



手指提示振動子の評価用カブラにおける機械モデルの構築

Mechanical Modeling in Couplers for Evaluation of Tactile Stimulus Vibrators

石川慎一*, 舟橋史考, 足立大

Shin-ichi ISHIKAWA, Fumitaka FUNAHASHI, and Dai ADACHI

リオン株式会社 研究開発センター (〒185-8533 東京都国分寺市東元町 3-20-41,* s-ishikawa@rion.co.jp)

概要: イヤホンの性能は装着状態の音響負荷に依存するため, 耳の負荷を模擬した音響カブラにて性能評価することが多い. 一方で, 手指の振動感覚を用いた研究が現在精力的に行われているもの手指提示振動子の評価用カブラは定められていない. 今回は, 手指提示振動子の評価用カブラの開発を目的に接触面 $\phi 10$ mm, 静圧 1 N における人の手指の機械インピーダンスを実測した. また, 実測値から類推される手指の機械モデルとそのパラメータを導出したため報告する.

キーワード: 指, 機械インピーダンス, 振動子, メカニカルカブラ

1. はじめに

イヤホンの出力性能は, 装着状態の音響負荷に依存する. そのため, しばしばイヤホンの性能評価は, 装着状態における耳の音響負荷を模擬した音響カブラを用いて測定する. これにより, 同じ装着状態のイヤホンであれば機種に依らず客観性と一貫性をもって評価することができる[1-4]. さらに, 音響カブラを用いたイヤホンの性能評価は, 人の耳を使用せずに評価できるため, イヤホン製造の検査装置としてコスト低減や品質安定に寄与している.

また, イヤホンだけではなく振動子も同様である. 聴力検査機器で使われている骨導振動子の性能は, IEC60318-6 によって定められたメカニカルカブラを用いて測定する[5]. このメカニカルカブラもまた, 人間の乳突と前額の振動子接触面からみた頭の機械インピーダンスを模擬したカブラである[6]. そのため, このメカニカルカブラを用いた振動子の性能測定は, 構造の異なる機種であっても客観的に性能評価をすることができる. また, 最近では軟骨伝導補聴器に使用される振動子の評価用カブラも同様に研究開発されている[7].

近年のバーチャルリアリティの業界では, 手指の振動感覚提示を使った触覚応用研究が精力的に行われている. 手指の振動感覚提示用振動子には, リニアバイブレータ, 圧電形, 動電形など異なる構造の振動子が使われている. しかし, これらの振動子には, 客観的な性能評価ができるメカニカルカブラが定められていない. 今後, この業界で様々な振動子が普及した際, 統一された既定のメカニカルカブラがないと振動子の客観的な性能評価や振動子製造の検査が困難になると推測する. そこで, 我々は手指

の装着負荷を模擬した振動子の評価用カブラの開発を進めている.

今回, 手指提示振動子の評価用カブラの開発を目的とした手指の機械インピーダンス測定をおこなった. また, その結果と近似する機械モデルおよびパラメータの導出を試みたので報告する.

2. 実験方法

2.1 被験者

本試験は, 段階的に被験者を増やしていき, 結果として正常な手指を有する成人 10 人 20 手(男性 9 名, 女性 1 名)を集めて測定した. 年齢は, 33 歳から 50 歳の範囲で中央値は 38.5 歳であった. 測定時の室内温度は, 24°C から 26°C であった.

手指提示振動子の評価用カブラ開発では, 精度よく機械モデルとカブラの機構設計を合わせこむことも難しい課題であるため, まずは振動子からみた手指の機械インピーダンスが大まかに把握できるまでを目標とし, 10 人測定した段階でカブラを試作する目的においては十分なデータが得られたため試験完了とした.

2.2 機械インピーダンスの測定方法

機械インピーダンスは, 振動に対する物体の動きにくさを示す. その周波数特性は, 物体の弾性や摩擦, 質量といった物理量を反映した結果を示す. ここで, 周波数を f , 角周波数を $\omega(\omega = 2\pi f)$, 対象物の作用点に加わる加振力を $F(\omega)$, その作用点での速度を $v(\omega)$ とすると機械インピーダンス $Z(\omega)$ は, 式 1 で定義される.

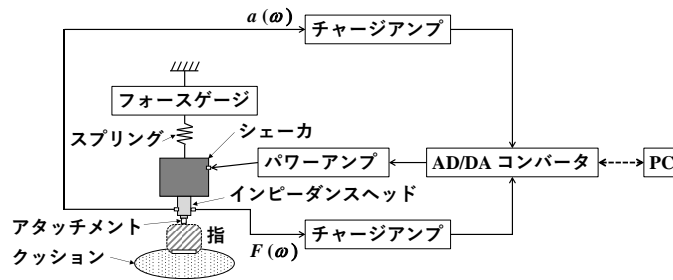


図 1: 機械インピーダンスの測定ブロック図

$$Z(\omega) = \frac{F(\omega)}{v(\omega)} \quad (1)$$

ただし、機械インピーダンスは、力の作用面積及び作用方向にも依存する。

今回の測定は、インピーダンスヘッド(Type 8000; Brüel & Kjaer)を用いたため力と加速度 $a(\omega)$ を計測する。したがって、速度を観測するために、式 2 に変換し機械インピーダンスを求めた。

$$Z(\omega) = j\omega \cdot \frac{F(\omega)}{a(\omega)} \quad (2)$$

ここで、 j は虚数単位である。インピーダンスヘッドを使用して小さな機械インピーダンスを測定する際はインピーダンスヘッド自身の機械インピーダンスの影響を除外する必要がある為、測定対象物に接触した場合の $Z_1(\omega)$ と接触しない場合の $Z_0(\omega)$ の 2 条件で測定する。そして、測定対象物の機械インピーダンスを Z_M とすると、 $Z_1(\omega)$ と $Z_0(\omega)$ の複素数の差として Z_M を求めることができる。(式 3)

$$Z_M(\omega) = Z_1(\omega) - Z_0(\omega) \quad (3)$$

図 1 は、今回使用した機械インピーダンスの測定ブロック図である。PC より生成した交流信号を AD/DA コンバータ(Analog Discovery; DIGILENT)で出力させ、パワーアンプで電圧安定化させた信号を加振器へ入力した。加振器(Type4810; Brüel & Kjaer)の入力電圧は約 1V の正弦波となるようパワーアンプで調整した。周波数は 20 Hz~2,000 Hz でスイープさせた。

加振器の加振を受けたインピーダンスヘッドの電荷出力は、チャージアンプ(UV-16; RION)で電圧信号に変換し

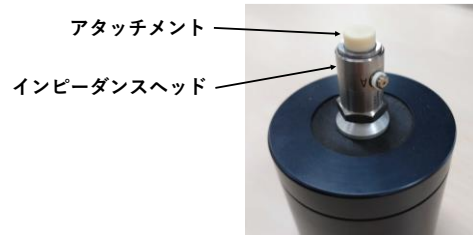


図 2: インピーダンスヘッドとアタッチメント

AD/DA コンバータを介して PC に収録した。PC は、インピーダンスヘッドの感度値とチャージアンプの増幅度を加味して力と加速度およびその位相差から機械インピーダンスを計算している。

インピーダンスヘッドと加振器は、ネジによってしっかりと固定した(図 2)。目的の機械インピーダンス ($\phi 10$ mm となる接触面積) を測定するために、インピーダンスヘッドのドライビングプラットフォームに、直径 $\phi 10.6$ mm(先端を R0.3 加工し、接触面を $\phi 10$ mm にした)、高さ 5 mm の ABS 樹脂のアタッチメント(0.22g)を接着した。外乱ノイズを低減するために、加振器はスプリングにて固定端から吊り下げた。スプリングと固定端の間にはフォースゲージ(RZ-10; AIKOH ENGINEERING)があり、指への静的荷重が $1 \text{ N} \pm 0.2 \text{ N}$ で一定となるように調整して測定を実施した。

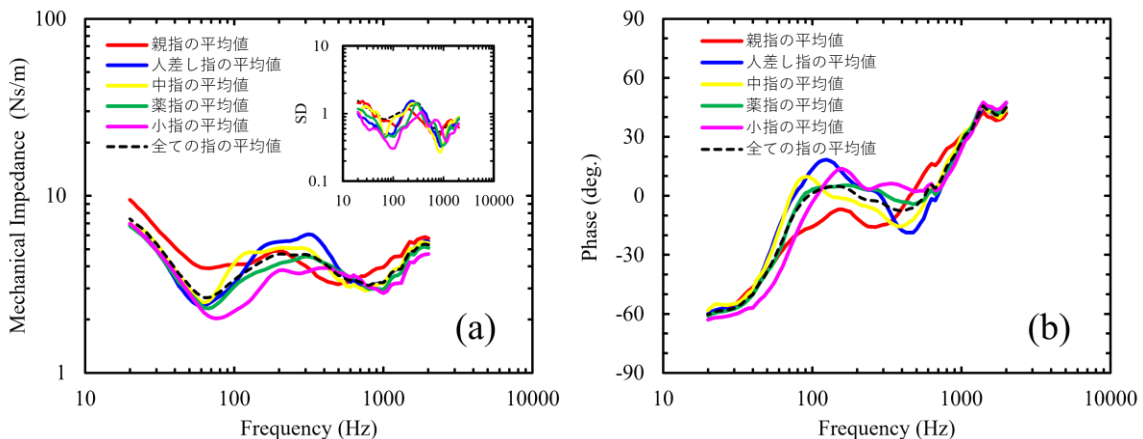


図 3: 10 人 (20 手) における指毎の機械インピーダンス (a) と位相 (b) の測定結果

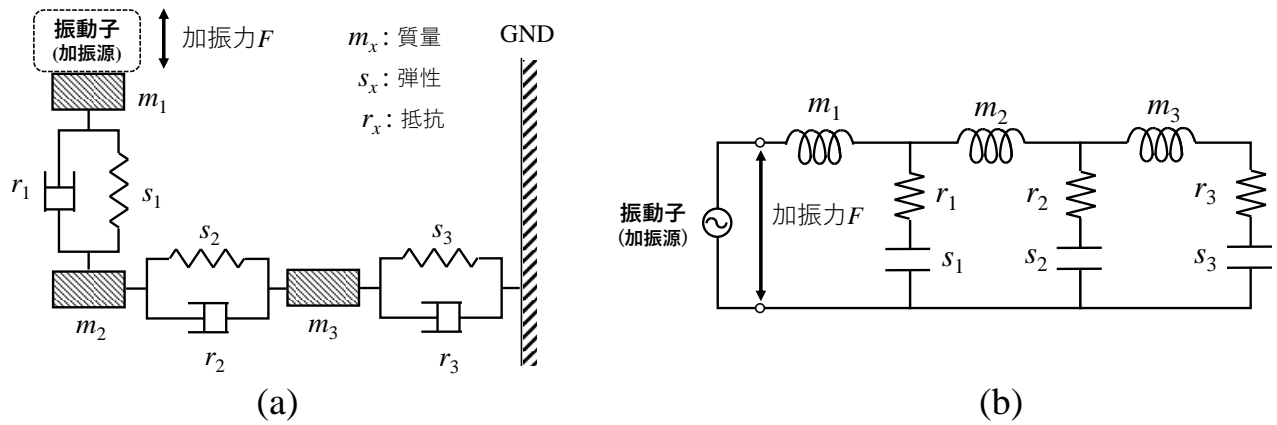


図 4: 指の機械インピーダンスを模擬するための機械モデル(a)と等価回路(b)

3. 実験結果

3.1 手指の機械インピーダンス実測結果

図 3 は, 10 人(20 手)の機械インピーダンスの実測結果を示している. (a), (b)ともに各指の平均値と全ての指の平均値の特性を示している. (a)は機械インピーダンスの絶対値を, (b)は位相を描画している.

機械インピーダンスの絶対値は周波数に対する傾きから動きにくさの要因となっている成分(弾性, 質量, 抵抗)を推定することができる. 例えば, 周波数増加につれて機械インピーダンスが減少する場合は弾性成分が支配的であり, 周波数増加につれて機械インピーダンスが増加する場合は質量成分が支配的である. そして, 機械インピーダンスが周波数増減に対して一定な場合は, 抵抗成分が支配的となる.

今回の測定結果からは, 20 Hz から 100 Hz の区間で親指は他の指よりも動きにくく, 100 Hz から 200 Hz の区間で小指は他の指よりも動きやすいといった傾向がみられた.

図 3(a)の内挿図は, 10 人(20 手)による測定結果のばらつき標準偏差(SD)の結果を図示している. 機械インピーダンスの各平均値は, 各人(手)による標準偏差よりも約 2 倍以上大きかった. 位相の標準偏差は, 図示していないが ± 20 deg 以内であった.

3.2 類推される機械モデルと等価回路

機械インピーダンスの測定結果をカプラ開発へインプットするために測定結果と一致する機械モデルとその定数を導出する必要がある. 今回は, 実測結果から機械モデルを仮定し, その機械モデルを等価回路として扱い, 実測結果と近似する定数解の導出を試みた.

図 3(a)より, 70 Hz, 250 Hz, 800 Hz 付近に機械インピーダンス周波数特性の谷(反共振)があった. つまり, 20Hz から 2,000 Hz の区間には少なくとも 3 つの質量と 3 つの弾性, 3 つの抵抗が異なる速度で振動していると推定できる. したがって, 図 4(a)の機械モデルを仮定した. m_1 は, 振動子が接触する指の表面の質点に相当する. m_1 と m_2 の間には r_1, s_1 が介在し, m_2 と m_3 の間には r_2, s_2 が介在する. m_3 は, r_3, s_3 を通じて振動接地(GND)に接続される.

電気音響学では, アナロジー的に音響や振動状況を電気回路図のような等価回路で表現し, その周波数特性などを計算する[8, 9]. 図 4(a)から運動方程式を解いていくと, 図 4(b)のような等価回路が得られる. 電気回路の電圧に相当するものが加振力に相当し, 電流が速度(時間微分すれば加速度, 時間積分すれば変位)に対応する.

3.3 類推したモデルの計算結果

表 1 に, 測定された機械インピーダンスと近似された定数の収束解例を示す. これは, 等価回路の回路定数を変数と設定し, 最小二乗法にて実測結果と計算結果の周波数特性の差が小さくなるような解を導出した一例である.

図 5(a),(b)は, 図 4(b)と表 1 のパラメータを使用して機械インピーダンスを計算した結果(青実線)とすべての指の平均値(灰色実線)を示したものである. (a)は機械インピーダンスの絶対値を, (b)は位相を描画している.

4. 考察

手指提示振動子の評価用カプラの開発では, 人や指毎にそれぞれのカプラを提供するものではなく, 人の手指の代表性能を可能なかぎり近似させることとなる. したがって, 今回の機械インピーダンスの測定結果(図 3)は, 人や指毎の差はあるもののカプラ開発を着手する目的においては, 十分参考になるデータと考える.

表 1: 実測結果と近似する定数の収束解例

機械素子	定数
m_1	0.33×10^{-3} kg
m_2	5.1×10^{-3} kg
m_3	2.0×10^{-3} kg
s_1	6.2×10^3 N/m
s_2	6.9×10^3 N/m
s_3	1.5×10^3 N/m
r_1	2.8 Ns/m
r_2	0 Ns/m
r_3	4.9 Ns/m

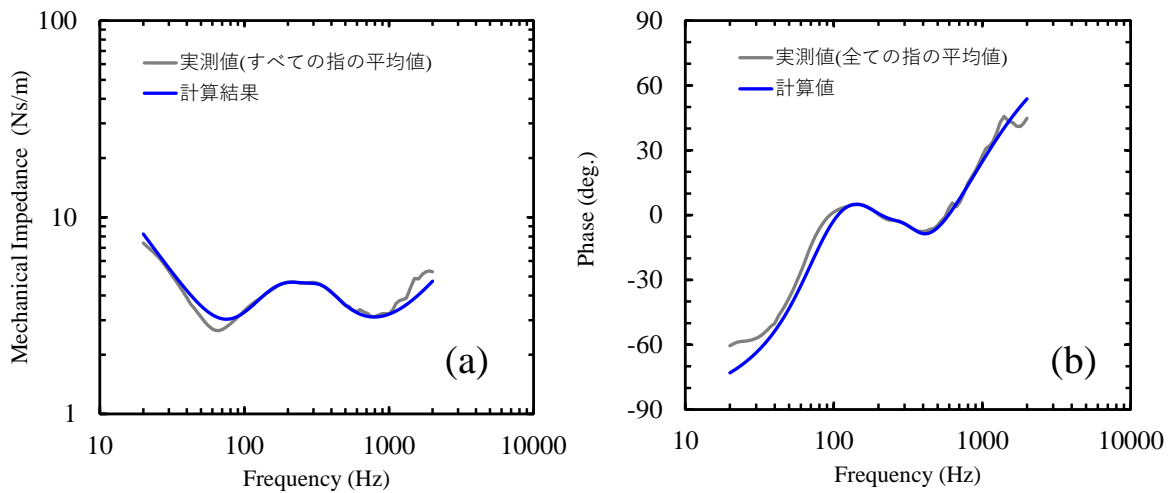


図 5: 類推したモデルの計算結果と実測結果の比較図. (a) 機械インピーダンス, (b) 位相

また, 図 5 より機械インピーダンスと位相は, 概ね実測値と一致した計算結果が得られた. したがって, 図 4(a)の機械モデルと収束されたパラメータ(表 1)は, 今回の装用条件 ($\phi 10$ mm となる接触面積かつ静的荷重 1 N) における手指の負荷をよく近似できていると示唆する. 今後, 図 4(a)の機械モデルと収束解(表 1)を用いてカプラの試作を試みる予定である.

その他の考察として 20 Hz から 60 Hz は主に s_3 のインピーダンスが支配的と推定される. s_3 は指周りの質量よりも十分な剛体 (GND) と m_3 の間に入っているばねであり, 指の関節などによる可動部に相当していると推測する. 今後, 人の手指の代表性能の確立には, 被験者数を増やすことと, 人の指の構造と自然な相関があるか研究する必要がある. また, 振動のセンシングも人の受容器と等価な伝達特性になるよう設計することが望ましく, その研究も行いたい.

5. まとめ

今回, 手指提示振動子の評価用カプラの開発を目的とした $\phi 10$ mm となる接触面積かつ静圧 1 N における人の指の機械インピーダンスを実測した. また, 実測値が概略一致する機械モデルとそのパラメータを導出した.

今後, 本結果を参考にカプラ開発を行い, 触覚用振動子の客観的な性能評価を可能とすることで触覚振動子業界の一助になれば幸いである.

参考文献

- [1] International Electrotechnical Commission. "IEC 60318-1:2009 Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 1: Ear simulator for the measurement of supra-aural and circumaural earphones." IEC, 2009.
- [2] International Electrotechnical Commission. "IEC 60318-3:2014 Electroacoustics - Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 3: Acoustic coupler for the calibration of supra-aural earphones used in audiometry" IEC, 2014.
- [3] International Electrotechnical Commission. "IEC 60318-4:2010 Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts." IEC, 2010.
- [4] International Electrotechnical Commission. "IEC 60318-5:2006 Simulators of human head and ear - Part 5: 2 cm3 coupler for the measurement of hearing aids and earphones coupled to the ear by means of ear inserts." IEC, 2006.
- [5] International Electrotechnical Commission. "IEC 60318-6:2007 Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 6: Mechanical coupler for the measurement on bone vibrators." IEC, 2007.
- [6] Flottorp, G.; Solberg, S. Mechanical impedance of human headbones (forehead and mastoid portion of the temporal bone) measured under ISO/IEC conditions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1976, 59, 899.
- [7] Ishikawa, S.; Watanuki, K.; Iwakura, T. Measurement of the Mechanical Impedance of Ear Cartilage and Development of a Coupler for Vibrator Evaluation of Cartilage Conduction Hearing Aids. *Appl. Sci.* 2024, 14, 1536.
- [8] 早坂壽雄, 吉川昭吉郎: 音響振動論, 丸善株式会社, 1974.
- [9] 西巻正郎: 音響振動学, コロナ社, 1960.