータセットができる(図3)。

c. 画像分析、数値化および容量の計算

画像解析用のソフトウェアを用い、上記操作で得られたデータセットから2値化を行う。2値化に際し、容量計算の条件を一定にするため2値化域値を常に同じになるように設定した。次に2値化されたデータセットから面積の測定を行った。画像の黒い部分のピクセル数をコンピュータに計算させ、あらかじめ入力されたスケールより実際の各断面の含気部の面積を計算した。含気部の容積は我々が作成した自動計算プログラムを付加した表計算ソフトウェアを用いて各断面の面積を基に下記式で求めた。

$$V = \sum Si \times Ti \times \cos(d)$$

容積は(V)、CTの各スライス面の面積は(Si)、スライス厚は(Ti)、そしてガントリ傾斜角度が(d)

である。

d. 3Dモデルの作製

3Dモデル作製用ソフトウェアを用い、上述した容積計算のために作成したデータセットより volume rendering を行い側頭骨含気部の3Dモデルを作製した。

4. 結 果

(1) 基礎実験

側頭骨の含気容量を求めるにあたり、本法の精度を知るために容積が既知の物体を測定した。水を入れた200mlのビーカーに数個のガラス玉を入れ、これをCT撮影し上記方法にて容積を計測した。図4は容積と2値化域値の関係を示したグラフで、縦軸に容積、横軸に2値化域値を示した。2値化域値を上げて行くと容量の測定結果はだんだんと小さくなっていくこと

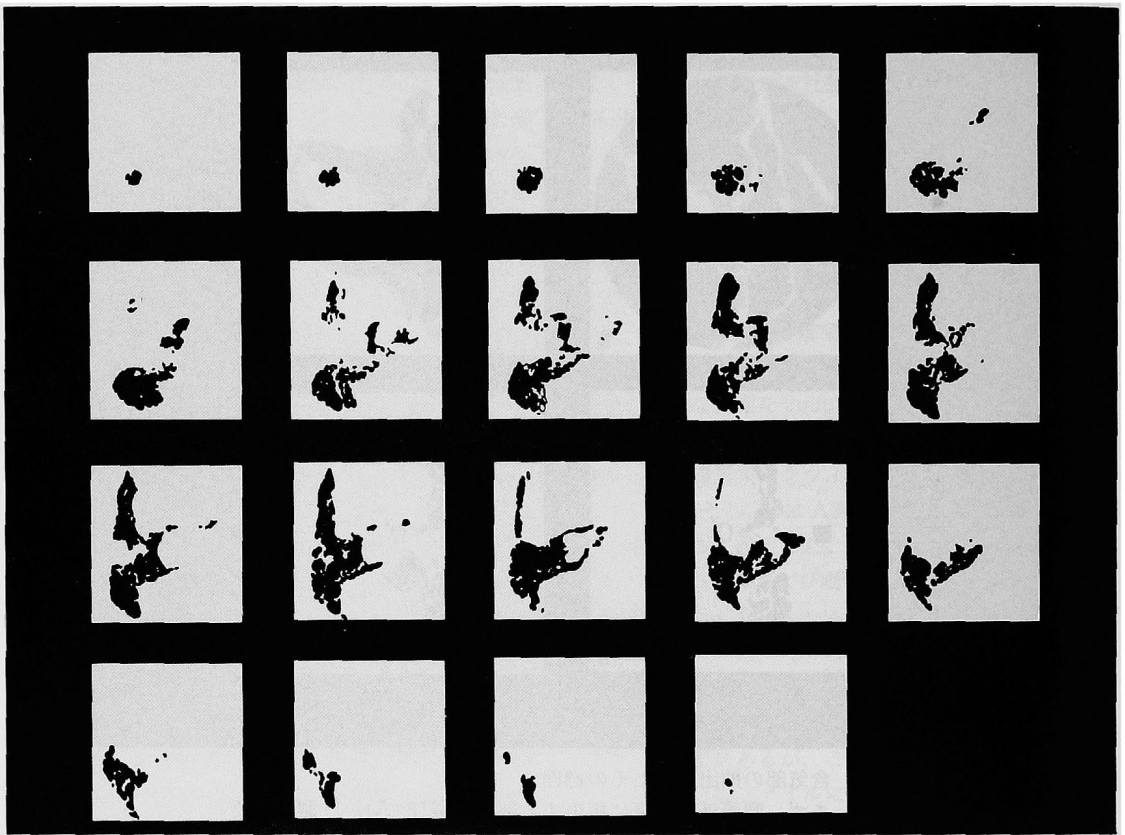


図3 2値化を行い含気部のみが残されたCT画像

図左上が最下断面で図右下が最上断面である。この例では上から下まで19断面である。

がわかった。この被検物体の容積は156mlであるが、2値化域値229でこの実測値と一致した。

(2) 側頭骨含気容量の測定結果

側頭骨含気容量は平均5.97mlであった。発育のよいもので18ml前後、悪いもので2ml前後であった(図5)。

(3) 側頭骨含気容量の左右差

左右差は左右両側を測定できた17例34耳で検討した。推計学的有意差はなかった(t検定)。

(4) 側頭骨含気容量の男女差

左耳18耳、右耳25耳の性差を別々に検討した。推計学的有意差はなかった(t検定)(図6)。

(5) 部位別側頭骨含気容量

CTでツチ・キヌタ関節の描出されている断面を基準面としてこの面より下4断面(通常はこの4断面に鼓室がちょうど入る)を鼓室に、またこれより上方の

4断面(この4断面で上半規管まで入る)を乳突洞および半規管に相当する部位として容量を計算し、さらにこれらの部位より上あるいは下の容量も4断面ずつに分けて計算した。なおこの4断面の上下の距離は8mmである。これらの容量曲線を見ると、鼓室に相当する部位と乳突洞および半規管に相当する部位の容量が大きいという傾向を示した(図7)。

(6) 症例別左右差の検討

代表的症例の左右の部位別側頭骨含気容量を各症例ごとに別々に示した。図8の左上のグラフは最も含気容量の大きかった例(症例1)で鼓室に相当する部位で最も含気容量が大きいことがわかった。この例では上下の部位でも同様に含気容量は大きかった。図8左中の例(症例2)の容量は鼓室に相当する部位では症例1とほぼ同じであるが、上下の部位で急に小さくなり曲線は鼓室に相当する部位をピークとした急峻な形

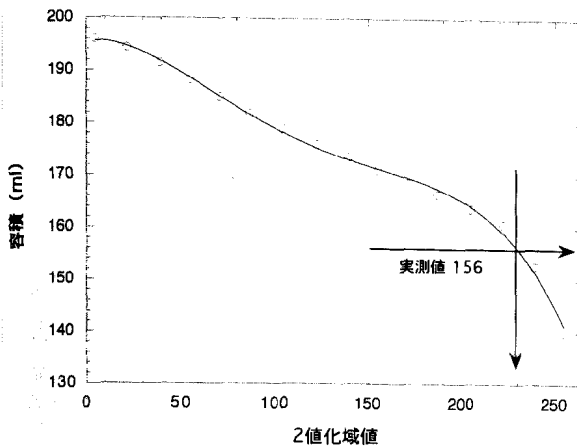


図4 容積と2値化域値の関係

縦軸に容量, 横軸に2値化域値をとり, 2値化域値の変化と容積の変化を示した。画像処理の際, 域値を大きくして行くと容積の計測値はだんだんと小さくなる。矢印は実測容積156mlに一致する2値化域値229を示す。

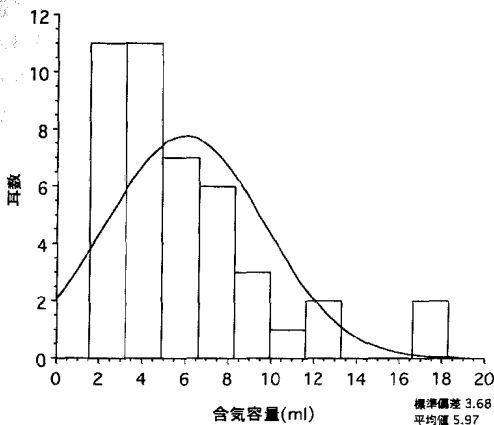


図5 43耳の側頭骨含気容量の分布
平均5.97mlであった。

となった。図8左下は含気容量が左右ともに小さい例(症例3)である。この例では含気容量は鼓室の高さよりその上方である乳突洞および半規管の描出される高さの方が大きく上記2例とは異なったパターンを示した。この例を含めて, これら3例は左右ともに同じパターンを示しかつ容量もほぼ差のない例である。一方, 図8右上, 右中の例(症例4, 5)は左右の全体の含気容量には差があるが, 容量曲線のパターンはほぼ同

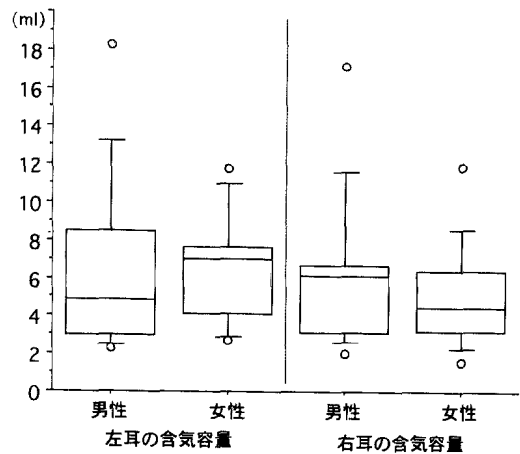


図6 側頭骨含気容量の左右別男女差
縦軸に含気容量を示す。

様であった。図8右下はそれぞれ別の症例(症例6, 7, 8)の右耳の含気容量をプロットしたものである。上記した左右比較の5例とは異なりここでは容量曲線のパターンがばらばらで各曲線の近似性は認められなかった。

(7) 側頭骨内含気部の立体化構築

最も含気量の多かった例(症例1)の容量を計測した側頭骨内含気部をそのまま立体化構築し4方向から見た3D画像を例として示した(図9)。他の画像と比較して大きく膨らんでいた。また, 含気が鼓室に相当する部位の含気はよかったが他の部位の含気がよい例(症例2)の3D画像では非常に平たい形態を示す様子が観察できた。その他, 含気が悪い例(症例3)では, 上方から見た画像で含気が少ないため鼓室および耳管が突出して見えるなど立体的特徴を容易に把握できた。

5. 考 察

(1) これまでの報告

側頭骨含気蜂巢に関する報告は我々の渉猟し得た範囲でも様々なものがあり枚挙にいとまがない。大きく分けて, 解剖学, 遺伝学そして体質学的な見地から検討したもの⁶⁾⁷⁾, 主に炎症と含気蜂巢の発育について論じたもの²⁾³⁾, 含気蜂巢と滲出性中耳炎など耳管機能との関連について論じたもの⁴⁾⁸⁾, 含気蜂巢とメニエール病などの内耳疾患の関連について論じたもの⁹⁾¹⁰⁾, そして, なんらかの方法で含気腔の容積を測定した報告¹⁾¹¹⁾¹²⁾などがあつた。また, CTを用いた比較的细节

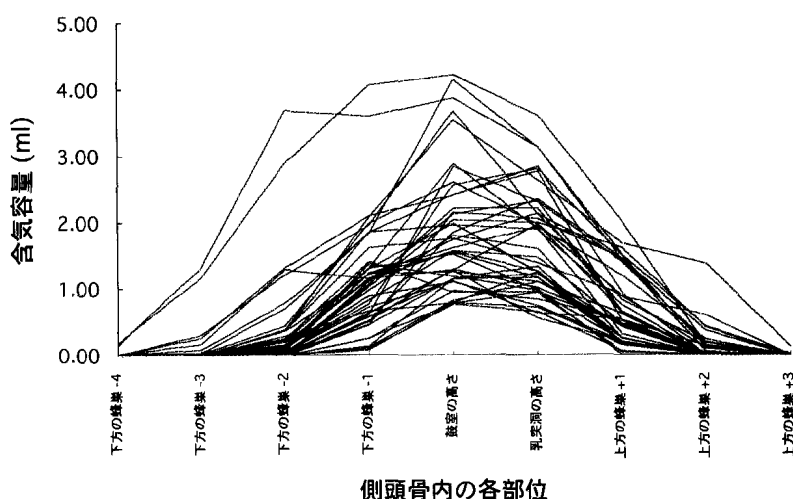


図7 部位別側頭骨含気容量

側頭骨を鼓室の高さを基準にし4つのCT断面(上下8mm)の容量に分割し、その差を検討した図。縦軸は含気容量、横軸は部位を示す。横軸の左へいくほど側頭骨内の下方の部分の容量を示す。

な検討¹³⁾もあった。これらの報告では含気蜂巣の大きさの測定にはSchüller撮影X線フィルムをplanimeterあるいは矩形面積測定法で含気蜂巣の面積を測定する方法が一般的であった。Frisberg¹⁾によればplanimeterの面積測定結果とVolumetric Methodを用いた含気蜂巣の容積はよく相関し、また今井ら³⁾によればこのplanimeterと矩形面積測定法の面積測定結果はよく相関するとしている。いずれにせよ生前X線の含気蜂巣の容量測定はこれらの方法に頼らざるを得なかった。しかし、含気蜂巣の複雑な構築はその側面の面積からの検討のみでは完全に把握することは不可能であり、様々な耳疾患と関連があると考えられる側頭骨含気蜂巣の容積の詳細な測定方法の確立が待たれていた。

(2) 基本的原理

パーソナルコンピュータに取り込まれた画像は数値データの集まりである。これを構成する各点はその画像の中の位置に関する情報と色に関する情報を持っている。このデータの性質を利用し、分析することで様々な研究が可能となる。主に前者、位置に関する情報を利用することにより顔面表情筋の運動を解析することができた¹⁴⁾。後者の色に関する情報を利用すれば今回のような研究が可能となる。本研究の基本的なアイデアは画像処理ソフトウェアにおいて、画像上の

ある部位の色と近似する色をもつ他の部位を同時に選ぶことができる機能を利用することで簡単に頭蓋外の空気と近似の色を持つ側頭骨内の含気部を選択することにある。この方法を用いれば、いかなる複雑な形態の含気部も抽出可能である。側頭骨内あるいは周辺の部位に蝶形骨洞や外耳道など空気を含む部分があるため前処理が必要ではあった。しかし、検討に必要な含気部さえ抽出してしまえばあとは上記の方法で簡単に数値化できる。今後、中耳炎症例の場合は軟部組織の部分も加えた検討が必要となると考えられるが、領域の選択に少し工夫を加えればこれも可能である。

以上のような検討はパーソナルコンピュータを用いなければこれまで不可能であったことで、本法によりこれが可能になったことは非常に意義深いことと考えられる。

(3) CTのもつ問題点

側頭骨含気部を余すことなく描出するためにはかなり意図的に撮影しないと描出しきれない。含気部をすべて描出しようとする断層数が増える。断層数が増えれば被曝量が増大する。したがって、断層間隔、断層厚を大きくすることにより断層数を減らす努力が必要である。しかし、逆に断層面が厚くなると容量計算および三次元表示に正確さが失われるというジレンマに陥る。我々は通常断層間隔および断層厚1.5mmで

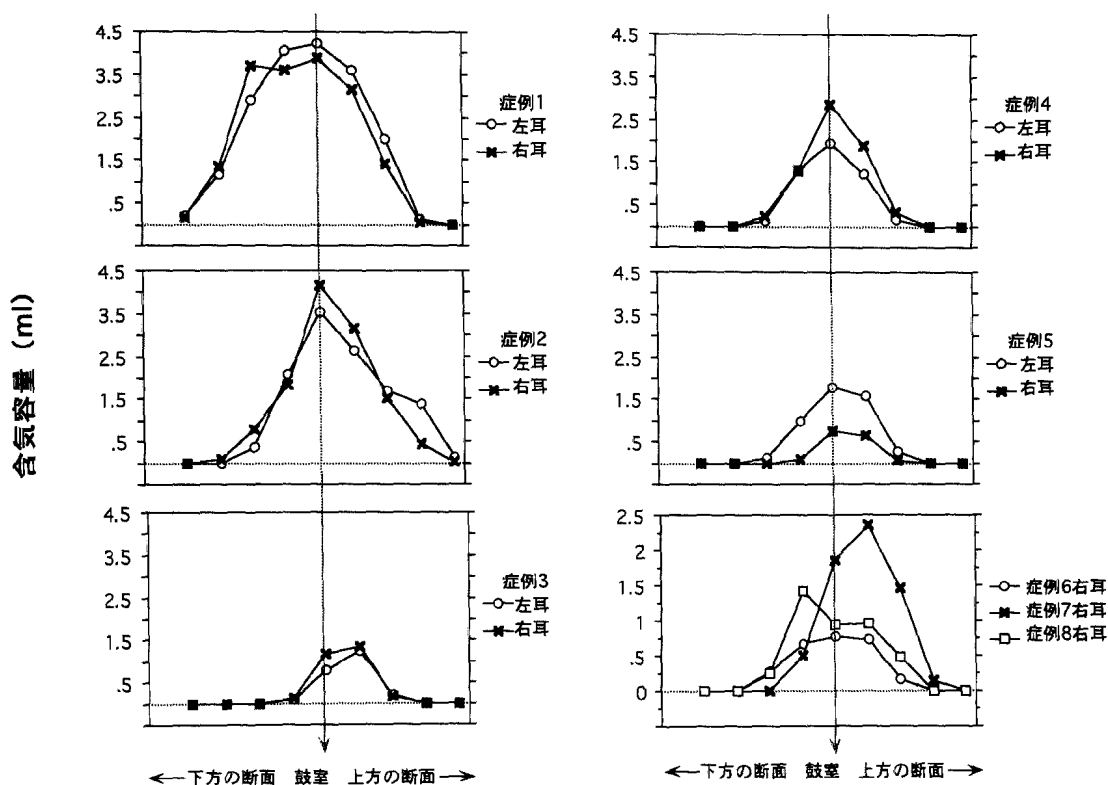


図8 代表的症例の左右の容量曲線

縦軸は含気容量、横軸は側頭骨内での部位を示し、図中の縦線は鼓室に相当する部分である。症例1（図左上）は容量最大の例。左右の容量曲線はほぼ同様の形を示す。症例2（図左中）は鼓室の高さでの容量は症例1とほぼ同様であるが、その上下の部位で容量は急に小さくなりその容量曲線は急峻な形となっている。症例3（図左下）は発育の悪い例。症例4（図右上）、症例5（図右中）は容量に左右差のあった例。図右下はそれぞれ別の症例の右耳の容量曲線を重ねて表示したグラフ。

鼓室を中心に撮影していたが、この条件では膨大な断面数となるので、妥協点として断層間隔および断層厚2.0mmを採用した。これにより全体的被曝量はやや増加するが問題となる水晶体被曝は1.5mmより2.0mmの方が軽減される。

もう一つのCTのもつ問題点として partial volume effect がある。含気部の場合、小さい蜂巣であればこの partial volume effect のために小さい蜂巣は黒ではなくグレイに近く描出される可能性がある。この場合、その蜂巣は本法では含気部として選ばれなくなり、含気部の容積は小さめに計算されてしまう可能性がある

る。これはCT固有の問題なので避けられないが、CTの撮影条件を常に一定に保つことで回避するしかない。

(4) 基礎実験について

本法の精度を知るために容量が既知のモデル（CT上骨のCT値に相当するガラス玉、CT上軟部組織のデンシティーに相当する水そして空気の3者が含まれる）をCT撮影しその容量を計測した。画像解析において二値化を行う際、その域値を変化させるとその測定領域の面積はその域値に従って変化する。容積を計算する時、ある一定の二値化域値の基準を設けなければ

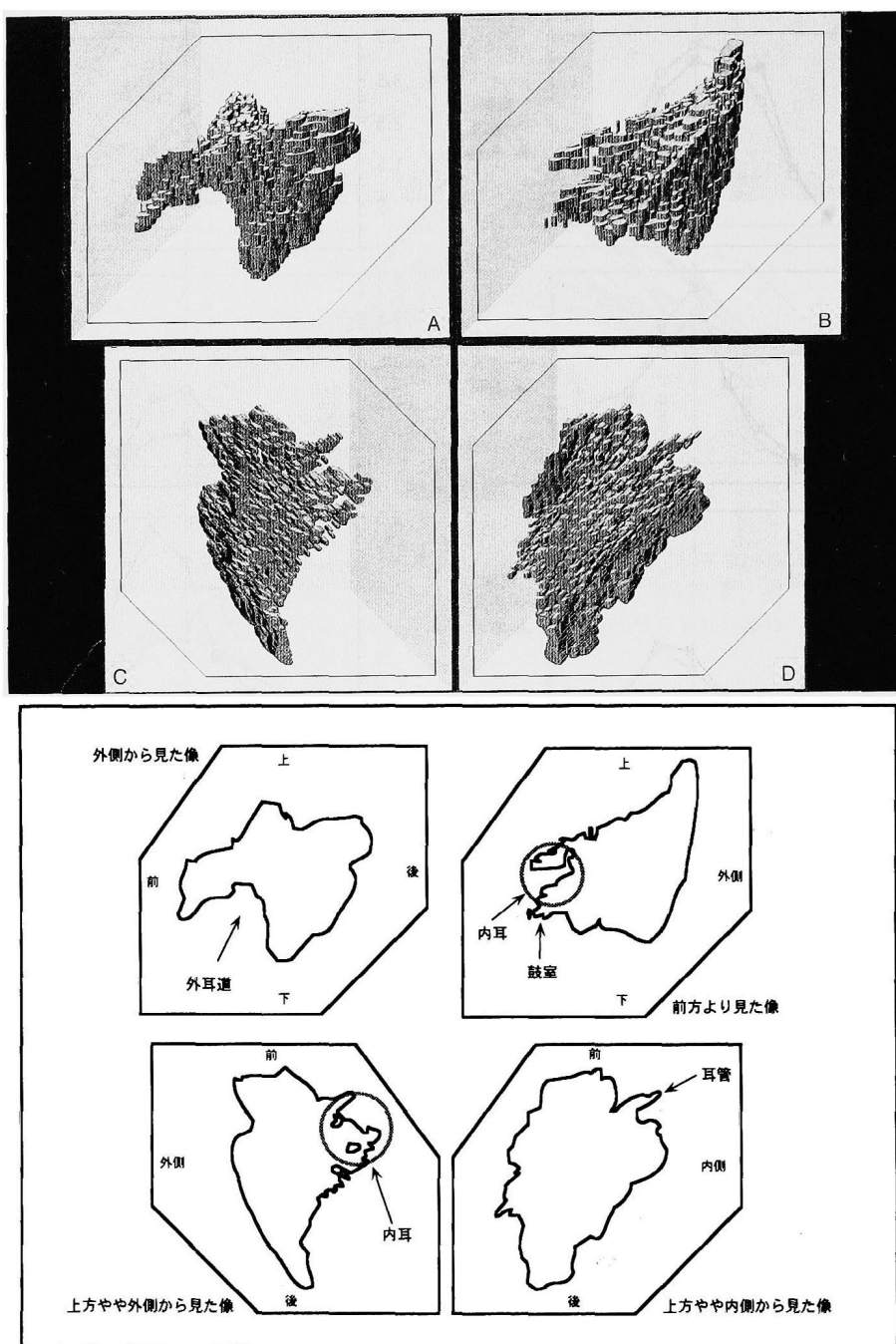


図9 症例1の左耳の立体化構築像

外側からみた像 (A), 前からみた像 (B), 上外側からみた像 (C), 上内側からみた像 (D). 外側からの像で含気蜂巣の前後方向への発育程度が観察できる。また外耳道上方の部分はアーチ状を呈する。前方からの像で含気蜂巣の上下方向への発育が確認できる。上方からの像ではやや外側から見ると、内耳周囲の蜂巣の発育が確認でき、またやや内方から見ると耳管から鼓室近辺の含気の程度を観察できる。本例はいずれの部位も含気が非常に良好である。

ばならない。図4に示したようにこのモデルでは2値化域値229でこの実測値と一致し、その容積の計算値は域値を小さくすると増加し、大きくすると減少することがわかった。つまりデジタル画像処理で何かを測定する場合、条件設定ひとつで測定値は容易に変化することが実際に示された。これはこの方法の弱点でもあり逆に利点でもあるのだが、このことを認識していることが重要である。この基礎実験モデルと側頭骨ではCT値が異なるのでデータをそのまま流用することはできないが、この結果と上述したpartial volume effectをふまえ二値化域値を決定した。

(5) 我々の結果の検討

含気蜂巢の検討に用いる正常例の定義は難しい。X線写真やCTを撮影するためには何らかの耳疾患があるはずであり完全に正常とはいえない症例がほとんどであろう。したがって本研究においても正常としたものは、慢性あるいは滲出性中耳炎の既往がなく、明らかなメニエール病症例や高度感音難聴症例を除外した顔面神経麻痺例、軽度の感音難聴例、めまい症例などにせざるを得なかった。

側頭骨含気容量の平均は約6mlであった。Silbiger¹²⁾のwater-weight法の結果では正常例で9cm³程度、Frisberg¹⁾がVolumetric Methodを用いた検討の結果では中心性穿孔の症例で3.47cm³、辺縁性穿孔の症例で2.64cm³、正常者で12.22cm³であった。また、Andreasson¹³⁾の圧トランスデューサー法の結果では正常例で5.83mlであったとしている。Andreasson¹³⁾以外の結果は我々の結果よりやや大きめの成績である。これらの結果が我々の結果よりやや大きめの成績であったのは、これらの結果がいずれも画像より計測したものでないことも関係していると考えられる。例えば、Frisberg¹⁾の方法は水を耳内に滴下し連結管によりBoyleの法則を用い容積を耳外で計測するというVolumetric Methodであった。また、これらの報告はいずれも欧米人を対象としたもので、人種の相違による頭蓋骨の大きさの違いが関係している可能性もある。上記したように、我々の方法ではCTのpartial volume effectの影響や2値化域値のとり方で測定結果が変化するのでやや測定値が小さめに出了た可能性はある。また、CTが2.0mmの断層間隔および断層厚のため本来微妙な曲線を持つはずの含気蜂巢を完全には表現出来ていない可能性もある。しかし、今回の我々の結果はある一定の基準で行った結果であり、また柔軟に測定の設定を変えることが可能であり、こ

の問題に関しては症例を増やしていずれ結論を出したい。

左右差はなかった。また、男女差でも両耳ともに有意差はなかった。一般的に男性の方が女性より大きくなると考えられるが、この点の検討はもう少し症例数が必要である。本研究で意義深かったのは側頭骨の部分的な容積を比較検討できたことである。ツチ・キヌタ関節の描出される断面を基準面に選んだのはこの部分が狭くブロックされやすい部位であり、またこの付近が真珠腫を始めとして様々な耳疾患で問題となる部位であるからである。今後、中耳炎症例の測定を行うに際し基礎的データとなろう。図7に示したように全体として鼓室に相当する部位並びに乳突洞および半規管に相当する部位でその含気容量は最も大きく、その上下の部位ではだんだんと容量が小さくなっていくことがわかった。この検討により側頭骨の部位別含気容量差が検討できるようになり、これを利用することにより様々な耳疾患においても部位別の容量が比較でき臨床的意義は高いものとなると考えられる。このような検討はX線写真よりの含気蜂巢面積の測定はもちろんのことVolumetric Method¹⁾をもってしても出来なかったことである。個々の症例の検討でも、正常例では左右のグラフ上の曲線はほぼ同じ形となり、容量に差がある場合も容量曲線の形はほぼ同じであることがわかった。一方、別々の症例をプロットした場合は3例とも異なる形の曲線を描くことがわかった。つまり、正常であれば同一個体の左右の含気部はほぼ同様の発育を示し極端な左右差、例えば右耳は上方の蜂巢ばかりが発育し、左耳はその下方の蜂巢が大きく発育するというようなことはないということが示唆された。今回の結果のみでは断定的なことは言えないのでさらに多症例を検討し別に報告したい。側頭骨の含気部の容積を計ることの臨床的意義に関しては上記のようにすでに多くの報告¹¹⁾⁻¹³⁾があり本論文では詳しくは触れないが、生前のX線の所見から従来のように面積から類推した容積ではなく、実際に直接計測した容積から検討できたことは本研究の価値を高めるものと思われる。

立体化構築で重要なことは形態的分類が可能になることである。図9に示した例をはじめとして様々な形態が観察できた。3D表示は手術シミュレーションへの応用を中心とした最近の形態学的研究のトレンドとも言える様相を呈しているが、定量的なデータの裏付けがないと単なるプレゼンテーションの一手法でしか

くその意義は低下する。その点我々の3Dモデルはすべて定量的なデータの裏付けがあり、容量と形態の関係などの詳しい検討も可能である。つまり本法は定量的検討のみならずこのような定性的で形態的検討をも可能にする方法と言える。

6. ま と め

デジタル画像処理の手法を用いて、側頭骨含気容量の測定および三次元表示を行った。

- (1) 側頭骨含気容量は平均約6mlであった。
- (2) 側頭骨含気容量は有意な左右差を認めなかった。
- (3) 側頭骨含気容量を分割し部位別に比較を行い、鼓室の高さおよび乳突洞の高さにおいてその含気容量が最も大きいことがわかった。
- (4) 部位別容量を比較した結果、左右の容量曲線には極端な差を認めないことが示唆された。
- (5) 側頭骨含気部の三次元表示によりその形態学的分類が可能であることが示唆された。

参 考 文 献

- 1) Frisberg K, Zsigmond M: The Size Of Mastoid Air Cell System. Planimetry — Direct Volume Determination. *Acta Otolaryngol* 60: 23-29, 1965.
- 2) 村田 勝: 慢性中耳炎における中耳含気蜂巣発育抑制機構に関する研究. *日耳鼻* 63: 1118-1125, 1978.
- 3) 今井昭雄, 中野雄一, 高橋 姿: 側頭骨含気蜂巣 — 炎症による影響 —. *耳鼻咽喉* 50: 633-640, 1978.
- 4) 青木和博, 本多芳男: 滲出性中耳炎と側頭骨含気蜂巣との関係. *耳鼻咽喉* 56: 779-785, 1984.
- 5) 谷内山 仁: 側頭骨含気蜂巣の臨床的研究 1. 内耳疾患に及ぼす影響. *日耳鼻* 85: 509-517, 1982.
- 6) 李 佰青: 福建系台湾人の側頭蜂巣についてのレ線学的研究. *耳鼻臨* 46: 717-730, 1953.
- 7) 後藤敏郎: pneumatizationの成立とその臨床. *日耳鼻* 56: 1028-1049, 1953.
- 8) 宮崎洋介, 小林一女, 三辺武幸: 側頭骨含気蜂巣の発育. 一口蓋裂滲出性中耳炎例の検討 —. *口蓋裂会誌* 17: 52-56, 1992.
- 9) Stahle J, Wilbrand H: The vestibular aqueduct in patients with Ménière's disease. *Acta Otolaryngol* 78: 36-48, 1974.
- 10) 村嶋龍太郎, 田川幸雄, 中島成人, 江上徹也, 隈上秀伯: 側頭骨含気蜂巣と前庭水管発育度の関係. *日耳鼻* 83: 654-656, 1980.
- 11) Silbiger H: Über das Ausmass der Mastoidpneumatisation beim Menschen. *Acta Anat* 11: 215-245, 1950.
- 12) Andreasson L: Correlation of tubal function and volume of mastoid and middle ear space as related to otitis media. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 85: 198-203, 1976.
- 13) Virapongse C, Sarwar M, Bhimani S et al: Computed Tomography of Temporal Bone Pneumatization: 1 Normal Pattern and Morphology. *AJNR* 6: 551-559, 1985.
- 14) 磯野道夫, 村田清高, 田中久哉, 箕山 学, 東 博二: コンピュータ画像処理を用いた顔面表情運動の解析 — 他覚的評価法の試み —. *日耳鼻* 97: 393-400, 1994.

(1994年4月8日受稿 1994年7月21日受理)

別刷請求先 〒589 大阪狭山市大野東377-2

近畿大学医学部耳鼻咽喉科学教室 磯野道夫