

博士論文

Sonotubometry による耳管開放症の重症度評価

東北大学大学院医学研究科医科学専攻
神経・感覚器病態学講座 耳鼻咽喉・頭頸部外科学分野

高田 生織

目次

第 I 章	要約
第 II 章	研究背景
第 III 章	研究目的
第 IV 章	対象・方法
第 V 章	研究結果
第 VI 章	考察
第 VII 章	結論
第 VIII 章	謝辞
第 IX 章	文献
第 X 章	図
第 XI 章	表

I. 要約

目的：

耳管とは咽頭と鼓室をつなぐ約 3.5 cm の細管で、周囲は筋・脂肪・血管組織・骨などで囲まれる。通常は閉鎖しているが、嚥下や欠伸に伴い短時間開くことで、中耳の圧平衡・排泄・防御などに重要な役割を果たしている。耳管開放症は、この普段閉鎖している耳管が持続的に開放している状態で、自声強聴・耳閉感などの不快な症状を来す。症状が強い重症例では、耳管ピンなどを用いた開放耳管の閉鎖治療が行われる。治療方針決定のためには耳管開放度を評価する必要があるものの、座位 CT 検査が一般的に行える検査ではないことから、解剖学的耳管開放度（重症度）を評価する新たな手法の確立が必要である。今回我々は、耳管音響法による計測結果から、耳管開放症の解剖学的な開放重症度が推定できるか否かを検討した。

対象・方法：

耳管開放症の疑いで仙塩利府病院耳鼻咽喉科を受診し、Sonotubometry と座位耳管 CT を実施していた 28 名・56 耳（男性 9 名、女性 19 名）の検査結果を、後ろ向きに検討した。対象の内訳は、耳管開放症確実例：26 耳、疑い例：9 耳、耳管非開放例：21 耳であった。Sonotubometry は、7 kHz のバンドノイズをプローブ音として、鼻咽腔から中耳への音の疎通性（音響伝達特性）を評価するが、前屈位で耳管が閉鎖することを利用し、座位と前屈位における音響伝達特性の差（体位変換 Sonotubometry）と座位 CT で評価された耳管最細部の断面積の相関を検討した。

また、モデル実験として、細管モデルを用いて細管径と伝達される音圧量の関係も検討を行なった。

結果：

細管モデルを用いた計測では、細管径(0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 mm)の増大に比例し、細管を介して伝達される音圧量が上昇した。臨床例では、体位変換による音圧の上昇は、座位での鼻腔から外耳道間の音圧減衰量と負の相関を示したが ($R = -0.771$, $P < 0.001$)、いずれの計測量も、座位 CT から求めた耳管最細部の断面積と有意の相関を認めた (それぞれ $R = 0.797$, $P < 0.001$ 、 $R = -0.753$, $P < 0.001$)。

結論：

体位変換 Sonotubometry を用いた鼻腔側から中耳側への開放耳管を介した音響伝達特性の評価により、解剖学的な耳管開放度を反映した耳管開放症の重症度診断の可能性が示唆された。

II 研究背景

耳管は、鼓室と咽頭をつなぐ長さ約 3.5 cm の細管で、周囲を骨、血管・筋・脂肪に囲まれている。通常の状態では閉鎖しており、嚥下によって能動的に開大し、主に中耳の圧平衡や貯留液の排泄、咽頭からの感染防御などにおいて重要な役割を果たしている（図 1）。耳管開放症とは、通常は閉鎖している耳管が常時開放した状態となっているために、咽頭腔側の呼吸雑音や圧変化などが中耳側に易伝達し、その結果、自声強聴、耳閉感、呼吸音聴取などの不快な症状を呈する疾患である^{1) 2) 3) 4)}。

表 1 に、日本耳科学会の耳管研究会から提案されている、耳管開放症の診断基準案⁵⁾を示す。耳管開放症では、音や圧が開放耳管を通して咽頭腔から中耳腔に低減衰で伝達するため、診断に際して、開放耳管に起因する自声強聴、耳閉感、呼吸音聴取などの症状に関する問診と、外来で簡便に侵襲なく施行可能な耳管機能検査装置を用いた検査があり、客観的な結果として大変重要である^{6) 7) 8)}。耳管鼓室気流動態法 (tubo-tympano-aerodynamic-graphy: TTAG) モードは、鼻すすりや深呼吸による鼻咽腔圧の変化に同期した圧変化が外耳道圧の動揺として観察される。

これに対し、音響耳管法 (Sonotubometry) モードは、音の疎通性を用いた方法で、閉鎖した耳管が嚥下などの動作に伴い正常に開大するか否かを評価する。計測に先立ち、鼻咽腔側より提示したプローブ音が外耳道に設置したマイクで、あらかじめ設定された一定のレベル（通常 50 dB）で記録されるように、鼻咽腔側スピーカーから出力されるプローブ音のレベルが自動校正される。プローブ音のレベルが設定されると、外耳道に設置したマイクで観察されるプローブ

音周波数の音圧変化が経時的に計測される(図 2)。計測中に嚥下動作を行い、耳管の開大が正常に行われるかどうか観察するが、正常に開大された場合は、鼻咽腔側から中耳側へのプローブ音の減衰が低減するため、耳管開大中は外耳道で記録されるプローブ音周波数の音圧が増大する(図 2)。

耳管開放症の診断基準は、Sonotubometry については、1) 嚥下後、耳管開大が持続する(開放プラトー型)、または2) スピーカー提示音圧(すなわち、外耳道音圧レベルが 50 dB になるための鼻咽腔側スピーカーから出力されるプローブ音圧)が 100 dB 未満であることが、耳管開放症の診断的意義が高い所見として提唱されている。

耳管開放症の治療は、患者の愁訴と開放の程度によって異なる。軽症例では、水分補給、脱水防止などの生活指導、耳管咽頭口の湿潤加療などが中心となるが、重症例では実際に開放耳管にシリコン製の耳管ピンの充填を行う^{9) 10) 11) 12) 13) 14)}。また耳管ピンの挿入に際しては、開放耳管の開放している内径に適合したサイズの耳管ピンを挿入する必要がある。治療方針決定のためには耳管開放度(重症度)を評価する必要があるものの、座位 CT 検査が一般的に行える検査ではないことから、耳管ピン加療が適切に施行されない一因となっている。

このような状況の中、最近、座位と前屈位で Sonotubometry を実施する、体位変換 Sonotubometry 法(図 3)が提案された^{15) 16)}。すなわち、座位・立位で開放状態にあった耳管は、臥位や前屈位への体位変化で狭窄または閉鎖することが知られているが、本法では、座位と前屈位で Sonotubometry を実施し、座位と前屈位での鼻咽腔側から中耳側への音響伝達特性を比較する。耳管開放がない症例では、座位と前屈位における音の疎通性変化は 5 dB 以下であるが、

耳管開放症患者ではより大きな変化を呈するため耳管開放症の診断に有用とされている。しかし、この音の疎通性の変化で重症度が評価できるかどうかは、これまで検討されてはいなかった。

Ⅲ 研究目的

耳管開放症患者の開放の度合を、現在の座位 CT 検査法に替わり、耳管を経由する音の疎通性により評価が可能であるかを検討し開大重症度を推定できるかを検討する。

IV 対象と方法

臨床研究に先立ち、モデル実験を行なった。直径の異なる細管を有する開放耳管モデルを作成し、開放耳管径と音響伝達量の関係について検討を行った。

臨床研究では、開放耳管を介した音の疎通性や、体位変換による音の疎通性変化と、座位CTで評価された耳管の開放程度の間に関連関係があるかを検証し、Sonotubometryを用いた耳管開放症重症度診断の可能性について検討を行った。

1. 対象

対象は、2015年～2016年に、仙塩利府病院耳鼻咽喉科を受診し、耳管開放症が疑われ、体位変換Sonotubometryと座位CTを実施していた28名56耳（男性9名女性19名、12～82歳：平均年齢 40.4 ± 21.5 歳）である（後ろ向きchart review）。日本耳科学会耳管開放症診断基準案に基づいた全症例の最終診断は、1)耳管開放症確実例26耳（男性：女性=8：18耳、平均年齢 36.5 ± 18.0 歳）、2)耳管開放症疑い例9耳（男性：女性=1：8耳、平均年齢 49.89 ± 24.7 歳）、3)非耳管開放症例21耳（男性：女性=9：12耳、平均年齢 41.1 ± 23.3 歳）で、3群の性差、年齢に有意差は認めなかった。尚、本研究は、仙塩利府病院倫理委員会の承認のもと実施した。（倫理委員会は、規定に則り外部委員を含む5名以上から構成された。研究計画書における役割は研究分担者で、倫理委員会承認番号20151201である。）

2. 方法

i) モデル実験

図 4 にモデル実験の実際の写真 (A) とシェーマ (B) を示す。

モデルは、長さ 30 mm のシリコンチューブ (内径 3 mm) を連結した 12 cc と 1.5 cc のシリンジの先端に装着したシリコンチューブを、長さ 30 mm の細管 (内径 0.2 - 1.0 mm) で連結 (連結部は粘土と接着剤でタイトにシール) し、12 cc のシリンジ側 (臨床例での鼻咽腔側に相当) に連結したスピーカーフォンから、1.5 cc のシリンジ側 (臨床例での外耳道側に相当) に設置したマイクロフォンまでのプローブ音の伝達特性を評価した。12 cc シリンジ側のシリコンチューブは、鉗子で内腔の閉鎖、開放ができるようにした。較正後、チューブの開放と閉鎖の伝達音量の差が、細管を通して伝達される音圧量として波形の動的变化が記録された。

今回、使用した機器は、Sonotubometry 計測に際し、外耳道圧があらかじめ設定した一定のレベル (今回の計測では、臨床例と同様の 50 dB) になるように、スピーカーから出力されるプローブ音レベルが自動較正される。このように設定されたプローブ音の音圧レベルと設定したマイクロフォンの較正レベルは、それぞれ「スピーカーレベル」と「キャリブレーションレベル」として記録紙に記録出力される。したがって、スピーカーレベルとキャリブレーションレベルの差は、スピーカーからシリンジ、シリコンチューブ、細管を経由してマイクロフォンに到達するまで減衰した音圧量を示すことになる。尚、形態学的な計測結果では、開放耳管の最細部分の内径の面積が 1 mm² であることから、

モデル実験では細管の内径 0.2, 0.4, 0.58, 0.8, 1.00 mm (それぞれ 0.03, 0.13, 0.26, 0.50, 0.79 mm²に相当)について検討を行った。

ii) 音響耳管法 (Sonotubometry)

機器は JK-05A (RION、国分寺市、日本) を用いて実施した。計測側の外鼻口に検査用のスピーカーのプローブを挿入、7 kHz band noise : BN を提示し、外耳道に挿入した音圧記録用のマイクロフォンでプローブ音の音圧を計測した。計測に先立ち、先に述べたように外耳道側の音圧が一定 (50 dB) になるようにスピーカーからのプローブ音圧出力が自動較正され出力レベルが固定される。この時、スピーカー音圧を 123 dB まで上昇させても設定したキャリブレーションレベル 50 dB に達さない場合は、スピーカー音圧 123 dB 提示時に記録される外耳道マイクロフォンレベルをキャリブレーションレベルとして、Sonotubometry の計測が実施される。その後実際の計測 (外耳道音圧の変化のモニター) がスタートするが、以下に挙げる 2 つを計測した。

1) 従来法 : 安静座位でプローブ音圧出力レベル (スピーカーレベル) の較正を行い、計測をスタートし、嚙下動作に伴い外耳道で得られる音圧変化を記録した。

2) 体位変換法 (大田法) : 前屈位で 20 秒経過した後、前屈位で較正を行なった後、計測を開始し、計測中に前屈位から座位へ体位変換し、体位変化に伴う外耳道音圧の変化を記録した。

iii) 座位 CT を用いた開放耳管径評価

耳管開放症の確実例に対して、コーンビーム CT を用い、座位安静時の耳管を撮影した。コーンビーム CT は高速短時間に撮影可能であり開放耳管の描出

に優れている 17) 18) 19) 20) 21)。機器は、仙塩利府病院に設置されている 3D Accuitomo F 17 MCT-HN（モリタ製作所、京都市、日本）を用いた。撮影条件は 90 kV、8 mA、距離 54 cm、照射時間 17.5s、再構成方向は中頭蓋底に平行とした。

画像処理ソフトウェアは同設備に付属の i-view を使用した。撮影された画像を元に、耳管長軸方向に対して垂直な画像を 1 mm のギャップレス再構成で作成し、耳管長軸に対し垂直な断面の耳管内腔を 1 mm 毎に観察した。測定は、他の耳管 CT 論文複数にて計測経験のある者の単独による手動計測で行われた。また Sonotubometry のデータ解析者と CT 解析者は別であり、CT 解析者は Sonotubometry データ等はブラインドで計測した。

耳管開放症例の代表例、閉鎖耳管、再構成で得られた耳管内腔最細部断面図の CT 画像を図 5 に示した。開放耳管の内腔は低吸収領域として容易に周囲から区別、同定することができた。開放内腔断面の形状は楕円に近似し、その長径、短径より“長径/2 x 短径/2 x 円周率”として内腔の断面積を求めた。

V 研究結果

1. モデル実験

シリンジモデルでの結果を図 6 に示す。

図 6A に、細径 0.2 mm における計測例を示す。図 6A に示した例では、チューブを開放している状態での減衰量（図 6A-1）と、チューブを閉鎖した状態の減衰量（図 6A-2）は、それぞれ 61 dB (=111 dB - 50 dB) と 73 dB (123 dB - 50 dB) となった。すなわち、チューブ開放時には 61 dB の減衰でマイクロフォンに到達したが、チューブ閉鎖時には音の伝達性が低下するため、減衰量は 73 dB に上昇した。両者の差 12 dB が細管を介した伝達量の増加分と考えられた。図 6A - 2 に、チューブ閉鎖状態で較正された後に、Sonotubometry の計測動作中にチューブの開放、閉鎖を繰り返した結果を示した。チューブ閉鎖時と開放時の較正時の伝達特性の差である 12dB の変化が記録されている。

以上のように評価した各細管の内腔断面積と細管を介したプローブ音の疎通性の関係を図 6B に示す。例にもあるように、繰り返しの測定でも再現性が極めて高い結果であったため、2 - 3 回の計測値の平均でプロットした。両者に比例関係を認め、計測の範囲では、伝達特性の変化から実際の細管径を求めることが可能であると考えられた。

2. 臨床例

i) Sonotubometry

図 7 に、耳管開放症患者の Sonotubometry の代表的な結果を示した。図 7A は、座位で実施した従来法による計測結果、図 7B は前屈位から計測を開始し、その後前屈から座位への体位変換を行って計測した結果である。座位における

スピーカー音圧は 88 dB、キャリブレーションレベルは 50 dB で減衰量は 38 dB となったが (図 7A)、前屈位ではスピーカー音圧は 123 dB、キャリブレーションレベルは 47 dB で、減衰量は 76 dB となった (図 7B)。本症例は、耳管開放確実症例であり、座位では耳管が開放しているが、前屈位では座位で開放していた耳管が閉鎖すると考えられる (実際、前屈位で耳管開放症状は改善した)。したがって、前屈位と座位での減衰量の差 38 dB が、本症例の開放耳管を介したプローブ音の伝達量と考えられる。図 7B の体位変換 Sonotubometry では、計測中に前屈位から座位に体位変換を行ったが、体位変換に伴い、同じく約 38dB の外耳道のマイクロフォンレベルの動的变化が観察された。

ii) CT

座位 CT によって得られた耳管内腔の最細部断面積の値を表 2 に示した。

疑い例と非開放例では、疑い例の 1 例を除いて CT 上で耳管内腔の連続した開放所見を認めなかったため、耳管開放症確実例のみを対象に示した。

図 8 に、耳管開放症確実例、疑い例、非開放例について、座位 CT によって得られた耳管内腔の最細部断面積の平均と標準誤差を示した。耳管開放症確実と診断された症例は、非開放群のみならず、耳管開放症疑い群とも有意に異なる特質を有する群であることが示唆された。(one-way ANOVA、Bonferroni)。

また、耳管開放症確実例 (26 耳)、疑い例 (9 耳)、耳管非開放例 (21 耳) の体位変換による音圧変化、座位鼻咽腔側-中耳側伝達減衰量 (平均を bar で、標準誤差を error bar で示した) の両者においても、耳管開放症確実例と診断された症例は、疑い例、耳管非開放例と有意差を持って区別された (one-way ANOVA、Bonferroni) (図 9)。

図 10 に、全対象耳について、前屈位から座位への体位変換に伴う音響伝達特性の変化量を、座位における鼻咽腔側から中耳側への音圧減衰量に対する変数としてプロットしたものを示した。耳管開放症確実例、疑い例、非開放症例を区別してプロットした。耳管開放症では、開放耳管を介して鼻咽腔側から提示したプローブ音が低減衰で中耳側に伝達されるため、耳管が開放している座位での鼻咽腔側から中耳側への音響伝達の減衰量は、耳管が閉塞、あるいはより狭小化する前屈位から耳管が開放する座位への体位変換に伴う鼻咽腔側から中耳側へのプローブ音の伝達量の変化と相関を示すことが推定される。実際、図 10 に示すように両者は、負の有意な相関を示した ($r = -0.771, p < 0.001$)。また、耳管開放症確実例、疑い例、非開放症例の 3 群を比較すると、鼻咽腔-中耳音響伝達減衰量が 50 dB 以上では、3 群間で座位での減衰量は有意差を認めなかったが、50 dB 以下の減衰量は全て耳管開放症であった。

iii) Sonotubometry と CT の関係について

体位変換による音圧上昇、ならびに、座位での鼻咽腔側から中耳側への音圧減衰量と、座位 CT によって得られた耳管内腔の最細部断面積の関係を図 11 に示した。耳管開放症確実例のうち、連続した内腔を認めなかった症例は、体位変換により耳管内腔の閉鎖している距離（閉鎖帯）が変化していると考えられたが、最細部断面積が 0 であったため、これらを除いた 16 耳について回帰分析を行なった。耳管再細部断面積と体位変換による音圧変化量の音圧変化量、座位での鼻咽腔側から中耳側への音圧減衰量の間には、いずれも有意な相関関係が認められた ($R=0.786, P<0.001$ ならびに $R=-0.753, P<0.001$)。

VI 考察

本研究では、実際に臨床で用いている Sonotubometry 検査機器を用い、細管モデルによる細管径と細管を介した音響伝達特性が、少なくとも内径 1mm までは比例関係にあることを示し、さらに、開放耳管を介した鼻咽腔側から中耳側への音の伝達特性と解剖学的な耳管の開放程度の間、有意な相関があることを示した。

1. 体位変換 Sonotubometry

耳管開放症状は、座位・立位で強く、臥位・前屈位や、頸部の内頸静脈の圧迫を行うと軽減することが知られている。これは、頭位を下げたり、頸部圧迫したりすることで頭蓋内静脈圧が上昇するが、その結果、耳管周囲にある静脈叢がうっ血し、耳管を外部から圧迫し、内腔が閉鎖するためであると考えられている²²⁾²³⁾²⁴⁾。したがって、座位と前屈位での鼻腔側から中耳腔側への音圧減衰量の変化は、座位に開放耳管を介して中耳側への音の伝達が良好なほど、すなわち、耳管の解剖学的な開放程度が大きいほど、大きくなることが推察される。実際、座位 CT における耳管内腔の面積と、体位変換に伴う鼻咽腔側から中耳側への伝達特性の変化は有意な相関を示した。すなわち、体位変換に伴う鼻咽腔側から中耳側への音響伝達特性から、耳管の解剖学的な開放度を推察することができるといえる。このことは、モデル実験において、細管径が 1mm までは内径と音響伝達量がよく相関する事と矛盾のない結果であった。

Sonotubometry は従来、通常閉鎖している耳管が嚥下時などに短時間開大する開大能の評価のために開発された検査である。先に述べた耳管開放症の診断

基準の Sonotubometry の項目において、1) 検査時閉鎖していた耳管が、嚙下後長く開放状態を継続することを示すこと（開放プラトー型）、または、2) 座位での較正スピーカー音圧（外耳道音圧レベルが 50 dB になる鼻咽腔側スピーカーから出力されるプローブ音の圧）が 100 dB 未満であることが、耳管開放症の診断的意義が高い所見として提案されている。体位変換 Sonotubometry は、基本的には後者の較正スピーカー音圧の指標と同様の意義を有すると思われる。従来法の較正スピーカー音圧は、外耳道に設置したマイクロフォンで記録される音圧レベルを基準にするため、スピーカーから外耳道までに存在する個体ごとのさまざまな解剖学的な条件、すなわち、鼻咽腔の容積、中耳腔容積、鼓膜の厚さなど、耳管の状態以外の要因にも影響を受けることが考えられる。これと比べて、体位変換 Sonotubometry では、同一人物の座位と前屈位で比較を行う為、異なるのは基本的に耳管の状態で、他の条件は同一であるので、耳管の開放による影響をより純粹に評価できる可能性があると思われる。本研究の体位変換 Sonotubometry では、15 dB 以下の音圧上昇を示した症例では 3 群に有意差を認めず、17 dB 以上の上昇を示した症例は、はすべて耳管開放症であった。また座位でのキャリブレーション音圧と体位変換での伝達音圧変化量は有意な相関を示し、また、耳管 CT により評価された耳管最細部の内腔断面積と、座位でのキャリブレーション音圧、体位変換での伝達変化量は、いずれも良い相関を示したが、後者の相関が若干ではあるが、良好な結果であった。

また、前屈位は非開放症例でも音の伝達性を低下させた。これは、開放状態にない耳管においても、前屈位で周囲の静脈叢からの圧迫により耳管の閉鎖が

強くなり、鼻咽腔側から中耳側への伝達がさらに不良になることが関係しているものと推察される（実際、非開放症例でも、前屈位になると嚙下時の耳管開大時間が、座位に比べて短くなる傾向がある）。今回の研究では、開放症ではない症例でも最大 13 dB の伝達量の低下を認め、図 7 に示すように前屈位で上昇した音圧が 15dB 以下の場合や、座位での鼻腔-外耳道音圧が 50dB 以上の場合では耳管開放症確実例と疑い例、非開放症例とを区別することはできなかった。これは本研究の対象の半数以上が区別できていないことを示している。すなわち現在の診断基準や座位 CT では特定できない症例を、この体位変換 Sonotubometry で評価できる可能性があることを示していると言える。

大田らは、健常者 21 名 42 耳を対象にした検討では、非開放症例における体位変換時の鼻咽腔側から中耳側への音の伝達特性は、今回の検討より低く、すべて 5dB 未満であったと報告している。大田らの非開放症例は、耳疾患の既往のない正常症例であったが、本研究の対象症例は一側耳管開放症例の対側耳も含まれており、非開放症例の中では、開放になりやすい耳管の閉鎖が軽微な症例も含まれている可能性もある。いずれにしても、本研究は、28 人 56 耳を対象にした後ろ向きの検討であり、先に述べたように、鼻咽腔から外耳道までの音の伝達性には、耳管の開大度以外にも、鼻腔の状態、鼻腔の容積、中耳腔の容積など様々な要因の影響を受けることも考慮すれば、耳管開放の有無診断のための基準を決定するには、より多くの症例を検討する必要があると思われる。また外来診療において、実際の開放の重症度と患者の愁訴の程度が必ずしも比例していない症例もあり、これらについての検討も今後の課題である。

2. 体位変換 Sonotubometry の臨床的意義

耳管開放症では、通常は閉鎖している耳管が、常時開放している状態にあるため、開放耳管を通した圧や音の鼻咽腔側から中耳側への易伝達を検出することが、診断上重要となっている。非開放時に比べて、開放時には、圧、音いずれも易伝達されるが、圧の易伝達を検出する TTAG 検査は、鼻すすりや深呼吸に伴う鼻咽腔側の圧変動を外耳道で検出する為、耳管が閉鎖していれば、理論的には圧は伝達されない。このことを考慮すれば、陽性所見の診断学的意義は高く、開放耳管が存在する絶対的な診断根拠になると考えられる。それに対して、Sonotubometry では、外鼻孔に挿入したスピーカー出力から外耳道に設置したマイクロフォンまでの音の伝達を指標にするため、前述したように、鼻腔、副鼻腔、中耳、鼓膜など様々な構造物の状態の影響に加え、耳管の閉鎖状態（耳管全長に渡って閉鎖しているのか、あるいは耳管の閉鎖帯がごく短い場合のかなど）の影響も受ける。したがって、ごく軽度の耳管開放では、非開放耳との判別が難しくなる場合もあるものと推察される²⁵⁾。実際、今回の検討でも、前屈位で上昇した音圧が 15dB 以下の場合や、座位での鼻腔-外耳道音圧が 50dB 以上の場合では耳管開放症確実例と非開放症例は区別することはできなかった。

今回の研究からは、Sonotubometry は耳管開放の重症度の評価において有用である可能性が示唆されたが、重症度判定では TTAG よりも有利な可能性が高い。すなわち、TTAG では鼓膜に穿孔がない限り、鼻咽腔側から中耳に伝達された圧変化は鼓膜の変化を介して外耳圧を変化させることになるため、鼓膜の変位が限界に達すると、それ以上中耳圧が上昇しても外耳圧の変化としてとら

えられないこととなることが容易に想像される。一方、Sonotubometry では、耳管を介した音圧上昇がそのままマイクロフォンの上昇としてとらえられるため、内径の増大に伴い音の伝達が増大する限り、又は音の増大を捉えることで、耳管内径の増大を推測することが可能になる。

現状では、座位 CT で耳管の開放状態を評価し（臥位での CT では耳管が狭窄・閉鎖するため）、治療方針の決定や、耳管ピンの適応判断を行っているが、座位 CT は限られた施設でしか実施が可能ではなく、適切な治療を受けられない症例が少なからず存在する一因となっていた。一方、Sonotubometry は最も普及している耳管機能検査の一つであり、体位変換 Sonotubometry を用いた耳管機能検査は、その非侵襲性、短時間で実施可能な簡便性やコスト面も含め、臨床現場における耳管開放症の重症判定の有力な耳管内腔の評価法になるものと思われ、的確な治療に結びつく症例がより多くなることが期待される。

VII 結論

体位変換 Sonotubometry を用いた鼻咽腔側から中耳側への開放耳管を介した音響伝達特性により、耳管開放症の解剖学的な耳管開放度が評価可能であり、CT に代わる耳管の評価法になり得ることが示唆された。

VIII 謝辞

本研究においてご指導いただきました本学耳鼻咽喉科・頭頸部外科学分野：香取幸夫教授、医工学研究科聴覚再建医工学分野/医学系研究科聴覚・言語障害学分野：川瀬哲明教授、仙塩利府病院耳鼻咽喉科：小林俊光名誉教授、池田怜吉先生をはじめとする、多くの先生方に心より感謝致します。

IX 文献

1. Ogawa S, Satoh I, Tanaka H : Patulous Eustachian tube. A new treatment with infusion of absorbable gelatin sponge solution. Arch Otolaryngol 1976; 102: 276-280.
2. O'Connor AF, Shea JJ: Autophony and the patulous Eustachian tube. Laryngoscope 1981; 91(9 Pt 1): 1427-1435.
3. Kobayashi T: Diagnosis and treatment of patulous Eustachian tube [in Japanese]. Practica Otologica 2000; 93: 897-907.
4. Doherty JK, Slattery WH: Autologous fat grafting for the refractory patulous eustachian tube. Otolaryngol Head Neck Surg. 2003; 128(1): 88-91.
5. 耳管開放症診断基準案 2016. 日本耳科学会 HP.
<http://www.otology.gr.jp/guideline/guideline.html>
6. Kumazawa T, Honjo I, Honda K: Aerodynamic evaluation of Eustachian tube function. Preliminary report on normal subjects. Arch Otorhinolaryngol 1974; 208: 147-156.
7. Kumazawa T, Honjo I, Honda K: Aerodynamic pattern of Eustachian tube dysfunction. Arch Otorhinolaryngol 1977; 215: 317-323.
8. Finkelstein Y, Talmi YP, Rubel Y, et al: An objective method for evaluation of the patulous eustachian tube by using the middle ear analyzer. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 1988; 114: 1134-1138.
9. 石川 滋:耳管開放症に対する薬物療法の試み 加味帰脾湯の使用経験. 耳鼻臨床 1994; 87: 1337-1347
10. 小林俊光、高村博光、馬場 保、他: 耳管開放症の手術 耳管ピン挿入術. JOHNS 2001; 17: 61-64
11. 小林俊光:耳管閉鎖障害の臨床. 第 106 回日本耳鼻咽喉科学会総会宿題報告モノグラフ. 笹氣出版 2005; 136-150
12. 山下達夫:疾患の病態・治療 耳管開放症.日耳鼻 1994; 97: 582-585

13. 堀 容子、小林俊光:解剖と機能 耳管閉鎖障害シリーズ 耳管閉鎖障害
総論と疫学. *JOHNS* 2007; 23: 114-115
14. 山口展正:耳管開放症に関する病態および疾患. *Otol Jpn* 1995; 5:
199-203
15. 大田重人:耳管機能検査の実際. *Otology Japan*, 2014; 24: 835-841.
16. Ohta S, Katsura H, Ikehata M, et al: The postural change
Eustachian tube function test using a sonotubometry
[in Japanese]. *Otology Japan* 2015; 25: 800-804.
17. 吉岡哲志:耳管疾患の最前線 多列検出型 CT 機器による耳管形態と機能の
解析 日本耳鼻咽喉科学会会報 2001; 114: 547-556.
18. Kikuchi T, Oshima T, Hori Y, et al: Three- dimensional computed
tomography imaging of the eustachian tube lumen in patients with
patulous eustachian tube. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*
2009; 71: 312-316.
19. Kikuchi T, Oshima T, Ogura M, et al: Three-dimensional computed
tomography imaging in the sitting position for the diagnosis of
patulous eustachian tube. *Otol Neurotol* 2007; 28: 199-203.
20. Ikeda R, Kikuchi T, Oshima H, et al: Relationship between
clinical test results and morphologic severity demonstrated by
sitting 3-D CT in patients with patulous Eustachian tube. *Otol
Neurotol* 2016; 37: 908-913.
21. Yosida H, Takasaki K, Kobayashi T, et al : Imaging of the patulous
Eustachian tube: high-resolution CT evaluation with mutiplannar
reconstruction technique. *Acta Otolaryngology*. 2004; 124(8): 918-
923.
22. Oshima T, Kikuchi T, Hori Y, et al : Involvement of pterygoid
venous plexus in patulous eustachian tube symptoms. *Acta
Otolaryngol* 2007;127:693-699.
23. Poe DS: Diagnosis and management of the patulous eustachian
tube. *Otol Neurotol* 2007; 28:668-677.

24. Bluestone CD, Cantekin EI: "How I do it"--otology and neurotology. A specific issue and its solution. Management of patulous Eustachian tube. *Laryngoscope* 1981; 91:149-152.
25. Kikuchi T, Kobayashi T, Oshima T, et al: High false-positive rate of the sonotubometry in the diagnosis of the patulous Eustachian tube [in Japanese]. *Otology Japan* 2013; 23:193-197.

X 図

付図説明

図1 耳管と周囲の構造 (左側)

耳管は、咽頭と鼓室をつなぐ約 3.5 cm の細管で、周囲は筋・脂肪・血管組織・骨などで囲まれる。通常は閉鎖しているが、嚥下や欠伸に伴い短時間開くことで、中耳の圧平衡・排泄・防御などに重要な役割を果たしている。

図2 Sonotubometry -原理の概略図と正常耳記録例-

A：原理の概略図

計測に先立ち鼻咽腔側より提示したプローブ音が、外耳道に設置したマイクで、予め設定された一定のレベル（通常 50 dB）で記録されるように鼻咽腔側スピーカーから出力されるプローブ音のレベルが自動較正される。プローブ音のレベルが設定されると、外耳道に設置したマイクで観察されるプローブ音周波数の音圧が持続的に計測される。通常閉鎖している耳管が嚥下に伴って開大すると、外耳道で計測される音圧レベルも上昇する。

B：正常耳記録例

嚥下に伴い耳管が開放すると外耳道音圧が上昇する。通常開大した耳管は短時間で閉鎖し、これに伴い外耳道音圧レベルも元のレベルに戻る。

図 3 Sonotubometry 従来法と体位変換法

1) 従来法

安静座位でプローブ音出力レベルの較正を行う。計測をスタートし、嚥下動作に伴い外耳道で得られる音圧変化を記録する。

2) 体位変換法（前屈位→座位）

前屈位で 20 秒経過した後、較正を行なう。計測を開始し、計測中に前屈位から座位へ体位変換し、体位変化に伴う外耳道音圧の変化を記録する。

図 4 モデル実験 実際のモデル (A) とシェーマ(B)

モデルは、2本のシリンジ（12 cc、1.5 cc）、2本のシリコンチューブ（長さ 30 mm、内径 3 mm）並びに、2本のシリコンチューブ間を連結する長さ 30 mm の細管（内径 0.2 - 1.0 mm の範囲で変更）から構成される。細管とシリコンチューブ間の連結部は、粘土と接着剤でタイトにシールした。12 cc のシリンジ側（臨床例での鼻咽腔側に相当）スピーカーフォン、1.5 cc のシリンジ側（臨床例での外耳道側に相当）にマイクロフォンを設置しプローブ音の伝達特性を評価した。また、12 cc シリンジ側のシリコンチューブは、鉗子で内腔の閉鎖、開放ができるようにした。

図5 座位 CT を用いた開放耳管径評価

a. 閉鎖耳管 b. 開放耳管 c. 撮影された画像を元に、耳管長軸方向に対して垂直な画像を、1 mm のギャップレス再構成で作成、耳管長軸に対し垂直な断面の耳管内腔を 1 mm 毎に観察し最細部内腔断面の画像を得た。開放耳管腔は、低吸収領域として容易に周囲から区別、同定することができる。開放内腔断面積は楕円に近似し、の長径、短径より“長径(a)/2 x 短径(b)/2 x 円周率(pi)”として内腔面積 (S) を算出した。

図6 モデル実験結果

A 代表例（細管径 0.2 mm における計測例）

チューブが開放されている状態（図 6A - 1）では、校正音圧 50 dB、スピーカーレベル 111 dB で、減衰量は 61 dB である。一方、チューブを閉鎖した状態（図 6A - 2）では、校正音圧 50 dB、スピーカーレベル 123 dB で、減衰量は 73 dB である。両者の差 12 dB が、細管を介した伝達量の増加と考えられる。図 6A - 2 の上段は外耳道の音圧変化が記録される。下段には通常、咽頭雑音（嚙下）の波形が記録されるが、モデル実験のため、鉗子の開放・閉鎖の雑音が記録されている。チューブ閉鎖時と開放時の校正時の伝達特性の差である 12 dB の変化が記録されている。

B 細管の内腔断面積と細管を介したプローブ音疎通性の関係

両者に比例関係を認め、計測の範囲では、伝達特製の変化から、実際の細管径を求めることが可能であると考えられた。例にもあるように、繰り返しの

測定でも再現性が極めて高い結果であり、2 - 3 回の計測値の平均でプロットした。

($R^2 = 0.9995$)

図 7 耳管開放症代表例

A: 従来法 (座位)

上段に嚙下動作に伴う音圧変化、下段に嚙下時の咽頭雑音が記録されている。座位における Sonotubometry 計測のスピーカー音圧は 88 dB、キャリブレーションレベルは 50 dB で減衰量は 38 dB である。本症は、耳管開放症であるが、嚙下時にわずかな音圧上昇が記録されている。これは開放耳管が嚙下に伴い、さらに開大しているものと推察される。

B: 体位変換 Sonotubometry

上段に体位変換に伴う音圧変化を示している。嚙下動作を行わないため、下段には咽頭雑音の波形は見られない。前屈位ではスピーカー音圧は 123 dB、キャリブレーションレベルは 47 dB で減衰量は 76 dB となっているが、前屈位と座位での減衰量の差 38 dB が、本症例の開放耳管を介したプローブ音の伝達量と考えられる。図 B の体位変換 Sonotubometry では、体位変換に伴い 38 dB の外耳道のマイクロフォンレベルの動的变化が観察されている。

図 8 耳管最細部断面積

耳管最細部断面積において、開放症確実例は疑い例と非開放症例と有意差を持って区別された (one-way ANOVA、Bonferroni)。

図 9 耳管開放症確実例 (26 耳)、疑い例 (9 耳)、耳管非開放例 (21 耳) の体位変換による音圧変化、座位鼻咽腔側-中耳側伝達減衰量

平均を bar で、標準誤差を error bar で示す。いずれにおいても、耳管開放症確実例と診断され症例は、疑い例、耳管非開放例と有意差を持って区別された (one-way ANOVA、Bonferroni)。

図 10 体位変換に伴う音響伝達特性の変化量 vs 座位における鼻咽腔側から中耳側への音響伝達の減衰量

耳管開放症確実例 (26 耳)、疑い例 (9 耳)、耳管非開放症例 (21 耳) を、それぞれ○、△、×区別してプロットしている。体位変換に伴う音響伝達特性の変化量と座位における鼻咽腔側から中耳側への音響伝達の減衰量は、負の有意な相関を示した ($r = -0.771$, $p < 0.001$)。

図 11 耳管最細部断面積（耳管開放症確実例のうち最細部断面積 0 を除いた 16 耳） vs. 体位変換による音圧変化、座位鼻咽腔側-中耳側伝達減衰量

耳管最細部断面積と体位変換による音圧変化量の音圧変化量、座位での鼻咽腔側から中耳側への音圧減衰量の間には、いずれも有意な相関関係が認められた（ $r = 0.786$, $p < 0.001$ ならびに $r = -0.753$, $p < 0.001$ ）

付図

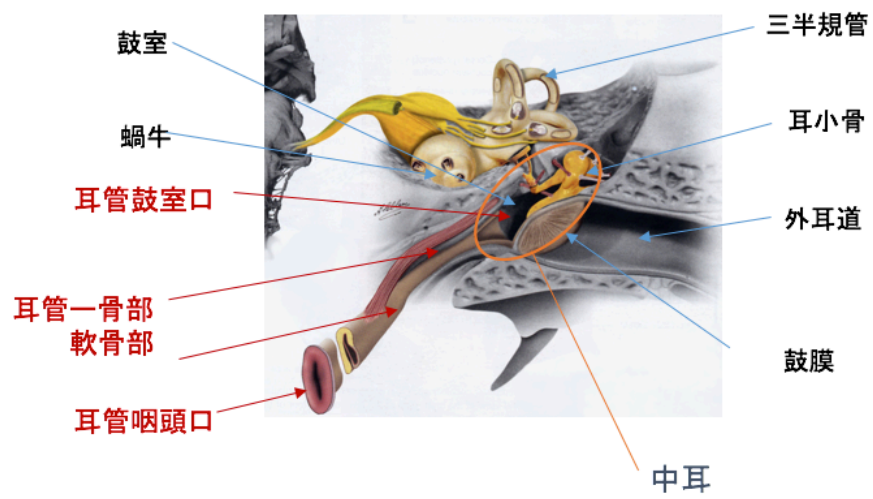
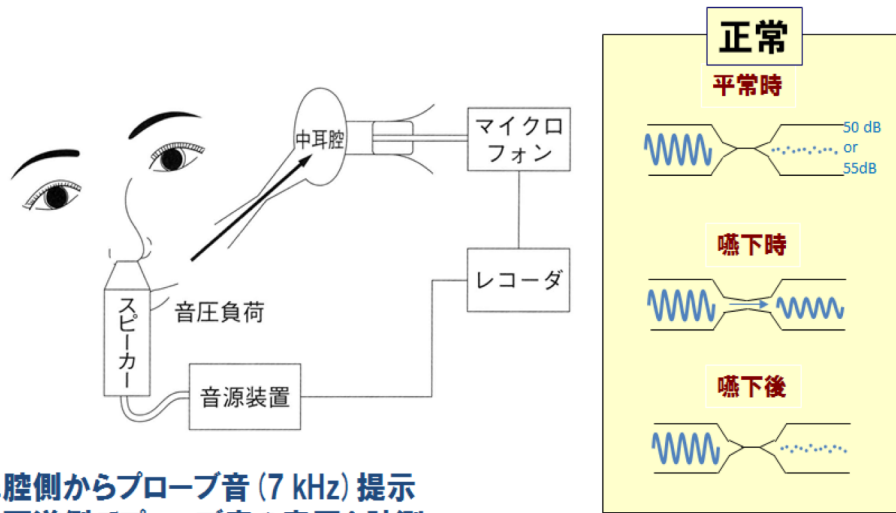


図 1

A.

音響耳管法 (sonotubometry)



1. 鼻腔側からプローブ音 (7 kHz) 提示
2. 外耳道側でプローブ音の音圧を計測
3. 外耳道の音圧が一定 (50dB or 55 dB) になるようにプローブ音圧を自動設定
4. 嚥下動作→嚥下動作に伴う外耳道で記録される音圧変化を記録
(嚥下動作を低周波数の嚥下ノイズとして記録)

B.

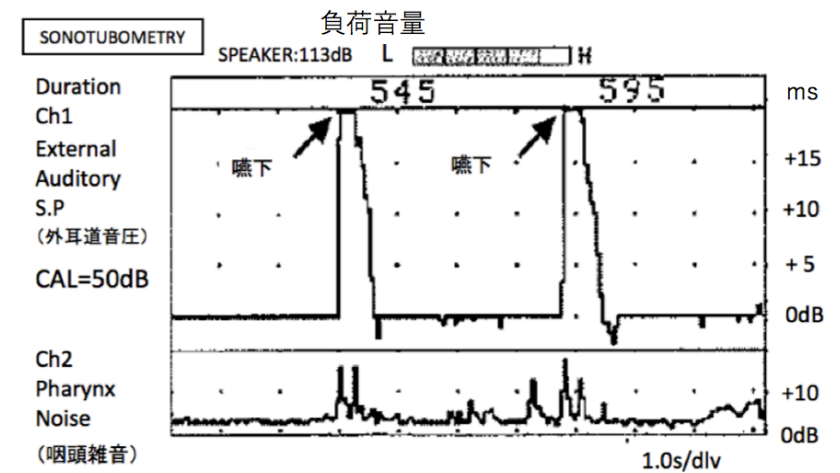
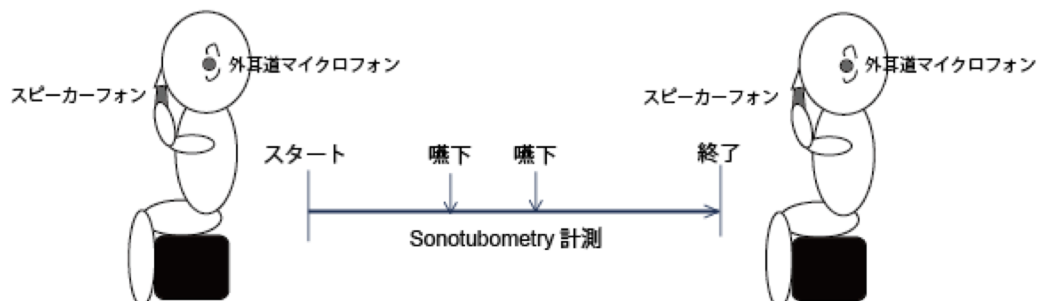


図 2

1) 従来法（座位で実施）



2) 体位変換法（前屈位 → 座位）

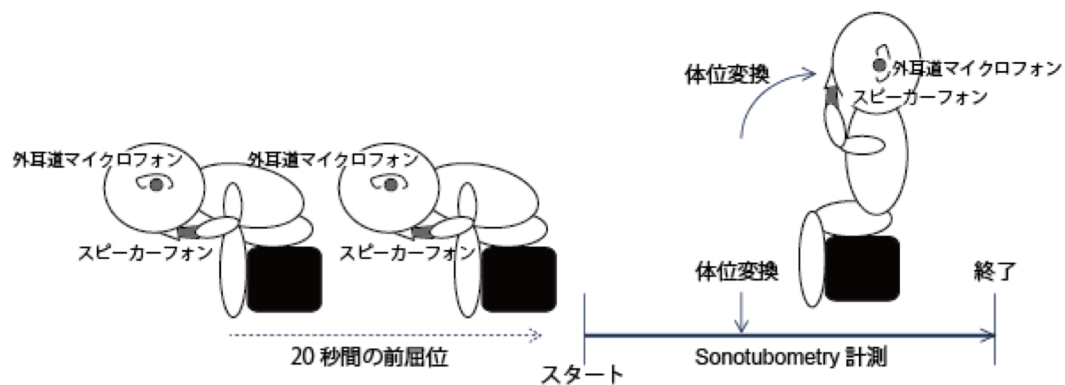
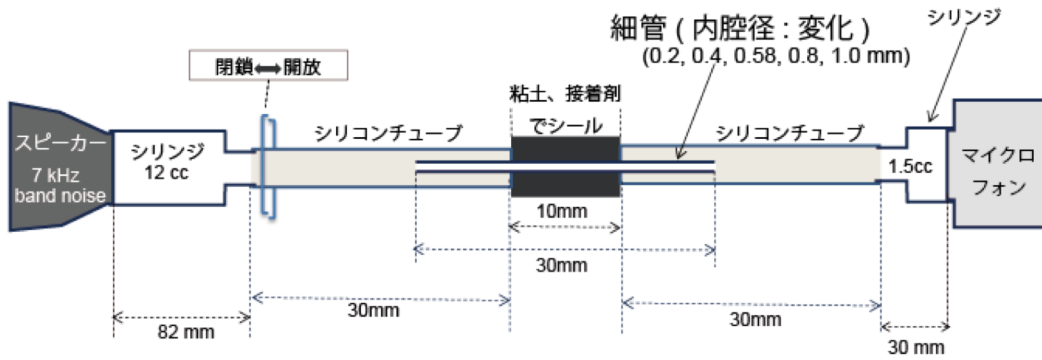


図 3



A. 実際のモデル

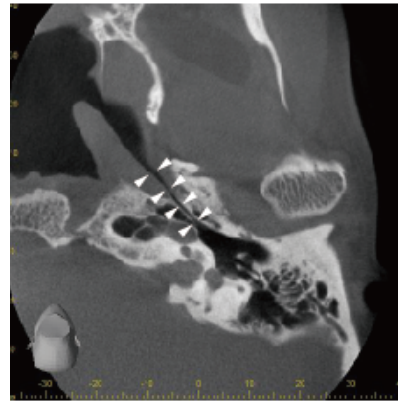


B. シェーマ

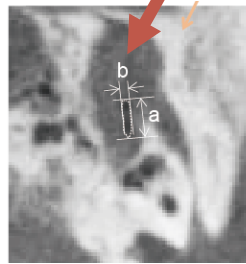
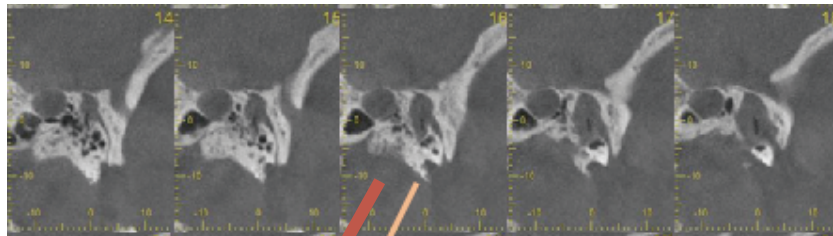
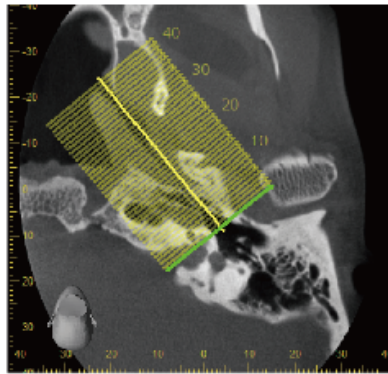
図 4



a. 閉鎖耳管



b. 開放耳管



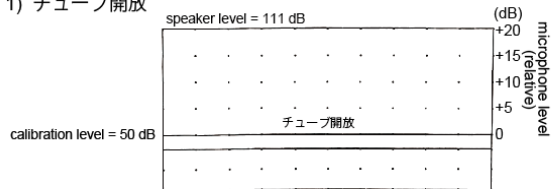
$$S \doteq a/2 \times b/2 \times \pi$$

c. 耳管内腔の最細部断面積

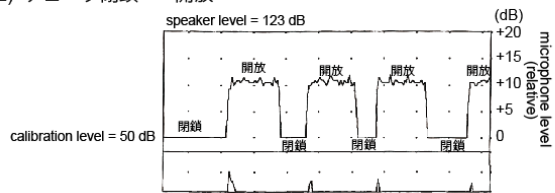
図 5

A 典型例 (細管径 = 0.2mm)

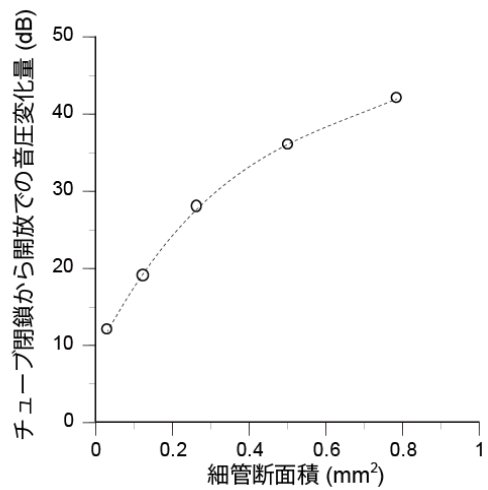
1) チューブ開放



2) チューブ閉鎖 ↔ 開放



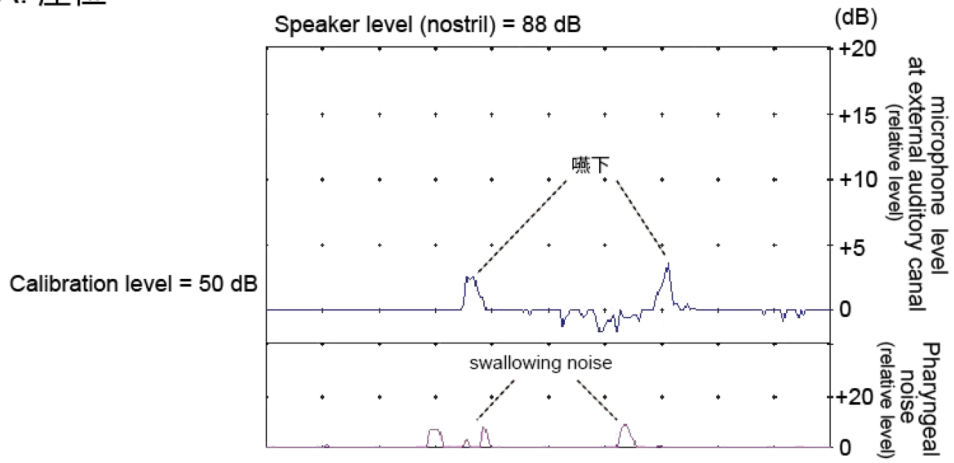
B 細管径と音響伝達量の関係



($R^2 = 0.9995$)

図 6

A. 座位



B. 前屈位 → 座位

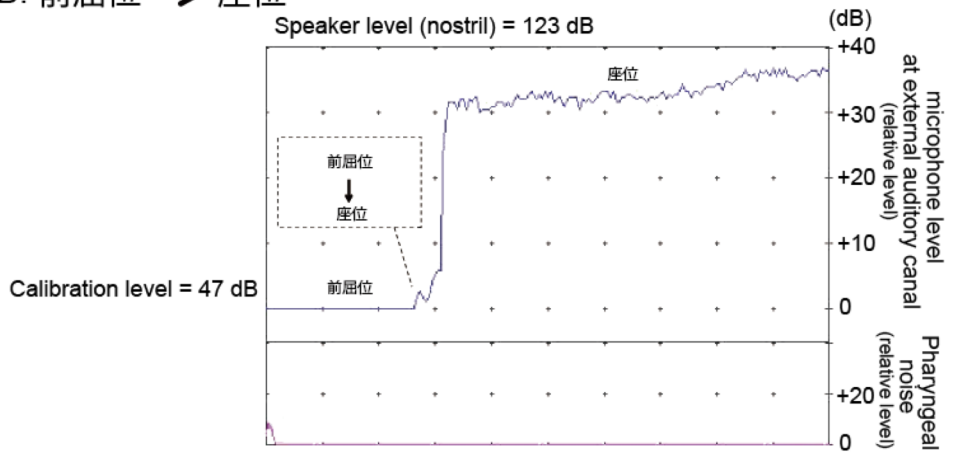
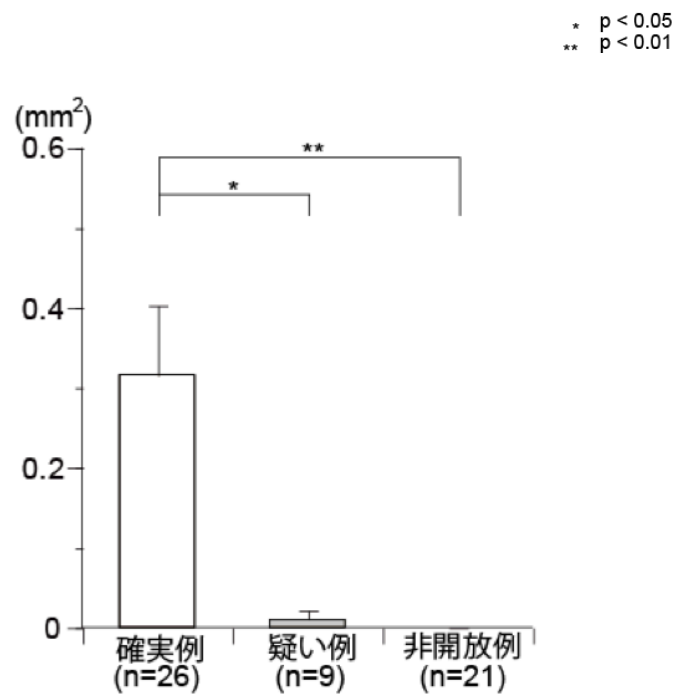


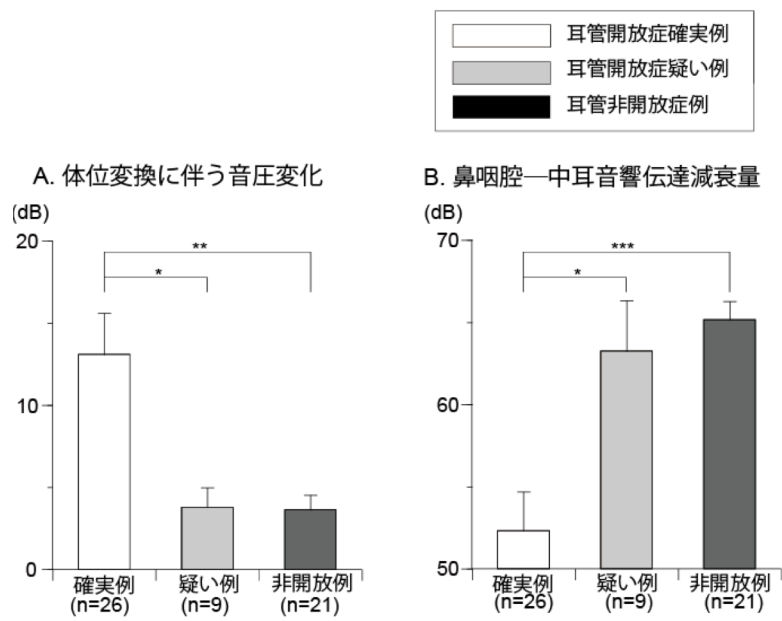
图 7



※ 平均を bar で、標準誤差を error bar で示す。

図 8

* p < 0.05
 ** p < 0.01
 *** p < 0.001



※ 平均を bar で、標準誤差を error bar で示す。

図 9

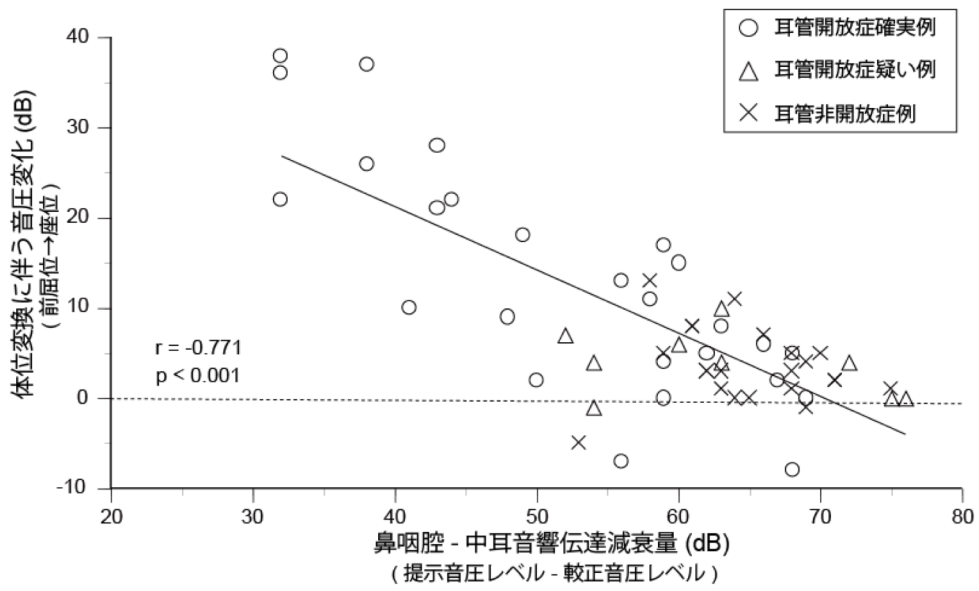


図 10

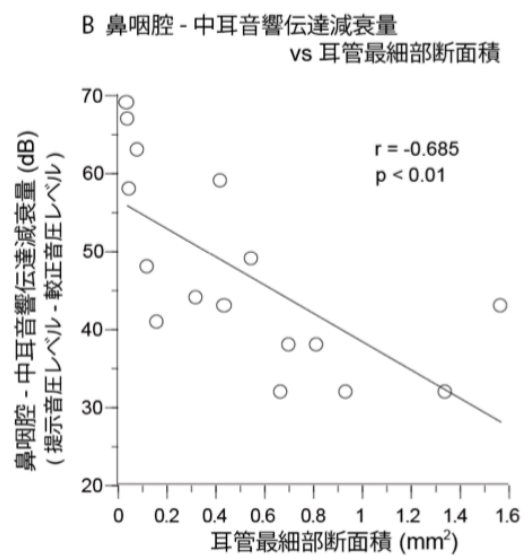
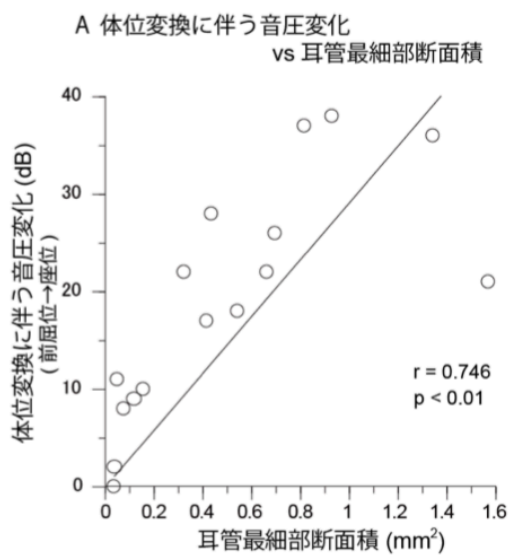


図 11

Case	age	Sex	R/L	閉鎖帯距離	長径	短径	最細部断面積
1	51	F	R	0	2.56	0.78	1.568283053
2	63	M	L	0	1.94	0.88	1.340831745
3	34	F	R	0	1.91	0.62	0.930068505
4	38	F	L	0	1.73	0.6	0.815243294
5	77	M	R	0	1.59	0.56	0.699318525
6	51	F	L	0	1.84	0.46	0.664761005
7	34	F	L	0	1.39	0.5	0.545851724
8	24	F	R	0	1.09	0.51	0.436602839
9	38	F	R	0	1.9	0.28	0.417831823
10	19	F	R	0	1.05	0.39	0.321620548
11	37	F	L	0	0.67	0.3	0.157865031
12	22	F	L	0	0.45	0.34	0.120165919
13	22	F	R	0	0.36	0.28	0.079168135
14	39	F	L	0	0.24	0.25	0.04712389
15	14	M	L	0	0.23	0.22	0.039741147
16	17	M	L	0	0.46	0.1	0.036128316
17	65	F	L	2	0	0	0
18	62	F	L	2	0	0	0
19	65	F	L	2	0	0	0
20	14	M	R	4	0	0	0
21	39	F	R	5	0	0	0
22	24	F	R	6	0	0	0
23	17	M	R	6	0	0	0
24	32	F	R	7	0	0	0
25	26	M	R	7	0	0	0
26	26	M	L	9	0	0	0

表 2 開放症確実例の座位 CT 計測値