

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24791799

研究課題名(和文)新しい音伝導ルート(軟骨伝導)を用いた両耳装用補聴器の開発

研究課題名(英文)Development of binaural hearing aid using a new sound transmission route (cartilage conduction)

研究代表者

下倉 良太(Shimokura, Ryota)

島根大学・総合理工学研究科(研究院)・助教

研究者番号：90455428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、両耳装用型軟骨伝導補聴器の実用化を目指し、軟骨伝導音による両耳聴効果(方向定位・騒音下での語音明瞭度改善)を評価し、試作機に改良を加えることを目的とする。方向定位実験では、気導音と軟骨伝導音の方向定位精度は同程度であった。また騒音下語音明瞭度実験では、軟骨伝導音の明瞭度が気導音を下回った。これは軟骨伝導音の低音域エネルギーの不足が原因として考えられる。そこで従来の圧電型から新しい電磁型に振動子を改良し、低音域の増幅を図った。その結果、改良した軟骨伝導補聴器は、「人混みの中でも聞き取れる」と難聴者に評価された。

研究成果の概要(英文)：An aim of this study is to evaluate binaural hearing effects (sound localization and improved speech intelligibility under noisy condition) and improve an existing cartilage hearing aid for a practical use of the binaural cartilage conduction hearing aid. The sound localization examination showed that cartilage conduction sound could make users known the sound arrival direction as accurate as the air conduction sound. And the speech intelligibility examination in noisy condition showed that the cartilage conducted speech was harder to be caught due to a shortage of sound energy in a low frequency range (< 300 Hz). So we replaced a previous piezo-electric transducer with an electromagnetic one for the sake of more amplified output in the same range. Owing to the improvement, some hearing-impaired participants using the new cartilage conduction hearing aid could hear speech even in the crowd.

研究分野：音響学

キーワード：実験系心理学 解析・評価 電子デバイス・機器 医療・福祉

### 1. 研究開始当初の背景

軟骨伝導補聴器とは耳の軟骨を振動させて音情報を伝える新しい補聴器である。2004年本学の細井教授が耳軟骨に振動子を当てると音が増幅して知覚される現象を発見したことに端を発し、我々は初代試作機となる箱型の軟骨伝導補聴器 (HD-GX) を開発した (特許第 4541111 号) (図 1)。

この補聴器は、これまでの気導・骨導とは異なる新しい伝導ルート (軟骨伝導) を利用したものであり、既存補聴器のデメリットを解消しうる画期的な補聴器として期待できる。例えば一般に広く使われている気導補聴器はイヤホンで外耳道を塞ぐため、耳漏のある患者や外耳道閉鎖症の患者は使用できない。そういった患者は、乳様突起から振動で音情報を伝える骨導補聴器に頼るしかないが、振動子を頭蓋骨に強く押し当てて使用するため、長時間着用すると大きな苦痛を伴い、さらには頭蓋骨を陥没させる危険性すらある。それに対して軟骨伝導補聴器は、振動子の形状が外耳道を塞がないリング型であり、軟骨に軽く接触させるだけで振動を伝えることができるので、気導補聴器を使用できない難聴者の補聴に大きく貢献する。

研究代表者は、これまで軟骨伝導について学術的な研究を行い、気導・骨導では見られない軟骨伝導特有の下記の物理的特徴を明らかにした。

- 耳軟骨の振動により外耳道内に 3kHz 以下の中低音を 30dB 増幅する
- このように増幅された軟骨伝導音は外耳道の外に漏れ出しにくい

これらの結果より、耳軟骨が振動して言語聴取に必要な帯域の音を生成する新しい補聴のメカニズムを明らかにし、この軟骨伝導音がハウリングを起こしにくいという補聴器としての利点を見出すことができた。外耳道閉鎖症患者を対象とした臨床実験でも、軟骨伝導は骨導に劣らないファンクショナルゲインを示しており、気導補聴器を使用できない難聴者の聴力を大きく改善する確証を得ることができた。また臨床実験後のアンケート



図 1 初代軟骨伝導補聴器試作機

トでも患者はその装用感の良さに興味を示しており、現在でも好んで利用している患者もいる。

ハウリングを起こしにくいという利点を生かし、その後我々は耳掛け型軟骨伝導補聴器 (HD-GX2) を試作し、それらを 2 機組み合わせ、三代目試作機となる両耳装用型軟骨伝導補聴器 (HD-GX3) を開発した。従来の気導補聴器においても、両耳聴効果 (方向定位・語音明瞭度の改善・聴力閾値の向上・音声と騒音の分離など) の有用性を掲げ、両耳装用を推奨する傾向が見られるが、未だ一般的となっていない。その理由のひとつに、両耳をイヤホンで塞ぐことによる強い閉塞感がある。リング端子の HD-GX3 はこういったデメリットを解消し、長時間着用しても不快感を覚えない補聴器に仕上がっているものの、こういった両耳聴効果を軟骨伝導でも実際難聴者が享受できるのか検証する必要がある。またそれが既存補聴器ほど享受できない場合は、振動子・マイク・信号処理などに改良を加える必要がある。

### 2. 研究の目的

数ある両耳聴効果の中から、会話に重要な「方向定位」「音声と騒音の分離」に注目して、難聴者を対象とした心理実験を行う。実験を行う前に、過去の文献 (Berger and Millin, 1980) を参考にしながら両耳装用のフィッティング (純音聴力検査・語音聴力検査) を行う。心理実験で得られた軟骨伝導音による結果と、過去の文献 (Byrne and Noble, 1998; Zurek, 1993 など) による気導音の結果を比較しながら、方向定位や音声騒音分離の精度を評価する。その評価に基づき、振動子・マイク・信号処理を最適化し、再度心理実験を行い評価する。また改良後の補聴器を用いて難聴者の会話のしやすさを質問紙で評価する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 軟骨伝導による方向定位実験

我々人間は音の到来方向を、右耳・左耳に到達する音の時間差 (Interaural Time Difference: ITD) と強度差 (Interaural Intensity Difference: IID) を手がかりに知覚している。例えば音源が被験者に対して右側にある場合、左耳に入る音は右耳に入る音よりも経路が長くなるため時間がかかり、さらに鼻や頬を回折して届くため音が小さくなる。気導音の場合、この ITD と IID を調節することによって音像の位置を制御することが出来る。つまりヘッドホンを着用した被験者の両耳に入る音情報に ITD と IID を負荷すると、音像が右、左へと移動する。では内耳への伝搬経路が異なる軟骨伝導でも同様のことが起こるのであろうか? 本研究では、被験者の両耳に軟骨伝導振動子を装用させ、ITD、IID を変化させながら音の到来方向を回答する心理実験を行った。比較検討するために、同様の実験をオープンフィッティングイヤホン (気

導音)でも行った。オープンフィッティングイヤホンとは開口部のある気導イヤホンであり、外耳道開放という条件を揃えるため選択した。実験の詳細は以下の通りである。

【被験者】: 25 から 36 歳の健聴者 7 名

【刺激】: 0.25, 0.5, 1, 2 kHz の純音、道路騒音、女性スピーチ

上記の刺激に対して ITD を 7 段階 (-0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6 ms)、IID を 7 段階 (-10, -5, -2, 0, 2, 5, 10 dB) で変化させた。

【提示方法】: オープンフィッティングイヤホンと軟骨伝導振動子

【手順】: 各被験者は各提示方法で各刺激を聴取し、その音の到来方向をディスプレイに示した半円上の弧(前方からの到来のみ想定しているため)にマウスクリックでプロットした。実験者はプロットの正中面からの角度を到来方向水平角とした。実験場所は防音室である。

#### (2) 騒音下語音明瞭度実験

リングタイプの軟骨伝導補聴器は外耳道を閉塞しない利点の反面、開口部からの騒音の進入を許してしまう。そのため騒音下では言葉の明瞭性が著しく損なわれる危険性がある。そこで本研究は医療機関で用いられる単音節語表(57S 語表)を用い、騒音下での語音明瞭度を評価する。語音明瞭度とは、57S 語表に用いられる 50 種類の単音節の正答率である。前回の実験と同様に、本実験でも気導音と比較するため、軟骨伝導振動子以外にオープンフィッティングイヤホンによる提示も行った。実験の詳細は以下の通りである。

【被験者】: 25 から 37 歳の健聴者 7 名

【語音】: 50 種類の単音節(57S 語表)

【騒音】: スピーチノイズ、街頭騒音、駅構内騒音、掃除機騒音

上記の刺激に対し、騒音レベルを 50, 55, 60, 65, 70 dB に変化させた。

【提示方法】語音の提示はオープンフィッティングイヤホンと軟骨伝導振動子で行った。騒音の提示にはステレオラウドスピーカを用いた。スピーカは被験者前方 1m に配置した。

【手順】: スピーカから騒音を提示し、その騒音環境の中で、オープンフィッティングイヤホンと軟骨伝導振動子による語音の聞き取りを行う。被験者は聞き取った単音節を、パソコンを用いてタイプした。比較のために、騒音のない静寂条件でも同様の実験を行った。実験場所は防音室である。

#### (3) 軟骨伝導振動子の改良

(1) の軟骨伝導による方向実験の結果より、軟骨伝導においても気導と遜色のない精度で方向定位出来ることが分かった。しかし(2) の騒音下語音明瞭度実験の結果より、軟骨伝導音の低音域の出力不足が明らかと

なった。一般的な環境騒音は低音域にエネルギーを多く含んでおり、当該領域の出力改善が望まれる。

そこで本研究は従来の圧電型振動子ではなく、電磁型振動子への改良を試みた。圧電型振動子とは、電圧を加えることで変位する圧電素子を利用した振動子である。一方、電磁型振動子とは、コイルに電圧を流しそこで発生する交流磁場によって励振する振動子である。圧電型から電磁型に変更することによって、出力向上や電池寿命の長期化を図ることが出来る。そこで本研究は、補聴器メーカーと共同で電磁型軟骨伝導振動子の開発を行った。

#### (4) 会話しやすさ評価のためのアンケート

(1)(2)(3) の研究の結果を受けて、最終的に完成した新しい電磁型軟骨伝導補聴器を用いて、日常の中で難聴者がその補聴器を使用し、会話のしやすさを質問紙により評価した。被験者は 9 名である。

使用した質問紙は、奈良県立医科大学の補聴器外来で使用する「聞こえの質問紙」を改良したもので、様々な聴取環境での聞き取りやすさを 5 件法で評価する。例えば想定される聴取環境は、「静かなところで、1対1で向かい合って会話が聞き取れる」といった比較的聴取が容易な環境から、「人混みの中で会話が聞き取れる」といった聴取困難な環境まで様々である。それらの質問に対して、「よく聞こえる」「聞こえることが多い」「変わらない」「聞こえないことが多い」「聞こえない」の 5 段階で被験者は補聴器を評価する。またそういった聴取環境に遭遇しなかったことを考慮し、「分からない」という回答を選ぶことも出来る。

また聞こえに関する質問以外に、「快適に長時間使用し続けられる」「操作・管理が楽である」などの快適性・日常性を評価する質問を加えている。

#### 4. 研究成果

##### (1) 軟骨伝導による方向定

ITD, IID を変化させて得られた被験者の主観的な音到来方向について図 2,3 にまとめる。プロットの違いは提示方法の違い(オープンフィッティング、いわゆる気導音と軟骨伝導音)を示している。この結果をみると、提示方法の違いに関わらず、右耳に早く、そして強く到達する音に対しては、被験者が右側から音が来ていると判断していることが分かる。これは軟骨伝導でも気導と同程度の方向定位が可能であることを意味している。

周波数別で見ると、ITD では 1kHz, 2kHz の純音に対し方向定位が出来ていない。この傾向は気導でも軟骨伝導でも同様であり、音自身が持つ特徴と言える。250Hz, 500Hz の純音で定位が可能なので、それらの音を含む道路騒音、スピーチでも正確に方向定位が出来ている。一方、IID では音源の違いに寄らず

方向定位が可能であった。この結果から軟骨伝導補聴器を両耳に装用した場合、後方からの接近車両にも気づくことが出来るし、後ろから声を掛けられても対応することが出来る。

### (2) 騒音下語音明瞭度

騒音下語音明瞭度の結果を図4に示す。横軸は提示騒音の騒音レベル、縦軸は語音明瞭度、つまり50単音節の聞き取りに対する正答率を示している。プロットの違いはオープンフィッティング(気導音)と軟骨伝導音を示している。この結果から、提示方法や騒音の種類に関わらず、騒音レベルが大きくなると、聞き取りの精度が悪くなる共通傾向が観察された。提示方法で比較すると、オープンフィッティングよりも軟骨伝導の明瞭度が低いことが分かる。この原因は、オープンフィッティングに比べて、軟骨伝導振動子の低音域出力が弱いと考えられる。次の振動子の改良では、この出力増強が課題となる。

### (3) 軟骨伝導振動子の開発

これまでの圧電型振動子と開発した電磁型振動子を図5に示す。まず外観においては、従来の振動子より小型化することに成功した。また性能について、各振動子の振動特性を図6に示す。振動特性は、各振動子を人工マストイド(4930, Brüel & Kjaer)に乗せ計測した。印圧は1Vであった。

この結果を見ると、従来の圧電型よりも新しい電磁型は振動出力が大きく改善されていることが分かる。特に課題としてきた低音域において改善度合いが大きい。さらに電池寿命を大きな改善が見られた。従来の圧電型振動子は空気亜鉛電池3個搭載して3時間しか連続駆動出来なかったが、新しい電磁型振動子は同様の電池1個で120時間の連続駆動が可能である。よって軟骨伝導補聴器の利便性が大きく向上した。

### (4) 会話しやすさ評価

改良された電磁型軟骨伝導補聴器の聞こえ・快適性・日常性に関するアンケートの結果を図7に示す。聞こえについては、概ね「よく聞こえる」「聞こえることが多い」という高い評価を得ることが出来た。「後ろから呼びかけられたとき、聞き取れる」や「人混みの中で会話が聞き取れる」といった困難な聴取環境でも聞き取れる被験者が多く、これまでの実験結果と、それを反映させた補聴器の改良が聞こえに結びついていることが分かる。一方、快適性・日常性に関する質問では、被験者ごとに評価が割れた。軟骨伝導補聴器は長時間快適に装用し続けられるものの、操作・管理・装用に手間を感じる被験者が存在した。今後は聞こえの改良だけでなく、補聴器の利便性も追究しなければならない。

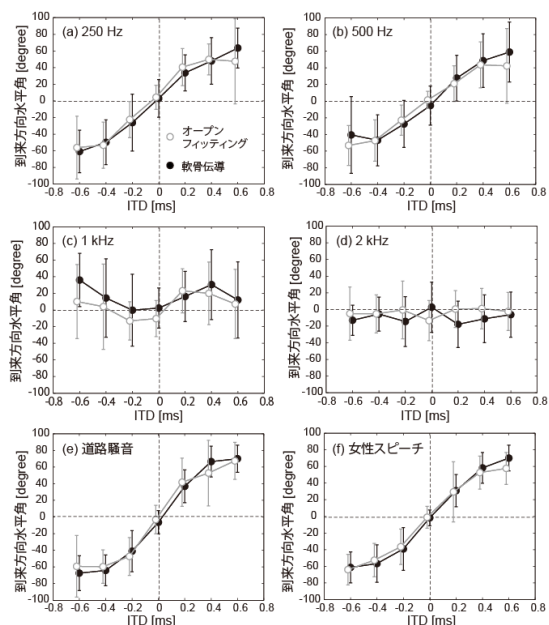


図2 ITD 変化による到来方向水平角

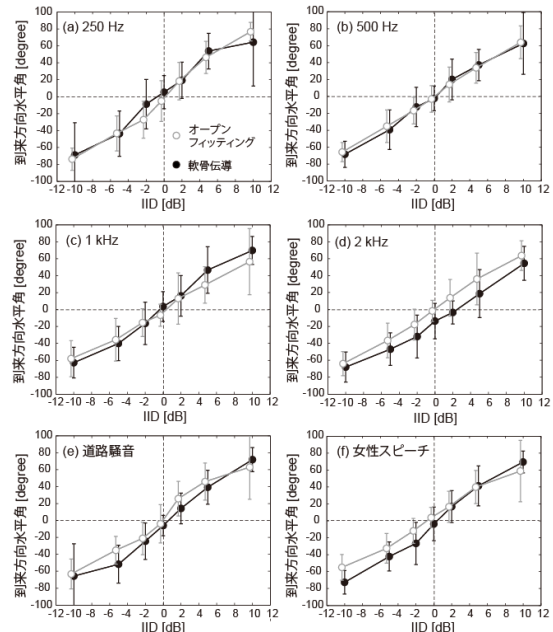


図3 IID 変化による到来方向水平角

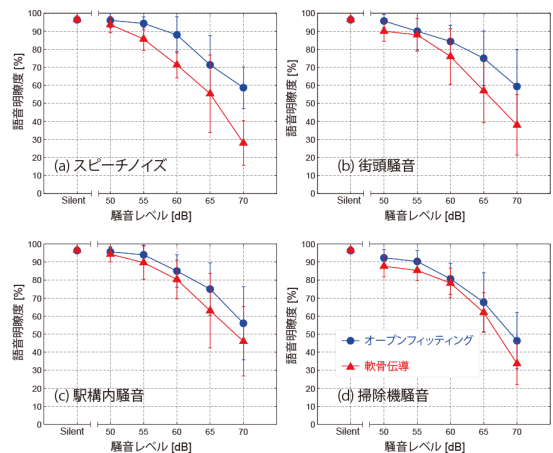


図4 騒音レベル変化による語音明瞭度

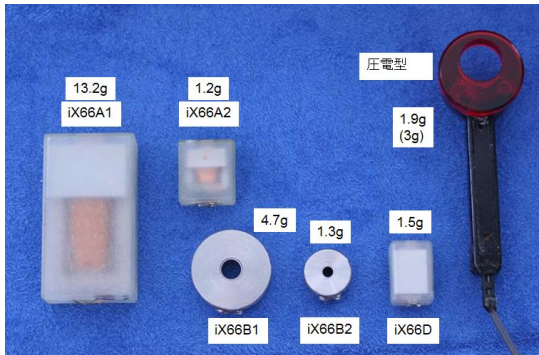


図5 電磁型・圧電型振動子

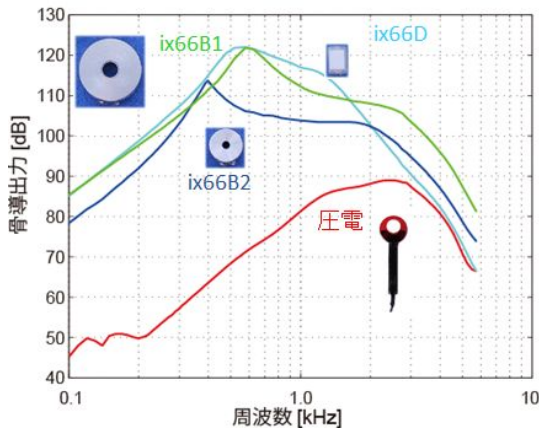


図6 各振動子の振動出力

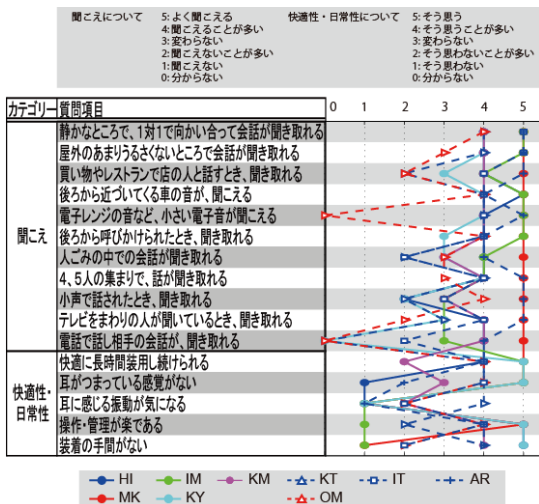


図7 聞こえ・快適性・日常性に関するアンケート結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, T. Iwakura, T. Yamanaka, "Simulating cartilage conduction sound to estimate the sound pressure level in the external auditory canal," Journal of Sound and Vibration 335, pp. 261-268 (2015). DOI: 10.1016/j.jsv.2014.09.021

R. Shimokura, T. Matsui, Y. Takaki, T. Nishimura, T. Yamanaka, H. Hosoi, "Evaluation of speech intelligibility in

short-reverberant sound fields," Auris Nasus Larynx 41, 343-349 (2014). DOI: 10.1016/j.anl.2013.12.013

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, T. Yamanaka, H. Levitt, "Cartilage conduction hearing", Journal of the Acoustical Society of America 135, 1959-1966 (2014). DOI: 10.1121/1.4868372

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Iwakura, T. Nishimura, T. Matsui, "Development of monaural and binaural behind-the-ear cartilage conduction hearing aid", Applied Acoustics 74, 1234-1240 (2013). DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.04.013

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, T. Yamanaka, "Aural cartilage vibration and sound measured in the external auditory canal for several transducer positions," Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment 12, 137-143 (2013).

R. Shimokura, F. Fukuda, H. Hosoi, "A case study of auditory rehabilitation in a profoundly deaf participant using a bone-conducted ultrasonic hearing aid", Behavioral Science Research 50, 1-12, (2012).

〔学会発表〕(計18件)

下倉良太「軟骨伝導のメカニズム・特性を調べる基礎研究」日本音響学会 2015年春季研究発表会講演論文集、pp. 1501-1502、中央大学(東京)、3月17日(2015)招待講演

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, H. Levitt, T. Kitahara, "Comparison of simulation models for cartilage conduction sound," Proc. of American Auditory Society Scientific and Technology Meeting, Poster No. 30, Chaparral Suites Scottsdale (Phoenix, US), 6<sup>th</sup> March (2015).

下倉良太「こんなに騒がしいポスター会場でも聞き取り可能な軟骨伝導受話器の開発」、日本音響学会関西支部第17回若手研究者交流研究発表会発表資料集、関西大学(吹田)、12月14日(2014)

下倉良太、細井裕司、西村忠己、北原紘「軟骨伝導補聴器の開発(第11報)振動子接触圧による言葉の聞こえの変化」、第59回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、p. 423、海峡メッセ下関(下関)、11月27日(2014)

下倉良太、齋藤修、細井裕司、西村忠己「言語聴覚士が支える軟骨伝導補聴器の開発」日本音響学会 2014年秋季研究発表会講演論文集、pp. 1577-1578、北海学園大(札幌)、9月4日(2014)招待講演

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, O. Saito, "Intelligibility of cartilage conduction speech in environmental noises," Proc. of

the 11th International Congress on Noise as a Public Health Problem, Team2 Prenary ID2\_2, Shin-Kokaido (Nara, Japan), 4<sup>th</sup> June (2014).

下倉良太、細井裕司、西村忠己、岩倉行志、津田直紀、中市真理子 「軟骨伝導補聴器の開発(7) 電磁型軟骨伝導補聴器の性能評価」 第115回日本耳鼻咽喉科学会抄録集、No.485、p.552、ヒルトン福岡(福岡) 5月17日(2014)  
R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, T. Iwakura, T. Yamanaka, "Development of cartilage conduction hearing aid (5) -Electromagnetic cartilage conduction transducer-", Proc. of the Midwinter Research Meeting of Association for Research in Otolaryngology 37, p. 474, Marriott Hotel (San Diego, US), 25<sup>th</sup> February (2014).

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, T. Matsui, "Cartilage conduction sound amplified by changing contact pressure of transducer," Proc. of the 6th International Symposium on Temporal Design, Grand Hotel Taipei (Taipei, Taiwan), 16<sup>th</sup> November (2013).

下倉良太、細井裕司、西村忠己 「軟骨伝導補聴器の開発(第8報) -振動子の接触圧と外耳道内音圧レベルの関係-」 第58回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、pp.407-408、ホテル・ブエナビスタ(松本) 10月25日(2013)

R. Shimokura, S. Akasaka, H. Hosoi, T. Nishimura, T. Matsui, "Relationship between intelligibility and autocorrelation factors of Japanese monosyllables," Proc. of 21th International Congress on Acoustics, Journal of the Acoustical Society of America 133, No. 5, p. 3293, Palais des congrès (Montreal, Canada), 5<sup>th</sup> June (2013) (Invited paper).

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, T. Matsui "Acoustic measurement on transmission of cartilage-conduction sound," Proc. of 20th International Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (IFOS) World congress, No. ME72802, in the Symposium moderated by H. Hosoi, COEX Convention Center (Seoul, Korea), 3<sup>rd</sup> June (2013).

下倉良太、細井裕司、西村忠己、松井淑恵、岩倉行志 「軟骨伝導補聴器の開発(5) 電磁型軟骨伝導振動子」 第114回日本耳鼻咽喉科学会抄録集、No.203、ロイトン札幌(札幌) 5月17日(2013)

R. Shimokura, H. Hosoi, T. Matsui, T. Nishimura, "Development of cartilage conduction hearing aid (3) -Monosyllable intelligibility in the noisy condition-", Proc.

of the Midwinter Research Meeting of Association for Research in Otolaryngology, No. 448, Marriott Hotel (Baltimore, US), 18<sup>th</sup> February (2013).

下倉良太、松井淑恵、西村忠己、細井裕司 「軟骨伝導補聴器の開発(第7報) 騒音下での語音聴取」 第57回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、p.521、京都国際会館(京都) 10月11日(2012)

R. Shimokura, T. Matsui, T. Nishimura, H. Hosoi, "Advantages of cartilage sound conduction in hearing aids," Proc. of the 2012 ICME International Conference on Complex Medical Engineering, p. 134-141, Kobe Oriental Hotel (Kobe, Japan), 1<sup>st</sup> July (2012).

下倉良太、松井淑恵、西村忠己、細井裕司 「軟骨伝導補聴器の開発(4) 軟骨骨導音の評価」 第113回日本耳鼻咽喉科学会抄録集、No.201、朱鷺メッセ(新潟) 5月11日(2012)

R. Shimokura, T. Matsui, T. Nishimura, H. Hosoi, "Development of cartilage conduction hearing aid -Evaluation of bone conduction pathway-", 14th Korea-Japan Joint meeting Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, p.112, Hotel Okura (Kyoto, Japan), 13<sup>th</sup> April (2012).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
○出願状況(計1件)

名称：耳軟骨の伝導音の予測装置及びその方法

発明者：下倉良太、細井裕司

権利者：同上

種類：特許

番号：特許、特願 2014-167848

出願年月日：2014年8月20日

国内外の別：国内

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

下倉 良太 (SHIMOKURA, Ryota)

島根大学・総合理工学研究科・助教

研究者番号：90455428