

＜研究課題＞ 重度難聴者のための自動車運転時聴覚補助システムの開発

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 准教授 大塚 翔
 千葉大学フロンティア医工学センター 特任助教 Qin Xuiyuan
 千葉大学フロンティア医工学センター 特任助教 Irwansyah

【抄録】

骨伝導で呈示された周波数 20 kHz 以上の超音波(骨導超音波)であれば、重度難聴者にも知覚される。また、骨導超音波は頭部から離れた位置(遠位)に呈示された場合も明瞭に知覚される。本研究では、申請者らが持つ骨導超音波研究のノウハウを生かして、重度難聴者のための自動車運転時における聴覚補助技術、特に警告音(サイレン、クラクション)の到来方向の同定(音像定位)を可能にする技術の開発に取り組んだ。検討の結果、体幹や上肢の左右2箇所(2ch)に骨導超音波を呈示すると、実用的な精度で呈示位置を区別できることがわかった。また、骨導超音波呈示時に体幹表面で観察される振動分布を調べた結果、表面形状が平坦かつ大きな筋肉に覆われた部位に呈示した場合に伝搬効率が向上することが示された。また、得られた知見に基づき、2ch 遠位呈示骨導超音波デバイスを試作した。今後、日常生活場面での実用評価を進める予定である。

1. 研究の目的

1-1 重度難聴者と自動車運転免許

以前の道路交通法には、運転免許適性試験における聴力基準が存在し、補聴器を利用して十分な聴力回復ができない重度難聴者(全国に約 85,000人)は、自動車運転免許の取得ができなかった。2008年の改正によって条件つきで運転免許の取得が認められるようになったものの、聴力障害者は健聴者に比べて事故率が高いことを示す報告もあり、依然として重度難聴者の運転に懸念を示す声も存在する。重度難聴者にも必要な聴覚情報の聴取を可能にし、安全な自動車運転を可能にする技術の開発が求められている。

1-2 骨導超音波知覚

一方、骨伝導で呈示された周波数 20,000 Hz 以上の超音波(骨導超音波)であれば、聴覚健常者のもとより、重度難聴者であっても知覚される場合はあることが知られている。また、骨導超音波を振幅変調することで、音声情報の伝達も可能になることも報告されている(Lenhardt et al. 1991)。

我々はヒトを対象とした各種の非侵襲計測(神経生理計測、心理計測、生体振動計測、コンピュータ・シミュレーションなど)を駆使して、骨導超音波の知覚メカニズムの解明に取り組んで来た。これまでに、骨導超音波の特異な知覚特性や神経生理メカニズムの一端を世界に先駆けて明らかにしている(Fujimoto & Nakagawa 2005, Nakagawa



図 1 骨導超音波知覚を利用した重度難聴者のための新型補聴器 (Nakagawa et al. 2015)。

2009, Hotchama & Nakagawa 2010, Nakagawa et al. 2013, Ito & Nakagawa 2015 等)。また、骨導超音波知覚を応用したした重度難聴者のための新型補聴器の開発に取り組んできた(図 1)。骨導超音波補聴器は重度難聴者用の補聴器としては世界初の試みであり、近い将来の実用化が期待されている。

1-3 骨導超音波の遠位呈示

一般に骨導超音波を含む骨伝導音は、聴覚受容器(内耳の蝸牛)に近い、側頭骨の乳様突起や下顎骨の顆状突起に呈示される。しかしながら、これらの骨性隆起への呈示には金属製のヘッドバンド等を用いる必要があり、長時間の使用に伴って痛みが生じる、使用者の動きに伴って最適位置からずれてしまう、また、見た目が悪いといった問題があった。

一方、骨導超音波には、頭部から離れた部位(遠位)、すなわち体幹や上肢、頸部に呈示された場合にも容易に知覚可能されるという

特徴がある (Nakagawa et al. 2018). 我々は, “遠位呈示”された骨導超音波の知覚特性や伝搬メカニズムの解明に取り組んで来た (Nakagawa et al. 2019, Ogino et al. 2019, Doi et al. 2020, Ishikawa et al. 2022, Takahashi et al. 2025 など). これまでのところ, 前腕に呈示した場合でも音を知覚可能であること, 時間分解能は気導音 (空気の振動を介して聴取される, 所謂普通の音) に遜色がないこと, 呈示部位が胸部までであれば実用的な周波数分解能と音声明瞭度を有すること等が明らかにされている.

遠位呈示では振動子は弾性のある筋肉に呈示される. また, 多くの場合は衣服の下に振動子が呈示されるため, 上述の振動子の装用性や美容上の問題を解決することができると考えられる.

1-4 本研究の目的

本研究では, 申請者らが行ってきた骨導超音波知覚研究の成果とノウハウを生かし, 骨導超音波による重度難聴者のための自動車等運転時における聴覚補助技術の開発に取り組んだ.

骨導超音波補聴器では明瞭な音声知覚の実現が重視されたが, 自動車等運転時には特に警告音 (サイレン, クラクション) の到来方向の同定 (音像定位) が重要と思われる. 本研究では, 2ch の遠位呈示骨導超音波による音像定位能を推定した. また, 音像定位に大きな影響を与える刺激呈示部位を決定するため, 解剖学的構造が骨導超音波の体内伝搬に及ぼす影響を評価した. さらに, 得られた知見に基づき, 自動車内に持ち込み可能な小型デバイスと実用的な振動子固定方式の開発に取り組んだ.

2. 遠位呈示骨導超音波の両耳知覚特性の検証

気導音 (空気の伝搬を介して知覚される, 所謂通常の音) の知覚においては, 両耳間の時間差 (Interaural time difference: ITD) や音圧差 (Interaural level difference: ILD) が水平面内の音像定位の手がかりになっているとされている. しかしながら, これまで開発が進められてきた骨導超音波補聴器 (図 1) は単一の振動子しか備えておらず, 音像情報を提供することはできない. 左右の乳様突起に骨導超音波を呈示することによって, 基礎的な音像定位 (刺激側の区別) ができるかどうかを検証した.

2-1 左右チャンネル間の時間差の影響

2 個の圧電セラミック振動子 (村田製作所 MA40E7S を改造したもの) を用いて, 30 kHz トーンバーストを両側の乳様突起, 胸鎖乳突筋, 鎖骨の胸骨端, 上腕二頭筋に呈示した. 2 つの

振動子はそれぞれ体の正中線に関して対象となるように慎重に配置された. 乳様突起には専用のヘッドバンド, 胸鎖乳突筋と上腕二頭筋にはゴム製のサポーターバンド, および鎖骨の胸骨端にはアイシングサポーターを用いて振動子を固定した (図 2).

頭内定位実験は 2 肢強制選択法によって行われた. 刺激呈示シーケンスを図 3 に示す. 各施行においては, 左右の時間差のない基準刺激が呈示された後, 連続する 2 区間において比較刺激が呈示された. なお, 第 1 区間, 第 2 区間では左右の刺激の時間差が反転するようになっており, 時間差 Δt は ± 15 , ± 30 , ± 50 , および $\pm 100 \mu\text{s}$ とした. 被験者には 2 区間のうち左側に音像定位された区間を回答するよう指示し, 右側のチャンネルを遅延させた区間との一致率を正解率として算出した.



図 2 鎖骨 (左), および上腕 (右) への骨導超音波刺激呈示の様子

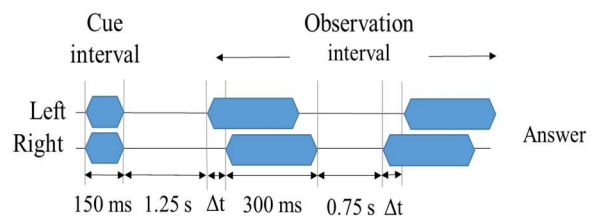


図 3 左右チャンネルに時間差 (Δt) を与えた場合の刺激シーケンス.

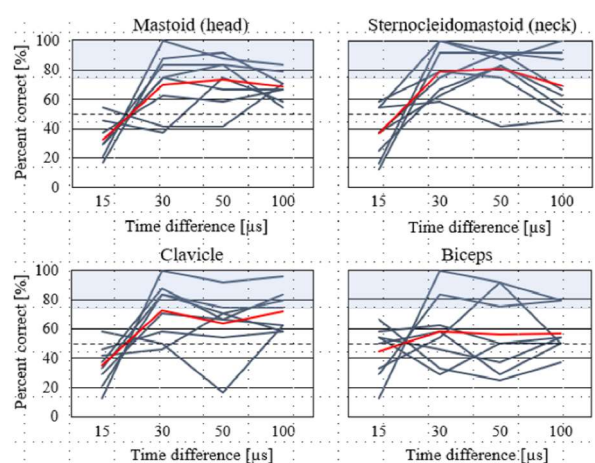


図 4 両耳間時間差 (ITD) による左右の骨導超音波の弁別率. 乳様突起, 胸鎖乳突筋, 鎖骨, 上腕筋に呈示した場合. 黒線: 各被験者のデータ, 赤線: 被験者間の平均値.

結果を図 4 に示す. Δt が $15 \mu\text{s}$ の場合を除き, 乳様突起, 胸鎖乳突筋, 鎖骨においてはほとんどの被験者で頭内定位がおよそ可能という結果であった. ただし, 上腕では被験者間のバラツキが大きく, 有意な頭内定位ができない被験者が半数に上った. また, 正答率は Δt が $30 \mu\text{s}$ で飽和しており, それ以降は有意な上昇は認められなかった.

2-2 左右チャンネル間のレベル差の影響

2 個の圧電セラミック振動子を用いて, 30 kHz トーンバーストを両側の乳様突起, 胸鎖乳突筋, 鎖骨の胸骨端, 上腕二頭筋に呈示した. 刺激条件は 2-1 に準じた.

刺激呈示シーケンスを図 5 に示す. 各施行において, 左右の強度差のない基準刺激が呈示された後, 連続する 2 区間においてレベル差を与えた比較刺激が呈示された. なお, レベル差は左右どちらかの刺激の音圧レベルを上昇させる方法で与え, 第 1 区間及び第 2 区間では左右の刺激の強度差を反転させた. 被験者には 2 区間のうち左側に音像が知覚された区間を回答するように指示した. 左側のチャンネルの音圧レベルを上昇させた区間と回答が一致した場合を正解とした.

結果を図 6 に示す. 全ての被験者において, 両側呈示した骨導超音波に与えた強度差に基づく左右の弁別が可能であった. 弁別閾は刺激呈示部位が頭部から離れるに従って上昇した. 弁別閾の上昇の程度には個人差があるものの, 半数以上の被験者で鎖骨の上腕二頭筋では顕著な閾値の上昇が観察された.

2-3 遠位呈示骨導超音波の両耳知覚特性のまとめ

刺激呈示部位が頭部から離れるに従って正答率の低下もしくはレベル弁別閾の上昇が観察されたものの, 左右に呈示した遠位呈示骨導超音波刺激間に時間差/レベル差を与えることで左右弁別が可能であった. この結果は, 鎖骨付近までであれば, 音源の到来方向の検知が可能であることを示している. もっとも, 得られた結果には被験者間のバラツキが観察されている. 伝搬経路となる各被験者の身体の解剖学的条件や, 振動子の固定具合の微妙なブレが結果のバラツキに繋がった可能性がある.

3. 遠位呈示骨導超音波の伝搬特性と解剖学的特徴の関係の検証

2 章の検討から, 鎖骨付近までであれば, 左右側の区別が可能であることが示されたが, 刺激呈示部位や被験者間のバラツキが大きかつ

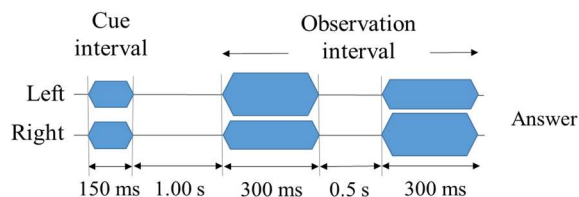


図 5 左右チャンネルにレベル差を与えた場合の刺激シーケンス.

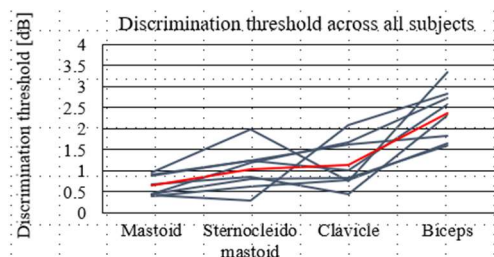


図 6 両耳間レベル差(ILD)による左右の骨導超音波の弁別率. 乳様突起, 胸鎖乳突筋, 鎖骨, 上腕筋に呈示した場合. 黒線:各被験者のデータ, 赤線:被験者間の平均値.

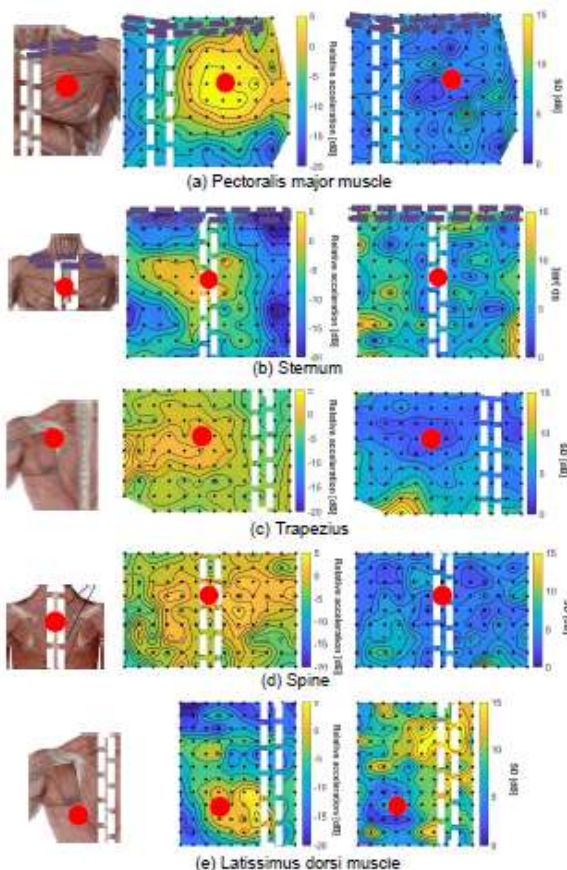


図 7 骨導超音波呈示時に計測される体表面振動分布. 赤丸は振動子位置を示す.

た. この結果は, 被験者の身体の解剖学的な特徴に依存している可能性がある. 胸部と背部に骨導超音波刺激を呈示した際の表面振動を計

測し、骨導超音波の体内伝搬と解剖学的特徴の関係を検討した。

聴覚健全男性の胸部および背部に 30 kHz 骨導超音波振動子を呈示した際に体表面に生じる振動分布を計測した。振動子は医療用両面テープ（ニチバンメディカル 1021）によって、胸部（鎖骨の胸骨端から 10 cm 下、かつ胸椎から 10 cm 左）および背部（隆椎から 10 cm 下、かつ脊椎から 10 cm 左）に貼付された（図 7）。また、体表面振動は、刺激点を基準として体表上に 2.5 cm 間隔で設定された各グリッド上で 96 kHz のサンプリング周波数にて計測した。計測には加速度センサ（小野測器 NP-3211）を用いた。

結果を図 7 に示す。振動子近傍の振動は胸骨に刺激を加えた場合が最小で、空間的な減衰は胸部よりも背部で緩やかであることがわかる。大きく比較的平坦な筋肉から構成される背部が、伝搬中のエネルギー損失を低減するのに役立つことを示唆している。

4. 2ch 遠位呈示骨導超音波デバイスの試作

これまでの成果に基づき、自動車運転時の重度難聴者の音像定位を可能にする 2ch 遠位呈示骨導超音波デバイスを試作した。

4-1 デバイスの概要

開発したデバイスは、2ch の指向性マイクロホンと 2ch の骨伝導振動子を有する。マイクロホンによって被験者の右側、左側から届く音をそれぞれ左右の骨導超音波チャンネルから呈示する（図 8）。

4-2 吸着式振動子の開発

吸盤で体表に固定される“吸着式振動子”を提案・試作し、その性能を評価した。

吸着式振動子の基本構造、大胸筋に呈示した様子、および外観をそれぞれ図 9 に示す。市販のプラスチックカップ内に、3D プリンタで作成した支持体を用いて圧電セラミック振動子

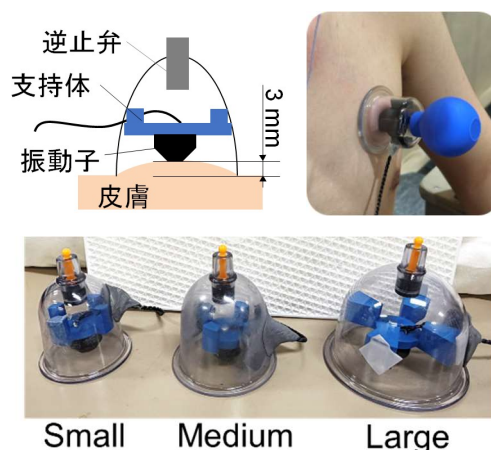


図 9 左上:吸着式振動子の基本構造. 右上:大胸筋への呈示の様子. 下:カップの直径の異なる 3 種類の試作器.

が固定されている。呈示部位毎に合わせてカップの直径の異なる 3 種類の振動子を試作した。

吸着型振動子の実用性能を評価するため、聴覚健全男性を対象として検出閾を計測した。呈示部位は胸部 2 点（大胸筋、胸骨）、背部 2 点（僧帽筋、脊柱）とした。

吸着式振動子の検出閾は、概してバンドを用いた従来の固定方式と遜色のないものであった。また、カップサイズ、即ち吸着面の面積が増すと吸着力は増大すると考えられるが、予想に反して検出閾が増加した。吸盤式振動子では吸着面の軟組織（皮膚など）がカップ内に吸引されるが、吸着面積が大きい振動子では、吸盤内に吸引される皮下組織量が増加するため、超音波の減衰が増大した可能性がある。吸着式振動子の使用時には考慮する必要があると思われる。

5. 今後の課題

本課題では、遠位呈示骨導超音波による基礎的な音像定位が可能であることを確認した。また、振動子の呈示部位や呈示方法の最適化に関する知見を利用して、自動車運転時の重度難聴者の音像定位を可能にする 2ch 遠位呈示骨導超音波デバイスを試作した。今後は様々な生活場面での実用性能を評価し、改善を施していく必要がある。

5. 研究成果の公表方法

研究成果は国内外の学術集会、英文の学術誌上で発表する。また、2ch 遠位呈示骨導超音波デバイスの要素技術にかかる特許申請を予定している。さらに、英文論文発表後には、研究代表者のホームページで広く発信する予定である。



図 8 自動車運転時の重度難聴者の音像定位を可能にする 2ch 遠位呈示骨導超音波デバイス

Development of an Auditory Assistance System for Automobile Driving for Individuals with Severe Hearing Loss

Primary Researcher: Seiji Nakagawa
Professor, Ctr. for Frontier Medical Eng., Chiba Univ.

Co-researchers: Sho Otsuka
Associate Professor, Ctr. for Frontier Medical Eng., Chiba Univ.
Xuiyuan Qin
Assistant Professor, Ctr. for Frontier Medical Eng., Chiba Univ.
Irwansyah
Assistant Professor, Ctr. for Frontier Medical Eng., Chiba Univ.

Ultrasound at frequencies of 20 kHz or higher presented via bone conduction, known as bone-conducted ultrasound, can be perceived even by individuals with severe hearing loss. Moreover, bone-conducted ultrasound can be clearly perceived even when it is presented at sites away from the head, that is, by distal presentation.

In this study, we applied our accumulated expertise in bone-conducted ultrasound research to develop an auditory assistive technology for individuals with severe hearing loss during automobile driving. In particular, we focused on enabling the identification of the direction from which warning sounds, such as sirens and car horns, arrive, namely sound localization.

The results showed that when bone-conducted ultrasound was presented to two left and right sites on the trunk or upper limbs, the presentation sites could be distinguished with practical accuracy. In addition, analysis of the vibration distribution observed on the trunk surface during bone-conducted ultrasound presentation showed that propagation efficiency improved when the stimulus was presented to regions with a flat surface and large underlying muscles. Based on these findings, we developed a prototype two-channel distally presented bone-conducted ultrasound device. In the future, we plan to evaluate its practical usability in daily-life situations.