質量負荷のティンパノグラム

—モデル実験—

遠藤 里見¹⁾・小林 俊光²⁾・高橋 邦明²⁾

武山 実²⁾・河本 和友³⁾

Tympanograms of Weighted Models

—An Experimental Study—

Satomi Endo

(Yamagata City Hospital Saiseikan)

Toshimitsu Kobayashi, Kuniaki Takahashi

and Minoru Takeyama

(Tohoku University)

Kazutomo Kawamoto

(Sendai Teishin Hospital)

We examined tympanometry using an ear drum model made of plastic tube and film of polychloride vinyliden. Weights of plastic rubber (30 mg to 150 mg) were placed on the center of the film. As more weights were added, the tympanogram (probe tone=220 Hz) showed higher peaks. When a weight of about 180 mg was placed on the membrane, the tympanogram developed into a two-peak type.

Similar results were obtained in clinical cases. When a metallic weight of about 93 mg was attached to the umbo of the tympanic membrane, in some cases the tympanogram showed higher peaks than when there was no load, and in other cases it developed into a multi-peak type.

Our study revealed that when a weight is placed on the film, the type of tympanogram can be changed, for example from A to M. Therefore, when a weight, such as metal or fluid, is attached to the membrane, the tympanogram may show higher peaks than with no load. The same weight was placed on the film in different places and with varying areas of contact. Tympanograms showed the highest peaks when a weight covered a small area at the center of the membrane.

These results indicate that, in humans, the ossicular chain may act to increase the peak of the tympanogram. However, the area of the malleus in contact with the ear drum may be regarded as relatively large when the highest peak of the tympano-

1) 山形市立病院済生館耳鼻咽喉科

2) 東北大学医学部耳鼻咽喉科学教室

3) 仙台通信病院耳鼻咽喉科

gram is relatively small.

We added a pars flaccida model, and the results suggest that the pars flaccida influences the type of tympanogram at lower frequencies.

Key words: tympanogram, experimental study, pars flaccida

緒 言

著者ら¹⁾は先に、滲出性中耳炎のティンパノグラムについて、モデル実験を行い、鼓室内貯留液の存在は、現在臨床応用されている、低周波数のプローブ音を使用したインピーダンスオージオメーターにおいて、ティンパノグラムのピークを高くするように働くことがあることを述べた。

そこで今回、鼓膜に種々の方法で質量負荷を与えた場合のティンパノグラムの変化について、モデル実験を行ったもので、その詳細を述べる。

また、鼓膜は耳小骨によってある程度の質量負荷を受けた状態にあるものと考えられるが、ティンパノグラムからみて、鼓膜とツチ骨の接合状態及び鼓膜弛緩部の存在がどのような影響を持ってくるのかも併せて考察した。

実験方法

モデルは、ラップフィルム、ディスポ注射筒で作製した人工モデルを使用した。注射筒の断

面を直角よりもやや斜めに作り、そこに膜をはった。膜面の径は $9 \times 13\text{mm}$ であり、この部分の膜の重量は約 2mg である。

この膜面に薄い紙性の接着膜（両面テープ）を張り、ここに種々の方法で質量負荷を与えた。接着膜の重量は約 9mg であり、ラップフィルムとの合計が約 11mg となり、これは正常鼓膜の重量（約 14mg ）に近い値を示した。

質量負荷にはプラスチック及びプラスチックゴムを細工したものなどを使用した。

臨床例に対する負荷材料としては、和紙パッチ、金属塊（ハンダ）を使用した。

また、耳小骨離断中耳でのティンパノグラムを検討するために、ベル麻痺で顔面神経管開放手術を受けた症例につき、術中にキヌタ骨をはずす前後においてティンパノグラムを測定した。

インピーダンス・オージオメーターは、主に Teledyne Avionics (TA-2C) 機（プローブ音 $226\text{Hz} \pm 1\%$ ）を使用した。一部臨床例

図1 膜面全体に紙テープを重ねた場合のティンパノグラムの変化

では, Rion RS30 (同 $226\text{Hz} \pm 3\%$), Rion 85 AR (同 $226\text{Hz} \pm 1\%$) も使用した.

結 果

1) 質量負荷のティンパノグラム

人工モデルの膜面にあわせて, 接着膜 (一枚約 9mg) を重ねていったときのティンパノグラムの変化を図1に示す. はじめA型を示していたものが, 接着膜の枚数が多くなるに従って,

ピークがしだいに低くなり As 型に変わった. また枚数が多くなるほどピーク圧が見かけ上の陰圧 (実際は $0\text{mmH}_2\text{O}$) へと移った.

次は, ラップフィルムの膜面に接着膜を一枚はったモデルで, 図2の如く膜の中心部に一個約 30mg のプラスチックゴムによる質量負荷を重ねて与えた. このときティンパノグラムは, 図1のときとは逆に, はじめA型だったものが,

図2 膜の中心におもりを重ねた場合のティンパノグラムの変化

図3 臨床例1: 鼓膜面に紙パッチを接着した場合

図4 臨床例2: 鼓膜中心部におもりを接着した場合

しだいにピークが高くなって **A_D** 型となり, 約 **150mg** の質量が加わったとき **M** 型へと変化した (質量負荷のおもり一個の重量はツチ骨, キスタ骨の重量を参考にした)。

次に臨床例を示す。図1, 図2での変化を実際の臨床例でも確認した。図3はピークの高い **A** 型を示す症例。症例は14歳女子で, クラブ活動で吹奏楽をやっており, 息込んだり, 傍で大きな音が響いたりすると左耳痛が強いという主訴で来院した。ティンパノグラムでピークの高い **A** 型を示し, 鼓膜全体がピラピラと萎縮性であった。この症例に対して, 和紙によるパッチを鼓膜面全体にあてるとティンパノグラムのピークは低くなった。

図4は低音域の感音性難聴と耳鳴を主訴に来院した53歳の男性。この症例に約93mgの金属塊 (ハンダ) を両面接着テープを用いて, ツチ骨柄の先端部に接着させた。はじめ **A** 型のティンパノグラムを示していたが, 金属塊のおもりを接着させると, ピークの高い **A** 型にかわった。

また別の症例では, 図5のように金属塊のおもりをつけると, **A** 型から **M** 型ないし3峰性のティンパノグラムに変る症例もみられた。

2) 膜に対する質量負荷の接合部位とティンパノグラムの変化

ラップフィルムに薄い接着膜を一枚はったモデルに, プラスチックによる約55mgの質量負荷を与えた。図6に示すごとく, 質量負荷によっ

図5 臨床例3: 鼓膜中心部におもりを接着した場合

図6 質量負荷: 接合面積が大きい場合のティンパノグラムの変化

て、ティンパノグラムのピークは高くなるが、膜とおもりの接面積が比較的大きいとき、膜に対するおもりの位置を種々変化させても(図6-2, 3, 4)その差はみられなかった。

同様のモデルで、今度は膜に対する質量の接面積を小さくしたときのティンパノグラムを図7に示す。質量が膜の辺縁部にかかるとき(図7-2, 3, 4)質量負荷によって受けるティンパノグラムの変化は比較的少ないが、質量

が膜の中心部に加わったとき(図7-5)ピークは著明に高くなった。

すなわち図8に示す如く、接面積が大きいときは、質量負荷が膜の中心部に加わっても、辺縁部の場合とほとんど変化はないが、接面積が小さくなると(図8-4)同じ膜の中心部でもピークが著明に高くなった。

3) 鼓膜弛緩部について(図9)

膜面とそれに接合する質量(約55mg)との関

図7 質量負荷：接面積が小さい場合のティンパノグラムの変化

図8 質量負荷が膜面の中心にあって接面積が小さい時、最もピークが高い。

係を、鼓膜とツチ骨との接合に擬似して作成し、ティンパノグラムを描く(図9-1). その後、モデルのツチ骨短突起相当部と膜辺縁部と

の間を切り離し、そこに再びラップフィルムをゆるく張りかえ、鼓膜弛緩部相当部をつくる。このときのティンパノグラムはピークが著明に

図9 PARS FLACCIDA モデルのティンパノグラム

図10 耳小骨連鎖離断時のティンパノグラム

高くなり、みかけ上の陰圧のピーク圧を示した(図9-2)。

4) 耳小骨離断症例について

ベル麻痺で、顔面神経管開放術を受けた症例で、その術中に、キヌタ骨を一時的にとりはずす前後において、ティンパノグラムを測定した(図10)。

術前A型だったものが、アブミーキヌタ関節を離断させた時点でM型にかわり、次に、キヌタ骨を摘出すると、さらに幅の広い多峰性のティンパノグラムになった。

考 察

1) 質量負荷のティンパノグラム

恩地³⁾によれば、振動体のインピーダンス(Z)は、力学的には抵抗(R)、慣性力、剛性(S)からなる合力である。慣性力は鼓膜にかかる質量(M)が振動されて生ずる力であり、振動数に比例する。これらのことから鼓膜面に生ずるZについて、次の関係が成立する。

$$Z = R + j(M\omega - S/\omega)$$

ω は角速度を表わし、周波数(f)について、 $\omega = 2\pi f$ 。また $j = \sqrt{-1}$ で力の方向を表わす。

これを図示すると下図の如くなる。

振動体ではSはMに比して極めて大であることが知られており²⁾³⁾、低周波数では $M\omega < S/\omega$ となる。

図1のように膜全体に均一に質量が加わったとき、 $jM\omega$ の項は増大するが、膜の肥厚によ

って、RとSも同時に増大し、その結果Zも増大することになる。すなわちティンパノグラムのピークはしだいに低くなってゆく。

ところが、図2のように、膜の一部分にのみ質量を負荷してゆくと、やはり $jM\omega$ の項は増大するが、膜の緊張度の変化に伴うRやSの変化はわずかと考えられ、このとき、ティンパノグラムの変化が示すように、インピーダンス(Z)は減少することになる。

図2のとき、質量負荷を増してゆくと $jM\omega$ の項はしだいに増大し、 $jM\omega = jS/\omega$ となる。このとき $Z = R$ となり、インピーダンスは最小値をとるものと考えられる。これが共鳴とよばれる。更に質量が増大すれば、再びZも増大し、ティンパノグラム上はM型などの複雑な波型を示すようになるものと考えられる。

この関係はちょうど、鼓膜の性質が、しだいに、うすく緊張度の弱い状態に変わってゆくときのティンパノグラムの変化とよく似ている。このときは、抵抗、剛性の変化によってインピーダンスが減少する。そして、ある剛性の弱い状態で $jM\omega = jS/\omega$ となったあとさらに剛性が弱く弛緩した状態になると $jM\omega > jS/\omega$ となり、インピーダンスは再び増大する。ティンパノグラムはM型などを示し、この場合、鼓膜の緊張と弛緩のくり返しによって、共鳴をくり返す現象と考えられている。

すなわち、図2のような条件下で膜面に質量を加えてゆくことは、その膜面でのインピーダンス変化にとって、膜の剛性を弱くしていったときと同様の意味をもつことがわかった。

図1、図2の結果からわかることは、どちらも振動系の質量は増大しているにもかかわらず、コンプライアンスで示されるインピーダンスの変化は全く逆になることである。このことは、単に質量の多寡だけが、インピーダンスの変化にとって問題なのではなく、膜面に加わる質量負荷の在り方が、膜の剛性や抵抗の変化にも大きく影響してくることを示す。

これらのことは、臨床例で、図3のようにや

やピークの高いA型のティンパノグラムを示す鼓膜に和紙パッチを鼓膜全体にあてるとピークが低くなり、また図4のようにティンパノグラムのピークがやや低い鼓膜におもり負荷を与えることで、ピークが高くなることがあることから証明された。

ただし、局在した質量負荷も過度になると図2-5、図5で示されるように、M型や多峰性のティンパノグラムとなり、ピークのコンプライアンス値は減少することになる。

ところで、鼓膜に対する質量負荷については、切替⁴⁾の詳細な報告があり、低音域での骨導聴力閾値を下げることが知らされている。また、約130~200mgの質量負荷をヒトの鼓膜に与えた場合、200~300Hzの低周波域において、鼓膜振動の振幅が著明に増大することを述べている。

以上のことから、ティンパノグラムで、コンプライアンスが大きいということは、特定周波数に対して鼓膜が動きやすくなることを意味し、膜面に水やおもりで質量負荷とされた場合、現在臨床で広く使われている220Hz前後の周波数を用いたインピーダンス・オージオメーターでも影響が大きいものと考えられた。

2) 膜に対する質量負荷の部位とティンパノグラムの変化

耳小骨連鎖の合計約55mgに相当する質量を、図6、図7、図8のように、膜に対する局在部位、接合面積を変えて負荷した。その結果、質量は、膜の中心に、しかも接合面積をより小さくして負荷したときに、ティンパノグラムのピークが最大になることがわかった。

ヒトの鼓膜と耳小骨との関係を考えた場合、鼓膜は耳小骨によってある程度の質量負荷をうけた状態にあるものと考えられる。すなわち、耳小骨と鼓膜の解剖学的な関係が、ティンパノグラムにも影響を与えるものと推論される。

今回の実験結果から、耳小骨は、鼓膜の中心で鼓膜に接合された状態が、質量負荷によるティンパノグラムの変化にとって最も影響が大き

かった。これは両棲類や爬虫類の鼓膜とコルメラの関係に近い⁴⁾。

これらのことから、鼓膜に対する耳小骨による質量負荷は、その接合状態も含めて、音響学的に意義があるものと考えられた。

3) 鼓膜弛緩部について

実際のヒトの鼓膜とツチ骨では、ツチ骨柄によって接合しているわけであり、この状態では、質量負荷によるティンパノグラムの変化をみた場合、鼓膜の中心にのみ耳小骨が接合している状態に比べ、質量負荷の影響が少なくなるものと考えられる。

そこで、モデルを用いて、膜面とそれに接合するおもりの関係を、鼓膜とツチ骨に擬似してつくり、ティンパノグラムを描き、その後、鼓膜弛緩部相当部を作った。後者でティンパノグラムのピークが著明に増大した。

鼓膜弛緩部の意義については文献上、中耳腔圧調節⁵⁾、ツチ骨の可動性に重要な役割をはたしていること⁶⁾、acoustic shunt 及び acoustic filter としての役割⁷⁾などが述べられているが、今回の実験結果から、鼓膜弛緩部の存在が、特定周波数における鼓膜面でのコンプライアンス増大に影響している可能性が考えられた。

4) 耳小骨離断症例について

耳小骨連鎖離断症例ではA_D型やM型のティンパノグラムを示すことが多いと言われている⁸⁾⁹⁾。耳小骨連鎖全体の質量が、どの程度、鼓膜に加わっているかを調べる目的で、顔面神経管開放手術例で、キヌタ骨を摘出する前後において、ティンパノグラムを測定した。

図10の結果から、これまでの実験結果とあわせて考えて、キヌタ骨を摘出する前のキヌターアブミ骨間の離断状態よりも、キヌタ骨を摘出した後の方が、ティンパノグラムの変化がより大きいことが示唆された。

即ち、ツチ骨だけの場合の方が、ツチ骨とキヌタ骨の2個の耳小骨がある場合よりも、ティンパノグラムの変化が大きかったことを示す。

このことから、実際のヒト中耳での鼓膜に対する耳小骨の質量負荷の影響をティンパノグラムの変化からみた場合、キヌタ骨の質量そのものは、ティンパノグラムの変化を大きくする方向には作用していないことが考えられた。

結 語

ラップフィルム及び接着テープを用いた鼓膜モデルでティンパノメトリーを行い、膜に対する質量負荷が、約 220Hz のプローブ音でのティンパノグラムのピークを高くするように働くことがあることを述べた。これは臨床例においても証明された。

また、耳小骨によって鼓膜が質量負荷を受けていると考えた場合、鼓膜と耳小骨の接合状態もティンパノグラムに影響していることが考えられモデル実験を行った。その結果、質量負荷は鼓膜の中心にあって、接合面積がより小さい場合、ティンパノグラムのピークが最も高くなることがわかった。

そして、鼓膜弛緩部は 220Hz をプローブ音のティンパノグラムの変化にとって、質量負荷の影響をより受けやすい方向に作用しているものと考えられた。

本論文の要旨は、第34回東北連合学会及び第13回日本臨床耳科学会で発表した。

参考文献

- 1) 遠藤里見, 他: 滲出性中耳炎のティンパノグラム—モデル実験による考察. 日耳鼻 86: 304~313, 1982.
- 2) 神崎 仁, 野村恭也: インピーダンスオージオメトリー (聴覚障害と神経疾患への臨床応用). 中外医学社, 1979.
- 3) 恩地 豊: インピーダンスオージオメトリーの原理—チンパノグラムとは何か, インピーダンスとは何か, その応用—その3. 耳鼻臨床 75: 3~16, 1982.
- 4) 切替一郎: 伝音機構と骨導に関する基礎的研究 (第58回日耳鼻総会宿題報告). 日耳鼻 60: 1786, 1957.
- 5) Stenfors LE and Hellström S: The pressure equilibrating function of pars flaccida in middle ear mechanics. Acta Physiol Scand 118: 337~341, 1983.
- 6) Tonndorf J and Khanna SM: The role of the tympanic membrane in middle ear transmission. Ann Otol Rhinol Laryngol 79: 734~754, 1970.
- 7) Kohlöffel LUE: Notes on the comparative mechanics of hearing. III. On Shrapnell's membrane. Hearing Research 13: 83~88 Elsevier, 1984.
- 8) Jerger J Anthony L, Jerger S, et al: Studies in impedance audiometry. III. middle ear disorders. Arch Otolaryngol 99: 165~171, 1974.
- 9) 阿瀬雄治, 恩地 豊, 大久保仁, 他: インピーダンスメトリーの診断価値 (耳小骨連鎖離断症例を中心に). 臨床耳科 4: 70~71, 1977.

(原稿採択: 昭和61年5月14日
別刷請求先: 遠藤里見
〒990 山形市七日町1-3-26
山形市立病院済生館耳鼻咽喉科)