

末梢伝搬メカニズムの解明に基づく軟骨伝導デバイス群の開発

代表研究者 千葉大学フロンティア医工学センター 教授 中川誠司

共同研究者 千葉大学フロンティア医工学センター 助教 大塚 翔

共同研究者 千葉大学フロンティア医工学センター 特任助教 Qin Xiuyuan

〔研究の概要〕

頭骨部に振動子を押しつける従来の骨伝導には、痛みが生じる、振動子がずれやすいという欠点があった。このような問題を解決する手段として、耳介軟骨に振動子を呈示する“軟骨伝導”が提案され、補聴器やスマートホンに応用されている。軟骨部は骨部に比べて軟らかく、弾性を持つために軟骨伝導では痛みを生じにくい。また、従来の骨伝導と同様に使い方を工夫することで騒音下でも聞きやすい、耳栓やイヤホンを装着した状態でも利用できるというメリットも有している。しかしながら、軟骨伝導の知覚メカニズムには不明な点が多く残り、新たなデバイス開発が効率よく行えない原因となっている。本提案では、軟骨伝導デバイスの最適化や派生機器の開発に有用な知見の獲得を目指して、軟骨伝導の末梢伝搬過程の解明に取り組んだ。

〔研究経過および成果〕

1. 軟骨伝導音の末梢伝搬特性の推定

一般に骨伝導では、(1) 一旦は頭部の生体組織に入った後、主に軟骨部を介して外耳道内に放射される外耳道内放射成分、(2) 頭部組織を介して中耳に到達し、耳小骨連鎖に慣性運動を生じさせている慣性骨導成分、(3) 頭内組織を介して内耳に到達し、蝸牛殻に圧縮・伸張を生じさせている圧縮骨導成分、(4) 振動子から空气中に放射され、外耳道に侵入する気導成分の4つの伝搬成分が知覚される。軟骨伝導における振動子の呈示部位が、上記の各伝搬成分および知覚に与える影響を検討した。

1.1. 方法

聴覚健常者5名(男性4名、女性1名 22~24歳)を被験者とした。

実際の骨伝導スマートホンに使用されている圧電振動子 (R11-244018-01, TOKIN) と1枚の亚克力板 (5 cm 平方) を用いて、スマートホンのパネルスピーカーを想定した軟骨伝導振動子を作成した。左側の耳介、側頭骨の乳様突起、および耳前部(耳珠から顆状突起にかかる部位)に振動子を呈示した (Fig. 1)。

外耳道全体の容積の0, 20, 40, 60, 80, 100% の水を外耳道に注入した (Fig. 2)。その状態で、三肢強制選択, 2up - 1down方式の変形上下法を用いて、250, 500, 1000, 2000, 4000, および 8000 Hz トーンバーストの聴覚閾を計測した。

1.2. 結果と考察

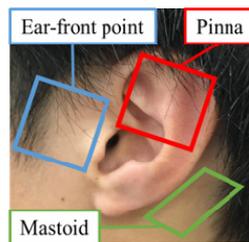


Fig. 1 Placements of the transducer

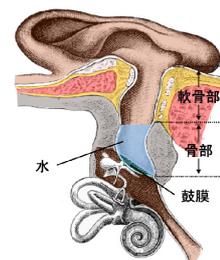


Fig. 2 The ear canal at 40% water injection

検出閾に対する呈示部位の主効果が見られた。また、1000 - 4000 Hz では、乳様突起に比べて耳介、耳前部で有意に大きな聴覚閾上昇が観察された。外耳道への注水によって気導成分と外耳道内放射成分の両者が遮断されたため、耳介、耳前部では上昇量が大きくなったこと、および、乳様突起は他の呈示部位に比べ知覚に占める気導成分と外耳道内放射成分の割合が低いため、上昇量が抑えられたと推測される。

これらの結果は、振動面が耳介軟骨のみに接触する場合は外耳道内に生じる成分が増大し、頭骨部に接触する条件では慣性骨導成分および圧縮骨導成分が発生することを改めて示している。

2. 軟骨伝導音知覚に及ぼす耳介特性の効果の推定

軟骨伝導では、耳介そのものの特性が聞こえに

影響を与えると考えられるが、先行研究は極めて限定的である。ヒトの耳介のサイズおよび硬度と聞こえの関係を調査した。

2.1. 方法

聴覚健常者 15 名 (男性 10 名, 女性 5 名, 19~28 歳) の左右耳, 合計 40 耳を対象とした。

硬度計測にはデュロメータタイプ E (GS-779G, テクロック) を用いた。伏臥位を取った被験者の耳介にデュロメータを垂直に 3 秒間押し当てて硬度を計測した。硬度の計測点 (対輪, 耳珠, 耳輪) を Fig. 3 左に示す。なお, デュロメータの押し当てによる計測部位およびその周囲組織の変形を防ぐため, 耳珠における計測時にはシリコンゴムの耳栓 (INSTA-PUTTY, Insta-Mold Products) を被験者の外耳道に挿入した。同様に, 対輪および耳輪計測時には, 耳介の裏側にシリコンゴムを挟み, 自作の固定治具とゴムバンドで頭部に固定した (Fig. 3 右)。また, 耳長(A), 耳幅(B), 耳介附着部長(C), 耳介軟骨長(D), 外耳道までの距離(E), 耳垂長(F)を測定した (Fig. 4)。

また, 実験 1 と同じ方法で聴覚閾を計測し, 耳介のサイズ, 硬度との関係を調べた。

2.2. 結果と考察

聴覚閾に及ぼす対輪および耳輪の硬度の主効果は有意であり, それぞれの部位の硬度の増加に伴う検出閾の下降/上昇が認められた (Fig. 5)。一般に硬度, すなわち弾性率が高いほど, 物体内での距離減衰は小さくなる。一方, 硬度が小さい場合は振動子の押付に対して生体組織が変形し, 両者の接触面積が増加することで, 骨伝導音の伝達効率が上昇することも考えられる。

250-1000 Hz では, 耳介軟骨長-検出閾間に正の相関が確認された。この結果は先行研究 (Nakagawa et al. 2021) に一致する。また, 対輪および耳輪の硬度, さらには外耳道までの距離(E)を除くすべての形態パラメータ, および 250-1000 Hz の検出閾に男女間の有意差が認められた。これらの結果は先行研究 (Nakagawa et al. 2021) に一致するもので, 耳介の硬度と耳介サイズは軟骨伝導の検出閾に影響すること, 小さな耳介を持つ女性の方が軟骨伝導音を効率よく聴取できることを示している。

[発表論文]

1. Irwansyah, Otsuka S, Nakagawa S, Improved Low-Frequency Crosstalk Cancellation in Bone

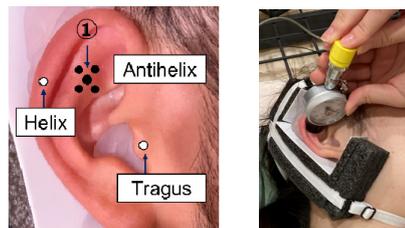


Fig. 3 Left: Measurement locations for the hardness of the pinna. Right: The durometer and pinna-holding jig for the hardness measurement.

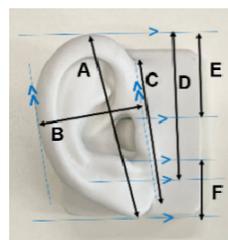


Fig. 4 Auricle dimensions.

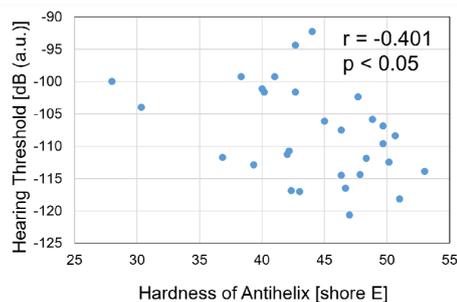


Fig. 5 A Scatter diagram of threshold and hardness of the helix.

Conduction Using Bone Transducers and Probe Microphone, IEEE Access, 10, 79201-79212, 2022

2. Ishikawa H, Otsuka S, Nakagawa S, Threshold and frequency- and temporal resolutions of distantly presented bone-conducted sound in the audible-frequency range, J. Jpn. Appl. Phys., 61 SG1065, 2022.
3. 菅原, 大塚, 中川, 振動子呈示部位の変化に伴う軟骨伝導伝搬成分比の推定, 日本音響学会講演論文集, 2022.
4. 田村, Irwansyah, 大塚, 中川, 耳介の形態・硬度および性別が軟骨伝導の検出閾特性に及ぼす影響, 日本音響学会講演論文集, 2022.
5. Uemura K, Otsuka S, Nakagawa S, Basic perception and propagation characteristics of bone-conducted sounds presented to facial parts, J. Jpn. Appl. Phys., Accepted.