

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：24601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：平成22～24年度

課題番号：22390319

研究課題名（和文）超音波聴覚のメカニズムと最重度難聴者のための超音波補聴システムの実用化研究

研究課題名（英文）Researches for practical use of the ultra sound hearing system for profoundly hearing impaired patients and auditory mechanism of ultra sound

研究代表者

細井 裕司（Hosoi Hiroshi）

奈良県立医科大学 耳鼻咽喉・頭頸部外科学講座 教授

研究者番号：80094613

研究成果の概要（和文）：我々人間の聴覚では20 kHz以上の超音波領域の音は聞こえないが、超音波振動として骨導に与えると音知覚が得られる（骨導超音波）。さらにこの骨導超音波は、音が全く聞こえない最重度難聴者でも聴取可能である。この現象を利用し、我々は最重度難聴者に音知覚を与える骨導超音波補聴器の開発を行っている。本研究では、（1）未だ知られていない超音波聴覚メカニズムの解明、（2）骨導超音波補聴器の実用化研究という二つの課題に取り組んできた。そしてその研究成果から、骨導超音波の末梢の知覚器官は蝸牛の基底回転に存在すること、またそれは変調された可聴音ではなく超音波自体を聴取していること、その際外有毛細胞が関与している可能性は低いことなど、聴覚路上の末梢・中枢での超音波聴覚メカニズムが明らかになってきた。また語音で変調した骨導超音波のプロソディ（抑揚）が弁別可能であること、リハビリテーションによって言葉の聞き取りが改善されることなどの実用化研究も大きく進展した。

研究成果の概要（英文）：Although we can not hear ultra sound above 20 kHz, the vibration in the frequency can induce auditory sensation through the bone conduction (bone-conducted ultrasound). And it is interesting that the bone-conducted ultrasound can induce auditory sensation also for profoundly hearing impaired patients who can not hear sound absolutely. Using this phenomenon, we have developed the bone-conducted ultrasound hearing aid. In this study, we addressed two challenges such as (1) definition of the mechanism of ultrasound perception, and (2) practical realization of the bone-conducted ultrasound hearing aid. As results, the mechanisms on the peripheral and central auditory pathways were clarified; for examples, that the peripheral perceptual organs are located in the basal turn of the cochlea, the perceptual organs respond not to the transformed audible sound but to the ultrasound itself, and the outer hair cells does not work at that time. Moreover, practical researches of the hearing aid could found that the amplitude-modulated ultrasound in language can express the prosody (intonation) and the rehabilitation using the hearing aid can improve the speech intelligibility.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2011年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2012年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・耳鼻咽喉科学

キーワード：耳科学

1. 研究開始当初の背景

(1) 超音波聴覚の基礎研究：人間の聴覚では、気導音としては 20kHz 以上の超音波領域の音は聞こえないが、超音波振動を用いて骨導で聞こえることは、1948 年に Gavreau が報告して以来、多くの研究が Nature や Science 等に発表されている。我々は、聴力正常者と最重度難聴者を対象に脳磁図と PET を用いた超音波聴覚の中樞メカニズムを調べた。その結果、音が全く聞こえない最重度難聴者においても超音波刺激が脳の聴覚野を活性化すること、また超音波を carrier として異なる言語音が聴覚で区別されることを初めて証明した (Hosoi et al., 1998)。

(2) 超音波聴覚の臨床応用：現在、全く音を知覚できない最重度難聴者に対して人工内耳があるが、手術を要するために、適応が困難な難聴者も多い。我々は、上記の基礎的研究をもとに超音波を搬送波として音声を知覚系に伝える最重度難聴者のための超音波補聴器のプロトタイプを作成した。

2. 研究の目的

このような研究の流れの中で、次に解決しなければならない課題が 2 つ存在する。

(1) 超音波聴覚の基礎研究：どのような経路で超音波が脳の聴覚に達するのか超音波聴覚のメカニズムを解明する課題。

(2) 超音波聴覚の臨床応用：そのメカニズムを踏まえ、より効率的に言語音で変調した超音波をヒトの聴覚屋に送り、最重度難聴者が言葉を認識できるようにする補聴システム実用化の課題。この 2 つを解決することが本研究計画の目的である。

3. 研究の方法

(1) マスキング音を用いた末梢の知覚メカニズム

可聴音の聴覚機構の解明を行うためによく用いられる方法の一つにマスキング（ある音が別の音の介入で聞こえなくなる現象）がある。骨導超音波においてもマスキングを用いた聴覚実験を行うことで知覚メカニズムの解明に役立つと考えられる。そこで骨導超

音波による可聴音のマスキング実験を聴力正常者を対象に施行した。

(2) 骨導超音波と可聴音の閾値の比較

骨導超音波の知覚メカニズムを解明するため、聴力正常者 15 名及び難聴者 31 名に対する骨導超音波及び可聴音の閾値を測定し検討した。

(3) シスプラチン投与による骨導超音波の閾値変化

骨導超音波の聴取に外有毛細胞の働きが関係しているかどうか検討するため、シスプラチン（耳毒性物質）を用いた化学放射線法の治療前後で、可聴音及び骨導超音波の閾値にどのような変化が生じるか検討した。

(4) 骨導超音波語音の刺激長知覚

超音波を語音の周波数で変調することにより、それを聴取した被験者はその語音を聞き取ることができる。これは変調された超音波自体を聞いているという説と、聴覚路の過程で可聴語音に変換されるという二つの説が存在した。本研究では、この変調超音波による中枢の聴覚反応は骨導超音波と可聴音のどちらの知覚によるものなのか調べた。骨導超音波語音と気導語音（共に単音節「あ」）の刺激長を変化させて、それを聴取した被験者の脳磁界反応の N1m 振幅の変化を比較した。

(5) 骨導超音波語音のプロソディ（抑揚）知覚

語音で変調した骨導超音波によって、その語音自体が知覚されるものの、その言葉のプロソディまで知覚されるか検討されたことはない。そこで本研究は、標準刺激「行った（平叙）」、逸脱刺激「行った？（疑問）」または「行って（命令）」を呈示し、オボドール課題を行った。そして被験者の脳磁界反応を計測し、ミスマッチフィールド（MMF）を調べることで、骨導超音波語音の抑揚の弁別能について評価を行った。

(6) 骨導超音波補聴器によるリハビリテーション

骨導超音波補聴器は、マイクで入力した言葉によって超音波を変調し、振動子を通して利用者に伝える。この骨導超音波語音は、超音波特有の高音の中から語音を抽出して聴取しないとしないため、十分な訓練が必要である。そこで本研究は、最重度難聴者を対象に、骨導超音波補聴リハビリテーションを

実施した。補聴器を用いた会話や朗読・歌唱訓練、リズム演奏などに加えて、単語理解度テスト、語音明瞭度テストを行い、骨導超音波補聴器装着による聞こえの改善やリハビリテーションの効果を測定した。

4. 研究成果

(1) 骨導超音波による可聴音のマスキング

30 kHz の骨導超音波をマスキングとして用いた場合、わずか 5 dB SL の強さにも関わらず骨導超音波のピッチに近い 10-14 kHz の可聴音が強くマスキングされた。この結果から、骨導超音波の末梢の知覚器官は蝸牛の基底回転に存在することが分かった。

(2) 骨導超音波と可聴音の閾値の違い

難聴者の三分法平均聴力レベルは 58.5 dB であったが（つまり聴力正常者と比較して 58.5 dB 聴力が劣る）、骨導超音波の閾値の平均は、聴力正常者と比較して 7.3 dB しか高くなかった。このことから、骨導超音波聴覚は超音波より生じた可聴音を聞いているのではなく、超音波自体を聴取することで起こる現象であると考えられる。

(3) シスプラチン投与による骨導超音波の閾値変化

シスプラチンによる聴力障害の有無について、American Speech-Language-Hearing Association の基準で評価すると、25 耳 62.5% に障害を認めた。シスプラチンの投与により、純音聴力 8 kHz、高周波聴力 9-14 kHz の全ての周波数で有意な閾値の上昇を認めた。一方、骨導超音波では治療前後に閾値の有意な差は認められず、逆に慣れの影響で若干低下していた（図 1）。可聴音の結果が示す様に多くの耳で外有毛細胞の障害が原因と考えられる閾値上昇が認められているにも関わらず、骨導超音波の閾値が上昇していなかった事を考慮すると、骨導超音波の聴取に外有毛細胞の働きが関与している可能性は低い。

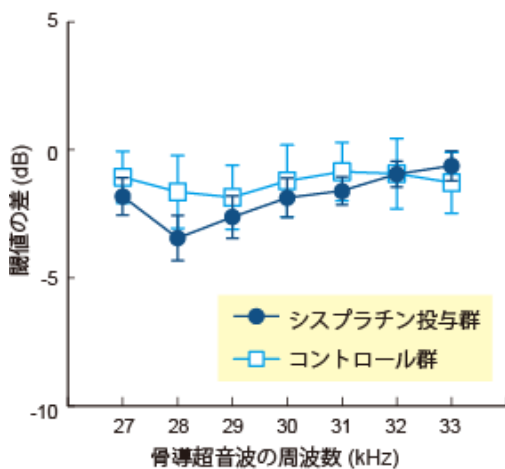


図 1 骨導超音波の閾値の変化量

(4) 骨導超音波語音の刺激長変化と N1m 振幅

骨導超音波語音、気導語音共に、刺激長の伸張に伴い、N1m 振幅が大きくなった。しかし、骨導超音波語音の N1m 振幅の増加は刺激長 40ms で飽和したのに対し、気導語音の N1m 振幅の増加は刺激長 20ms で飽和した。この結果から骨導超音波語音の時間積分は気導語音とは異なることが示唆され、骨導超音波語音の知覚は生体の非線形性により生成された可聴音によるものではなく、超音波自体の反応であることが示唆された。

(5) 骨導超音波語音のプロソディ変化と MMF

左側頭部で最大の MMF が得られたセンサーにおける MMF の等価電流ダイポールを推定した。骨導超音波語音と気導語音について、またプロソディと文節音について、共に主効果は認められなかった。骨導超音波語音と気導語音の文節音の等価電流ダイポールは同等の大きさだったが、骨導超音波語音のプロソディの等価電流ダイポールの大きさは、気導音よりも小さい傾向にあった。従って、骨導超音波語音のプロソディの弁別は気導音には劣る可能性が示唆されるものの、骨導超音波語音についてもプロソディの弁別が可能であることが示唆された。

(6) 骨導超音波補聴器によるリハビリテーション成果

最重度難聴者に骨導超音波補聴リハビリテーションを行った結果、選択肢やコンテキストといった事前のヒントがあれば、読唇なしに単語を弁別できることが分かった。また、補聴器から得られる聴覚の手がかりと、読唇で得られる視覚の手がかりを両方用いると、それぞれ単独の手がかりを利用するよりも高い語音明瞭度が得られた。またその語音明瞭度はリハビリ期間が経過するほど向上する結果が得られた。従って、リハビリを繰り返すことによって、言葉の弁別はより明瞭になる。

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 10 件）

① Hosoi Hiroshi, Yanai Syuichi, Nishimura Tadashi, Sakaguchi Takefumi, Iwakura Takashi, Yoshino K, "Development of cartilage conduction hearing aid," Archives of Materials Science and Engineering 42, pp. 104-110 (2010)

②赤坂咲恵, 西村忠己, 岡安唯, 細井裕司「難聴者における 57-S 語表の単音節別正答率の検討」Audiology Japan 53, pp. 69-75 (2010)

③呉将延, 岡本亮維, 猿渡洋, 鹿野清宏, 細井裕司「ICA による雑音推定を用いた平均二乗誤差最小化短時間振幅スペクトル推定法に基づく両耳補聴器」信学技報 109, pp. 7-12 (2010)

④福田英美, 柳井修一, 西村忠己, 清水直樹, 細井裕司「軟骨伝導によるラット聴性脳幹反応の測定」日本音響学会聴覚研究会資料 40, pp. 531-534 (2010)

⑤ Nishimura Tadashi, Okayasu Tadao, Uratani Yuka, Fukuda Fumi, Saito Osamu, Hosoi Hiroshi, "Peripheral perception mechanism of ultrasonic hearing," Hearing Research 277, pp. 176-183 (2011)

⑥ Okayasu Tadao, Nishimura Tadashi, Yamashita Akinori, Nakagawa Seiji, Nagatani Yoshiki, Yanai Syuichi, Uratani Yuka, Hosoi Hiroshi, "Duration-dependent growth of Nlm for speech-modulated bone-conducted ultrasound," Neuroscience Letters 495, pp. 72-76 (2011)

⑦Nishimura Tadashi, Uratani Yuka, Fukuda Fumi, Saito Osamu, Hosoi Hiroshi, "Hearing aids reduce overestimation in pre-fitting self-assessment," Auris Nasus Larynx 39, pp. 156-162 (2012)

⑧ Shimokura Ryota, Fukuda Fumi, Hosoi Hiroshi, "A case study of auditory rehabilitation in a profoundly deaf participant using a bone-conducted ultrasonic hearing aid," Behavioral Science Research 50, pp. 1-12 (2012)

⑨松井淑恵, 下倉良太, 斎藤修, 福田英美, 西村忠己, 細井裕司, 中川誠司「骨導超音波補聴による最重度難聴者の単音節知覚傾向」信学技報 111, pp. 13-18 (2012)

⑩ Okayasu Tadao, Nishimura Tadashi, Yamashita Akinori, Saito Osamu, Fukuda Fumi, "Human ultrasonic hearing is induced by a direct ultrasonic stimulation of the cochlea," Neuroscience Letters 539, pp. 71-76 (2013)

[学会発表] (計 32 件)

① Hosoi Hiroshi, Yanai Syuuichi, Nishimura Tadashi, Sakaguchi Takefumi,

Iwakuma T, Yoshino K, "Development of cartilage conduction hearing aid," The Eighteenth International Scientific Conference on AMME 2010, 13-17 June, Zakopane, Poland (2010)

②Yamashita Akinori, Nishimura Tadashi, Nagatani Yoshiki, Sakaguchi Takefumi, Okayasu Tadao, Hosoi Hiroshi, "Differences between bone-conducted ultrasound and audible sound in speech recognition," The 13th JAPAN-KOREA Joint Meeting of Otolaryngology-Head and Neck, 9-11 September, Seoul, Korea (2010)

③ Okayasu Tadao, Nishimura Tadashi, Yamashita Akinori, Nakagawa Seiji, Yanai Shuichi, Uratani Yuka, Nagatani Yoshiaki, Hosoi Hiroshi, "Growth of Nlm for stimulus saturation through bone-conducted ultrasound modulated by Japanese vowel sound," The 13th JAPAN-KOREA Joint Meeting of Otolaryngology-Head and Neck, 9-11 September, Seoul, Korea (2010)

④ Saruwatari Hiroshi, Go Masanobu, Okamoto Ryoi, Shikano Kiyohiro, Hosoi Hiroshi, "Binaural hearing aid using sound-localization-preserved MMSE STSA estimator with ICA-based noise estimation," International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control, 30 August, Israel, Korea (2010)

⑤西村忠己, 福田英美, 斎藤修, 宮前了輔, 岡安唯, 下倉良太, 高木悠哉, 細井裕司「軟骨伝導補聴器の開発(第2報) - 呈示部位による感度差 -」第55回日本聴覚医学会総会, 10月29日-30日, 奈良 (2010)

⑥下倉良太, 高木悠哉, 西村忠己, 細井裕司「軟骨伝導補聴器の開発(第3報) - 外耳道内の音響特性 -」第55回日本聴覚医学会総会, 10月29日-30日, 奈良 (2010)

⑦岡安唯, 西村忠己, 山下哲範, 中川誠司, 吉田悠加, 柳井修一, 長谷芳樹, 細井裕司「骨導超音波語音の母音刺激長に対するミスマッチフィールド」第55回日本聴覚医学会総会, 10月29日-30日, 奈良 (2010)

⑧Shimokura Ryota, Takaki Yuya, Nishimura Tadashi, Hosoi Hiroshi, "Development of cartilage conduction hearing aid - Loudness given by cartilage conduction transducer -, " The Midwinter Research Meeting of Association for Research in

Otolaryngology, 19 February, Baltimore, USA (2011)

⑨西村忠己, 山下哲範, 岡安唯, 細井裕司「難聴者を用いた骨導超音波知覚の検討」第112回日本耳鼻咽喉科学会総会, 5月19日-21日, 京都 (2011)

⑩ Shimokura Ryota, Takaki Yuya, Hosoi Hiroshi, "Sound localization using a cartilage conduction transducer of a hearing aid," The 5th International Symposium on Temporal Design, 21-22 July, Sheffield, UK (2011)

⑪岡安唯, 西村忠己, 山下哲範, 中川誠司, 吉田悠加, 柳井修一, 長谷芳樹, 細井裕司「骨導超音波語音のプロソディーの変化に対するミスマッチ反応」第56回日本聴覚医学会総会, 10月27日-28日, 福岡 (2011)

⑫西村忠己, 齋藤 修, 宮前了輔, 下倉良太, 福田英美, 森本千裕, 松井淑恵, 細井裕司「軟骨伝導補聴器の開発 (第4報) - 耳栓による軟骨伝導閾値の変化と呈示部位 -」第56回日本聴覚医学会総会, 10月27日-28日, 福岡 (2011)

⑬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5報) - 耳後部の音圧レベル計測 -」第56回日本聴覚医学会総会, 10月27日-28日, 福岡 (2011)

⑭松井淑恵, 下倉良太, 福田英美, 西村忠己, 細井裕司「最重度難聴者による骨導超音波補聴器装用訓練」第56回日本聴覚医学会総会, 10月27日-28日, 福岡 (2011)

⑮西村忠己, 齋藤 修, 宮前了輔, 下倉良太, 福田英美, 清水直樹, 森本千裕, 松井淑恵, 細井裕司「軟骨伝導補聴器の開発 - 耳栓による気導, 骨導, 軟骨伝導閾値の変化の比較 -」第21回日本耳科学会総会, 11月24日-26日, 宜野湾 (2011)

⑯ Shimokura Ryota, Matsui Toshie, Nishimura Tadashi, Hosoi Hiroshi, "Development of cartilage conduction hearing aid - Evaluation of bone conduction pathway -," The 14th JAPAN KOREA Joint Meeting of Otolaryngology-Head and Neck, 12-14 April, Kyoto (2012)

⑰Yamashita Akinori, Nishimura Tadashi, Nagatani Yoshiki, Okayasu Tadao, Hosoi Hiroshi, "The effect of visual information in speech signals by bone-conducted

ultrasound," The 14th JAPAN KOREA Joint Meeting of Otolaryngology-Head and Neck, 12-14 April, Kyoto (2012)

⑱Matsui Toshie, Shimokura Ryota, Saito Osamu, Fukuda Fumi, Nishimura Tadashi, Hosoi Hiroshi, Nakagawa Seiji, "Intelligibility of bone-conducted ultrasonic speech sounds: A case study of two profoundly hearing-impaired rehabilitants," The 14th JAPAN KOREA Joint Meeting of Otolaryngology-Head and Neck, 12-14 April, Kyoto (2012)

⑲西村忠己, 宮前了輔, 森本千裕, 下倉良太, 松井淑恵, 清水直樹, 細井裕司「軟骨伝導補聴器の開発 (1) - 正常者における軟骨伝導のラウドネス -」第113回日本耳鼻咽喉科学会総会, 5月10日-12日, 新潟 (2012)

⑳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総会, 5月10日-12日, 新潟 (2012)

21松井淑恵, 下倉良太, 西村忠己, 細井裕司「最重度難聴者の骨導超音波補聴リハビリテーションと語音聴取能」第113回日本耳鼻咽喉科学会総会, 5月10日-12日, 新潟 (2012)

22岡安唯, 西村忠己, 山下哲範, 松井淑恵, 下倉良太, 柳井修一, 細井裕司「シスプラチンを用いた化学放射線療法が骨導超音波聴力に与える影響」第113回日本耳鼻咽喉科学会総会, 5月10日-12日, 新潟 (2012)

23Shimokura Ryota, Matsui Toshie, Nishimura Tadashi, Hosoi Hiroshi, "Advantages of cartilage sound conduction in hearing aids," 2012 ICME International conference on complex medical engineering, 1-4 July, Kobe (2012)

24Okayasu Tadao, Nishimura Tadashi, Nakagawa Seiji, Yamashita Akinori, Uratani Yuka, Hosoi Hiroshi, "Mismatch fields elicited by prosodic change of speech-modulated bone-conducted ultrasound," 18th International conference on Biomagnetism, 26-30 August, Paris, France (2012)

25西村忠己, 細井裕司, 齋藤修, 宮前了輔, 下倉良太, 松井淑恵, 森本千裕, 清水直樹, 福田英美「軟骨伝導補聴器の開発 (4) - 慢性中耳炎症例に対しての装用効果 -」第22

回日本耳科学会総会, 10月4日-6日, 名古屋 (2012)

26 岡安唯, 中川誠司, 西村忠己, 山下哲範, 吉田悠加, 長谷芳樹, 細井裕司「刺激の周波数構造が聴覚野の時間積分に与える影響について」第57回日本聴覚医学会総会, 10月11日-12日, 京都 (2012)

27 下倉良太, 細井裕司, 松井淑恵, 西村忠己「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, 10月11日-12日, 京都 (2012)

28 松井淑恵, 下倉良太, 齋藤修, 福田英美, 西村忠己, 細井裕司, 中川誠司「重度難聴者による骨導超音波補聴器装用訓練 (第2報) - 語音明瞭度検査 -」第57回日本聴覚医学会総会, 10月11日-12日, 京都 (2012)

29 西村忠己, 細井裕司, 齋藤修, 宮前了輔, 下倉良太, 松井淑恵, 森本千裕, 福田英美「軟骨伝導補聴器の開発 (第6報) - 固定方法が閾値に及ぼす影響 -」第57回日本聴覚医学会総会, 10月11日-12日, 京都 (2012)

30 Nishimura Tadashi, Hosoi Hiroshi, Saito Osamu, Miyamae Ryosuke, Shimokura Ryota, Matsui Toshie, Iwakura Takashi, "Development of cartilage conduction hearing aid (2) - Benefits in patients with continuous otorrhea or acquired aural atresia," Association for Research in Otolaryngology 36th MidWinter Meeting, 16-20 February, Baltimore, USA (2013)

31 Shimokura Ryota, Hosoi Hiroshi, Matsui Toshie, Nishimura Tadashi, "Development of cartilage conduction hearing aid (3) - Monosyllable intelligibility in the noisy condition -," Association for Research in Otolaryngology 36th MidWinter Meeting, 16-20 February, Baltimore, USA (2013)

32 Yamashita Akinori, Nishimura Tadashi, Nagatani Yoshiki, Hosoi Hiroshi, "The effect of visual information on intelligibility in bone-conducted ultrasound perception," Association for Research in Otolaryngology 36th MidWinter Meeting, 16-20 February, Baltimore, USA (2013)

[図書] (計4件)

① 阪口剛史, 細井裕司「よくわかる聴覚障害 - 難聴と耳鳴のすべて -」永井書店, 408ページ, 5月15日 (2010)

② 細井裕司「言語聴覚士テキスト第2版」医歯薬出版, 409ページ, 3月10日 (2011)

③ 西村忠己, 細井裕司「耳鼻咽喉科診療 私のミニマム・エッセンシャル」全日本病院出版会, 272ページ, 4月25日 (2011)

④ 細井裕司「超音波と軟骨伝導による聴覚の基礎と新補聴システム」奈良県立医科大学耳鼻咽喉・頭頸部外科学, 232ページ, 5月 (2012)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

なし

[その他]

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細井裕司 (HOSOI HIROSHI)

奈良県立医科大学・耳鼻咽喉頭頸部外科学
講座・教授

研究者番号: 80094613

(2) 研究分担者

添田喜治 (SOETA YOSHIHARU)

(独) 産業技術総合研究所・健康工学研究
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・耳鼻咽喉頭頸部外科学
講座・助教

研究者番号: 60364072

下倉良太 (SHIMOKURA RYOTA)

奈良県立医科大学・耳鼻咽喉頭頸部外科学
講座・助教

研究者番号: 90455428

松井淑恵 (MATSUI TOSHIE)

奈良県立医科大学・耳鼻咽喉頭頸部外科学
講座・特別研究員

研究者番号: 10510034