

“からだで聞く”超音波を利用したコミュニケーション機器の開発

研究代表者：中川 誠司 千葉大学フロンティア医工学センター 教授

共同研究者：大塚 翔 千葉大学フロンティア医工学センター 准教授

Qin Xiuyuan 千葉大学フロンティア医工学センター 特任助教



1. 研究の背景と達成目標

背景

可聴周波数を超える超音波であっても、骨伝導であれば明瞭に知覚される。この骨導超音波は頭部以外の頸部、体幹、上肢といった“遠位”に呈示した場合も容易に知覚可能であり、対象者のみに選択的に音情報を呈示可能な新型オーディオ・デバイスへの応用が示唆されている。しかしながら、遠位呈示骨導超音波による音声・音響情報の伝達性能の解明や、デバイス応用時の最適構成や実装形態の検討は未だ不十分である。本研究では、遠位呈示骨導超音波の知覚・伝搬メカニズムに基づき音声明瞭度や音響情報の可搬性および音質の向上を図ったうえで、応用機器の開発に取り組んだ。

達成目標

- 頸部、体幹、上肢等といった頭部から離れた部位（遠位）や顔面、頭皮に呈示した骨導超音波および可聴帯域の骨伝導音の基礎知覚特性、音声知覚特性、および音質を調べる。
- ヒトの頭部や上肢、体幹の表面における振動計測、およびコンピュータ・シミュレーションを用いて骨導超音波の体内伝搬過程を明らかにする。
- 知覚特性や体内伝搬過程の結果に基づき、骨導超音波の変調方式、音声加工方式、および振動子呈示部位の最適化を図る。
- より実用的な振動子固定方式を提案し、その実用性能を検証する。また、遠位/顔面呈示骨伝導を用いた新型コミュニケーション・デバイスを試作し、その性能を評価する。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- 遠位呈示骨導超音波であっても、通常の聴覚（気導音聴覚）に遜色のない時間分解能、（音声帯域における）周波数分解能を持つことを明らかにした。また、頸部においては実用的な単音節明瞭度が得られることを明らかにした。
- 明瞭度や音質を向上させられる変調方式を検討し、DSB-TC 方式が最も明瞭性が高くなるものの、Transposed 方式は音質面で有利であることを見出した。
- ヒトの頭部や上肢、体幹の表面における振動計測の結果から、体内伝搬に伴う骨導超音波の距離減衰は可聴帯域の骨伝導音より遥かに小さいこと、その平坦な形状や伝播経路のシンプルさから、背部（広背筋、僧帽筋）で効率よく骨伝導音を呈示できることを見出した。
- 骨伝導振動子を粘着素材で装用・固定する方式（粘着式）、および吸盤で体表に固定する方式（吸盤式）を提案し、バンドやサポーター用いた従来手法との比較を行った。粘着面の面積や振動子構造を工夫することで、従来法に迫る聞こえが得られることを見出した。
- 40 kHz 気導超音波の基礎知覚特性の解明に取り組んだ。130 dB SPL 程度の音圧であれば実験に参加したすべての健常成人被験者が知覚可能であった。また、そのピッチは 11.85 kHz の気導音と同様であり、骨導超音波のピッチともおよそ等しいことがわかった。
- 骨導超音波知覚メカニズムにかかる成果は、ヒト聴覚の知られる機能に光を当てるものであり、聴覚

科学やその応用分野にインパクトを与える可能性がある。

- 遠位呈示骨導超音波を用いた、上肢や体幹で触れた対象者にだけ音声情報を呈示可能な新型コミュニケーション・デバイスの開発に有効な知見を提供する。また、骨伝導を用いた強大騒音下での音声コミュニケーションをデバイスの改良にも有用である。

3. 研究成果

- 頸部、体幹、上肢等といった頭部から離れた部位（遠位）に呈示された骨導超音波および可聴帯域の骨伝導音の基礎聴覚特性や音声知覚特性の解明に取り組んだ（図 1）。また、骨導超音波の変調方式を検討した。
 - (1) 時間分解能、音声帯域における周波数分解能は通常の聴覚（気導音聴覚）に遜色がないこと、頸部における単音節明瞭度は 60%程度に達することがわかった。
 - (2) マルチチャネル化の可否の検証を目的として、超音波領域および可聴周波数帯の骨伝導音を遠位呈示した際の音像定位特性を調べた。両側の側頭部（乳様突起）、頸部（胸鎖乳突筋）、鎖骨に呈示した骨伝導刺激に時間差および強度差を与え、左右側の弁別閾を調べた。その結果、気導音に比較して弁別閾が上昇する傾向が認められるものの、遠位呈示骨伝導においても時間差および強度差を手がかりとした音像定位が可能であることが示された。
 - (3) 超音波領域および可聴周波数帯の骨伝導音を頸部や体幹に呈示した際の音単語理解度と単音節明瞭度を測定した。超音波領域、可聴帯域にかかわらず、頸部や胸部であれば実用レベルの明瞭度、理解度が得られることがわかった。
 - (4) 音声情報を重畳させるための変調方式を検討した。遠位呈示骨導超音波による音声聴取に振幅変調方式、および音声そのものの時間周波数特徴が及ぼす効果を調べた。その結果、DSB-TC 変調、Transposed 変調で高い明瞭度が得られることがわかった。また、Transposed 方式は音質面で有利であることを見出した。
- 遠位呈示した骨導超音波および可聴帯域の骨伝導音の伝搬特性の解明に取り組んだ。
 - (1) ヒトの頭部や上肢の表面における振動計測の結果から、体内伝搬に伴う骨導超音波の距離減衰は可聴帯域の骨伝導音より遥かに小さいことを見出した。
 - (2) 胸部・背部・上肢に骨導超音波を呈示した時の検出閾および外耳道内振動を計測し、呈示部位の解剖学的構造と伝搬特性の関係を検討した。その結果、背部は胸部や上肢よりも有意に検出閾が低下し、外耳道内振動が増加した。背部は大きくて平坦な筋肉に覆われており、振動子とのカップリングが良好で、筋の接続部が少ないことが伝搬効率の上昇に繋がった可能性が示唆される。
- 顔面に呈示された可聴帯域の骨伝導音の知覚特性、伝搬特性の解明に取り組んだ。
 - (1) 顔面各部（鼻骨、眼窩下部、頬骨、下顎角、およびオトガイ隆起）に呈示された骨伝導音の基礎知覚特性および伝搬特性を調べた。その結果、顎を除く顔面頭蓋上の各部位の検出閾は、従来部位である乳様突起、前額部に遜色のない値を示した。

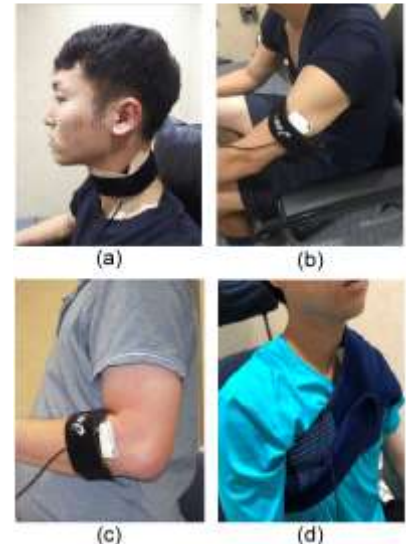
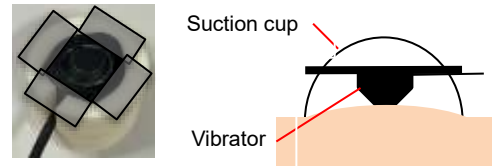


図 1 骨導超音波の遠位呈示の様子。伸縮バンドを利用して (a) 頸部、(b) 上腕、(c) 前腕、(d) 鎖骨、および胸部等に振動子を一定の押付圧で固定した。

- (2) 顔面の各部に骨伝導音を呈示した際の周波数弁別特性、時間弁別特性を調べた。その結果、中域および高域では、各顔面部位においても 従来部位および気導条件と同等の弁別能が得られた。
- (3) 顔面部位では従来部位（側頭骨の乳様突起、下顎骨の顎上突起）



粘着式

吸盤式

図2. 新しい振動子固定方式(粘着式および吸盤式)

- 実用的な振動子装用方式の提案、および新型コミュニケーション・デバイスの提案

- (1) 骨伝導振動子を粘着素材で体表に固定する“吸盤方式”を提案し、従来手法との比較を行った。その結果、従来方式と同等の検出閾が得られることを確認した。
- (2) 骨伝導振動子を吸盤で体表に固定する“粘着方式”を提案し、ヘッドバンドやサポーターで固定する従来手法との比較を行った。検出閾は吸盤の素材や構造を最適化することで、従来方式に遜色のない性能が得られることがわかった。

- 超音波聴覚メカニズム解明

- (1) 超音波聴覚の本質的なメカニズム解明を目指して、40 kHz 気導超音波の知覚特性の解明に取り組んだ。超音波アレイスピーカを用いた閾値計測およびピッチ推定の結果、その検出閾の平均は 133.3 ± 2.7 dB SPL に及ぶものの、全ての被験者が40 kHz 空中超音波を聴取可能であることを確認した。また、40 kHz 空中超音波のピッチは11.85 kHz の気導音と等しく、骨導超音波のピッチとおよそ同等であることを明らかにした。

4. 今後の展開

- 骨伝導のメリットを活かした各種のコミュニケーション・デバイスの開発に取り組む。
- (1) 遠位呈示骨導超音波を用いた、上肢や体幹で触れた対象者にだけ音声情報を呈示可能な新型コミュニケーション・デバイスの開発に取り組む。
- (2) “耳栓装用下でも容易に聴取可能”という骨伝導のメリットを活かして、耳栓装用が不可欠な強大騒音下での音声コミュニケーションを可能にするデバイスを開発する。
- (3) 外耳孔を塞がないという骨伝導のメリットを活かして、周囲環境音の聴取が必要とされる接客時やスポーツ時に利用可能なオーディオ・デバイスを開発する。また、当該デバイスで聴取する音と周囲環境音、それぞれの時間-周波数特性の類似度と聴取性能の関係を評価する。
- ヒトを対象とした心理計測、生理計測、計算機シミュレーションを駆使して、骨導超音波知覚のメカニズムの解明を進める。解明した骨導超音波知覚メカニズムに基づき、新たな聴覚デバイスの開発や超音波曝露安全基準の策定等に取り組む。



図3. 遠位呈示骨導超音波を使った各デバイスの実装形態案。
(a) 骨導超音波補聴器など、音声（言語音）の伝達を目的とする場合。
(b) 携帯端末の報知音の伝達を目的とする場合。

5. 発表実績

【論文】

1. Ishikawa H, Otsuka S, Nakagawa S, Threshold and frequency- and temporal resolutions of distantly presented bone-conducted sound in the audible-frequency range, Japanese Journal of Applied Physics, 61 SG1065, 2022.
2. Irwansyah, Otsuka S, Nakagawa S, Improved Low-Frequency Crosstalk Cancellation in Bone Conduction Using Bone Transducers and Probe Microphone, IEEE Access, 10, 79201-79212, 2022.
3. Uemura K, Otsuka S, Nakagawa S, Basic perception and propagation characteristics of bone-conducted sounds presented to facial parts, Japanese Journal of Applied Physics, 62, SJ1016, 2023.
4. Miwa A, Otsuka S, Nakagawa S, Occlusion effects by bone-conducted sound to the facial parts assessed by hearing threshold and ear canal sound pressure, Japanese Journal of Applied Physics, 62, SJ1016, 2023.
5. Irwansyah, Otsuka S, Nakagawa S, Unilateral Crosstalk Cancellation via Bone Conduction: Methods and Evaluation, Method X, 102394: 1-14, 2023.
6. Irwansyah, Otsuka S, Nakagawa S, Pinna Hardness and Vibrator Placement: Their Effects on Bone Conduction Through the Pinna, Acoustical Science and Technology, 45(5), 270-280, 2024.
7. Irwansyah, Otsuka S, Nakagawa S, 3D Printed Dummy Heads for Crosstalk Cancellation Studies in Bone Conduction, HardwareX, 21, e00618: 1-16, 2024.
8. Tamura A, Otsuka S, Nakagawa S, Effect of hematoma-induced changes in auricular hardness, thickness and volume on the propagation components of cartilage conduction hearing: assessments by hearing threshold and ear canal sound pressure. Japanese Journal of Applied Physics 64, 02SP45, 2025.
9. Takahashi N, Otsuka S, Nakagawa, Effects of anatomical characteristics of stimulus placements on the propagation and perception of distantly-presented bone-conducted ultrasound, Japanese Journal of Applied Physics, in press.

【学会発表（主な招待講演）】

1. 中川誠司, 骨伝導知覚のメカニズム解明とコミュニケーション・デバイスへの応用, 日本音響学会東海支部講演会, オンライン, 2022.4.
2. Nakagawa S, Elucidation of Mechanisms of Bone-conduction Perception and its Applications to Communication Devices, NICT International Seminar, Kobe, Japan, 2022.10.
3. 中川誠司, 骨伝導メカニズムの解明に基づく福祉機器開発, 日本生体医工学会育児工学未来研究会, 2023.7.
4. 中川誠司, 知っているようで知らない骨伝導, 千葉市科学館 大人が楽しむ科学教室, 千葉市, 2024.7..

【その他（主な受賞）】

1. Best Paper Award, The 2021 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Application (IC3INA 2021), 2021.10.
2. Student and YP Awards, International Institute of Noise Control Engineering, 2021.11.
3. 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門 研究奨励賞, 2023.9.
4. IEEE EMBS East and Central Japan Chapter/West Japan Chapter Young Researcher Award, 2023.9.
5. 若手奨励賞, 第4回日本小児リハビリテーション医学会学術集会, 2024.9.