

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：13501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K21314

研究課題名（和文）気導・骨導経路による自己聴取音声の伝達過程の解明

研究課題名（英文）Study on transmission process of one's own voice through air- and bone-conduction pathways

研究代表者

鳥谷 輝樹 (Toya, Teruki)

山梨大学・大学院総合研究部・特任助教

研究者番号：00911223

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、気導・骨導経路による自己聴取音声の伝達過程を明らかにすることを目的に、発話器官から聴覚器官に至る骨導伝達系の周波数特性を物理測定した。また、得られた伝達特性を用いて骨導音を模擬することで、気導・骨導経路の知覚的寄与を推測した。成果として、中耳・内耳に直達する骨導伝達経路と外耳道内に放射される骨導伝達経路では互いにことなる伝達特性を有することが分かった。また、骨導経路全体では気導経路と概ね同等の知覚的寄与を有し、骨導経路では外耳道内に放射される骨導経路の寄与が大きいことが分かった。本成果により、発話において骨導音声知覚が一定の役割を果たす可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発話者が自ら発した音声を自ら知覚する「聴覚フィードバック」という機構の存在が知られている。これまで、骨導音観測の難しさ等から、聴覚フィードバックにおける骨導音声知覚の役割は未解明であった。本研究では、骨導音の物理計測に加え、過去の生理学的知見等から自己聴取音伝達経路を仮定し、情報科学的なアプローチで自己聴取音知覚における骨導経路の役割を推測できた。得られた知見は、骨導聴取技術を用いた新しい発話支援等に応用できることが期待される。

研究成果の概要（英文）： This study attempted to clarify the transmission process of one's own perceived voice through air-conducted (AC) and bone-conducted (BC) pathways. (1) Measurement of the frequency characteristics of the BC pathway from the speech organ to the auditory organ using actual vocalizations and artificial sound excitation. (2) The perceptual contributions of the AC and BC pathways were estimated by simulating BC speech spectrum using the transmission characteristics obtained.

The results showed that (1) the BC pathway reaching the middle/inner ear and that radiating sounds into the ear canal had different transmission characteristics, and (2) the AC and total BC pathways had almost equal contribution to the own-voice perception, while the BC pathway radiating sounds into the ear canal had a larger contribution in comparison with the other BC pathway. Those findings suggest the role of BC speech perception on the auditory feedback.

研究分野：聴覚・音声，音響信号処理

キーワード：聴覚フィードバック 気導音声 骨導音声 自己聴取音 伝達特性

1. 研究開始当初の背景

ヒトは音声コミュニケーションにおいて、他者の音声を知覚し、自身の発話内容を意図し、自身の発話器官(声帯や声道)を運動させて音声を生成する。この一連の過程を、発話者は種々の音環境下において円滑に実現できる。このとき、音声知覚・生成の個々の働きのみならず、両者の相互的・一体的な働きが重要である。知覚と生成の相互作用として、発話者が自ら発した音声を自ら知覚する「聴覚フィードバック」という機構の存在が知られている。発話者が生成した音声に遅延や変形を施すと発話が変化することを示した知見から[1]、発話者自身が発して知覚する音声(自己聴取音声)のモニタリングの重要性が示されている。

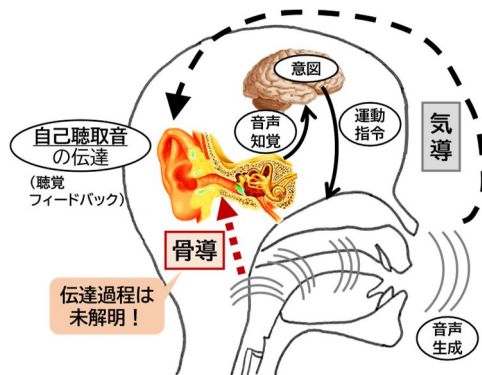


図1：発話者の音声生成・知覚過程

図1に、発話者の音声生成・知覚過程の概念図を示す。自己聴取音声は、口唇から空気を介して聴覚系に到達する経路(気導経路)と、発話器官から頭蓋骨や軟組織を介して聴覚系に到達する経路(骨導経路)の二種類の経路から伝達される。したがって、発話における聴覚フィードバック機構の全容解明には、気導経路および骨導経路から伝達される自己聴取音声(気導音声と骨導音声)の各々の知覚を通してどのような情報をモニタリングし、発話にどのように貢献しているかを明らかにする必要がある。

上述した従来知見[1]を通して、聴覚フィードバックにおける気導音声知覚の役割に関しては理解が進んでいる。一方で、聴覚フィードバックにおける骨導音声知覚の役割に関しては全くと言って良いほどに未解明であるという現状がある。その理由として、気導音声の伝達過程については音源・フィルタ理論等の情報科学的な理論・モデルが確立しているのに対して、骨導音声の伝達過程については経路の複雑さや観測の難しさ等により、統一的理解に至っていないという点が挙げられる。この現状を受けて、骨導経路を通じた情報伝達の様相を理解するためのボトムアップ的な知見の拡充が必要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、発話時の自己聴取音声知覚に関して、気導経路と骨導経路の両面に着目する。本研究の目的は、自己聴取音声知覚に関わる骨導経路の伝達過程を明らかにし、気導・骨導の両経路を通じた自己聴取音声の知覚メカニズムの理解を促進することである。具体的に、本研究では下記の検討項目を実施した。

(1) 骨導伝達系の情報科学的理解

発話器官から聴覚末梢系に至る骨導経路が、システムとしてどのような伝達特性を有しているかを検討すべく、発話により生じる頭部位置での振動および外耳道内放射音の周波数特性を解析し、発話器官から聴覚器官への骨導伝達系を推測した。

(2) 気導・骨導経路の知覚的寄与の検討

気導経路および複数の骨導経路が、発話中の自己聴取音声の知覚にそれぞれどの程度の割合で寄与しているのかを、音色に関する主観評価実験により検討した。

3. 研究の方法

(1) 骨導伝達系の情報科学的理解

発話時の骨導伝達経路の仮定

本研究では、Stenfelt による生理学的知見[2]に基づき、自己聴取音の伝達過程を図2のように、気導音声(P_A)、中耳・内耳に直接到達する骨導音声(P_B)、および外耳道内に放射される骨導音声(P_C)の3つの成分の足し合わせとして仮定した。中耳や内耳における解剖・生理学的側面から[3]、側頭部や乳様突起の振動特性は中耳や内耳に至る骨導経路の伝達特性を反映したものであると概ね推測できる。このため、発話時に観測される側頭部振動および外耳道内放射音の解析により、 P_B と P_C のスペクトルを推測した。

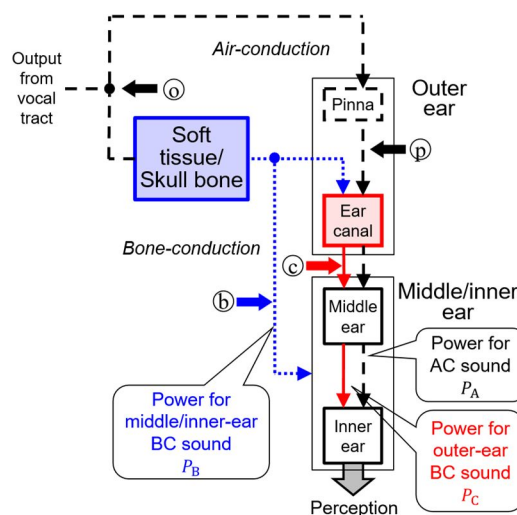


図2：本研究で仮定する自己聴取音伝達過程

発話時の骨導伝達特性の測定

図2のような収録環境において、発話時の気導音声および骨導音声を観測し、 P_A 、 P_B および P_C のスペクトル解析を実施した。得られた P_B および P_C のスペクトル P_A に対する比を求め、ヘッドホン受聴を考慮した外耳・中耳の伝達特性の補正を施すことで、気導音声スペクトルを基準とした2種類の骨導音声の伝達特性 $|H_{obp}(f)|$ および $|H_{ocp}(f)|$ (f :周波数)を算出した。

(2) 気導・骨導経路の知覚的寄与の検討

模擬骨導音声の合成

上記で得られた $|H_{obp}(f)|$ および $|H_{ocp}(f)|$ の振幅特性を満たすようなFIRフィルタを設計し、収録した気導音声に対してフィルタリングすることで、中耳・内耳に直達する経路および外耳道内放射経路に対応する模擬骨導音声を合成した。

主観評価による気導・骨導音声の混合比の決定

気導音声および2種類の模擬骨導音声を一定の混合比で足し合わせ、自己聴取音の聴感を模擬する音声刺激を作成した。このとき、気導音声に対する骨導音声の混合比($L_{(B+C)/A}$)および、2種類の骨導音声の混合比($L_{B/C}$)を

$$L_{(B+C)/A} = 10 \log_{10}\{(P_B + P_C)/P_A\},$$

$$L_{B/C} = 10 \log_{10}(P_B/P_C)$$

と定義し、音声刺激が自己聴取音に聴感上もっとも類似するような $L_{(B+C)/A}$ および $L_{B/C}$ の条件を主観評価(調整法およびトーナメント法(図3))により決定した。

4. 研究成果

(1) 発話時の骨導伝達特性の測定

図4に、気導音声を基準とした側頭部振動の伝達関数($|H_{obp}(f)|$)および外耳道内放射音の伝達関数($|H_{ocp}(f)|$)を示す。 $|H_{obp}(f)|$ は主に1 kHz以下の低域成分を通過させる高域減衰特性を有するのに対し、 $|H_{ocp}(f)|$ は3 kHz付近の成分を通過させる帯域通過特性を有することが示唆された。測定時の雑音混入を防ぎ安定した伝達関数を得るため

に、顔面周辺に遮音壁を設置して気導音を遮断した状態で再度骨導伝達特性を測定した。遮音壁により、発話時に話者の頭部付近に到達する気導音が約5~10 dB減衰することを確認した。この下で、側頭部振動の伝達関数は上記と同様の高域減衰特性を有した一方、外耳道内放射音の伝達関数については主に1 kHz以上の高域で上記とは異なる特性を有することが明らかになった。

現在のところ、伝達関数の算出過程において位相情報が未知であることから、骨導伝達特性の中でも振幅特性のみの議論に留まっている。今後、本研究における物理的測定に加えて純音抑圧実験等の心理物理測定を実施することで、経路の位相特性についても検討する予定である。

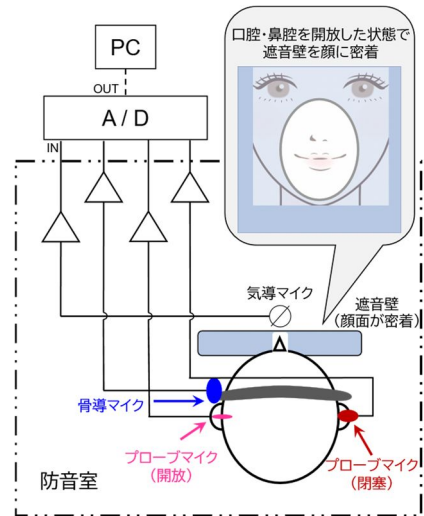


図2：発話時の気導・骨導音声収録の概略

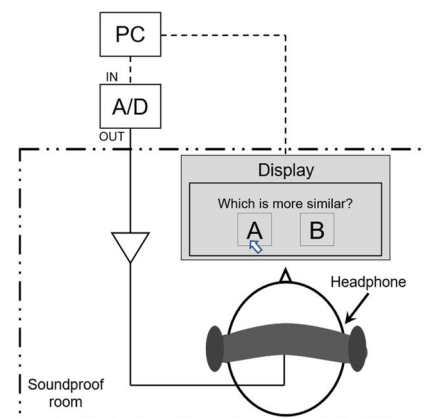


図3：混合比の主観評価実験の概略

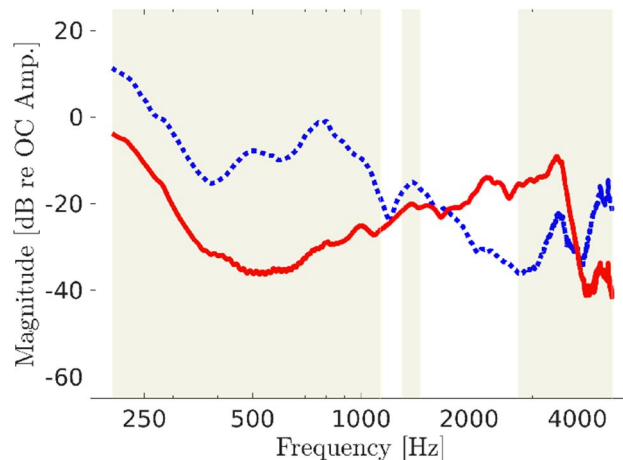


図4：気導音声を基準とした側頭部振動($|H_{obp}(f)|$, 点線)および外耳道内放射音の伝達関数($|H_{ocp}(f)|$, 実線)

(2)- 主観評価による気導・骨導音声の混合比の決定

図 5 に、実験参加者 10 名に対する混合比 $L_{(B+C)/A}$ および $L_{B/C}$ の主観評価結果を示す。 $L_{(B+C)/A}$ については概ね 0 dB 付近であることが分かり、従来知見[4]と同様に骨導経路全体では気導経路と概ね同等の知覚的寄与を有する可能性が示唆された。一方、 $L_{B/C}$ については参加者による個人差が大きかったものの、中央値は約-4 dB であり、外耳道内放射を經由する骨導経路は中耳・内耳に直達する骨導経路に対してパワー換算で少なくとも 2 倍以上の知覚的寄与を有する可能性が示唆された。

ここで決定する混合比は、自己聴取音模擬に用いる模擬骨導音声合成のためのフィルタの設計精度の影響を大きく受ける。今後は、(1)- の伝達特性測定を安定して実施した上で、種々のフィルタ設計手法を比較検討していく予定である。

本研究で得られた成果は、あらゆる話者に対する自己聴取音の音色を模擬する拡張現実(VR)技術等に应用できることが期待される。

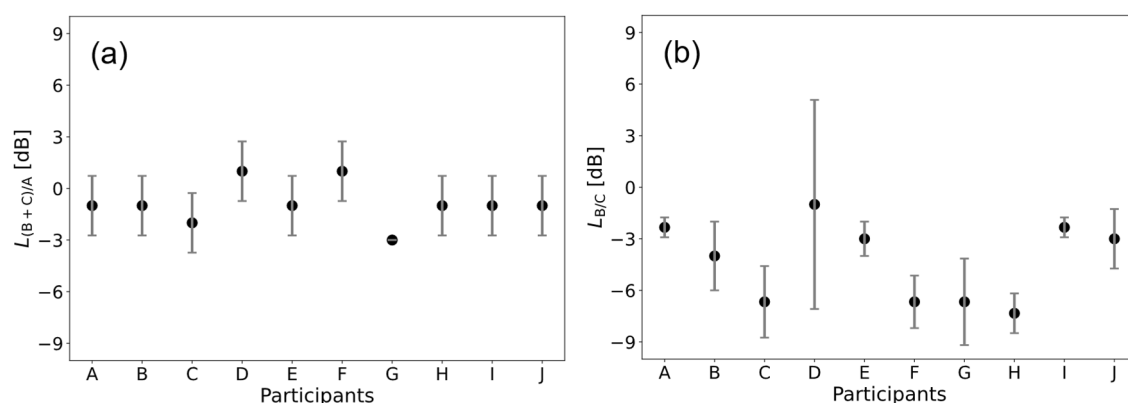


図 5：主観評価により決定された自己聴取音中の混合比：(a) 気導音声に対する骨導音声の混合比 ($L_{(B+C)/A}$)、(b) 2 種類の骨導音声の混合比 ($L_{B/C}$)

上記の研究成果をまとめ、査読付国際会議論文への投稿を予定している。

参考文献

- [1] S. H. Chen, H. Liu, Y. Xu, and C. R. Larson, "Voice F0 responses to pitch-shifted voice feedback during English speech," *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(2), 1157–1163, 2007.
- [2] S. Stenfelt, "Acoustic and physiological aspects of bone conduction hearing," *Advances on Oto-rhino-Laryngology*, 71, 10–21, 2011.
- [3] S. Stenfelt, N. Hato, and R. L. Goode, "Factors contributing to bone conduction: The middle ear," *J. Acoust. Soc. Am.*, 111(2), pp. 947–959, 2002.
- [4] G. von Békésy, "The structure of the middle ear and the hearing of one's own voice by bone conduction," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 21, pp. 217–232, 1949.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 鳥谷輝樹, BIRKHOLZ Peter, 鷗木祐史
2. 発表標題 遮音壁による気導音遮断の下での骨導音声の伝達特性の測定
3. 学会等名 日本音響学会聴覚研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥谷輝樹, BIRKHOLZ Peter, 鷗木祐史
2. 発表標題 発話時の骨導伝達特性の測定における気導音遮断の検討
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruki Toya, peter Birkholz, Masashi Unoki
2. 発表標題 Subjective evaluation regarding mixing ratio of bone-conducted to air-conducted speech for own-voice perception
3. 学会等名 24th International Congress on Acoustics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------