

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K20221

研究課題名(和文)騒音環境下でも利用可能な軟骨伝導補聴器の実用化研究

研究課題名(英文) Practical research for cartilage conduction hearing aid available also under the noisy condition

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：我々は耳軟骨の振動で音情報を伝える全く新しい補聴器を開発した。リング状振動子を用いれば外耳道を塞ぐことなく装用できるので、利用者の耳閉感を大きく低減するが、その反面、環境騒音に対する脆弱性が課題となる。そこで本研究は、騒音環境下での軟骨伝導補聴器の有用性を評価することを目的としている。

騒音環境を再現し、軟骨伝導音の語音明瞭度を計測した結果、特に低音域にエネルギーがある子音が聞きとりづらいたことが判明した。一方で、振動子と耳軟骨との接触圧を上げると、明瞭度が著しく改善することも明らかとなった。また軟骨伝導メカニズムを模擬するシミュレーターを開発し、今後の軟骨伝導研究の利便性を大きく向上させた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a quite new hearing aid which provide sound by vibration of aural cartilage. Since a ring-shaped transducer does not occlude a user's ear, it can reduce his feeling of ear fullness. On the other hand, it will be weak for environmental noises coming through the opening. The aim of this study is to evaluate the efficiency of the cartilage conduction hearing aid under the noisy condition.

Measuring speech intelligibility in the noisy condition made it clarified that consonants which have sound energy in the low frequency range were relatively hard to be identified. While, it was also appear that the indiscernible consonants improved the intelligibility by increasing the application force between the transducer and the aural cartilage. And we have developed a mechanical simulator which can demonstrate the propagation mechanism of cartilage conduction. It will make convenience of the cartilage conduction research much better in the future.

研究分野：音響学・聴覚

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

2004年、本学の細井教授(現学長)が、軟骨伝導(耳軟骨に振動子を接触させると明瞭な音が知覚できる現象)を発見した。以来(特許第4541111号)、当教室ではこの軟骨伝導を応用した新しい補聴器の開発を行っている。図1のように、リング状の振動子を用いれば、外耳道を開放させたまま音を聞くことができるため、気導補聴器のようにイヤプラグを外耳道に挿入する必要がなく、耳閉感を大幅に軽減することができる。また骨導補聴器とは異なり、頭蓋骨よりも遙かに軽い耳軟骨を振動させるため、振動子の圧着を必要とせず、痛みや糜爛もなく快適に長時間の装用が可能である。このように軟骨伝導補聴器は、既存の気導・骨導補聴器にはないメリットを有している。

我々は軟骨伝導補聴器の試作機を完成させ(図1)、現在は試作機性能評価の目的で、難聴者を対象に装用閾値検査・語音聴取検査を行っている。この臨床研究において、軟骨伝導補聴器は既存補聴器と遜色のない装用効果を示しており、快適な装用感を保ったまま、聞こえの質も十分であることが実証された(図2)。

しかし一方で、外耳道を開放することにより、軟骨伝導補聴器は騒音に対する脆弱性が明らかになった。軟骨伝導補聴器実用化のためにはこれらの問題点を解決する必要がある。

2. 研究の目的

そこで本研究は、軟骨伝導振動子の装用方法と騒音下での語音明瞭度との関係を明らかにし、それに対する対策を講じることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 軟骨伝導振動子の接触圧と騒音下明瞭度実験

軟骨伝導は耳軟骨と振動子との接触によって生じるが、その接触圧が変化すれば外耳道内で増幅される音圧レベルも変化することが既存研究により分かっている。そこで本実験では、振動子と耳珠との接触圧を変化させながら、言葉の明瞭度を評価した。



図1: 軟骨伝導補聴器の試作機 (ix66B2)

【被験者】健聴者4名
 【スピーチ】ラジオ放送(日本語)
 【騒音】スピーチノイズ、交通騒音、駅構内騒音、掃除機騒音に対し、騒音レベル50, 60, 70, 80dBに調整

【呈示】スピーチは軟骨伝導振動子、騒音は被験者前方の1mに配置したステレオスピーカから呈示

【手順】被験者は騒音環境下で、スピーチが明瞭に聞こえるように、聞き手で持った軟骨伝導振動子を同側の耳珠に押しつける。接触圧が大きいほど外耳道内音圧レベルは上昇し、騒音下でもスピーチが明瞭に聞き取れるようになる。十分スピーチが聞き取れるまで振動子を押し当てたら、その位置で静止し、その間実験者は、振動子と耳珠の間に挟んだ圧力センサーの圧力値を読み取る。圧力を加えずに、振動子を耳にかけた状態では、スピーチの外耳道内音圧レベルは60dBであった。

(2) 感音性難聴者の語音明瞭度

軟骨伝導補聴器に限らず、補聴器装用者の多くは感音性難聴を患っている。感音性難聴者は補聴器で十分聞こえる音量に調節されたとしても、聞き取れない単音節があり、補聴器の恩恵を十分に受けられない。特に、「で」や「せ」などの単音節が聞き取りづらい。そこで本研究は、単音節のどのような音響的特徴が聞き取りを左右しているのか調べるため、単音節別正答率とデジタル信号解析で計算されるファクターとの比較を行った。

【単音節別正答率】奈良県立医科大学耳鼻科補聴器外来に通院する感音性難聴者144耳のデータから、単音節50語の各正答率を比較対象とした。

【デジタル信号解析】これまで言語の明瞭性

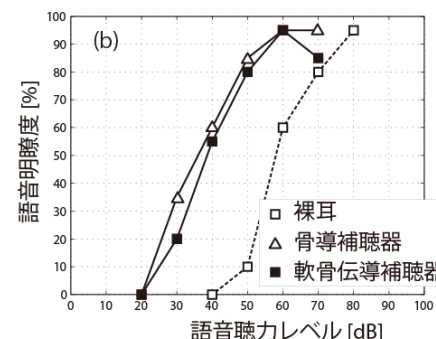
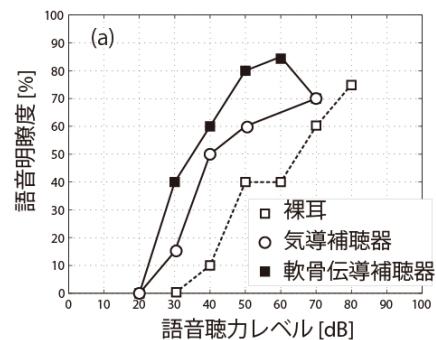


図2: (a)気導補聴器と比較した語音明瞭度曲線、(b)骨導補聴器と比較した語音明瞭度曲線

に対するデジタル信号処理は、Speech Intelligibility Index (SII) やラウドネスなど、周波数領域での解析手法に限られていた。そこで本研究は聴神経でも行われる自己相関解析 (ACF) という時間領域の解析手法に着目した。ACF とは信号がそれ自身を時間シフトした信号とどれだけ良く整合するかを測る尺度であり、時間シフトの大きさの関数として表される。つまり ACF はパターン抽出に多用され、聴覚においてはピッチ (音の高さ) 知覚に利用されてきた。その際、ACF の時間減衰を表す有効継続時間 (τ_e) は、音場での言葉の明瞭度を示すファクターとして既存研究でも使われているので、感音性難聴者の語音明瞭度を説明する有力なファクターとなり得る。

(3) 軟骨伝導を模擬したシミュレーターの作成

外耳道内への騒音の混入を客観的に評価するため、これまで被験者を雇った実耳測定を行ってきたが、騒音レベルが上がるにつれ倫理的問題が発生し、検証が困難になってくる。そこで本研究では、軟骨伝導の音の伝搬を模擬したシミュレーターの開発に着手した。

ちなみにイヤホンやヘッドホンの出力評価には、これまで Head and Torso Simulator (HATS) と呼ばれる疑似頭と疑似耳が用いられてきたが、HATS では耳軟骨の振動を十分に模擬できておらず、外耳道内音圧レベルが実測と大きく異なっていた。そこで頭蓋骨モデルに、外耳道軟骨を模したウレタンチューブを固定し、このシミュレーターの測定精度を実耳測定の結果と比較して検証した。またその後、耳介軟骨モデルも使い、外耳道長や硬度を変化させながら、詳細な軟骨伝導メカニズムの解明に努めた。

4. 研究成果

(1) 軟骨伝導振動子の接触圧と騒音下スピーチ明瞭度との関係

図3に音場の騒音レベルに対する、必要十分なスピーチ明瞭度を確保するための軟骨伝導振動子の接触圧との関係を示す。この図から、騒音レベルが 80dB に達しても、接触圧を強めることによって、明瞭にスピーチを

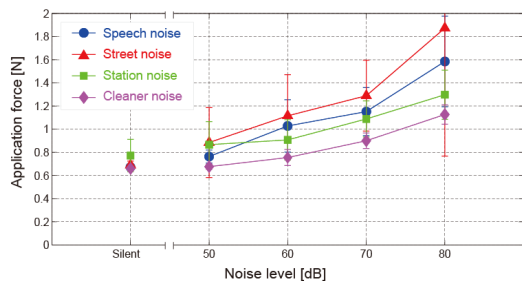


図3 音場の騒音レベルに対する適切音量を得るための軟骨伝導振動子接触圧

聴取できる様子が見て取れる。ただし、スピーチ聴取に最も接触圧を高める必要があるのは交通騒音であった。交通騒音は、他の騒音に比べて 500Hz 以下の低周波数領域のエネルギーが強く、それがこの結果に反映されたものと推測される。

また接触圧が 1N を超えると、耳珠が折りたたまれ、外耳道を塞ぐ。この状態では、外部からの騒音の混入を最小限にでき、スピーチの外耳道内音圧レベルを最大限にできる。つまり高い SN 比を実現できるので、80dB という過酷な騒音環境下でも声を聴取することができるのである。つまり軟骨伝導振動子をスマートホンに搭載すれば、工事現場や新幹線のデッキなど、高い騒音環境下で会話を必要とする労働者やサラリーマンにニーズがありそうである。

(2) 感音性難聴者の語音明瞭度と ACF の有効継続時間 (τ_e) との関係

図4に感音性難聴者の子音別正答率と各子音の SII、ラウドネス、 τ_e との関係を示す。

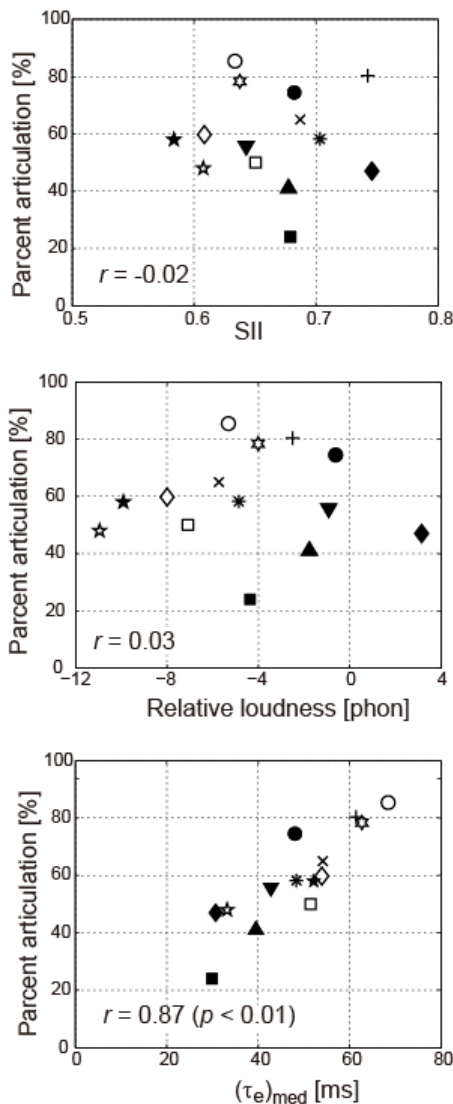


図4 SII, ラウドネス, τ_e に対する子音別正答率 (シンボル: 各子音)

これまでSIIやラウドネスなど周波数領域での解析手法が用いられてきたが、これら手法では感音性難聴者の明瞭度を十分に説明できていない。一方、単音節のACFの時間減衰を示す τ_c とは、相関係数0.87という高い関係を観察することができる。これは言い換えると、単音節内の（主に母音部で見られる）周期性が豊かであると、感音性難聴者には聞き取りやすいことを意味している。軟骨伝導は主に母音部に相当する低周波数領域を強調するのに長けている。よって軟骨伝導補聴器が感音性難聴者の聞こえを支援することは十分に考えられる。

(3) 軟骨伝導シミュレーター

図5に従来のイヤホンのシミュレーターであるHATSと、頭蓋骨モデルにウレタンチューブを固定した提案法との比較を示す。ともに軟骨伝導振動子で出力している。従来法では軟骨伝導の特徴である低周波数領域の増幅を模擬できていないが、提案法ではそれができている。頭蓋骨モデルにチューブを取り付けただけの単純なモデルであるが、低周波数に関しては十分に軟骨伝導を表現できている。

一方、提案法は2kHz以上の高周波数領域で実測と大きく外れる。そこでウレタン樹脂で形成した耳介モデルを固定して再度同じ計測を行うと、全帯域に渡って精度の高い予測が可能となった。今後は、軟骨伝導シミュレーターをさらに改良し、騒音下での物理計測をより勘弁により安全に行えるよう、実験環境を整えていく。

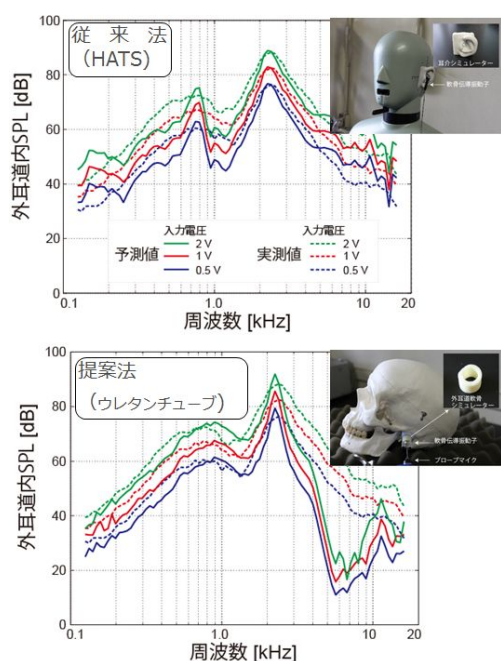


図5 従来法と提案法の外耳道内音圧レベルの比較

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7件)

- [1] R. Miyamae, T. Nishimura, H. Hosoi, O. Saito, R. Shimokura, T. Yamanaka, T. Kitahara, "Perception of speech in cartilage conduction," *Auris Nasus Larynx* 44, pp. 26-32 (2017)
- [2] C. Morimoto, K. Nario, T. Nishimura, R. Shimokura, H. Hiroshi, T. Kitahara, "Effects of noise exposure on neonatal auditory brainstem response thresholds in pregnant guinea pigs at gestational periods," *Journal of Obstetrics and Gynaecology Research* 43, pp. 78-86 (2017)
- [3] Y. Soeta, R. Shimokura, "Sound quality evaluation of air-conditioner noise based on factors of the autocorrelation function," *Applied Acoustics* 124, pp. 11-19 (2017)
- [4] 下倉良太, 細井裕司, 西村忠己, 齊藤修, 北原紘「質問紙を用いた軟骨伝導補聴器の自己評価」, *Audiology Japan* 60, pp. 168-176 (2017)
- [5] R. Shimokura, "Noise Barrier Performance of a SEKISYU-Tile Roof," *Modern Environmental Science and Engineering* 3, pp. 168-172 (2017)
- [6] R. Shimokura, S. Akasaka, T. Nishimura, H. Hosoi, T. Matsui, "Autocorrelation factors and intelligibility of Japanese monosyllables in individuals with sensorineural hearing loss," *Journal of the Acoustical Society of America* 141, pp. 1065-1073 (2017)
- [7] 下倉良太「大学病院内で行われる補聴器に関する研究開発 患者の"聞こえる"を聞くために」音学シンポジウム2015、情報処理学会研究報告4巻、pp. 1-4 (2015)

(学会発表)(計32件)

- [1] 下倉良太「再現性に優れた軟骨伝導音評価手法の開発」, 日本音響学会2018年春季研究発表会講演論文集, pp. 1553-1554, 南埼玉郡宮代、3月(2018)招待講演
- [2] 下倉良太「松江市内の喫茶店に流れるBGMの調査と心理評価」, 平成29年度日本建築学会中国支部研究報告集41, pp. 457-460, 呉、3月(2018年)
- [3] C. Morimoto, K. Nario, T. Nishimura, R. Shimokura, H. Hosoi, T. Yamanaka, T. Kitahara, "Effects of noise exposure on neonatal auditory brainstem response thresholds in

- pregnant guinea pigs at gestational periods," Proc. of the Midwinter Research Meeting of Association for Research in Otolaryngology, PS 1029, p. 657, San Diego, February (2018)
- [4] T. Nishimura, H. Hosoi, O. Saito, R. Shimokura, S. Akasaka, T. Yamanaka, T. Kitahara, "Cartilage conduction hearing," Proc. of the Midwinter Research Meeting of Association for Research in Otolaryngology, PS 957, p. 618, San Diego, February (2018)
- [5] 陣内照道、下倉良太「歌いやすさを追究するカラオケボックスの音響最適化に関する研究 次世代カラオケボックスの開発」, 日本音響学会関西支部第20回若手研究者交流研究発表会発表資料集、京田辺、12月(2017)
- [6] 下倉良太「打ち上げ花火を利用した都市インパルス応答による屋外反射応答評価」, 平成29年度日本建築学会中国支部第2回支部環境工学委員会、広島、12月(2017)
- [7] 赤坂咲恵、西村忠己、下倉良太、齋藤修、亀井昌代、米本清、細井裕司、北原紘「単音節の有効継続時間 (te) の雑音負荷による変化について」, 第62回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 60, pp. 450、福岡、10月(2017)
- [8] 西村忠己、細井裕司、齋藤修、下倉良太、山中敏彰、北原紘「軟骨伝導補聴器の開発(第17報) 振動子を軟骨上に固定することによる閾値への効果」, 第62回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 60, pp. 373、福岡、10月(2017)
- [9] 下倉良太「打ち上げ花火による都市インパルス応答計測と伝搬方向による屋外拡声明瞭度低下に関する考察」, 第62回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 60, pp. 448、福岡、10月(2017)
- [10] R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, "Problem-solving researches on hearing aid," Proc. of the 8th International Symposium on Temporal Design, Bologna (Italy), September (2017) R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, "Problem-solving researches on hearing aid," Proc. of the 8th International Symposium on Temporal Design, Bologna (Italy), September (2017)
- [11] 下倉良太「打ち上げ花火による都市の疑似インパルス応答計測と屋内伝搬評価」, 2017年度日本建築学会(中国)学術講演梗概集、pp. 341-342、広島、9月(2017)
- [12] 下倉良太「軟骨伝導の規格化に向けた取り組み」, 日本音響学会2017年春季研究発表会講演論文集、pp. 1373-1374、川崎、3月(2017)招待講演
- [13] 陣内照道、下倉良太「カラオケボックスの音響特性と歌いやすい残響時間に関する研究」, 平成28年度日本建築学会中国支部研究報告集 40, pp. 467-470、松江、3月(2017年)
- [14] 竹谷栄利子、下倉良太「演奏ジャンルの違いによるコンサートホールの最適聴衆座席の選定に関する研究」, 平成28年度日本建築学会中国支部研究報告集 40, pp. 463-466、松江、3月(2017年)
- [15] 増本祥太、下倉良太「石州瓦の室内における降雨騒音に関する研究」, 平成28年度日本建築学会中国支部研究報告集 40, pp. 471-474、松江、3月(2017年)
- [16] 平林美奈、下倉良太「花火を用いた擬似インパルス応答による建物内の明瞭度の差に関する研究」, 平成28年度日本建築学会中国支部研究報告集 40, pp. 1013-1016、松江、3月(2017年)
- [17] 落合泰誠、下倉良太「野外ロック・フェスティバルの音響に関する研究」, 日本音響学会関西支部第19回若手研究者交流研究発表会発表資料集、吹田、12月(2016)
- [18] R. Shimokura, "Noise barrier performance of 'SEKISYU' tile roof," The 5th International Conference on Human-Environment System (ICHES), pp. 1-5, Nagoya, October (2016)
- [19] T. Nishimura, H. Hosoi, R. Shimokura, T. Kitahara, "Threshold shifts when water was injected into the ear canal reveal the difference among air-, bone-, and cartilage conduction," Journal of the Acoustical Society of America 140, p. 3263, 5th Joint Meeting ASA/ASJ, Honolulu (US), November (2016)
- [20] R. Shimokura, H. Hosoi, T. Nishimura, "Development of cartilage conduction receiver available in noisy condition," Journal of the Acoustical Society of America 140, p. 3274, 5th Joint Meeting ASA/ASJ, Honolulu (US), November (2016)
- [21] 岡安唯、西村忠己、齋藤修、下倉良太、松井淑恵、山下哲範、細井裕司、北原紘「骨導超音波音の知覚メカニズムに関する検討(第2報) - スピーチノイズ負荷下の語音別の正答率 -」, 第61回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 59, pp. 285-286、盛岡、10月(2016)
- [22] 西村忠己、細井裕司、齋藤修、宮前了輔、下倉良太、北原紘「軟骨伝導補聴器の開発(第16報) 振動子固定部位と注水による閾値変化」, 第61回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、

Audiology Japan 59, pp. 287-288、盛岡、10月(2016)

- [23] 下倉良太、赤坂咲恵、細井裕司、西村忠己、齋藤修、北原紘「語音の自己相関解析による感音性難聴者の異聴傾向解明の試み」、第61回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 59, pp. 545-546、盛岡、10月(2016)
- [24] 下倉良太「出雲流神楽における神楽殿の音響に関する研究」、2016年度日本建築学会(九州)学術講演梗概集、pp. 347-348、福岡、8月(2016)
- [25] 西村忠己、細井裕司、下倉良太、岩倉行志「軟骨伝導補聴器の市販化に向けた臨床試験」、第117回日本耳鼻咽喉科学会抄録集、Vol. 119, p. 623、名古屋、5月(2016)
- [26] 下倉良太、橋本悠佑「花火による都市インパルス応答計測の試み」日本音響学会2016年春季研究発表会講演論文集、pp. 1111-1112、横浜、3月(2016)
- [27] 西村忠己、細井裕司、齋藤修、宮前了輔、下倉良太、北原紘「軟骨伝導補聴器の適応について」、第60回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 58, pp. 311-312、東京、10月(2015)
- [28] 宮前了輔、西村忠己、細井裕司、齋藤修、下倉良太、北原紘「軟骨伝導補聴器の開発(第14報) 感音難聴者の語音明瞭度」、第60回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 58, pp. 307-308、東京、10月(2015)
- [29] 下倉良太、細井裕司、西村忠己、齋藤修、北原紘「軟骨伝導補聴器の開発(第15報) 軟骨伝導補聴器に対する内観報告」、第60回日本聴覚医学会総会・学術講演会抄録集、Audiology Japan 58, pp. 309-310、東京、10月(2015)
- [30] 西村忠己、細井裕司、齋藤修、下倉良太、北原紘「先天性外耳道閉鎖症小児例に対する軟骨伝導補聴器のフィッティング」、第25回日本耳科学会総会・学術講演会抄録集、Otology Japan 25, p. 536、長崎、10月(2015)
- [31] 下倉良太「劣化語音を用いた低残響空間の語音明瞭度評価」2015年度日本建築学会(関東)学術講演梗概集、pp. 263-264、平塚、9月(2015)
- [32] 下倉良太「大学病院内で行われる補聴器に関する研究開発 患者の"聞こえる"を聞くために」音学シンポジウム2015、調布、5月(2015)

〔図書〕(計2件)

- [1] R. Shimokura, "Hearing aid," pp. 151-171 in An Excursus into Hearing Loss (Chapter 9), edited by Stavros Hatzopoulos, IntechOpen (2018)

- [2] 下倉良太「ラットの行動解析ハンドブック、第43章 精神医学モデル、pp. 333-341・第44章 神経心理学テスト、pp. 342-357」(翻訳) 監訳:高瀬堅吉 柳井修一、山口哲生、西村書店(2015)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔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