研 究

外耳・中耳修飾効果の臨床応用に
関する基礎的研究

暁 清文・Richard L. Goode*・Craig Miller*

Experimental Study for Clinical Application of the External
and Middle Ear Modifications

Kiyofumi Gyo

(Ehime University)

Richard L. Goode and Craig Miller

(Stanford University/Palo Alto Veterans Administration Hospital)

Hearing at the speech frequency range can be improved by modifications of the external and middle ear at the cost of hearing loss at low and/or high frequencies, which are not important for speech recognition. Experiments using the model of the external ear proved that the increase of cavity volume of the external ear changed its resonant peak to lower frequency. Use of a ring in a model of the external ear also showed similar effects. These results showed that hearing could be improved at around 1 kHz by 10–20 dB. The effects of middle ear modifications were studied with fresh human temporal bones. Stainless steel microspheres placed on the umbo was observed under a microscope with strobe illumination, and the displacement of the umbo was measured using a video measuring system. Blockage of the aditus ad antrum improved the hearing at 2.8 kHz by 5.4 dB (mean). Decrease of the middle ear cavity volume increased the hearing at 1.4–2.8 kHz by 2.2 dB (mean).

Key words: cavity modification, cavity resonance, ossicular displacement

はじめに

近年、補聴器の発達は著しく、小型化・高性能化が一段と進んできた。しかし補聴器にはなお、耳栓を必要とすること、出力の調整や電池

の交換が必要なことなどの問題点があり、長期間の使用が必要になることを考えると、使用せずにすむならそれに越したことはない。ところで、外耳や中耳に種々の修飾を加えると、その

音響特性が変化することが知られている。これを利用して、会話音声の理解に重要な中音域、とりわけ 1～2 kHz 付近の聴力を改善することが考えられる。すなわち例えば、谷型や高音漸傾型のオージオグラムを持つ患者の聴力を、中音域の聞こえが良い山型に変えることができれば、この患者は語音明瞭度が改善し、補聴器が不要になる可能性がある。ここでは外耳と中耳に種々の修飾を加え、上記の目的の可能性について検討した。

外耳道修飾効果の検討

a) 容積拡大の効果

外耳道腔の容積を拡大すれば、外耳道の共鳴は低い周波数に移動する。この効果により中音域、とりわけ 1～2 kHz の帯域でどの程度のゲインが得られるかを、外耳道を延長した場合と副腔を設けた場合（外耳道後壁除去後の状態を想定）についてモデルを用いて検討した。

<実験方法>

ゴム製耳介モデルに延長プラスチック・チューブ（内径13mm）を付け、Zwislocki カプラーに接続した。これを Brüel & Kjaer 社製無響試験箱（B&K, type 4222）内に置き、オージオ試験装置（B & K, type 2118）を用いて

チューブ延長の効果を見た。刺激音は無響試験箱の上部に組み込まれたスピーカーから発生させ、カプラーに接続したハーフィンチ・マイクロホン（B & K, type 4134）で外耳道モデル内の音圧を測定した。刺激音圧は各周波数とも 90dB SPL とし、オージオ試験装置は周波数自動掃引モードとして測定を行なった。

一方、副腔の効果は、ゴム製耳介モデルに T 型プラスチック・チューブ（内径13mm）を連結し、カプラーを介さず直接ハーフィンチ・マイクロホンに接続した。無響試験箱内にて、T 型チューブの側管の長さを変え、共鳴特性の変化を測定した。

<結果>

延長効果では、プラスチック・チューブの長さを長くするにつれて、共鳴周波数は低音方向へ移動し、30mm のチューブの場合、1.5kHz 付近で 16dB 程度のゲインが得られた（図 1）。逆に、3 kHz 付近では反共鳴のために、コントロールと比べてロスがみられた。

一方、副腔の効果では、延長の場合と同様、T 管の長さが長くなるにつれて共鳴周波数は左に移動し、25mm の場合、1.2kHz 付近で 10dB 程度のゲインが得られた（図 2）。高い周波数

図 1 外耳道延長効果。刺激音圧は90dB SPL。チューブがない場合（d=0）の音響特性は、平均的な人間の外耳道音響特性に相当する。

ではやはり反共鳴のためのロスがみられた。

b) リング使用の効果

外耳道にリングを挿入して鼓膜前面に小さな空隙を作ることにより、外耳道の音響特性を変えることができる。この方法により、どの程度のゲインが得られるかを、モデルを用いて検討した。

<実験方法>

一端が閉鎖したプラスチック・チューブ（内径8.6mm，全長30mm）の開放端に第一マイクロホン（Starkey Lab, model res. 1）を設置，また同一形式の第二マイクロホンをチューブ閉塞端に小孔を開けて設置した。次いで，チューブ内にエポキシ系樹脂で作成したリング（厚さ1～5mm）を挿入した。第二マイクロホンは従属型ヘテロダイン・フィルター（B & K, type 2020）から増幅器（B & K, type 2606）を経て，レベル・レコーダー（B & K, type 2305）に接続した。第一マイクロホンは，第二マイクロホンの場合と同一形式の別の増幅器（B & K, type 2606）に接続し，チューブに入力する音圧をモニターした。第一マイクロホンからの出力は増幅後，信号発生器（B & K, type 1027）のコンプレッション回路に接続し，スピー

ーカーへの出力電圧をコントロールして，チューブ開放端での入力音圧が各周波数とも 94dB SPL となるようにした。信号発生器は周波数掃引モードとし，リングの位置を変え，第二マイクロホンで各周波数における音圧を測定した。なお，測定は上記無響試験箱内で行ない，スピーカーは試験箱内蔵のものを利用した（図3）。

<結果>

リングの内径との関係では，内径が大きくなると，当然ながらリングの効果は小さくなった。リングの厚さとの関係では，厚くなるほど共鳴点は低い周波数に移動した。図4は厚さ5mm，内径1mmのリングを使用した時の結果である。この場合，リングを置く位置が閉塞端から遠いほど，すなわち鼓膜前面に相当する空間の容積が大きいほど，共鳴点は低い周波数に移動し，約 20dB のゲインが得られた。逆に高い周波数では反共鳴のためのロスがみられた。

中耳修飾効果の検討

中耳腔の容積を変えることにより，中耳伝音系の音響特性を変えることができる。ここでは乳突洞口閉鎖，鼓室腔狭小化の効果を検討した。

図2 外耳道副腔の効果。刺激音圧は90dB SPL。

＜実験方法＞

実験には新鮮な人摘出側頭骨を用いた。中耳修飾の効果は、ツチ骨腭の動きを顕微鏡下に計測して、これを指標として検討した。摘出した側頭骨は、ゴム袋とデンタル・セメントで外耳道や天蓋を除いて全体を覆い、固定台上に固定した。実験中は側頭骨の乾燥を防ぐため、

Merthiolate でたえず湿らせ、乾燥を防いだ。ついで、側頭骨天蓋に小孔をあけ、ここよりツチ骨腭上に $10\sim 60\mu\text{m}$ 径のステンレス小球を置き、その後、小孔を透明ガラスで閉じた。ガラスを通して、このステンレス小球を顕微鏡上 (Leitz, Laborlux 12ME) に設けたビデオカメラでとらえ、テレビ・モニター上に映し出し

図3 外耳道リングの効果. 実験方法のブロック図.

図4 外耳道リングの効果. リングの厚さ 5 mm, 内径 (b) 1 mm の場合の測定結果. 盲端からの距離 (a) を変えて測定した.

た。顕微鏡の照明にはストロボ光源 (B & K, type 4911) を用い、発光を刺激音と同期化させ、両者の位相を調整してツチ骨脛の変位振幅を測定した。実際の計測には Video Measuring System (Colorado Video Co.) を用い

た。このシステムの拡大率は9インチのモニター・スクリーン上で1,000倍であり、 $0.3\mu\text{m}$ の変位振幅まで測定が可能であった。Video Measuring System による測定法の詳細はここでは省略する。一方、音刺激には信号発生器

図5 耳小骨振動測定法のブロック図。

図6 乳突洞口閉鎖前後のツチ骨脛の変位振幅。刺激音圧は124dB SPL。
(1)乳突洞削開前,(2)乳突洞削開後,乳突洞口開放,(3)乳突洞口閉鎖後。
斜線の領域は乳突洞口閉鎖により得られるゲイン。なお,乳突洞削開前後はいずれも洞の大気側は閉塞して測定を行なった。

(B & K, type 1027) を用い, University Sound 社製スピーカー (ID-40T) を駆動, 音はビニール・チューブと耳鏡を用いて外耳道に導いた. また, 鼓膜前面での音圧をモニターするため, 側頭骨の下顎関節面に小孔を開け,

小型マイクロホン (B & K, type 4170) のプローブ先端を鼓膜から 2~3 mm の位置に設置した. 刺激音圧は各周波数とも鼓膜前面で 124dB SPL とした. 実験装置の概要を図 5 に示す. なお, 試行による検査の誤差は, 全ての測定を

図 7 乳突洞口閉鎖の効果. 12例の平均値ならびに標準偏差を示す. 乳突洞の容積は 2.36 ± 0.29 cc, 中耳腔の容積は 0.51 ± 0.04 cc.

図 8 中耳腔狭小効果. 4例の成績を示す.

3時間以内に行なえば、2 dB 以内であった。

乳突洞口閉鎖の効果は、あらかじめ乳突蜂巣削開を行ない、ここより骨ろうとデンタル・セメントで乳突洞口を完全に閉塞して求めた。また、鼓室腔狭小化の効果は、乳突洞口を閉塞した後、天蓋の小孔よりシリコン・パテを鼓膜や耳小骨に触れないように挿入して求めた。容積の測定は実験終了後、腔内に生食水を注入して行なった。

＜結果＞

乳突洞口閉鎖により、ツチ骨膈の変位振幅がどのように変化するかを例を図6に示した。本例では1.2kHz以下の周波数では振幅は減少するが、1.6～4kHzの帯域では増加していることが分かる。図7は12例の乳突洞口閉鎖効果の平均値、標準偏差を示す。閉鎖前の値を0とし、閉鎖後の値をdB単位で表わした。その結果、2.8kHzで平均5.4dBのゲインが、0.8kHzで平均3.4dBのロスがみられた。

鼓室腔狭小化の効果は4例で検討した。図8にこれら4例の結果を示す。どの程度、鼓室腔を狭くするかによって違いはあるが、1.4～3kHzで平均2.2dBのゲインが、1.6kHz以下ではほぼ同程度のロスがみられた。

考 案

外耳・中耳に修飾を加えることの狙いは、0.5kHz以下や4kHz以上など言語の理解にそれほど重要でない帯域音の聞こえを犠牲にし、その分、主要語音帯域と言われる中音域の聞こえを良くすることにある。実際には、老人性難聴をはじめとする多くの感音性難聴では、主に高音部の聞こえが障害されており、すでに高音域では鼓膜は無駄に振動しているとも言える。したがって、このような場合には高音域を犠牲にしたとしても、実用上の不便はあまりないはずである。

ところで、外耳は一種の共鳴腔であり、その大きさや形態を変えると音響特性も変化する。また、中耳の伝音特性は、鼓膜や耳小骨、中耳腔などの音響特性に影響されるが、これらはい

ずれも物理的に修飾することが可能である。以下、外耳・中耳修飾による伝音特性の変化について、各項目ごとに考察を行なう。

1) 外耳道容積拡大の効果

外耳道は円筒形の盲管で、直径は約7mm、長さは25～30mm、容積は約1ccである。開放端の外耳道入口部は円錐型の耳甲介に連なり、終端には振動膜である鼓膜がある。これまでの実測成績によると、外耳道の音響特性は3.4～3.9kHz付近にピークがあり、その高さは12dB程度であるという¹⁾²⁾³⁾。

実験1aでは外耳道延長による外耳道容積拡大効果をみるため、Zwislockieカプラーを使用した。Zwislockieカプラーは平均的な人間の外耳道音響特性に一致するように、副腔を設けるなどの工夫がなされたカプラーである。ここで行なったのはモデル実験であり、実際には外耳道を延長することはできない。いずれにしろ、外耳道は長いほど、共鳴のピークが低い周波数に移動するので好都合といえる。Goodeら⁴⁾は、外耳道の長さができれば30mm以上であれば、共鳴のピークが3kHz以下となるので望ましいとしている。簡便に外耳道延長と類似の効果を得る方法としてはearsonatorがある。earsonatorは外耳道入口部の形にあわせた中空のプラスチックで、外耳道側と大気側にそれぞれ1つずつの小孔が開けられたものである。これにより音の入り口である耳甲介の形を変え、外耳道を延長し、外耳道腔を大きくしたのと同じような効果が得られる。この方法で1～2.5kHzで10～15dB程度のゲインが得られることから、米国では軽度難聴者の補聴器代わりに使用されている。

実験1aでは、また、外耳道に副腔がある場合、すなわちopen methodにより外耳道後壁を除去した場合の影響を、モデルを用いて検討した。これまでにも中耳根治手術を受けた人の外耳道音響特性が報告されているが⁴⁾⁵⁾、それによると、手術創の広さ、形などは症例によりさまざまであるが、外耳道の共鳴ピークは

2kHz 以下の低い周波数にあり, そのゲインは急峻で 20dB を越えることもあるという。さらに, 3~4kHz 付近には反共鳴のためのロスがみられている。いずれにしろ, これまで中耳根治手術による外耳道容積拡大効果は, 補聴器フィティングの障害という面から注目されてきたが⁵⁾⁶⁾, 中耳手術の際, 中音域の聴力が問題となるような症例には, 目的とする帯域音を増幅するように外耳道形成を行なうなど, この効果の積極利用も考えられるべきであろう。とりわけ open method 術後で外耳道後壁を形成する場合には, とくにこの点を考慮して外耳道の大きさを決めれば, わずかでも言葉の理解度が改善される可能性がある。その場合には, 術中に外耳道音響特性を測定する必要がある, そのための機器の開発が望まれる。

2) リング使用の効果

日常臨床において, 時に, 外耳道をほとんど閉塞しているような耳垢を除去すると, かえって聴力悪化を訴える症例を経験する。これは耳垢の存在が, 外耳道にリングをはめているのと同じような効果があるからである。今回の実験でも明かなように, 鼓膜前面の容積が大きいほど, この腔の共鳴特性は低音に移動する。リングの位置を調節すれば, 中音域で 10dB 程度のゲインを得ることは容易である。Goode ら⁴⁾は KEMAR モデルを用いて外耳道入口部狭窄効果を調べ, 0.5~2kHz の聞こえにとっては 4 mm 径にするのが最もよいことを報告している。実際にリングをはめるとなると, 耳垢が多い耳では不可能であり, また, 腔内の湿度が高くなり, ただれたり感染をおこしやすくなるといった欠点がある。

3) 乳突洞口閉鎖の効果

鼓膜の振動は中耳腔の容積に影響される。中耳腔は閉鎖腔であり, 鼓膜に対してコンプライアンスとして働く。もし腔の容積が小さければ, 鼓膜振動は低い周波数で抑制され, 高い周波数で増加する。腔の容積が大きければ, この逆になる。したがって, 中耳腔の容積を調節す

ることにより, 鼓膜の振動特性を変えることができる。

鼓室は狭い乳突洞口を通して, 乳突洞と交通している。中耳腔の鼓膜振動への影響について Kirikae⁷⁾は, 「鼓膜に働くコンプライアンスは低い周波数では鼓室と乳突洞の2つの腔を加算したものであるが, 高い周波数では音響的に乳突洞口が閉鎖するため, 鼓室腔のみがコンプライアンスとして働く」ことを明らかにしている。物理的に乳突洞口を閉鎖すると, 乳突洞のコンプライアンスがかからなくなるので, 鼓膜振動のスティフネスが増加し, 低い周波数で振動を抑制, 高い周波数で振動を増やすことになる。Onchi⁸⁾は人摘出側頭骨を用いて乳突洞口閉鎖効果を研究し, 中耳伝音系は乳突洞口閉鎖により, 正常耳と比べて 1 kHz 以下では約 5 dB 程度の音圧のロスがあるが, 2~3 kHz で 5~10 dB 程度向上することを報告している。McElveen ら⁹⁾も同様の結果を報告している。

今回の実験では, 先に乳突洞削開を行なってから, 乳突洞口閉鎖を行なったので, 単純に乳突洞口閉鎖のみの効果とはいえないが, ほぼ同様の結果が得られた。すなわち12例の平均では, 1.8~4kHz で 5.4 ± 2.4 dB の向上, 1.6 kHz 以下で 3.4 ± 1.8 dB のロスがみられた。側頭骨の摘出には Schuknecht の電動円筒のこ(ストライカー社製)を用いたので, その乳突洞の大きさは本来の大きさよりもかなり小さく, 実際の乳突洞では今回の結果よりももっと大きな効果が得られるものと思われる。事実, 乳突洞の大きさと乳突洞口閉鎖の効果を比べたところ, 2.9cc では 9.4 dB の増加がみられたのに対し, 1.8cc では 4 dB の増加しかみられず, 乳突洞腔の容積が大きいほどその効果は大きかった。しかし乳突洞腔を全く閉鎖せず外気に開けた場合には, 8.2 dB 程度のゲインしか得られず, この効果はやはり 10 dB 前後が限界であろう。

4) 鼓室腔狭小化の効果

鼓室腔を狭くするのも、乳突洞口を閉鎖するのと狙いは同じである。すなわち、コンプライアンスとして働く鼓膜裏面の空気容積を減らすと、鼓膜の振動は低音域では減少するが、高音域では増加することを利用したものである。実際の手術では鼓室形成術 III 型のように、鼓室腔を狭くする手技が用いられることが多いが、この時には鼓膜や耳小骨も同時に形成されているので、臨床成績からは鼓室腔狭小の効果だけを判定できず、今回のデータと比較することはできない。今回の 4 例の結果では 3 例は 1.4~1.6kHz で、1 例は 1.8~2.8kHz で平均 2.2dB のゲインが得られた。後者は修飾後の中耳腔容積が最も小さかった例である。いずれにしろ、すでに乳突洞口を閉鎖した状態での結果なので、この効果は乳突洞口閉鎖効果と加算的に働くといえる。

結 語

日常会話音の理解にとって重要なのは 0.25~4kHz の周波数帯域の聴力であるが、このうちでも特に重要なのは主要語音周波数帯域といわれる 0.5~2kHz の聴力である。この帯域の聴力を少しでも改善できれば、その意義は大きい。ここで示した外耳や中耳の修飾効果は組み合わせたとしても大きくはないが、わずかでもこの帯域の聴力を改善できれば、とりわけ補聴器が必要かどうかの境界線上の人にとっては意義深い。現在の補聴器には欠点も多く、使用しなくてすめばそれに越したことはない。効果が大きくないのでこの目的のために手術をすることには問題があるが、中耳手術を行なう際には、術後の予想聴力との兼ね合いから修飾効果をも考慮した術式の選択が必要であろう。

本論文の要旨は、1984年度 American Academy of Otolaryngology, Research Forum ならびに第13回日本臨床耳科学会にて発表した。

参考文献

- 1) Wiener FM and Ross DA: The pressure distribution in the auditory canal in a progressive sound field, J Acoust Soc Am 18: 401~408, 1946.
- 2) Shaw EAG and Teranishi R: Sound pressure generated in an external ear replica and real human ear by a nearby point source. J Acoust Soc Am 44: 240~249, 1968.
- 3) 恩地 豊: 外耳—中耳基礎。生理学大系Ⅵ—感覚の生理学 (勝木保次編)。665~697頁, 医学書院, 東京, 1967.
- 4) Goode RL, Friedrichs R and Falk SA: The effect of surgical modification of the external ear on hearing thresholds. Ann Otol Rhinol Laryngol 86: 441~450, 1977.
- 5) 片山雄二, 山本 晃, 杉内智子, 他: 外耳道の形態と挿入利得. Audiology Japan 28: 641~642, 1985.
- 6) 服部 浩, 宮永好章: 補聴器装用時の外耳道内音圧 (第2報) —各種病態における比較—. Audiology Japan 28: 647~648, 1985.
- 7) Kirikae I: Acoustic properties of the middle ear. The structure and function of the middle ear. Chapter 5. pp 131~141, University of Tokyo Press, Tokyo, 1960.
- 8) Onchi Y: Mechanism of the middle ear. J Acoust Soc Am 33: 794~805, 1961.
- 9) McElveen JT, Goode RL, Miller C, et al: Effect of mastoid cavity modification on middle ear sound transmission. Ann Otol Rhinol Laryngol 91: 526~532, 1982.

原稿到着: 昭和61年1月20日
別刷請求先: 暁 清文
〒791-02 愛媛県温泉郡重信町大字志津川
愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室