平成28年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

ヒト生体における鼓膜・耳小骨の振動測定と医療への応用

鳥取大学医学部　感覚運動医学講座
耳鼻咽喉・頭頸部外科学分野
國本　泰臣

鳥取大学大学院
工学研究科
有井　士郎

1．はじめに

聞こえのメカニズムとして以前から、外耳道に入った音波が鼓膜やその奥にある耳小骨を運動させると言われている（図１）。鼓膜は100μm以下の厚さであり、きわめて可撓性が大きく、その音響インピーダンスは空気の音響インピーダンスにほぼ等しい。従って外耳道に入った音響エネルギーは大部分が鼓膜に伝達される。鼓膜はその裏側に耳小骨を背負った形となっているが、これは鼓膜が振動しやすい薄い膜でありながら音響を耳小骨に伝えるのに合理的なものとなっている。耳小骨が振動するときツチ骨、キヌタ骨は一体となって振子様運動をし、アブミ骨はこれを受けてピストン様運動、後脚を中心とした蝶番運動、底長軸を軸とした回転運動をおこなう。アブミ骨の振動により蝸牛内のリンパ液に波動がおこり、内耳へとエネルギーが伝わっていく。振動エネルギーは内耳で電気エネルギーに変換され、蝸牛神経を通って脳へと伝わり音の情報が処理される。

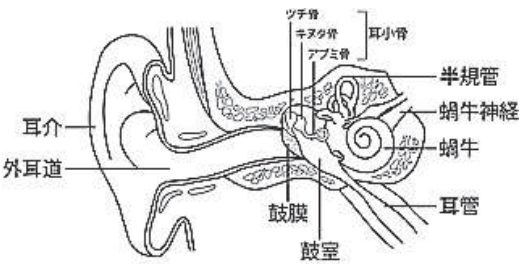

図１

しかし実際にヒト生体において鼓膜や耳小骨の振動を計測することは非常に難しく、生体での音響刺激に対する振動様式の報告は少ない。本研究ではヒト生体における鼓膜と耳小骨との振動関係を明らかにし、医療現場での検査・診断・治療効果判定への応用を目的とする。

2．振動測定によるメリット

今までにヒト生体での鼓膜振動測定の報告は少なく、あっても鼓膜の１点もしくは数ヶ所のみの測定であった。これに対し申請者は、2013年に非接触型レーザードップラー速度計を用いてヒト生体での鼓膜振動を33ヶ所網羅的に測定し、鼓膜の振動は周波数によって位相が変化することを報告した[1)]。その後、ヒト生体における耳小骨の振動様式を手術中に測定することにより、耳小骨間でも位相の違いがあることを学会で報告した。現在申請者が行っている研究では正常な鼓膜・耳小骨についての振動測定で

あるが、可能であれば疾患を有する鼓膜・耳小骨での測定も行い、両者での振動様式の差異を検討する。具体的には、鼓膜に穿孔を有する患者、耳小骨の硬化性病変を有する患者などで手術前･手術中に鼓膜や耳小骨の振動を測定する。今までの研究によりすでに実験系は確立しており技術的な問題は少ないものと考える。

その結果から、実際の医療現場における検査や診断、治療効果判定への応用を目指したいと思っている。耳疾患の手術において、耳小骨の可動性制限などは術前の画像検査だけでは不明なことが多い。実際の手術中に術者が耳小骨を操作し可動性を確認しているがこれも主観的なものであり客観的な評価は不可能である。今研究により、術中の可動性評価も客観的に行うことができ、より有効性の高い手術を提供し患者の日常生活の質をさらに向上することができると考える。

３．振動測定の実際

手術用顕微鏡の側視鏡部分にレーザードップラー速度計を装着し、パルス分析装置、パーソナルコンピュータと接続する。音響刺激器からのチューブを耳鏡に接着して外耳道から音響刺激を行う。実際の測定部位を確認するため、顕微鏡モニターでの測定中の様子をDVDで録画しておく。鼓膜の振動測定の場合、外耳道経由で顕微鏡下にレーザーを測定部位に照射し測定する（図２）。今までの振動測定の際、再現性および解析可能なものとして音響刺激１kHz、３kHzとしたため、今回使用する音響刺激も同様とする。その後、サンプリング周波数32.8kHz、ローパスフィルター25.6kHzで記録した速度波形をフーリエ変換して振動周波数を確認する。以前の研究では33ヶ所を測定したが、現実的な測定時間や位相のずれを確認するために必要最低限な５ヶ所程度とする（図３）。また、耳小骨の振動測定の場合、乳突蜂巣を広く削開して十分に耳小骨が観察できるようにしてから、事前にセッティングしておいた

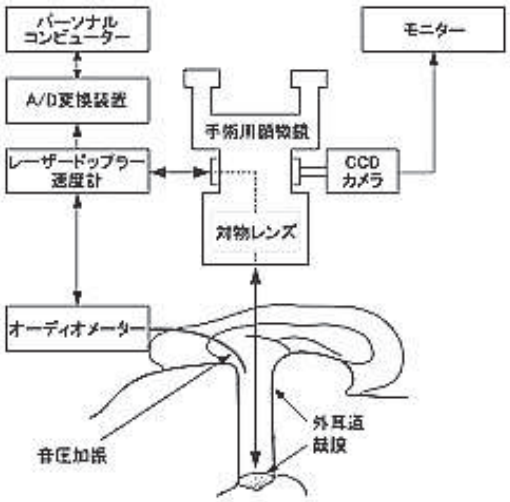

図２

レーザードップラー速度計を装着した顕微鏡を使用して外耳道経由で音響刺激を加えた際の耳小骨の振動を測定する。測定場所はツチ骨頭、キヌタ骨短脚、キヌタ-アブミ関節、アブミ骨後脚とする（図４）。得られた速度波形から各測定点での経時的な振幅を計算し、グラフィックソフト（gnuplot）を使用して得られた経時的な振幅をグラフ化し視覚的に描出する。これを周波数毎に行う。次に鼓膜と耳小骨各測定点の経時的な振動様式を同じグラフ上に描出しその関係性や位相差を解析する。これも周波数毎に行う。

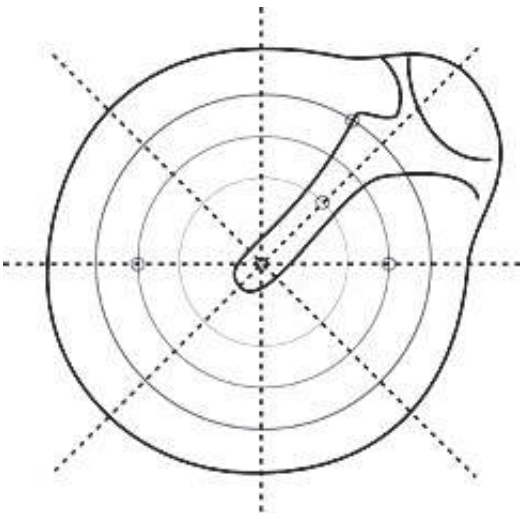

図３

次に正常解剖での測定結果との比較を行う。これは測定結果のグラフを比較したり、PC上で耳小骨の振動モデルを作製して行う。現在、鳥取大学工学部の共同研究者により正常耳での振動モデルを作成中である。このモデルでは実際には測定できない部分の振動も予測できるため非常に有用と考える。

４．研究の問題点と今後の方向性

鼓膜や耳小骨の形態には個人差があり、相対的な角度などが微妙に異なっている。レーザードップラー速度計はレーザーを刺入した方向についての速度成分しか測定できないため、レーザーの刺入角が大きく変わると測定結果も大きく変化することとなる。これについては、各測定点の結果を絶対値ではなく相対値で検討することや、術前後のCT画像などからレーザーの刺入角度を計算し測定結果が対象者間で比較で

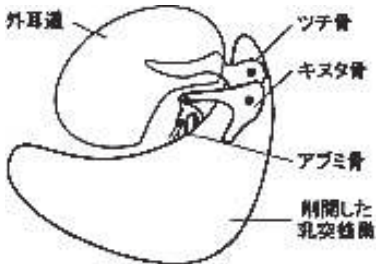

図４

きるよう検討中である。

前述したように、鼓膜や耳小骨の可動性を客観的に評価できる既存の方法はなく、今研究を通してより有効性の高い診断・手術を提供し患者の日常生活の質をさらに向上することができると考えている。

謝辞

本研究に対して研究助成を賜りました、一般財団法人カワイサウンド技術・音楽振興財団に心より感謝申し上げます。

文献

1）Kunimoto Y., Hasegawa K., Arii S., Kataoka H., Yazama H., Kuya J., Kitano H.：Sequential multipoint motion of the tympanic membrane measured by laser Doppler vibrometry: preliminary results for normal tympanic membrane. Otol Neurotol. 35(4)：719－724, 2014.