

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282130

研究課題名(和文) 新型補聴器の開発のための骨導超音波の末梢伝搬・受容メカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of peripheral mechanisms of bone-conducted ultrasonic perception for the development of a novel hearing aid for the profoundly hearing impaired

研究代表者

中川 誠司 (Nakagawa, Seiji)

千葉大学・フロンティア医工学センター・教授

研究者番号：70357614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：骨導(骨伝導)で呈示された超音波であれば、聴覚健常者のもとより、最重度難聴者にも知覚される。この骨導超音波知覚の末梢処理過程には、通常の聴覚とは異なる特異なメカニズムの存在が示唆されるが、その詳細は明らかにされていない。本提案課題では、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(骨導超音波補聴器)の開発に有用な知見の獲得を目指して、骨導超音波知覚メカニズムの全体像の解明に取り組んだ。聴覚末梢機能を反映する各種の生理反応の計測および骨導超音波の頭部内伝搬特性結果に基づき、骨導超音波知覚の末梢～中枢処理モデルを提案した。得られた知見は骨導超音波補聴器の最適化や適用基準の策定に有用である。

研究成果の概要(英文)：Bone-conducted ultrasound (BCU) can be perceived even by the profoundly hearing impaired who cannot use conventional hearing aids. However, mechanisms of the BCU perception, especially the peripheral mechanisms remain unclear. In order to obtain useful information for the development of a novel hearing aid for the profoundly hearing impaired using BCU, we investigated the mechanisms of BCU perception from the periphery to the central nervous system. Psychological characteristics, neurophysiological responses, and the wave propagation property in the inner head were measured. Also, based on results of these measurements, the perception model of BCU perception was proposed. The results obtained provide useful information to optimize the BCU hearing aid and to establish its application guideline.

研究分野：生体医工学

キーワード：骨伝導 超音波 聴覚 知覚メカニズム 補聴器 重度難聴

## 1. 研究開始当初の背景

周波数 20 kHz 以上の超音波であっても、骨導(骨伝導)で呈示された場合(骨導超音波)は、聴覚健常者のみならず最重度感音性難聴者にも知覚可能であることが報告されている(Lenhardt et al. 1991). 申請者らはこの知覚現象の存在を神経生理データで客観的に証明したうえで、そのメカニズム解明と、重度難聴者にも使用可能な新型補聴器(骨導超音波補聴器)への応用に取り組んできた(Nakagawa et al. 2006, Nakagawa 2012, 図 1). 現在、骨導超音波補聴器のプロトタイプによって最重度難聴者の半数が音声を知覚可能、3 割程度が簡単な単語の理解まで可能という画期的成果を挙げている(Nakagawa et al., 2006). 補聴器メーカー・リオン(株)や奈良県立医大との連携のもと、近い将来の実用化が期待されている。

その一方で、骨導超音波知覚の神経生理メカニズム、特に末梢メカニズムには、未だに不明な点が残されている。これまでの申請者らの研究から、骨導超音波といえども聴神経以降の神経伝導路を通常の音(空気を介して知覚される音 = 気導音)と共有していることや(Nakagawa 2009 など)、聴覚野の処理メカニズムには気導音との本質的な差異はないこと(Nakagawa et al. 2008 など)等が示された。また、骨導超音波知覚であっても蝸牛が関与していることが、心理データ(骨導超音波が気導音に及ぼすマスキング効果の確認, Nishimura et al. 2003)、生理データ(蝸牛神経の活動電位の確認, Nakagawa 2009 など)の両面から強く示唆されている。しかしながら、“重度感音性難聴者にも知覚可能”という事実や、“骨導超音波のピッチ(主観的な音の高さ)は十数 kHz の気導音に相当し、周波数を 100 kHz 程度まで増大させても変化しない(Kono et al. 1985, Nakagawa et al. 2005 など)”, “ラウドネス(主観的な音の大きさ)のダイナミックレンジは 20 dB 以下で、気導音に比べてかなり小さい(Nishimura et al. 2003)”といった特徴的な知覚特性は、気導音との間に何らかのメカニズムの差異が存在する可能性を示している。その差異は末梢の蝸牛内での処理に存在する可能性が高いと考えられるが、それを直接的に示すような実験結果は得られていない。

## 2. 研究の目的

本課題では、骨導超音波知覚が持つ末梢知覚メカニズムの特異性(気導音知覚との差異)を明らかにすることを目的とする。

先に述べたように、骨導超音波知覚の特異性は蝸牛内メカニズム、つまりは蝸牛内の各構造物の振る舞いに依存する可能性が高い。具体的には、(1)音入力に対し共振振動を生じる基底膜や、(2)基底膜の上に存在し、機械的振動エネルギーを電気的エネルギーに変換する役割を持つ内毛細胞、さらには(3)自発的伸縮によって内毛細胞の活動を修飾する(音圧に応じて応答感度を調節することでダイナミックレンジを拡大し、かつ周波数分解能を上昇させる)外毛細胞に、気導音とは異なる特異な振動モードや活動様式



図 1 申請者らが開発した骨導超音波補聴器(BCUHA-007). 音声や環境音によって約 30 kHz の超音波が振幅変調され、振動子によって片側の乳様突起に呈示される。

が生じている可能性が疑われる。また、これらの蝸牛内の構造物や蝸牛殻、および頭部全体の持つ共振特性が、知覚に影響を与えている可能性もある。

本課題では、ヒトを対象とした種々の計測(電気生理計測、心理計測や頭部表面における振動計測)や頭部内伝搬過程の計算機シミュレーションを駆使して、骨導超音波の末梢知覚メカニズムの解明に有用な知見の獲得を図った。また、与えている可能性のあるこれらの要因を検証する。得られた成果を利用して、骨導超音波知覚の末梢処理過程をシミュレート可能な計算機モデルを構築し、末梢知覚メカニズムについて検証した。また、聴覚末梢機能を反映する各種の生理反応の計測および骨導超音波の頭部内伝搬特性結果に基づき、骨導超音波知覚の末梢～中枢処理モデルの提案を試みた。

## 3. 研究の方法

以下の課題に取り組んだ。

- 1) 蝸電図計測による基底膜運動、有毛細胞活動の推定  
刺激音によって誘発される蝸牛内の電気的活動の観察した。
- 2) うなりの計測による蝸牛応答特性の推定  
骨導超音波と周波数を変化させた気導音、骨導可聴音の間のうなりの発生の有無を検証した。
- 3) 生体頭部を対象とした振動計測  
被験者の頭部を対象とした振動計測を行い、頭部内で生じるマルチパス伝搬経路を推定する手法を提案した。
- 4) 音響放射計測による外有毛細胞機能の推定  
蝸牛運動によって発生した“音”が中耳伝音系を逆行的に伝わり、外耳道に放射される現象を“耳音響放射”と言い、特に音を増幅する作用を持つ外有毛細胞機能を反映するとされる。骨導超音波聴取時の耳音響放射計測を行い、骨導超音波知覚におよぼす外有毛細胞機能の機能を評価した。

5) ヒト頭部計測およびコンピュータ・シミュレーションによる頭部内伝搬過程の推定

頭部内での骨導超音波伝搬過程を、ヒトの頭部を対象とした計測およびコンピュータ・シミュレーションで明らかにした。

6) 聴覚中枢神経系メカニズムの検討

重度難聴者を対象とした脳磁界計測や脳波計測を用いて、骨導超音波知覚における脳幹～皮質活動の詳細を検討した。聴覚健常者を対象とした計測における気導可聴音との異同から、骨導超音波知覚に独特の中枢神経系メカニズムの有無を検討した。

7) 骨導超音波知覚モデルの構築

各種検討で得られた知見を考慮して、骨導超音波知覚の末梢～中枢処理モデルを構築した。

4. 研究成果

1) 蝸電図計測による基底膜運動、有毛細胞活動の推定

骨導超音波知覚に対しては蝸電図の一部の反応(CM, SP)が認められないことから、蝸牛の外有毛細胞の寄与が小さい可能性を明らかにした。

2) うなりの計測による蝸牛応答特性の推定

骨導超音波と可聴音の間にならみが全く観察されないことから、骨導超音波知覚における末梢メカニズムの特異性が示された。

3) 生体頭部を対象とした振動計測

頭部内で生じるマルチパス伝搬経路を推定する手法を提案した。今後実施予定の頭部内伝搬シミュレーションの高精度化に有用な知見を得た。

4) 音響放射計測による外有毛細胞機能の推定

複数の計測装置(マイクロホン, アンプ)を用いて、慎重に繰り返し実験を行ったが、骨導超音波への応答を示唆する耳音響放射成分は計測されなかった。このことは、骨導超音波知覚においては外有毛細胞の寄与が小さい可能性を改めて示すものと考えられる。

5) ヒト頭部計測およびコンピュータ・シミュレーションによる頭部内伝搬過程の推定

加速度センサを用いた頭部振動計測の結果からは、生体組織の非線形性による有意な可聴周波数成分の発生は生じていないことや、骨導超音波知覚に及ぼす波動成分の伝搬速度が推定された。また、コンピュータ・シミュレーションの結果と併せて、骨伝導知覚において複数の伝搬ルート(マルチパス)が生じている可能性が示された。

6) 聴覚中枢神経系メカニズムの検討

重度難聴者に対しても通常と同様の聴性脳幹反応や聴覚野活動が観察された。また、大脳皮質における十数kHzのトノトピシティと骨導超音波に対する聴覚野活動の関係を検討した。その結果、骨導超音波は気導可聴音におけるトノトピシティに従わないことがわかった。これらの結果は、骨導超音波知覚といえども通常の聴覚と中枢神経経路を共有しており、特有の処理経路が存在するわけではないこと、骨導超音波知覚と気導可聴音のメカニズムの違いは、主として末梢に存在することを示唆する。

7) 骨導超音波知覚モデルの構築

骨導超音波知覚の末梢～中枢処理モデルを構築し、心理物理計測の結果や生理反応との比較からその妥当性を検証した。現在、さらなる改良を加えるための検討を継続中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 35 件)

- ① Otsuka A, Yumoto M, Kuriki S, Hotehama T, Nakagawa S, Frequency characteristics of neuromagnetic auditory steady-state response to sinusoidally amplitude modulated chirp tones, Clin. Neurophysiol., 127, 790-802, 2016. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2015.05.002 査読有
- ② Ito K, Nakagawa S, Self-demodulation effect on amplitude-modulated bone-conducted ultrasonic hearing, Jpn. J. Appl. Phys., 54, 07HF07:1-6, 2015. DOI:http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.07HF07 査読有
- ③ Ito K, Nakagawa S, Characterization of human head vibration with bone-conducted ultrasonic stimulation, Jpn. J. Appl. Phys., 53, 07KF04:1-5, 2014. DOI:10.7567/JJAP.53.07KF04 査読有
- ④ Okayasu, T, Nishimura T, Nakagawa S, Yamashita A, Nagatani Y, Utratani Y, Yamanaka T, Hosoi H, Evaluation of Discrimination of prosodic change in speech-modulated bone-conducted ultrasound evaluated with mismatch fields, Neurosci. Lett., 559, 117-121, 2014. DOI:10.1016/j.neulet.2013.11.048 査読有
- ⑤ Nishimura T, Okayasu T, Saito O, Shimokura R, Yamashita A, Yamanaka T, Hosoi H, Kitahara T, An examination of the effects of broadband air-conduction masker on the speech intelligibility of speech-modulated bone-conducted ultrasound, Hear. Res., 317:41-49, 2014. DOI:10.1016/j.heares.2014.09.012 査読有

- ⑤ Ito K, Nakagawa S, Self-demodulation effect on amplitude-modulated bone-conducted ultrasonic hearing, Jpn. J. Appl. Phys., 54, 07HF07:1-6, 2015. DOI:http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.07HF07 査読有

[学会発表] (計 97 件)

- ① Nakagawa S, Soeta Y, Ishimitsu S, Evaluation of auditory impression by autocorrelation analyses of brain magnetic alpha waves, The 2014 International Conference on Complex Medical Engineering, Taipei, Taiwan, 2014.6.18-21
- ② Otsuka A, Yumoto M, Kuriki S, Nakagawa S, Frequency characteristics of neuromagnetic auditory steady-state response to sinusoidally amplitude modulated sweep tones, Proceedings of the 2014 International Conference on Complex Medical Engineering, Taipei, Taiwan, 2014.6.18-21
- ③ 中川誠司, 非侵襲計測によるヒトの聴覚・音声知覚・言語機能の解明, 第 62 回 NINJAL (国立国語研究所)コロキウム, 東京都立川市, 2015.10.13
- ④ 中川誠司, 聴覚と音響の人間・福祉・医工学, 産業競争力懇談会 (COCN) 「安心・安全・快適の実現に向けた空間ソリューション」プロジェクト 2015 年度第 4 回全体会, 東京都港区, 2015.9.30
- ⑤ 中川誠司, 骨伝導知覚の解明に基づく福祉機器や生活機器の開発, 千葉大学医工学研究会, 千葉市, 2016.10.17
- ⑥ 中川誠司, 骨伝導メカニズムの解明に基づく福祉機器・音響機器の開発, 育児工学未来研究会, 東京未来大学, 東京都足立区, 2017.3.9
- ⑦ Otsuka A, Yumoto M, Kuriki S, Nakagawa S, Frequency characteristics of neuromagnetic auditory steady-state responses at the supra-threshold level, The 5th joint ASA/ASJ meeting, Hilton Hawaiian Village, Honolulu, Hawaii, USA, 2016.11.28-12.2

[図書] (計 3 件)

- ① 中川誠司 他, 科学立国 日本を築く Part II 次代を拓く新進気鋭の研究者たち 日本工業出版社, 2017

[産業財産権]

○出願状況 (計 8 件)

名称: Method and device for measurement of propagation delay characteristic in multipath propagation environment, and external audio perception device

発明者: Seiji Nakagawa, Takuya Hotehama

権利者: (国研)産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 14/899, 053

取得年月日: 2015/12/16

国内外の別: 米国

名称: Method and device for measurement of propagation delay characteristic in multipath propagation environment, and external audio perception device

発明者: Seiji Nakagawa, Takuya Hotehama

権利者: (国研)産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 10-2015-7035090

出願年月日: 2015/11/5

国内外の別: 韓国

名称: マルチパス伝搬環境における伝搬遅延特性の測定方法および装置

発明者: 中川誠司, 保手浜拓也

権利者: (国研)産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2016-024542

出願年月日: 2016/2/12

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://www.cfme.chibau.jp/~nakagawa/index.html>

<https://www.facebook.com/NakagawaLab/>

<http://www.tms.chiba-u.jp/div.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中川 誠司 (NAKAGAWA, Seiji)

千葉大学・フロンティア医工学センター・教授

研究者番号: 70357614

(2)研究分担者

添田 喜治 (SOETA, Yoshiharu)

国立研究開発法人 産業技術総合研究所・バイオメディカル研究部門・主任研究員

研究者番号: 10415698

西村 忠己 (NISHIMURA, Tadashi)

奈良県立医科大学・医学部・講師

研究者番号: 60364072

細井 裕司 (HOSOI, Hiroshi)

奈良県立医科大学・医学部・学長

研究者番号: 80094613

(3)研究協力者

大塚 明香 (OTSUKA, Asuka)

国立研究開発法人 情報通信研究機構・研究員

今田 俊明 (IMADA, Toshiaki)

Director of Language Neuroimaging Lab.

Institute for Learning & Brain Sciences, University of Washington

クール パトリシア N. (KUHL, Patricia K.)

Co-Director, Institute for Learning & Brain  
Sciences, University of Washington

メロツォフ アンドリュー N. (MELTZOFF,  
Andrew N.)

Co-Director, Institute for Learning & Brain  
Sciences, University of Washington