

RK-001

## 明瞭度試験による気導音, 骨導可聴音および骨導超音波の音声知覚傾向の比較 Monosyllable articulation tests by air-conducted, bone-conducted audible, and bone-conducted ultrasonic sounds

中川 誠司†, 藤崎 恵美子†, 岡本 洋輔†  
Seiji Nakagawa, Emiko Fujisaki, Yosuke Okamoto

### 1. はじめに

骨導で呈示された周波数 20 kHz 以上の高周波 (骨導超音波) であれば, 聴覚健常者のもとより, 通常の補聴器では聴覚が得られない重度感音性難聴者にも知覚されることが報告されている[1]. 我々は骨導超音波が重度難聴者にも知覚される場合があること, さらに骨導超音波を振幅変調することによって重度難聴者に音声伝達が可能であることを客観的に証明したうえで[2, 3], この現象を応用した重度難聴者のための補聴器 (骨導超音波補聴器) の開発に取り組んでいる[4].

我々は骨導超音波補聴器の変調方式として DSB-TC (Double sideband-transmitted carrier)方式を用いることで, ある程度の音声伝達ができることを示した[4, 5]. また, DSB-TC方式, DSB-SC (Double sideband-suppressed carrier)方式, および下側波帯を利用した SSB (Single sideband)方式の3種類の振幅変調方式を用いた日本語単音節明瞭度試験を実施し, 変調方式による聞こえの違い, 男声・女声の違いによる聞こえの違い, さらに異聴表からみた知覚傾向について検討を行ってきた[6, 7].

これまでの研究では骨導超音波が気導音よりも明瞭度が低いこと[4-6]や拗音への異聴が高いこと[5, 7]が示された. しかし, このような気導音との知覚傾向の違いが骨導という呈示方式によるものなのか, 振幅変調した超音波を呈示していることに起因するものなのかは不明である.

また, 振幅変調方式については, DSB-TC方式が最も明瞭度が高く知覚傾向が気導音のそれに近いこと, 全ての方式および気導音において女声の方が男声よりも明瞭度が高いことがわかった[6, 7]. 話者 (性別) の影響に関しては, 実験に使用したものと同一話者による音声を使用した気導音単語聴取試験においても女声の方が男声より了解度が高いという報告もあり[8], 刺激音に依存した傾向である可能性もある. しかし, 骨導超音波知覚における話者の影響が, 刺激音に依存するものか, 骨導超音波特有のメカニズムによるものかは不明である.

本稿では, これらの点を詳細に検討し, 骨導超音波の内部機構の最適化に有用な知見を得るため, 気導音 (AC), 骨導可聴音 (BC) および DSB-TC方式の骨導超音波 (BCU) の単音節明瞭度と異聴傾向を比較した.

### 2. 骨導超音波補聴器 (BCUHA) の概要

骨導超音波補聴器では, 音声で振幅変調された約 30 kHz の超音波が骨導で呈示される. DSB-TC方式で振幅変調された場合には, 使用者には搬送波である 30 kHz 正弦波に由来する十数 kHz のピッチと, 復調された音声を知覚され

る[5, 9].

現行試作機 (AIST-BCUHA-5, Fig. 1)[3] では胸ポケットに収まる程度の実用的な小型化を実現している. また, 高性能 DSP の搭載によって, ノイズリダクション機能, 音声信号変換機能 (音程変換, 周波数圧縮など), 変調度保持機能, 非線形ゲイン設定機能, 較正信号発信機能などを有している. なお, 補聴器各部の仕様は骨導超音波知覚特性研究の成果に即して決定されている.

### 3. 実験

#### 3.1 被験者

日本語を母語とする聴覚健常者 11 名 (女性 1 名, 22-37 歳) を被験者とした.

#### 3.2 呈示音声

「親密度別単語了解度試験用音声データベース (FW03)」 (NTT-AT) に収録されている, 男声・女声各 1 名分の日本語単音節 100 個 (計 200 個) を用い, 以下の条件で呈示した.

- 気導音 (AC) : ヘッドホンにより片耳に呈示
- 骨導可聴音 (BC) : 骨導振動子により片側乳様突起に呈示
- 骨導超音波 (BCU) : 各音声によって 30 kHz 骨導超音波に DSB-TC方式の振幅変調を施したもの. 変調にあたっては, 過変調が起こらない様に音声振幅を調整した. また, 単位時間あたりのエネルギーが一定になるように, 変調後の刺激音の振幅を調整した. BC同様, 振動子により片側乳様突起に呈示した.

#### 3.3 刺激呈示と手続き

各被験者につき, それぞれ 200 個の音声を前節の 3 条件で呈示した. 骨導呈示においては振動子をヘッドギアによって約 5.1 N の押付圧で被験者の片側の乳様突起に固定された. なお, 刺激側は被験者の希望によってより聴取しやすい側を選択された. 被験者には, 聴取された単音節をひらがなで書き取るように教示した.

実験は呈示条件と話者を固定した単音節 100 個ごとのセッションにわけて実施された. 各セッションの始めに,



Fig.1. A prototype of the bone-conducted ultrasonic hearing-aid (BCUHA). Body size: 64 \* 118 \* 24 mm, Weight: 178 g.

†独立行政法人産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門

ACおよびBCについては1kHz トーンバーストに対して、BCUについては音声で振幅変調された刺激音と単位時間あたりのエネルギーが等しい、1kHz トーンで振幅変調された30kHz 骨導超音波トーンバーストに対する閾値計測を行った。各被験者について推定された閾値に基づいて刺激音圧を25dB SLに設定した。各セッションでは100個の刺激音がランダムな順序、および5.0秒の間隔を持って呈示された。なお、前後半各50個の刺激音の間には20秒の休憩を取らせるようにした。

なお、実験は防音室内で被験者1名ごとに行われた。実験後に男声・女声の声質の違いに関する印象についてアンケートを取った。

4. 結果

4.1 明瞭度

各条件における明瞭度を Fig.2 に示す。分散分析の結果、BCUおよびBCに比べてACの明瞭度が有意に高かったが、BCとBCUの間に有意差は認められなかった。また、AC、BCUでは女声の方が男声よりも有意に明瞭度が高かった。アンケートでは、ACおよびBCUについては11名中8名、BCでは6名が女声の方が男声より聞き取りやすいと報告した。

4.2 異聴傾向

それぞれの条件の異聴表を作成した。以下の傾向が観察された。

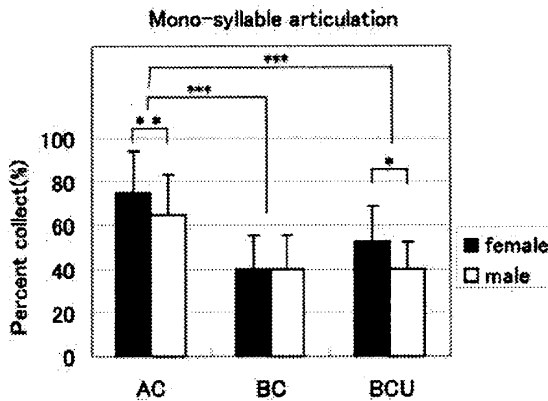


Fig.2 Averaged scores of mono-syllable articulation tests for AC, BC, and BCU (mean+S.D.,\*\*\*:p<0.001, \*\*:p<0.01, \*:p<0.05)

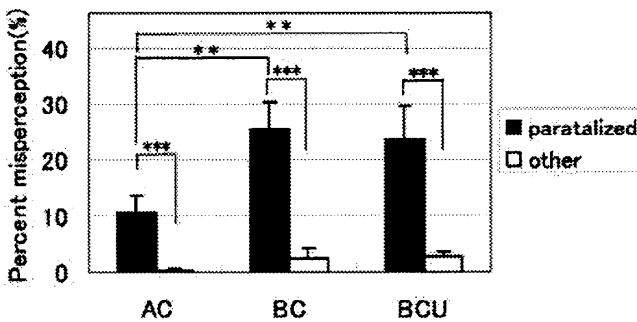


Fig.3 Percent misperception to /j/ from the palatalized and others (mean+S.D.,\*\*\*:p<0.001, \*\*:p<0.01)

4.2.1 カテゴリ別異聴

各異聴表を母音、無声子音、有声子音(破裂音・摩擦音)および他の有声子音の4つにカテゴリ化し、それぞれのカテゴリ内で正答を含めた同一カテゴリ内への回答率を調べた(Table.1)。その結果、ACではどのカテゴリにおいてもカテゴリ内の回答率は約83-90%でほぼ一定であることがわかった。また、BCおよびBCUでは他のカテゴリ内回答率が71-84%程度であったのに対して、有声子音である破裂音・摩擦音内での回答率がそれぞれ約56%、66%と低く、他の有声子音に対し33%、23%異聴していた。

4.2.2 母音の異聴

ACおよびBCでは母音カテゴリ内での異聴は生じなかった。対して、BCUでは /u/ から /i/ に14%、また /e/ から /o/ に4.5%の異聴が見られた。それ以外は母音内での異聴は全く見られなかった。さらに、BCおよびBCUにおいては /i/ の子音への異聴が極端に高く、それぞれ50%、68%であった。/i/ 以外の母音の子音への異聴率は32%以下であった。

4.3.3 拗音から /j/ への異聴

全ての刺激において、拗音が /j/ に異聴される傾向が認められた。その異聴率は、AC(約11%)に比べてBCおよびBCUがそれぞれ25%、24%で有意に大きかったが、

Table.1 Confusion matrix on category (a)-(d) of AC, BC, and BCU

- (a) vowels
- (b) unvoiced consonants
- (c) voiced consonants (plosives and fricatives)
- (d) other voiced consonants

		AC			
		category of perceived phoneme			
category of spoken phoneme		(a)	(b)	(c)	(d)
	(a)	88.18	0	8.181	3.636
	(b)	2.667	83.68	10.53	3.133
	(c)	0.39	2.208	82.94	14.47
	(d)	0.228	0.499	9.634	89.64

		BC			
		category of perceived phoneme			
category of spoken phoneme		(a)	(b)	(c)	(d)
	(a)	73.64	0.909	9.999	15.45
	(b)	5.86	71.83	10.29	12.02
	(c)	2.864	8.059	55.76	33.32
	(d)	1.781	1.97	12.69	83.56

		BCU			
		category of perceived phoneme			
category of spoken phoneme		(a)	(b)	(c)	(d)
	(a)	70.55	6.363	14.82	8.272
	(b)	3.728	82.92	7.145	6.209
	(c)	1.008	9.974	65.56	23.45
	(d)	1.743	2.509	14.25	81.49

BCとBCUではほぼ等しかった (Fig.3) .

## 5.考察

### 5.1 明瞭度

ACの明瞭度は、BCとBCUのそれよりも有意に大きかった。一方、BCとBCUの差は見られなかった。この結果は、先行研究でも見られたようなACよりBCUの明瞭度が低い原因は骨導という呈示方式によるものである可能性を示唆している。

先行研究[6]と同様にAC、BCUでは女声が男声よりも明瞭度が高かった。先述のように、実験に使用した音声においては女声が男声よりも高い明瞭度を持つ可能性がある[8]。本実験においても同様の傾向がACおよびBCUの両方で観察されていることから、得られた結果が元々の音声刺激の特性に由来するものである可能性は否定できない。この現象を明らかにするためには、異なる音声刺激を利用した検討が必要であると思われる。

一方、BCでは両者に有意差はなかった。このことは、少なくともこの現象が骨導という呈示方式に依存して観察されるものでないことを示している。

### 5.2 異聴傾向

可聴音・超音波にかかわらず、骨導音では破裂音や摩擦音内での異聴は他のカテゴリに比べて低いものの、他の有声子音へ異聴する傾向が大きかった。また、有声子音の無声子音への異聴は少なかった。これは、有声・無声の区別はできているが、有声子音内での細かい区別が困難であることを示している。

BCUでは /u/ および /e/ において他の母音への異聴が見られた。母音間の異聴は可聴音であるACおよびBCにおいては生じなかったことから、骨導超音波聴取においては母音を特徴づけるなんらかの情報が欠落していることが推察される。また、母音内では /u/ を /i/ に、/e/ を /o/ に異聴していた。/u/ と /i/、/e/ と /o/、それぞれの組み合わせでは第1フォルマント周波数がほぼ等しく、第2フォルマント周波数が異なる。つまり、被験者は第1フォルマント周波数の差は認識できているものの、第2フォルマント周波数が区別できていないと考えることができる。それぞれの組み合わせの第2フォルマント周波数の差を大きくする処理を施すことで、それぞれの母音の違いが明確になる可能性がある。

さらに、BCおよびBCUにおいて、/i/の子音への異聴だけが極端に高かった。母音の知覚はフォルマントの中での持続時間の長い定常部をもとに行われているのに対し、多くの子音情報は急激にフォルマントが変化する遷移部に担われている[11]。骨導呈示によって、/i/に子音のフォルマント遷移部にあたるものが付加されているのかもしれない。なお、実験に使用した音声の /i/ が、他の音に比べて音圧レベルが小さいという報告があり[12]、その影響が骨導音において顕著に出た可能性もある。異なる刺激音声を用いた検討や、音圧レベルを調整した上での検討が必要であると思われる。

骨導音において、拗音の /j/ への異聴率が特に高くなっていた。その原因として、最初の摩擦部分や拗音のわたり部分に見られるFM音(フォルマント周波数が変化する音)[10]の変化が捉えにくいことなどが考えられる。詳細なメカニズムについては今後の検証が必要である。

## 6.おわりに

骨導超音波補聴器の内部機構の最適化において有用な情報を得ることを目的として、健聴者において気導音および骨導可聴音と骨導超音波の単音節音声知覚傾向の比較を行った。その結果、明瞭度において骨導可聴音と骨導超音波に差はないことがわかった。また、骨導超音波では気導音および骨導可聴音にはない母音内での異聴がみられること、拗音を /j/ に異聴する傾向があることなどが見いだされた。しかし、実験に用いた音声そのものにいくつかの問題点が指摘されていることから、実験結果が呈示条件だけではなく刺激音声に依存している可能性も否定できない。異なる刺激音声による検討が必要である。

なお、骨導超音波補聴器の開発においては、難聴者における聴取試験データの収集、話者や声質の影響の評価や聞こえの快・不快等の感性的評価など、検討すべき課題も多く残されている。骨導超音波補聴器のさらなる品質向上のために、継続的な検討が必要であると思われる。

## 謝辞

本研究は H18FY NEDO 産業技術研究助成事業、および H18FY 総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の補助を受けて実施された。

## 参考文献

- [1]Lenhardt et al., Human ultrasonic speech perception, Science, 253, 82-85, 1991.
- [2]Hosoi et al., Activation of the auditory cortex by ultrasound, The Lancet, 431, 469-497, 1999.
- [3]Nakagawa et al., Characteristics of auditory perception of bone-conducted ultrasound in humans revealed by magnetoencephalography, NeuroImage, 11, s746, 2000.
- [4]Nakagawa et al., Development of a Bone-conducted Ultrasonic Hearing Aid for Profoundly Sensorineural Deaf, Trans. Jpn. Soc. Med. Biol. Eng., 44(1), 184-189, 2006.
- [5]Okamoto et al., Intelligibility of bone-conducted ultrasonic speech, Hearing Research, 208, 107-113, 2005.
- [6]中川 他, 明瞭度試験による骨導超音波変調方式の検討, 音講論 2007 巻 2 号, 569-570, 2007.
- [7]中川 他, 明瞭度試験による骨導超音波変調方式の検討 - 異聴傾向の比較 -, 音講論 2008 巻 1 号, 549-552, 2008.
- [8]近藤 他, 親密度別単語理解度試験用音声データセット 2007(FW07)の作成, 信学技報, TL2007-62/SP2007-157/WIT2007-62, 43-48, 2007.
- [9]Fujimoto et al., Nonlinear explanation for bone-conducted ultrasonic hearing, Hearing Research, 204, 210-215, 2005.
- [10]伊藤, 福島, 聴覚系の特徴抽出機構の神経回路モデル, 信学会論文誌 J70-D, 451-462, 1987.
- [11]J.ライアルズ 著, 今富 他監訳, 音声知覚の基礎, 海文堂出版, pp.31-33, 2003.
- [12]長谷 他, FW03 単音節音声のラウドネス校正, 音講論 2008 巻 1 号, 609-610, 2008.