

令和元年6月10日現在

機関番号：31310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K11194

研究課題名(和文) 中耳・内耳疾患を診断できる計測装置SFIの開発

研究課題名(英文) Development of a measurement apparatus "Sweep Frequency Impedance Meter (SFI)", which diagnoses middle and inner ear dysfunctions

研究代表者

和田 仁 (Wada, Hiroshi)

東北文化学園大学・健康社会システム研究科・教授

研究者番号：30111264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：中耳病変の診断にはブローブ音周波数を固定した tympanometer と呼ばれる診断装置が広く使用され、滲出性中耳炎の診断に特に有効である。しかし、他の中耳病変の診断では必ずしも有効とはいえない。そこで、本研究ではブローブ音周波数を0.1 kHzから6.0 kHzまで変化させ、外耳道内の音圧変化を計測する、我々が開発した周波数特性がフラットなブローブを組み込んだ、Sweep Frequency Impedance Meter (SFI)を製作し、このSFIでヒトの耳を計測した。また、計測と平行して、ヒトの外耳・中耳モデルを作成し、SFI計測結果をシミュレーションできるようにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したSFIでヒトの耳を計測すると、これまで十分に解明されてこなかった、周波数領域0.1 kHzから6.0 kHzでの中耳動特性が明らかとなる。さらに、このSFIで中耳・内耳疾患を計測すると、中耳・内耳疾患をかなりの精度で診断できるようになる。このSFIは、将来的には中耳・内耳疾患の診断装置と新生児の難聴スクリーニング用装置になる可能性を秘めている。

研究成果の概要(英文)：Conventional fixed-frequency tympanometry has been widely used and has especially been acknowledged as a valuable method for the diagnosis of secretory otitis media. However, the use of conventional fixed-frequency tympanometry has been demonstrated as too inaccurate for diagnosis of other middle ear dysfunctions.

In our research, an attempt was made to develop a measuring apparatus: Sweep Frequency Impedance Meter (SFI). Considering acoustic and structural resonance effects upon the frequency characteristics of an SFI probe tip, it was designed to have flat frequency characteristics at frequencies of 0.1 - 6.0 kHz. The dynamic characteristics of ears of human subjects were measured using this apparatus. Subsequently, measurement results were compared with results of numerical simulations.

研究分野：生体工学

キーワード：診断装置 中耳・内耳

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中耳病変の診断には、**tympanometer (TYM)**と呼ばれる診断装置が広く用いられている。この装置の原理は、一定周波数 (220 Hz または 226 Hz) の音を外耳道に与え、外耳道内の圧力を変化させることにより得られる **tympanogram (TG)**と呼ばれる外耳道内音圧変化曲線から、疾患を診断しようとするものである。TYM は滲出性中耳炎の診断には大変有効であるが、その他の中耳病変では必ずしも有効とはいえない。そこで、TYM よりはるかに多くの情報を得ることができる **Sweep Frequency Impedance Meter (SFI)**を開発してきてきた。SFI では、プローブの音周波数を 0.1 kHz から 2.0 kHz まで連続的に変化させ、外耳道内圧力と周波数に対する音圧変化を計測する。現在使用している SFI で計測する周波数は 0.1 kHz から 2.0 kHz までであるが、これを 8.0 kHz まで拡張すると、中耳病変のみならず内耳病変 (例えば **Semicircular Canal Dehiscence**) も診断できる可能性が出てきた (G. Merchant et al., *Otology & Neurotology*, 2014)。そこで、本研究では、プローブ音周波数を 0.1 kHz から 8.0 kHz まで sweep し、中耳・内耳病変を診断することができる装置の開発を試みる。

2. 研究の目的

外耳道の圧力を変化させるためのローラーチューブポンプとそれを動かすステッピングモータ、及び外耳道の圧力を計測する圧力センサーと一定圧力で大気圧開放となるリリースバルブからなる圧力駆動部と、外耳道に入力音を与えるスピーカーと外耳道音圧を計測するマイクロフォンを内蔵するプローブからなる音響部で構成される SFI を製作する (図 1)。次に、製作した SFI でヒトの耳を計測し、データを集める。また、中耳モデルを作成し、SFI 計測結果をシミュレーションできるようにする。

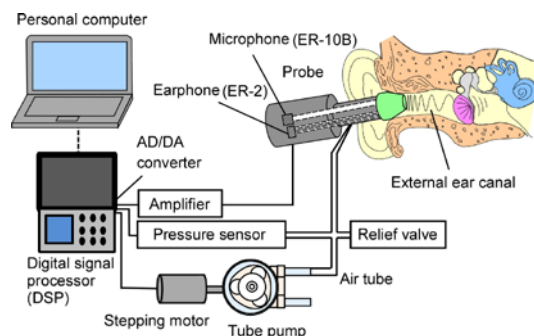


図 1. 製作する SFI の構成図。外耳道の圧力を変化させるためにローラーチューブポンプを使用する。また、計測の安定化と高速化のため計測制御デジタルシグナルプロセッサ (DSP) を用いる。

3. 研究の方法

まず、周波数を 0.1 kHz から 8.0 kHz まで連続的に変化させ、外耳道内の音圧変化を計測する SFI を製作する。次に、この SFI でヒトの耳を計測する。また、計測と平行して、外耳・中耳モデルを作成し、SFI 計測結果をシミュレーションする。

4. 研究成果

(1) 広域周波数 SFI メーターの開発

診断装置の概略図を図 1 に示す。この装置はパソコン (CF-10S)、AD/DA コンバーター、イヤフォンとマイクロフォンを含むプローブシステムで構成される。AD/DA コンバーターの変更によってより広い周波数域 (0.1~10.0 kHz) に対応した。音刺激用波形は AD/DA コンバーターを介し、Windows PC 上の Matlab で生成・制御した。プローブシステムから外耳道に音刺激 (周波数: 0.1~8.0 kHz, 音圧 70 dB SPL @ 1.0 kHz) を入力し (図 2)、プローブ内のマイクロフォンで音圧 (sound pressure level: SPL) の変化を検出した。

プローブの周波数特性を調べるために、入力音周波数とマイクロフォンで測定される SPL との関係 (SPL curve) を得た。この測定には、2 種類のキャビティ (プラスチック製の円筒状シリンダー) を使用した。キャビティの長さはそれぞれ 15 mm と 35 mm, 直径は 4 mm および 8.5 mm とした。測定は大気圧下で行った。

2 種類のキャビティで測定された結果を図 3 に示す。図 3(a)は新生児を想

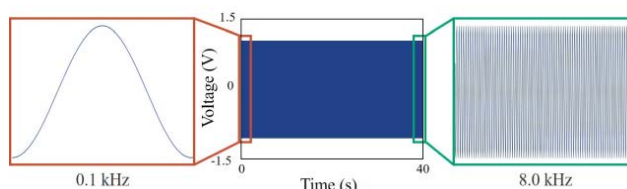


図 2. 音刺激用波形。Windows PC 上の Matlab で 0.1 kHz から 8.0 kHz の掃引サイン波を生成し、AD/DA コンバーターを介してプローブシステムに入力することで音刺激を作製した。

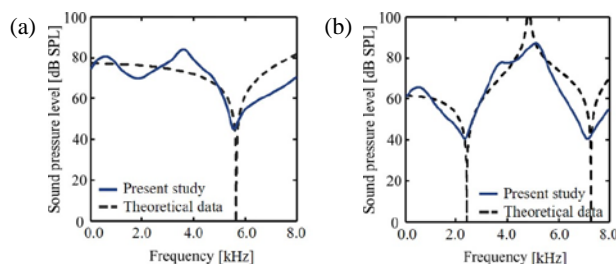


図 3. キャビティによるプローブ周波数特性の計測。(a) 新生児を想定したキャビティ。(b) 成人を想定したキャビティ。実線および点線はそれぞれ実測値および理論値を示す。

定した長さ 15 mm, 直径 4 mm のキャビティでの実測値と理論値, 図 3(b)は成人を想定した, 長さ 35 mm, 直径 8.5 mm のキャビティにおける実測値と理論値である. いずれの場合も, 共振の位置はよく一致しているものの, 実測値と理論値は一致していないことが分かる. これらの差はイヤホンおよびマイクロフォンを含むプローブシステムの特性に起因するものであると考えられるため, その校正方法についてさらに検討を加えた.

(2) 周波数特性がフラットなプローブの開発
診断精度を高めるためには, 周波数特性がフラットなプローブの開発が必須である. まず, 周波数特性のよいイヤホンとマイクロフォン (Etymotic Research) を用い, また, プローブ内での配置を吟味した上でプローブを試作した. 次に COMSOL による数値シミュレーションとプローブによる計測結果を比較しながら, プローブの周波数特性を校正した. この作業を繰り返し, 周波数特性がフラットなプローブを開発した.

図 4 に校正空洞に挿入しているプローブを示す. プローブ内イヤホンに周波数 0.1 kHz から 6.0 kHz までの一定電圧を加え, その時に発生する音圧をプローブ内マイクロフォンで計測した. また, 汎用物理シミュレーションソフトである COMSOL Multiphysics 5.4 を用いて, 外耳道に見立てた校正空洞の有限要素モデルを図 5 のように作成し, 数値計算を行なった.

校正無しのプロープによる校正空洞の周波数特性とシミュレーションによる計算結果を図 6 に示す. 0.1 kHz から 1.5 kHz, 2.5 kHz 付近, 4.5 kHz から 6.0 kHz で両者の差が大きく表れた. 次にシミュレーションの結果を基にプローブを校正し, そのプローブで校正空洞を計測した (図 7). プローブ校正後の計測結果は図 6 に示した校正無しのプロープによる計測結果と比べてシミュレーションの結果に近いものとなった.

(3) 数値シミュレーション

新生児の外耳・中耳を模した有限要素モデルを図 8 に示す. 外耳道のモデル形状は CT 画像を元に構築された Qi (2006)らのモデルを参考に SolidWorks を用いて作成した. 新生児の外耳道壁は, 成人とは異なりほぼ全てが軟組織であるため, 外耳道壁のヤング率は脂肪と同等の 60 kPa とした. 中耳のモデル形状については, 誕生時にはほぼ大人と同様の大きさになっている報告が多くあることから, 成人の中耳 CT 画像を元に構築された Puria (2014)らによる有限要素モデルを使用した.

解析は, 汎用物理シミュレーションソフトである COMSOL Multiphysics®を用いて行った. SFI meter による新生児の中耳動特性の測定と同様, 校正用キャビティで 1.0 kHz で 80 dB SPL 相当する一定の体積変位を外耳道入口から与えた際の音圧変化(SPL Curve)を求めた.

SFI meter により生後 6 日の新生児で計測された 2.0 kHz までの SPL curve と, シミュレーションにより得られた 6.0 kHz までの SPL curve, および 0.2, 1.15, 5.0 kHz の各周波数で抽出した外耳道および鼓膜面の変位図を図 9 に示す. 計測とシミュレーションのいずれにおいても, 0.1-0.2 kHz の領域と, 1.0-1.5 kHz の領域において大きな音圧変化が見られた. 変位図に着目すると, 0.2 kHz では外耳道が大きく変形しており, この領域における音圧変化は外耳道の共振によるものと考えられる. また, 1.15 kHz では鼓膜面がほぼ一様に振動し, 変位も顕著に大きく

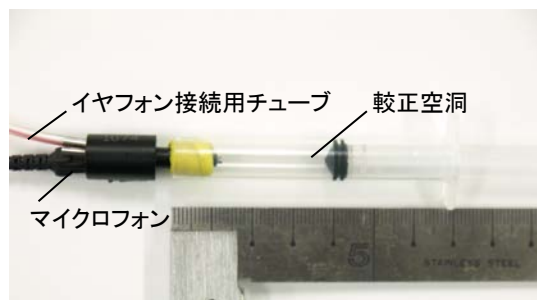


図 4. 校正空洞に挿入しているプローブ. l が校正空洞の長さ.

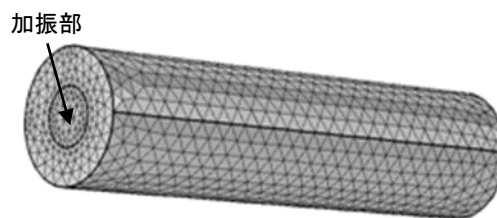


図 5. 校正空洞の有限要素モデル. 長さ 31.5 mm, 半径 4 mm, 加振部半径 1.95 mm の場合.

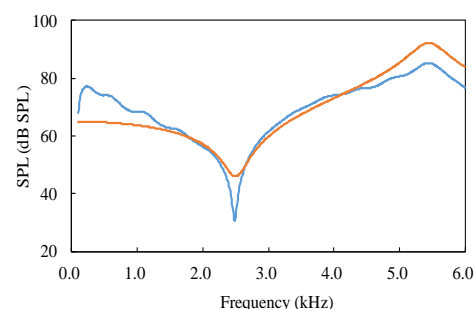


図 6. 校正無しのプロープによる校正空洞の計測と Simulation 結果. — 校正空洞; — Simulation.

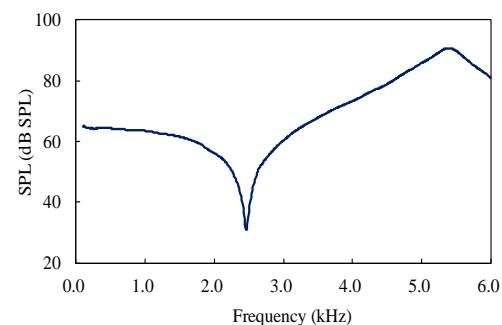


図 7. 校正プローブによる校正空洞の計測結果.

なっていることから、この領域での音圧変化は鼓膜や耳小骨で構成される中耳の共振であることが示唆された。一方、5.0 kHz では、外耳道の変形が見られず、また、鼓膜面の各部位では様々な位相で振動していることから、高周波数領域では外耳道内の体積が変化せず、SPL curve が一定に推移することが明らかとなった。

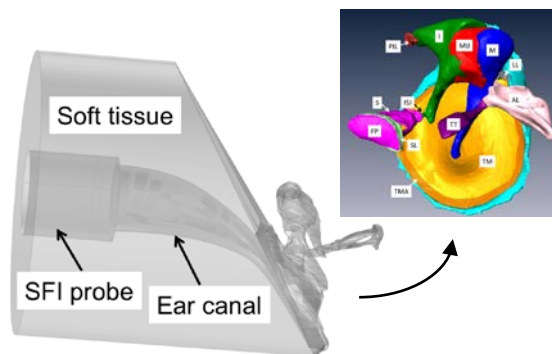


図 8. 新生児の外耳道・中耳を模した有限要素法モデル。外耳道モデルは軟組織である脂肪、中耳モデルは鼓膜・耳小骨および多くの靭帯によって構成されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

① Venkatesh Aithal, Joseph Kei, Carlie Driscoll, Michio Murakoshi and Hiroshi Wada, Predictive accuracy of sweep frequency impedance technology in identifying conductive conditions in newborns, *Journal of the American Academy of Audiology*, 査読有, 29, 2018, 106-117.

DOI: 10.3766/jaaa.16077

② Michio Murakoshi, Shohei Takeda and Hiroshi Wada, Analysis by finite element method of dynamic characteristics of the external ear canal in neonates, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 査読有, 12, 2017.

DOI: 10.1299/jbse.16-00596

③ Michio Murakoshi, Kyosuke Sano, Nattikan Kanka, Naoto Yoshida, Shinji Hamanishi, Hiromichi Kiyokawa, Risako Kakuta, Sreedevi Aithale, Venkatesh Aithale, Joseph Kei, Carlie Driscoll, Andrew Swanston, Sachiko Matsutani, Toshimitsu Kobayashi and Hiroshi Wada, Analysis by sweep frequency impedance (SFI) meter of 226-Hz and 1,000-Hz tympanometries in neonates, *Procedia IUTAM*, 査読有, 24, 2017, 5-14.

DOI: 10.1016/j.piutam.2017.08.038

④ Venkatesh Aithal, Joseph Kei, Carlie Driscoll, Michio Murakoshi and Hiroshi Wada, Sweep frequency impedance measures in young infants: developmental characteristics from birth to 6 months, *International Journal of Audiology*, 査読有, 56, 2017, 154-163.

DOI: 10.1080/14992027.2016.1244867

⑤ Venkatesh Aithal, Joseph Kei, Carlie Driscoll, Michio Murakoshi and Hiroshi Wada, Effects of ear canal static pressure on the dynamic behaviour of outer and middle ear in newborns, *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 査読有, 82, 2016, 64-72.

DOI: 10.1016/j.ijporl.2015.12.006

[学会発表] (計 37 件)

① 山田健吾, 村越道生, 和田仁, 新生児聴覚スクリーニング(NHS)用広域周波数インピーダンスメーターの開発, 日本機械学会第 31 回バイオエンジニアリング講演会, 郡山, 2018 年 12 月 14-15 日

② Michio Murakoshi, Venkatesh Aithal, Shinji Hamanishi, Joseph Kei and Hiroshi Wada, Characteristics of the external- and middle-ear dynamics in neonates, The 8th International Symposium on Middle-Ear Mechanics in Research and Otology (MEMRO2018), Shanghai, China, July 5-9, 2018.

③ 村越道生, 濱西伸治, 和田仁, 新生児のための聴覚スクリーニング装置の開発, 第 57 回日本生体医工学会大会, 札幌, 2018 年 6 月 19-21 日

④ Shinji Hamanishi, Michio Murakoshi and Hiroshi Wada, Dynamic characteristics of neonatal ear up to 6 kHz using a finite element modeling approach, The XXVI Congress of the International Society of Biomechanics (ISB2017) incorporating the 9th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (AP Biomech 2017), Brisbane, Australia, July 23-27, 2017.

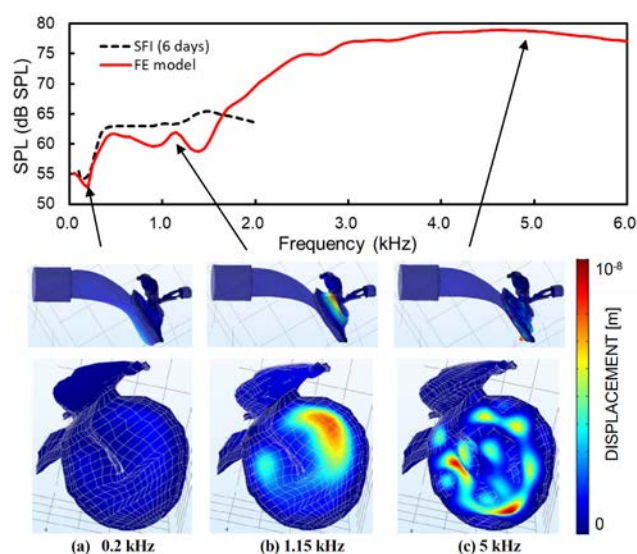


図 9. 数値シミュレーションによって得られた SPL curve と変位分布. (a) 0.2 kHz; (b) 1.15 kHz; (c) 5.0 kHz.

⑤ 和田仁, 松谷幸子, 小林俊光, 清川裕道, 角田梨紗子, 村越道生, 濱西伸治, Venkatesh Aithal, Joseph Kei, 新生児の中耳動特性解析 - Sweep Frequency Impedance (SFI) メータを用いて-, 日本聴覚医学会 第11回 ERA・OAE 研究会, 東京, 2016年07月10日

[図書] (計1件)

① 和田仁 他, 南山堂, 聴覚検査の実際 改訂4版, 2017, 34-39.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 濱西 伸治

ローマ字氏名: (HAMANISHI, Shinji)

所属研究機関名: 仙台高等専門学校

部局名: 総合工学科

職名: 准教授

研究者番号 (8桁): 00374968

研究分担者氏名: 村越 道生

ローマ字氏名: (MURAKOSHI, Michio)

所属研究機関名: 金沢大学

部局名: 理工研究域フロンティア工学系

職名: 准教授

研究者番号 (8桁): 70570901

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: KEI, Joseph

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。