ヒト側頭骨における耳小骨振動様式の研究

愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：柳原尚明教授）

有 友 宏

OSSICULAR VIBRATION IN HUMAN TEMPORAL BONES

HIROSHI ARITOMO, M. D.

Department of Otolaryngology, Ehime University School of Medicine, Ehime

Vibration mode of the ossicles was investigated in twelve fresh human temporal bones using a video measuring system (VMS, Technical Instrument). This system allows one to observe the ossicular vibration and to measure its vibration amplitude (up to 0.2 micron) and phase angle. In this study the inner and middle ear was kept intact except for two small holes in the tympanic tegmen. These holes were for the observation of ossicular movement and were covered with a thin cover glass during the experiment. The vibration amplitude and phase angle of the umbo, malleus head, lenticular process and stapes head were measured at 19 frequencies between 0.1 kHz and 4.5 kHz. The umbo moved piston-like at 0.1-0.8 kHz and 2.6-4.5 kHz but in an ellipse at 1.0-2.4 kHz. The malleus head showed elliptical movement with its long axis anteriorly tilted around 45 degrees from the direction of the umbo vibration at 0.1 kHz. Both the lenticular process and stapes head showed similar movement; piston-like in lower frequencies and elliptical in higher frequencies. The umbo, lenticular process and stapes head vibrated parallel at lower frequencies. The position, displacement and phase angle of the rotation axis of the ossicles was calculated based on the displacement and phase angle of the umbo, malleus head and lenticular process. The axis was around the level of the neck of the malleus in frequencies lower than the resonant frequency, beneath the level of the short process near the resonant frequency and at the top of the malleus head in higher frequencies. The average axis displacement was 0.9 microns at 1 kHz but much smaller at frequencies lower than 0.8 kHz or higher than 2 kHz. This suggests that such axis movement may reduce the efficiency of the middle ear sound transmission.

Key words: 人側頭骨, VMS, 耳小骨振動, 振動軸の振動A 92-1359-22020

はじめに

ヒト側頭骨を用いた耳小骨振動に関する従来の研究では、不快域値を越える音圧が入力として用いられたり、観察のために中耳や内耳の構造が破壊されていることが多く、生理的環境下での耳小骨振動を観察したデータが得られていない。近年測定技術の進歩により、生理的環境下での耳小骨振動の観察が可能になってきたが、それらの研究でも耳小骨振動の測定方向につい

ての記載が曖昧であったり、測定方向が一方向もしくは耳小骨上の1～2の限られた点の振動を測定しているにすぎず、耳小骨の動きを3次元的に把握することが困難であった。耳小骨の振動を3次元的に把握するためには、耳小骨上の3つ以上の点で3次元方向で振動を測定する必要があるが、このような測定はいまだ行われていない。

本論文では、2次元方向の振動測定が容易に行える

video measuring system (VMS, Technical Instrument Co.) により、耳小骨振動が直線性を有する大きさの範囲の入力音を用いてヒト側頭骨における耳小骨振動を測定し、耳小骨振動の回転軸（以後、振動軸とする）を含め耳小骨全体の動きを3次元的に検討し、従来の知見に補遺する所があったのでここに報告する。

実験方法

1. 材料

死亡後24時間以内に採取したヒト側頭骨12個を用いた。採取には Schucknecht 電動ノコを用い、実験開始にあたっては手術用顕微鏡で中耳に病的変化のないことを確認した。採取後直ちに実験に供しない場合は、恩知¹⁾の方法に準じ10,000倍希釈 Merthiolate 溶液に浸し5℃で保存し、遅くとも6日以内に実験を行った。なお、側頭骨を採取した患者の年齢は62歳から76歳、平均68歳であった。

2. 測定方法

音圧 124dB SPL の純音を鼓膜面に負荷したときのアブミ骨骨頭、キヌタ骨長脚豆状突起、ツチ骨骨頭、ツチ骨柄先端の振動を VMS を用いて観察し、その変位振幅 (peak to peak 値とする) 及び位相を測定した。また、振動軸の検討に際しては、ツチ・キヌタ関節の動きを見るために、ツチ骨骨頭と豆状突起を結ぶ線上

のキヌタ骨長脚基部の振動を2例の側頭骨で測定した。

耳小骨の振動を測定する VMS については既に詳しく紹介されている²⁾ので、これに関する記載は省略し、以下に本実験の手技について述べる。外耳道前壁にプローブマイク挿入用の小孔を、鼓室天蓋に観察用小孔をあけ、側頭骨を歯科用セメントでホルダーに固定した。この際、歯科用セメントが直接側頭骨に当たると側頭骨は容易に乾燥するため、セメントが当たる部分の側頭骨をゴム膜で覆った。測定部位に直径約15μmのステンレス小球をおいた後、天蓋に開けた小孔をカバーガラスで覆い隙間を歯科用セメントで埋めた。以上の操作でまだ覆われていない部分の骨にワセリンを塗って骨の乾燥を防いだ。最後に、鼓膜の乾燥を防ぐために植物油を鼓膜に浸した後、ホルダーを顕微鏡 (Leitz Laborlux 12 ME) のステージに固定した。

プローブマイク (B & K 4170) の先端が鼓膜前面約1-2mmに位置するように外耳道前壁の小孔から挿入し、さらにスピーカ (University ID 40T) の先端を外耳道に挿入した。鼓膜前面の検査音圧は、プローブマイクからの feed back により 124dB SPL になるように調節した。検査音には純音を用い、0.1kHz から測定を開始し、0.2kHz から 3kHz まで 0.2kHz 毎に、3kHz から 4.5kHz まで 0.5kHz 毎に測定を行った。4.5kHz まで測定したのち、0.1kHz で再測定を行い最

図1 耳小骨振動測定装置のブロックダイアグラム

初めの値と測定誤差内で一致することを確認した。

図1は測定機器のブロックダイアグラムである。振動の測定に当たっては、各測定部位においたステンレス小球の動きを耳小骨の動きと見なし、顕微鏡に装着したテレビカメラにより小球の動きをモニター上に1000倍に拡大して観察した。この時、モニターには小球の反射光のみが映し出される。この反射光の径をVMSで測定したところ約 $2\mu\text{m}$ であった。顕微鏡の光源にはストロボ光 (B & K 4913, 4915) を用い、鼓膜前面に負荷した検査音に同期して発光するようにした。これにより、ストロボ光の位相・周波数を変えることで小球の振動を任意の位置で止めたり振動速度を変えたりして観察することが出来る。なお、本実験では小球を耳小骨に単においただけで観察しているが、予備実験で小球を cyanoacrylate (アロンアルファTM) によって耳小骨に固定した場合と単においた場合で測定結果に違いがないことを確認した。

モニター上では観察方向に垂直な平面での振動を観察することが出来るが、各測定点の耳小骨は周波数によって振動方向が異なり、また必ずしも一直線上で振動するわけではない。しかし、ツチ骨柄先端は0.1kHzでピストン運動を行うので、この方向を基準にしてツチ骨柄先端、ツチ骨骨頭上端 (上ツチ骨靱帯付着部内側) 及び、キヌタ骨長脚豆状突起の振動を測定した。アブミ骨骨頭は0.1kHzで直線運動をするが、その方向はツチ骨柄先端の振動方向とは必ずしも一致せず、 $7-12^\circ$ 異なっている例が多かった。このため、アブミ骨についてはアブミ骨自身の0.1kHzの振動方向を基準にして振動の観察測定を行った。(ツチ骨柄先端及びアブミ骨骨頭は0.1kHzで鼓膜面にほぼ垂直な方向で内外に動いていると考えられるので、以後0.1kHzでのそれぞれの運動方向をin-out略してioとする。) なお、変位振幅の測定はモニター画面上水平方向についてのみ可能なので、io方向がモニターの水平方向に一致するようにして変位振幅の測定を行った。さらに、周波数によって振動が楕円運動になったり振動の方向が変わってくる場合には、io方向に加え観察平面上でこれに直角な方向 (以後、antero-posteriorを略してapとする) でも測定した。この測定は、顕微鏡に装着したTVカメラの光軸を中心に 90° 回転させて行った。位相の測定にあたっては、まずモニター上で振動周期が一番左側の位置に球が止まって見えるようにストロボの位相を調節した。このとき、トリガーを基準として鼓膜前面の検査音及びストロボ光の位相の遅れを測

定し、両者の差を耳小骨振動の位相とした。ただし、マイク、アンプ、ストロボユニット等による位相の歪は計算の際補正した。今回は鼓室天蓋からの観察に限り、観察方向と平行な方向の運動の検討は行わなかった。ただし、用いた顕微鏡の焦点深度は約 $2\mu\text{m}$ であったが、観察平面に垂直な方向の変位振幅は微小であったので、小球に一度焦点をあわせると振動観察中に焦点を再度あわせ直す必要はなかった。

測定誤差について

変位振幅の測定では試行差は無視し得たが、位相の測定は変位振幅が小さくなるにつれ不正確になる傾向があり、その試行差は1kHz以下では $\pm 5^\circ$ 、2.4kHz以下では $\pm 15^\circ$ 、それ以上では $\pm 30^\circ$ であった。このため、各周波数で3回測定した値の中間値をとってその周波数での位相とした。

軟部組織、骨の乾燥により中耳伝音系の振動特性が変化するが、測定開始後の各測定点の変位振幅変化は、測定開始後4時間以内では最初の測定値から2dB以内の範囲におさまった。このときの位相の変化は1.8kHz以下では 5° 以内、2kHzから3kHzでは 15° 以内、3kHzより高い周波数では 25° 以内に納まった。また、118dB, 124dB, 130dBの音圧を用い、0.1, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4kHzと測定周波数を限定して音圧と変位振幅の関係を検討したところ、124dB 迄は音圧と変位振幅の増加が比例し、位相の変化は見られなかった。しかし、130dBでは1.2kHzでツチ骨柄先端、ツチ骨骨頭の変位振幅増大が音圧の増加より大きく、これに伴い位相も変化した。変位振幅増大の割合はツチ骨骨頭の方がツチ骨柄先端より大きかった。

3. 振動軸の計算方法

中耳及び内耳を保存して耳小骨振動軸を求めるには、2点で変位振幅の計測を行い、以下の計算式を用いる。この計算式では、測定した2点を結ぶ線上またはその近傍に軸があると仮定し、この線上で変位振幅が最小になる位置を軸としている。このため、ツチ骨骨頭中央、柄先端、豆状突起を測定点に選び、io方向、ap方向で振動を測定したが、今回は伝音に直接関すると思われるio方向の振動の振動軸について検討した。ここでは、ツチ骨上の振動軸を例にその計算法を説明するが、同じ方法をツチ骨骨頭、豆状突起間に適用してキヌタ骨上の振動軸も求めることが出来る。

ツチ骨柄先端の変位振幅をU

ツチ骨骨頭の変位振幅をH

ツチ骨骨頭の柄先端に対する位相の進みを α

ツチ骨骨頭と柄先端の間の長さを L

とすると, $L \gg U$, $L \gg H$ だから, ツチ骨柄先端の座標を xy 平面で $(0, Y_u)$ とおくと骨頭は (L, Y_{mh}) とおける. ツチ骨骨頭, 柄先端はそれぞれサイン運動をすると考えられるので

$$Y_u = (U/2) \cos \omega t \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$Y_{mh} = (H/2) \cos(\omega t + \alpha) \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

ただし, t ; 時間

$$\omega = 2\pi f \quad (f; \text{周波数})$$

と表せる.

ツチ骨骨頭と柄先端を結ぶ直線上の点 (x, y) は

$$y = ((Y_{mh} - Y_u)/L)x + Y_u \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{3}$$

$\textcircled{1}\textcircled{2}\textcircled{3}$ より

$$y = \sqrt{(ux + U/2)^2 + (vx)^2} \cos(\omega t + \beta) \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

ただし, $u = (H \cos \alpha - U)/(2L)$

$$v = (H \sin \alpha)/(2L)$$

$$\beta = \tan^{-1}(vx/(ux + U/2))$$

$\textcircled{4}$ より, 任意の点 x における変位振幅は

$$D_x = 2\sqrt{(ux + U/2)^2 + (vx)^2}$$

振動軸は D_x が最小になる点 x に位置することから,

$$\text{振動軸の位置: } -(uU)/(2(u^2 + v^2))$$

$$\text{振動軸の変位振幅: } (U|v|)/\sqrt{u^2 + v^2}$$

振動軸のツチ骨柄先端から見た位相

$$\tan^{-1}(-u/v)$$

となる.

なお, 本論文では $L = 1$ とおき, ツチ骨柄先端を 0 , ツチ骨骨頭上端を 1 として比で振動軸の位置を表した.

4. 測定条件

i) 正常側頭骨の耳小骨振動特性

側頭骨 9 個について, 耳小骨各部の振動を測定した.

ii) 中耳伝音系のスチフネスの違いによる振動特性の差

顕微鏡的に中耳に病的所見はないが, 鼓膜が非常に薄く中耳腔内が見え出した 2 例 (130L, 130R) の側頭骨で, 耳小骨振動を検討した.

さらに, 側頭骨 1 例 (129R) を用いて乾燥によるスチフネス変化を検討した. この検討では i) の測定が終了した後, 鼓室天蓋のカバーガラスを除き室温で側頭骨を放置した. 48 時間後再度鼓室天蓋を覆い, 耳小骨各部の変位振幅, 位相を測定した. 測定時, 鼓膜の上半分, 前ツチ骨靱帯, 後キヌタ骨靱帯が乾燥していたが, 鼓膜の下半分, 骨自体は乾燥してなかった. 測定終了後, アブミ骨を取り除いて蝸牛の液面を確認した

が, 蝸牛は液体で満たされていた.

また, 側頭骨 2 個 (129L, 125R) を用いて鼓膜張筋及び前ツチ骨・後キヌタ骨靱帯切断前後の耳小骨振動特性の変化を検討した. 短時間での測定が要求されることから, 1 例では $0.1, 0.8, 1.4 \text{ kHz}$, 他の一例では $0.1, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 \text{ kHz}$ の検査音を用いた. 筋及び靱帯の切断は, あらかじめ鼓室天蓋の観察用小孔を大きくあけておき, この小孔からカバーガラスをはずして行った.

iii) 内耳破壊, アブミ骨底板固着

蝸牛破壊前後の耳小骨振動を 1 例 (6L) で比較した. 蝸牛破壊にあたっては, 内耳道から内耳道底を削削しアブミ骨底板を直視できるようにした. さらに, 内耳道底から cyanoacrylate を蝸牛内にみだし, アブミ骨底板が固着した状態での振動特性も検討した. 検査音には, $0.1, 0.8, 1.4 \text{ kHz}$ を用いた.

結 果

1. 耳小骨の振動特性

i) 正常側頭骨の耳小骨振動特性について

実験中モニター上で各測定点の振動を観察出来るが, 高い周波数では変位振幅が小さくなり振動の詳細を観察することが困難であった. このため, 測定値をもとにして各測定点の振動様式を再構築して検討した.

a) ツチ骨柄先端 (図 2)

変位振幅から換算した振動速度 ((変位振幅) $\times$ (π) $\times$ (周波数)) が最大になる周波数 (以後, 共振周波数と呼ぶ) は $0.6\text{--}1.2 \text{ kHz}$ (平均 0.8 kHz) で, 位相もこの周波数で -90° に最も近い値を示した.

通常 0.8 kHz 以下及び 2.6 kHz 以上では io 方向のピストン運動を示した. $1.0\text{--}2.4 \text{ kHz}$ では橢円運動となり, その長軸は後外側から前内側に向かうものが多かった. この橢円運動の ap 方向の振動は個体差が大きく, io 方向の振動と比較しても一定の傾向は見られなかった. ap 方向の変位振幅は, $1 \text{ kHz}, 1.2 \text{ kHz}$ で最大になるものが多かったが, 最大でも $1.4 \mu\text{m}$ 以下で, io 方向の変位振幅より 10 dB 以上小さかった.

b) ツチ骨骨頭 (図 3)

2 kHz 付近まで, 長軸が後外側から前内側に向かう橢円運動を示した. 長軸の方向は周波数, 側頭骨によって異なり, 低い周波数では io 方向から約 45° 傾き, 周波数が高くなるにつれて ap 方向に近づき, 2 kHz より高い周波数で ap 方向になるものと io 方向になるもの

図2 ツチ骨柄先端の変位振幅と位相 (io 方向)

a. MALLEUS HEAD (io)

b. MALLEUS HEAD (ap)

図3 ツチ骨骨頭の変位振幅と位相

a. io 方向の振動

b. ap 方向の振動

が見られた。ツチ骨骨頭の io 方向の変位振幅はツチ骨柄先端より小さく、その位相は柄先端の共振周波数よりも低い周波数では柄先端よりも約 180° 遅れたが、これよりも高い周波数では $230\text{--}260^\circ$ 遅れた。

c) キヌタ骨長脚豆状突起

0.1kHz の振動はピストン状で、その方向はツチ骨柄先端の振動方向と一致するものから最大 10° 異なる

ものまでみられた。その振動は、低い周波数で io 方向に近く、高い周波数では ap 方向に近い傾きを示す楕円運動をすることが多かった。1.6kHz 以上では 8 例中 6 例で ap 方向の変位振幅が io 方向の変位振幅より大きかった。ツチ骨柄先端からの位相の遅れは、0.4-0.6kHz ではじまり、周波数が高くなるに従い大きくなった。

図4 アブミ骨骨頭の変位振幅と位相 (io 方向)

図5 中耳伝音系乾燥の耳小骨振動 (io 方向) に及ぼす影響

- ツチ骨柄先端
- ツチ骨骨頭
- - - キヌタ骨豆状突起
- a. 側頭骨乾燥前
- b. 側頭骨乾燥後

d) アブミ骨骨頭 (図4)

0.1kHzの振動方向はツチ骨柄先端の振動方向と異なるものが多かったが、その違いは最大でも15°以内におさまった。0.6kHz以下ではio方向のピストン運動をするが、1kHz付近では楕円運動となりその長軸は周波数が高くなるにつれてap方向に近づいてくる。io

方向の振動の位相は、豆状突起の位相と10°以下の差で一致したが、1.2kHz以上では20°以上異なるものも見られた。一方、ap方向では両者の位相は必ずしも一致しなかった。

ii) 中耳伝音系のスチフネスの違いによる振動特性の差

図6 振動軸の io 方向の変位振幅
a. ツチ骨軸 b. キヌタ骨軸

図7 ツチ骨、キヌタ骨上の振動軸の位置
axis on malleus: ツチ骨軸 axis on incus: キヌタ骨軸

鼓膜の薄い場合 (130L, 130R) にはツチ骨骨頭を除いて、ap 方向の変位振幅が測定限界以下であった。ツチ骨柄先端の共振周波数が 1.4kHz, 2.2kHz と正常側頭骨群より高い周波数を示し、伝音系のスチフネスが高いことが推測された。これら二点を除くと、i) の測定と同様の結果を示した。

側頭骨を乾燥させた場合、図 5 に示すようにすべての部位で変位振幅が減少し、ツチ骨骨頭以外の部位では ap 方向の変位振幅は測定限界以下になった。ツチ骨骨頭の振動は測定したすべての周波数でほぼ一定で、長軸が io 方向と約 45° の角度をなす楕円運動となった。乾燥前に見られた豆状突起のツチ骨柄先端からの位相の遅れは、乾燥後はほとんど消失し 3.5kHz 迄 10° 以下となった。また、ツチ骨骨頭の io 方向のツチ骨

柄先端からの位相の遅れは、180° 前後でほぼ一定するようになった。

鼓膜張筋、前ツチ骨靱帯・後キヌタ骨靱帯の切断では、io 方向の振動に有意の変化を認めなかったが、ap 方向の変位振幅がやや増大した。

iii) 内耳破壊、アブミ骨底板固着

蝸牛破壊では、0.1kHz でほとんど変化を示さなかったが、0.8, 1.4kHz では 4 つの測定点すべてで変位振幅が増大し、アブミ骨、豆状突起のツチ骨柄先端からの位相の遅れが小さくなった。

アブミ骨底板の固着では、アブミ骨骨頭、豆状突起の変位振幅が共に測定限界以下となった。ツチ骨骨頭、ツチ骨柄先端の変位振幅は余り変化しなかったが、ツチ骨柄先端の位相の遅れが著明に減少した。

図8 中耳伝音系の乾燥が耳小骨振動軸に及ぼす影響

乾燥前

——ツチ骨軸

-----キヌタ骨軸

乾燥後

——ツチ骨軸

-----キヌタ骨軸

a. 中耳伝音系乾燥前後の耳小骨振動軸の変位振幅

b. 中耳伝音系乾燥前後の耳小骨振動軸の位置

なお、蝸牛破壊では1.4kHzで、アブミ骨底板の固着では0.8kHzでツチ骨柄先端のap方向の変位振幅のio方向の変位振幅に対する割合が増大した。

2. 振動軸について

算出したツチ骨上の振動軸（ツチ骨軸）とキヌタ骨上の振動軸（キヌタ骨軸）の変位振幅を図6に示す。ツチ骨軸の変位振幅は、0.8kHz以下では比較的小さく0となる周波数もあった。1kHz前後で変位振幅が最大となることが多く、平均0.9 μ mであった。位相は、ツチ骨柄先端にほぼ一致した。キヌタ骨軸の変位振幅は、ツチ骨軸より小さいがツチ骨軸と同様の周波数特性を示した。位相は、豆状突起にほぼ一致した。各側頭骨で、(ツチ骨軸変位振幅)/(ツチ骨柄先端変位振幅)比を計算したところ、1kHz以下、2kHz以上では-20dB以下であったが、1-2kHzでは-10dB以上の例が多く、最大値は1.4kHzで-3.3dBであった。

図7にツチ骨軸、キヌタ骨軸の位置を示すが、縦軸の0はツチ骨柄先端または豆状突起、1はツチ骨骨頭上端に相当する。短突起の位置は0.55である。ツチ骨軸の位置は共振周波数以下ではツチ骨柄付近にあり、共振周波数で最もツチ骨柄先端に近づき、それより高い周波数ではツチ骨骨頭上端付近にあった。キヌタ骨軸の位置は0.1kHzでキヌタ骨長脚基部付近にあり、周波数が高くなるにつれて徐々に豆状突起に近くなった。

なお、ツチ・キヌタ関節の動きを検討するため、ツチ骨骨頭と豆状突起及びキヌタ骨長脚基部と豆状突起のそれぞれの測定値の組合せで計算される振動軸の値を比較した。この検討は2例で行ったが、両者はほぼ一致し、ツチ・キヌタ関節の動きは無視できるものと考えられた。

鼓膜を乾燥させた場合(129R)、ツチ骨軸、キヌタ骨軸共にほとんど振動しなくなった。位置も2.2kHzまでほぼ一定で、これをこえると徐々にツチ骨柄先端または豆状突起に近づいた(図8)。

蝸牛破壊の場合、0.1kHzで著明な変化はなかったが、ツチ骨軸、キヌタ骨軸とも0.8kHzで変位振幅が減少し、1.4kHzで増加した。アブミ骨底板を固着させた場合、キヌタ骨軸は豆状突起上に位置し動かなくなったが、ツチ骨軸の変位振幅は0.8kHzで減少し、1.4kHzで増大した。

考 按

1) 耳小骨変位振幅について

近年、耳小骨振動の観察に際しては、生理的狀態にできるだけ近い状態で振動を検討することを目的に、より低い音圧の検査音を用いた報告がみられるようになってきた。そこで、io方向の変位振幅をこのような報告と比較したのが、図9である。なお、Brenkmann³⁾、Vlaming⁴⁾は80dB SPLの音を鼓膜に与えたときのヒト側頭骨耳小骨の振動速度を報告しているので、これ

図9 ツチ骨柄先端及びアブミ骨の変位振幅比較

Brenkmann は14例のヒト側頭骨で SQUID 法にて測定、その平均値を示した。Vlaming は4例のヒト側頭骨で laser doppler interferometer を使用して測定を行った。この中から、2例を選んで示した。Rabinowitz は成人の中耳インピーダンスを報告しているので、この値から 124dB SPL の検査音圧を用いたときのツチ骨柄先端の変位振幅を計算した。自験例のツチ骨柄先端、アブミ骨の変位振幅 (io 方向) の平均値を U, S として示した。(U): ツチ骨柄先端 (S): アブミ骨

図10 耳小骨振動様式

各測定部位に置いたステンレス小球の振動の軌跡の一例を楕円、及び矢印で示す。矢印の場合、その運動がピストン運動であったことを意味する。

を元に 124dB SPL での変位振幅を求めた。また、Rabinowitz⁴⁾ が成人の中耳入力インピーダンスを測定しているの、鼓膜の有効面積を 0.55cm^2 ⁵⁾ とし

て、124dB SPL での変位振幅を求めた。インピーダンスから算出した Rabinowitz の値は 2kHz 以上で他の測定に比べ平坦な周波数特性を示したが、これは高い

図11 耳小骨テコ比

縦軸は、(ツチ骨柄先端変位振幅)/(アブミ骨骨頭変位振幅)比すなわちU/S値を示す。

周波数では鼓膜が必ずしも一体として振動しない⁷⁾ため誤差が大きくなったものと考えられる。Brenkmannの報告例は生体でのインピーダンス測定結果から予測された値よりもさらに大きな変位振幅を示したが、これが側頭骨の個体差によるものか否かは不明である。死後変化については他に詳しい報告¹³⁾があるので簡単に述べる。文献的には、死後少なくとも45時間³⁾最長では7日¹⁾まで生体と同様の中耳伝音特性が維持されることが考えられる。人で死直後数時間の変化を検討することは困難であるが、動物実験では死後2時間までにツチ骨柄先端の振幅が10dB以上変化した例が報告³⁾されている。しかし、この報告では、死後鼓室内圧が陰圧になったためにこのような大きな変化が生じた可能性がある。いずれにしろ、死後変化は1kHz以下の低い周波数で著しいが、今回の実験値は生体でのインピーダンス値からの換算値と低い周波数ではほぼ一致しており、生体に近い状態でえられていると思われる。

2) 耳小骨振動様式と測定方法について

図10に今回の結果から得られた耳小骨各部の運動様式を周波数毎にまとめた。このような耳小骨振動様式の検討にあたっては、ストロボ光を用いた低倍率での観察が3次元的に振動様式を把握出来るので有用と考えられる。しかし、検査に大きな音圧⁸⁾を用いる必要が

あり、かつ微細な運動の変化を見逃す可能性がある。一方、側頭骨実験で近年用いられるようになってきたレーザードップラー法⁴⁾、SQUID法³⁾では、80dB SPL位の小さい音圧で耳小骨振動を検討できるが、中耳、内耳を保存すると二方向以上での検討は困難である。このため、これらの方法を用いた実験ではツチ骨柄先端、アブミ骨が一方方向の振動を行うものと仮定している。

Gundersen⁹⁾は電磁式ピックアップを用いて、ツチ骨骨頭、ツチ骨柄先端、アブミ骨底板の動きを3次元的に検討した。これによると、75-125dB SPLではツチ骨柄先端、アブミ骨底板はio方向のピストン状運動を行い、ツチ骨骨頭は1500Hzまでio方向のピストン状運動を行いそれ以上ではap方向の運動が加わるという。ツチ骨柄先端、骨頭、アブミ骨それぞれの相対的な運動方向について詳細な記載はないが、いずれも同方向の振動を行うと推測している。この方法では測定点の動きを3次元方向で同時に測定できる利点があるが、そのためには鼓室天蓋を大きく開けて実験を行う必要があり、中耳の靱帯や鼓膜の損傷、乾燥が容易に起こり得る。また、ピックアップを直接耳小骨に当てていることで振動様式が変化した可能性もあり、これらの実験結果に影響した可能性がある。以上に比較す

ると、著者の用いた方法は、中耳、内耳の構造を保存したまま、中耳伝音系に特別な負荷をかけることなく2次元方向で容易に測定できる利点がある。検査音圧が124dBSPLとやや大きいのが、Vlaming⁴⁾がレーザードップラーを用いた側頭骨実験で80-120dBSPLの範囲で直線性を確認し、今回の検討でも118-124dBSPLの範囲で直線性を確認できた。前述した文献の検討もあわせ、観察された耳小骨の動きは80dBSPLの比較的小さい音圧を検査に用いた場合にも見られるものと推定される。

ap方向の動きは個体差が大きく、乾燥側頭骨、鼓膜スチフネスの高い側頭骨ではツチ骨骨頭以外の部位で測定限界以下となり、鼓膜張筋、前ツチ骨・後キヌタ骨靱帯切断でap方向の変位振幅が増大した。このことから、ap方向の振動は耳小骨支持組織のスチフネスに大きく影響されているものと考えられる。一方、蝸牛破壊及びアブミ骨底板の固着でツチ骨柄先端のap方向の変位振幅のio方向の変位振幅に対する割合が増大した周波数があったことから、ap方向の動きは中耳伝音系とアブミ骨以後の内耳とのインピーダンスマッチングに影響されることが示唆された。さらに、豆状突起とアブミ骨骨頭のap方向の動きが必ずしも一致しなかったことも、これに由来すると考えられた。

3) 振動軸の動きについて

振動軸の位置が周波数によって変化することが報告されているが、暁ら¹⁰⁾はテコ比としてツチ骨柄先端とアブミ骨骨頭の変位振幅比(以後U/Sとする)を算出しこの値から振動軸の位置が周波数によって異なるばかりでなく、軸自体が振動していることを推定した。Gundersen⁹⁾はツチ骨上で振幅を測定した結果、振幅が最小になるところではツチ骨柄先端振幅より20dB以上小さいが振幅が0になることはないと報告している。

軸位置の周波数による変化については、Gundersen¹¹⁾がホログラフィを用いて検討し、図7と同様の結果を報告している。今回の測定値からU/Sを算出し(図11)図7と比較すると、ツチ骨軸、キヌタ骨軸がそれぞれツチ骨骨頭、豆状突起に近づく周波数になるとU/Sが大きくなった。

乾燥側頭骨ではツチ骨軸、キヌタ骨軸の振動はほとんど無くなり、位置も一定するようになった。U/Sも全周波数で1.8-3.0とほぼ一定し、豆状突起のツチ骨柄先端からの位相の遅れも見られなくなった。正常群では振動軸は0.8-1.6kHzで大きく動いたが、これらの

周波数では豆状突起の位相がツチ骨柄先端より遅れている。また、低い周波数ではこのような位相の遅れは10°以下であるが、この時軸振動も小さい。一方、著者の検討ばかりでなく、文献的⁹⁾¹¹⁾にも、今回用いた音圧ではツチ・キヌタ関節に動きはないものと考えられる。したがって、豆状突起の位相の遅れは、軸振動に由来することが考えられる。また、U/Sの周波数による変化、特に高い周波数でのU/Sの増大は、振動軸の位置変化、変位振幅の増大に起因し、伝音効率の改善には必ずしも働かないことが推察される。

アブミ骨底板を固着させた場合、キヌタ骨軸は豆状突起上に位置してap, io方向には動かなくなるので、ツチ骨軸の変位振幅が増加することが予想される。実際、1.4kHzで軸振動が増大したが、ツチ骨柄先端の共振周波数(0.8kHz)で軸変位振幅が逆に減少した。この場合豆状突起の振動は認められていないので、観察方向に平行なキヌタ骨の動きにより代償されたことが考えられる。今回は、観察方向の動きについては検討していないが、周波数、中耳病変の状態によってはこの方向の運動が相対的に大きくなるものと考えられる。

4) 臨床的意義

耳小骨振動の音圧に対する直線性の検討ではツチ骨骨頭と柄先端が130dBSPLで直線性を喪失しており、過大な音圧に対してはツチ骨上の軸振動が音圧の増大より大きな割合で増大することで、中耳伝音効率を減少し、内耳保護の方向に作用する可能性がある。すなわち、この直線性の喪失はツチ・キヌタ関節の動きと同じ作用を有し、ほぼ同じ音圧で始まるものと考えられる。一方、会話域周波数で耳小骨振動軸が固定せず、伝音効率を下げる方向に働いていることから、中耳伝音系の再建にあたっては必ずしも本来の耳小骨連鎖に固執する必要はないことが示唆された。また、乾燥側頭骨の結果から、中耳軟部組織スチフネスをあげれば会話域での中耳伝音効率を改善できる可能性がある。

ま と め

ツチ骨柄先端はピストン運動を主体とし、1-2.4kHzで楕円運動を行う。ツチ骨骨頭は、長軸が柄先端の振動方向と約45°の方向に傾く楕円運動を行い、2kHz以上になると前後または内外方向に動いた。豆状突起、アブミ骨骨頭は低い周波数ではピストン運動を、0.6kHzより高い周波数では楕円運動を示し、1.4-2.0kHzではその楕円運動の長軸は低い周波数での振動方向と垂直な方向に近づいた。

これらの測定値から振動軸の変位振幅、位相、位置を検討したところ、耳小骨は固定した振動軸を中心に回転運動を行うのではなく、振動軸自体が振動することがわかった。その変位振幅は1-2kHzで大きくなり、この周波数でみられる中耳伝音効率の低下に関与しているものと考えられた。同時に、豆状突起のツチ骨柄先端からの位相の遅れもこの振動軸の振動に由来していることが考えられた。また、振動軸はツチ骨上とキヌタ骨上でやや異なる変位振幅、位相を持ち、それぞれツチ骨柄先端、豆状突起とほぼ同じ位相を示した。ツチ骨上では共振周波数まではツチ骨頸付近に軸が位置し、共振周波数で最もツチ骨柄先端に近づき、これより高い周波数ではツチ骨骨頭上端に位置した。

文 献

- 1) Onchi Y: Mechanism of the middle ear. J Acoust Soc Am 33: 794-805, 1961.
- 2) Gyo K, Goode RL, Miller C: Effect of middle ear modification on umbo vibration. Human temporal bone experiments with a new vibration measuring system. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 112: 1262-1268, 1986.
- 3) Brenkmann CJ, Grote JJ: Acoustic transfer characteristics in human middle ears studied by a SQUID magnetometer method. J Acoust Soc Am 82: 1646-1654, 1987.
- 4) Vlaming MSMG, Feenstra L: Studies on the mechanics of the normal human middle ear. Clin Otolaryngol 11: 353-363, 1986.
- 5) Rabinowitz WM: Measurement of the acoustic input immittance of the human ear. J Acoust Soc Am 70: 1025-1035, 1981.
- 6) Bekesy G: Experiments in hearing. McGraw-Hill Book Co, New York, 1960.
- 7) Tonndorf J, Khanna SM: Tympanic-membrane vibrations in human cadaver ears studied by time-averaged holography. J Acoust Soc Am 52: 1221-1233, 1972.
- 8) Kirikae I: The structure and function of the middle ear. University of Tokyo Press, Tokyo, 1960.
- 9) Gundersen T: Prostheses in the ossicular chain-experimental and clinical studies. University Park Press, Baltimore, 1971.
- 10) Gyo K, Aritomo H, Goode RL: Measurement of the ossicular vibration ratio in human temporal bones by use of a video measuring system. Acta Otolaryngol (Stockh) 103: 87-95, 1987.
- 11) Gundersen T, Hølgmoen K: Holographic vibration analysis of the ossicular chain. Acta Otolaryngol 82: 16-25, 1976.

本研究の主要な部分は米国スタンフォード大学 Goode 教授の元で行った。稿を終えるに当たり、留学の機会を与えて頂き、懇切なる御校閲を賜った柳原教授に深甚なる謝意を表します。さらに、実験の場を提供下さり、御指導御助言頂いた Goode 教授ならびに御指導と御校閲を頂いた丘村助教授に心から感謝致します。また、貴重な御助言を頂いた 暁 講師はじめ御協力頂いた教室の諸先生方に感謝致します。

(原稿受付 1989年 3月18日)

別刷請求先 〒791-02 愛媛県温泉郡重信町大字志津川29
愛媛大学医学部耳鼻咽喉科学教室 有友 宏