

# 微小孔が耳栓の遮音特性に与える影響について

Effect of micro orifice of an earplug on sound insulation characteristics

眞田 明・高祖 英樹<sup>1</sup>

Akira SANADA, Hideki TAKASO

キーワード 微小孔 / 遮音特性 / 耳栓

KEY WORDS Micro orifice / Sound insulation characteristics / Earplug

## 1 はじめに

騒音環境下での作業時、就寝時、航空機などでの移動時において、耳に伝わる音を低減するために耳栓が広く使用されている。耳栓には、様々なタイプのものが市販されており、全周波数帯域を対象にしたもの、話し声を透過させるもの、突発音を低減するものなど音響特性に機能性を持たせたものも多く見られる。しかしながら、その実際の音響特性や遮音原理については、十分に検討されていないのが実状である。

そこで、本研究では、微小な孔を用いた耳栓について、その基本的な音の透過原理と遮音特性を実験と計算により明らかにした。以下にその内容を報告する。

## 2 実験

本来、耳栓は周囲の騒音の遮断を目的としているが、話し声などの必要な音は聞こえることを特徴としたものがある。微小な孔を用いた耳栓では、その孔径などを調整することで音の透過量を変化させる。図1に微小孔を有する耳栓の代表的な構造の模式図を示す。このタイプの耳栓では入射した音が特性調整用プラグに設けられた微小孔（微小オリフィス）を通過し、外耳道内に進入し、鼓膜に到達する構造となっている。孔径が異なるプラグを複数用意しておけば、必要に応じて耳栓の特性を選択可能である。

まず、実験的に微小孔の音響特性について検討した。耳栓の評価はJIS T8161に規定される被験者による方法や人工耳（イヤーマシミュレータ）による方法が用いられるが、ここでは耳栓の孔の物理的な音響特性のみを評価するため、図2に示すような単純な鉄製円筒で構成されたカプラを用いた評価を行った。カプラには、1/4インチマイクロホンを挿入し、カプラ内部の音圧を計測した。また、本研究では、耳栓構造の内、微

小孔部分のみの特性を検討するため、実際の耳栓に用いられている微小孔を有する特性調整用プラグの性能評価を行った。孔径の異なる2種類のプラグ（プラグA：孔径約0.1mm、プラグB：孔径約0.17mm）を対象とした。カプラから1mの位置にスピーカを配置し、ホワイトノイズにて音を発生した。また、参照用のマイクロホンをカプラ横に設置し、カプラ内部のマイクロホンとの音圧比を算出した。

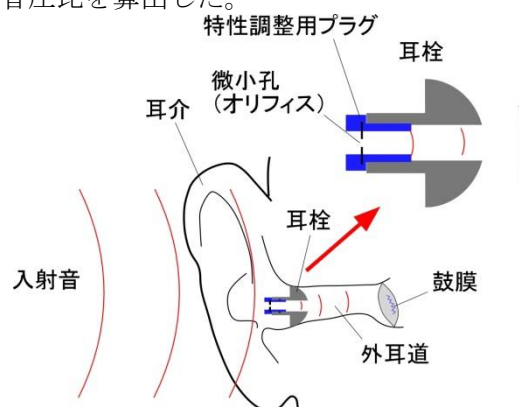


図1 微小孔を有する耳栓

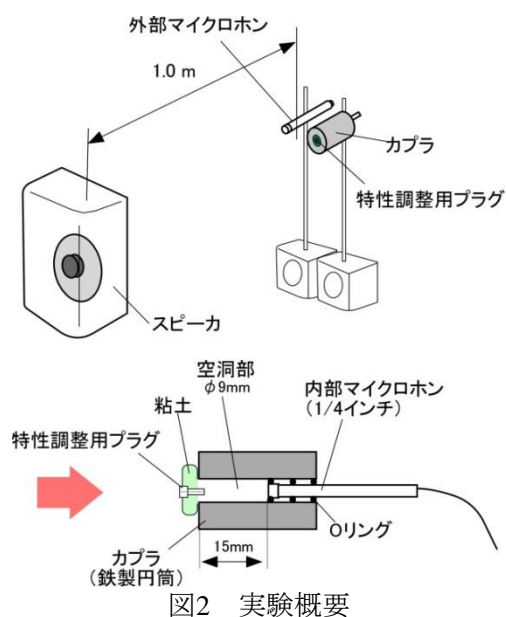


図2 実験概要

<sup>1</sup> エーイー・ザ・サウンズカンパニー

### 3 理論および実験結果との比較

音波が微小孔を透過する場合の計算モデルを図3に示す。断面Aが孔表面（耳栓表面）、断面Bが孔の背後面、断面Cが鼓膜面を表している。ここでは、耳栓内部の音波通路は無視し、孔背後は鼓膜面まで一定の断面積であると仮定する。このときの孔部分の空気の運動方程式は、次式で表すことができる。

$$s\rho l' \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} = p_A s - p_B s \quad (1)$$

ただし、 $s$ は孔断面積、 $\rho$ は空気密度、 $c$ は孔部分の粘性抵抗、 $p_A$ および $p_B$ は、図2中の断面Aおよび断面Bにおける音圧である。また、 $l'$ は、

$$l' = l + \delta_e + \delta_i \quad (2)$$

であり、 $\delta_e$ 、 $\delta_i$ は、それぞれ外部および空洞部の管端補正值を表し、次式である。

$$\delta_e = \frac{8}{3\pi} a, \quad (3)$$

$$\delta_i = 0.48\sqrt{s} \left( 1 - 1.25 \frac{a}{r} \right) \quad (4)$$

鼓膜面の振動が外耳道の音に影響を与えないと仮定して、外耳道内の音場を求め、B面での体積速度の連続性を考慮し、式(1)の運動方程式を解くと、入射音圧に対する鼓膜面での音圧の比を次式で表すことができる。これを耳栓での遮音性能と定義する。

$$R[\text{dB}] = 10 \log_{10} \left| \frac{S}{s} \frac{j \sin kL}{Z_0} \left( \rho l' j \omega + \frac{c}{s} + \frac{s}{S} \frac{\cos kL}{j \sin kL} Z_0 \right) \right| \quad (5)$$

ただし、 $S$ は外耳道部分の断面積、 $k$ は波数、 $j$ は虚数単位、 $Z_0$ は空気の特性インピーダンスを表す。

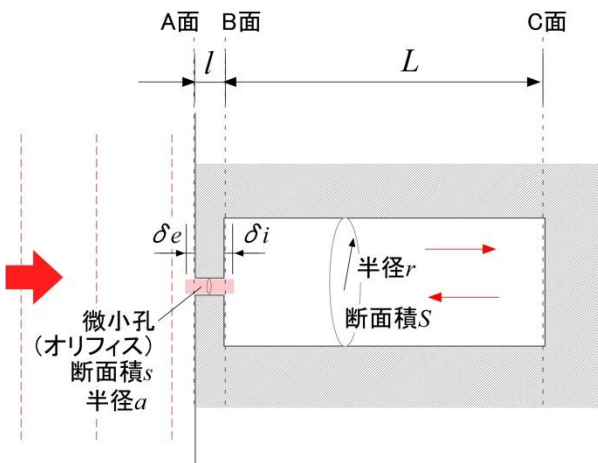


図3 計算モデル

図4に実験結果および計算結果を示す。なお、計算に用いた粘性抵抗値は、流れ抵抗測定器（Mecanum社、SIG2011）を用いて、各プラグの流れ抵抗を実測した値から求めた。実験結果及び計測結果は、10kHz以下の帯域において、どちらの孔径のプラグに対してもよく一致しており、理論的に求めた式が妥当であることが確認できた。また、微小孔を用いた耳栓は、高周波数になるほど損失が大きく、高い音に有効であることが分かった。また、その損失は、孔径が小さいほど、孔の粘性抵抗値が大きいくほど大きくなり、周波数に対する増加率は、損失が10dB以上の範囲ではほぼ同一であることが分かった。なお、10kHzより高い周波数は、実験と計算結果が一致していないが、これはプラグを固定した粘土を透過する音などが影響したものと考えられる。

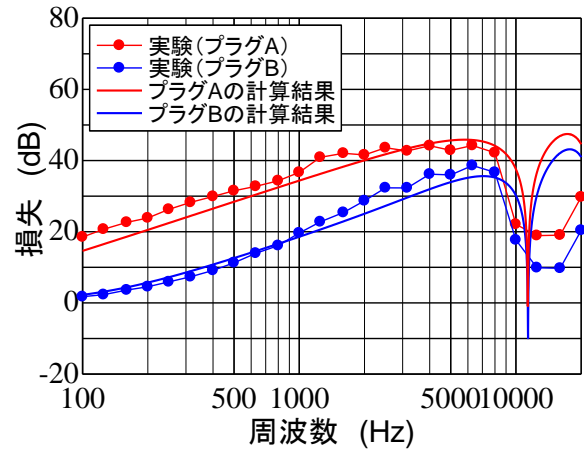


図4 実験結果および計算結果

### 4 まとめ

微小な孔を用いた耳栓について、その基本的な音響特性および遮音原理を計算および実験により明らかにした。微小孔を用いることで、低周波数では音を透過し、高い周波数で音を減衰させる特性を持たせることができる。また、遮音性能の大きさは、孔部分の粘性抵抗値や孔径により大きく変化することが分かった。導出した理論式を用いることで、10kHz以下の領域では所望の特性となるように孔径などを設計することができるようになった。今後は、他のタイプの耳栓構造についても、遮音原理などについて検討していく予定である。

### 参考文献

- 1) U. Ingard, J. Acoust. Soc. Am. 25(6),1037 (1953)