

令和 4 年 5 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H03976

研究課題名（和文）構音シミュレーターと医療情報を用いた構音障害の物理的病理の推定

研究課題名（英文）Estimation of Physical Pathology of Articulatory Disorder Using Articulatory Simulator and Medical Information

研究代表者

野崎 一徳 (Nozaki, Kazunori)

大阪大学・歯学部附属病院・准教授

研究者番号：40379110

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：舌先端付近の挙上を再現する[s]構音単純モデルを用いて、[s]を含む音節調音時に縦音圧レベルと舌挙上速度との間にヒステリシスが存在することを突き止めた。[s]や[sh]の音響スペクトル特性の個人差は、上顎中切歯と上顎前方の舌との狭窄の距離から生じることを発見した。臨床的な意義として、上顎総義歯中切歯の歯軸傾斜角度の違いによる[s]音への影響を、数値解析し、角度が大きいと8~12kHzの周波数帯域が減少するメカニズムを突き止めた。また口唇口蓋裂や舌癌既往の患者に関して、ニューラルネットワークを用いた自己教師あり学習を行い、患者の音声特性を反映した音声認識の実現可能性に関して有効性が確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会を構成する人々が健康で文化的な生活を営む上で、音声言語による会話は重要なヒトの機能の一つである。そのため、構音障害をもつ方々のリハビリテーションを支援する理論やデバイスの開発が、ダイバーシティ&インクルージョンの観点からも急務である。本研究成果は、音声言語を構成する全ての音素や単語を網羅していないが、構音障害の理解とリハビリテーションにつながるアプローチの仕方は、その他の音声言語研究に有効であろう。特に空力音響学に基づいた構音障害が生じるメカニズムの解明は、これまで医療関係者が経験則からでも想定することが困難であった、非線形物理現象を理解する上で貴重な指標となると予想される。

研究成果の概要（英文）：Using a simple model of [s] articulation that reproduces raising near the tip of the tongue, we found that hysteresis exists between the total sound pressure level and the velocity of tongue raising during syllable articulation with [s]. We found that individual differences in the acoustic spectral characteristics of [s] and [sh] result from the distance of constriction between the maxillary central incisor and the anterior maxillary tongue. Of clinical significance, we numerically analyzed the effect on [s] sound of the different angles of inclination of the maxillary full denture central incisor tooth axis, and found a mechanism by which the frequency band of 8-12 kHz is reduced when the angle is large. In addition, the effectiveness of neural network-based self-supervised learning for patients with cleft lip and palate and tongue cancer was confirmed in terms of the feasibility of speech recognition that reflects the patient's speech characteristics.

研究分野：医療情報学

キーワード：構音 数値計算 空力音響 構音障害 調音結合 医療情報 機械学習 可視化

1. 研究開始当初の背景

この研究の核心的な「問い」は、構音障害によって生じる音声の歪を制御するために必要な知識とは何か、というものである。構音障害の発生原因は原発の疾病が器質的な変化を口腔領域に生じさせ、その変化は音声を特徴づける物理現象(音源発生、共鳴)に影響を及ぼす。図1に示すように共鳴現象は、解剖学的な空間寸法が音源の波長と特定の関係を満たすことで生じる。さらに口腔で生じた音源からの音波は口唇の開口形状による音圧の増幅効果によって遠方まで伝わることになる。構音障害のリハビリテーションにおいて、口腔領域の形状に器質的な変化を代償させる筋骨格系の運動を患者に習得させることや、口腔内補綴物形状を最適形状に近づけることが目的となる。そのためには、聞き手に伝わる音(遠方場音)がどのような過程を経て生成(構音)されたかを明らかにし、聞き取りが難しい音について、その原因を取り除く必要がある。

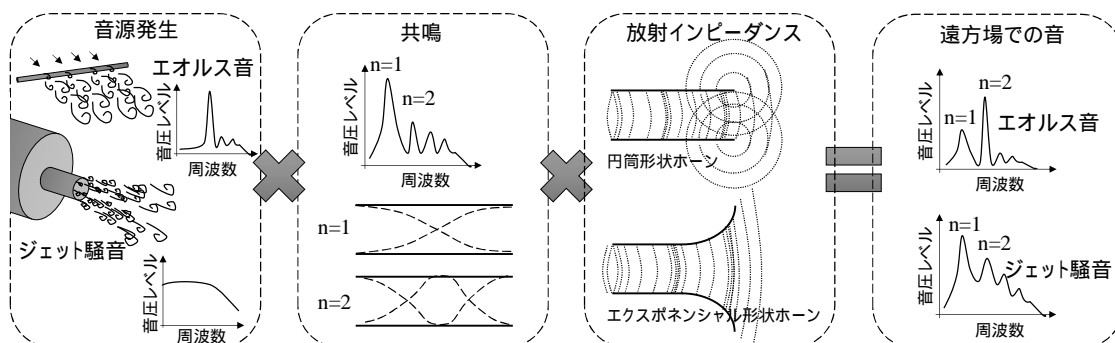


図1 音の振動理論による音源、共鳴、放射インピーダンス及び遠方場での音の関係

例えば無声摩擦子音/s/は「さ」行の音素であり、義歯製作時や前歯部治療時等に適切な形状を与えなければ構音障害が発生することが知られている。/s/に関しては、口腔内で形成される狭めからジェット流が発生し、障害物と衝突し、高周波音が発生する空力音モデルが示されている(1)。このようなモデル実験では、ヒューリスティックにモデルに与える形状を決定し、発生する流れ場や遠方場での音を測定し、解剖学的な実形状から発生する値とどの程度一致するかを調べる。我々は構音障害の無い被験者の、/s/や/sh/構音時の気道の中から特徴的な5箇所の断面形状をCT画像から抽出し、流れ方向に5つの直方体を連結した流路を構築することにより、同じくCTやMR画像から抽出し実形状から発生した遠方場音と音圧レベルを一致させることに成功し(2)、数値流体シミュレーションで音源分布を確認した(3)。

これまでの研究から、健常人の構音(/s/及び/sh/)については詳細な物理的メカニズムを理解することが出来た。しかし、構音障害のメカニズムを明らかにするにはさらなる実験的アイデアが必要となる。その一つとして構音障害が生じる機序を含む空力音モデルの導出がある。図1に示したように音源発生と共鳴及び放射特性により決定論的に予測可能である。しかし歯科治療時の義歯や前歯部に付与された形状に起因する器質性構音障害は口腔形状に影響を及ぼすため、物理的には音源発生と共鳴及び放射特性のそれぞれに影響を及ぼす。具体的には、口腔形状は上下顎位置関係及び歯列状態、口蓋形状や舌運動、さらに鼻咽腔閉鎖機能の影響を受ける(図2)。構音の空力音モデルを考えると、遠方場音は、音源発生と共鳴及び放射特性が振動理論(4)により掛け合わされることで求められるため、口腔形状と遠方場音との関係は非線形であることが予想される。現在、このような非線形な関係を臨床現場では医学的知識を基に直感的且つ経験的に捉え、患者のリハビリテーションを行っていると考えられる。

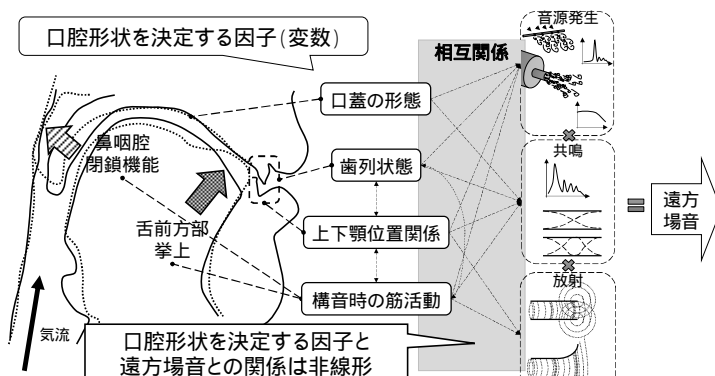


図2 口腔形状の決定因子と遠方場音との非線形な関係

このような非線形の問いに答えるためには、構音障害に関する医療情報を収集し、そこに潜在する何らかの法則性を見つけ出すという帰納的なアプローチを選択することになる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、医療情報と構音の物理的メカニズムを基盤とした構音障害に関する物理的病理の深層学習による推定とその評価である。ここで扱う医療情報は、電子カルテだけではなく

医療画像及び音声データを含む。さらに構音の物理的メカニズムとは、空力音モデルにより説明可能な物理的解釈のことを示唆しており、物理学的には空力音響学を基礎とした考え方をを用いている。物理的病理とは、病院における病理診断のアナロジーで、基礎(研究)と臨床(治療)を結びつけることを意味している。

### 3. 研究の方法

本研究は臨床研究、医療情報基盤、生体医工学解析の3グループが連携して取り組んだ。臨床研究Gはまず、構音障害患者の音声や口腔内診査情報、超音波画像を含むマルチモーダルデータをスクリーニング調査として取得し、データベースに登録する。医療情報・音声解析Gで構築する構音障害シミュレーターから形状を推定し最適補綴物に関して大規模数値シミュレーション及び物理実験により調査した。最終的に構音障害原因推定手法の有効性を音声医学的見地から評価した。

生体医工学解析Gは、これまで我々が研究を行ってきた空力音モデルの適用範囲を拡大し、舌運動を組み込んだ構音シミュレーターを試みた。舌運動を組み込むことにより、音素同士の調音(調音結合)の表現を可能とし、構音障害を再現することを試みた。医療情報基盤Gと協力して、構音障害患者のスクリーニング調査から得られる音声データ等を再現するため、マイクロフォン等実験装置を用い構音障害シミュレーターを構築した。

医療情報基盤Gは、患者スクリーニング調査結果をデータベースで保管した。さらに保管された構音障害のある患者データを対象に、構音障害患者の画像及び音声データから Deep Speech2(6)等の手法(CNN)を参考にして、構音障害特徴ベクトルの抽出を行い、自己教師あり学習を用いて、患者さんの望む自らの音声を理解するAIの構築を行った。

実際には患者特徴ベクトルと構音障害特徴ベクトルと、口腔形状と(空力音の)物理法則との相互関係(図2)との間の関係を、機械学習した構音障害シミュレーターに与え、物理的な現象を再現(デコード)し、遠方場音を発生させる基盤構築を行った。

### 4. 研究成果

舌先端付近の挙上は、舌による構音において最も高速に行われる舌運動の一つである。そのためMRやCT画像により精度の高い3次元実形状を取得することが困難である。そこで、我々の研究グループで開発した[s]構音単純モデルを応用し、[s]調音単純モデルを構築した。これにより、任意の加速度で舌先端を模した形状の構造物を気道形状中の狭窄を形成するように挙上することを可能とした。[s]を含む音節(母音-子音-母音:VCV)の調音時に、**総音圧レベルと舌挙上速度との間にはヒステリシス(履歴現象)が存在することがわかった**。さらに構音障害の要因を明らかにするため、歯科医療において問題が生じやすい音素である[s]音に関して、圧縮性のナビエ・ストークス方程式を用いた数値解析によって、調音結合時の気道内での流れと、そこから生じる音源成分、そして伝播する圧力波を導出し、遠方場での音のスペクトル特性がよく一致することを確認した。さらに**[s]音を含む調音結合では上顎中切歯口蓋側面において縦渦が生じていることが可視化された**。圧縮性のナビエ・ストークス式を用いた数値解析は「京」や「富岳」といったスーパーコンピューターを用いて行われ、大規模なデータをパイプライン処理により最適な視点から頻繁に可視化することで、効率的な計算を実施することができた。

摩擦子音の音響スペクトル特性には個人差が存在している。この個人差に、[s]や[sh]構音時の気道形状において、どの箇所が関連しているかについて、圧縮性のナビエ・ストークス式を用いた数値解析を行った。その結果、**上顎中切歯先端付近と上顎前方部と舌先端部で形成される狭窄の出口付近との間の距離が遠方場での音響的特徴に関与していることがわかった**。

上顎総義歯中切歯の歯軸傾斜角度の違い(30°)による[s]音への影響を、圧縮性のナビエ・ストークス式を用いた数値解析により検討し、歯軸角度を口唇側に大きくすると、流れの形態が変化し、乱流強度の高い領域の位置が口唇側に移動し、8~12 kHzの周波数帯域の音の振幅が減少することがわかった。**切歯歯軸の変化は特に高周波成分に影響をおよぼすことが明らかとなった**。さらに実臨床への適応を考慮し、声道形状の格子生成時間を階層構造格子を用いることで大幅に短縮することに成功した。

舌筋繊維を考慮した有限要素法による舌機能モデルの構築を行った。ヒトにおける舌突出を実現するために、初期条件に重力を与えることで、前方への舌突出再現性が向上することを確かめた。非侵襲的に小児から老人まで構音時の気道形状を観察し、計測することは、構音障害を同定する際に有効であろうと考えられる。そこで超音波画像撮影装置により複数人の健康人に対して構音時の気道縦断面形状の変化を観察した。さらに、舌癌既往患者の構音時の気道の観察を行った結果、縦断面のエコー画像のみでは物理的な舌の動態が把握できないことが分かった。縦断面像に加え横断面像を同時に得られる超音波画像撮影装置を用いることにより、舌突出時の正中付近における内舌筋と外舌筋の動作が確認できた。舌突出時に機能(収縮)するとされている中オトガイ舌筋は、収縮していないことが分かった。

口唇口蓋裂や舌癌既往の患者に関しては、自らの声質で会話を成立させたいという願望があり、ボイスコマンド等の音声認識の利活用への期待が大きい。5名の患者にATR503文を朗読してもらい、その音声を用いて、ニューラルネットワークを用いた自己教師あり学習を行った。その結果、患者の音声特性を反映した音声認識の実現可能性に関して有効性が確かめられた。

本成果の一部は令和4年9月より国立民族博物館「Homō loquēns『しゃべるヒト』ことばの不

思議を科学する」にて展示される予定である。

#### 参考文献

- (1) Shadle CH., 1985, The Acoustics of Fricative Consonants, Ph. D thesis, MIT, Cambridge, MA, 194 pp.
- (2) **Nozaki K.\***, Yoshinaga T., Wada S., 2014, Sibilant/s/simulator based on computed tomography images and dental casts, Journ Experimental and numerical investigation of the sound generation mechanisms of sibilant fricatives using a simplified vocal tract model, Physics of Fluids 30(3), 035104
- (3) Fant G., 1970, Acoustics Theory of Speech Production, 2nd printing Mouton, The Hague 328 pp.
- (4) Kitano H., 2002, Systems biology: a brief overview, Science **295** 1662-64
- (5) Amodei D., Anubhai R., Battenberg E., et al., 2015, Deep Speech 2: End-to-End Speech Recognition in English and Mandarin, arXiv preprint arXiv:1512.02595.
- (6) Miotto R., Li L., Kidd B., Dudley J., 2016, Deep Patient: An Unsupervised Representation to Predict the Future of Patients from the Electronic Health Records, Scientific Reports, **6** 26094.
- (7) Hochreiter S., Schmidhuber J., Long Short-Term Memory, 1997, Neural Computation, **9**(8), pp.1735-1780.
- (8) Jiang YG., Wu Z., Wang J., Xue X., Chang SF., 2018, Exploiting Feature and Class Relationships in Video Categorization with Regularized Deep Neural Networks, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **40**(2), pp.352-364.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshinaga Tsukasa, Nozaki Kazunori, Iida Akiyoshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Hysteresis of aeroacoustic sound generation in the articulation of [s]	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 105114 ~ 105114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshinaga T., Van Hirtum A., Nozaki K., Wada S.	4. 巻 476
2. 論文標題 Acoustic modeling of fricative /s/ for an oral tract with rectangular cross-sections	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 115337 ~ 115337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsv.2020.115337	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshinaga Tsukasa, Nozaki Kazunori, Wada Shigeo	4. 巻 14
2. 論文標題 A simplified vocal tract model for articulation of [s]: The effect of tongue tip elevation on [s]	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0223382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0223382	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshinaga Tsukasa, Nozaki Kazunori, Wada Shigeo	4. 巻 146
2. 論文標題 Aeroacoustic analysis on individual characteristics in sibilant fricative production	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 1239 ~ 1251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/1.5122793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lu HsuehJui, Yoshinaga Tsukasa, Li ChungGang, Nozaki Kazunori, Iida Akiyoshi, Tsubokura Makoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Numerical investigation of effects of incisor angle on production of sibilant /s/	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-96173-2	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 山岡義明, 坂本尚久, 野中丈士, 吉永司, 野崎一徳
2. 発表標題 In-situ可視化向け適応的視点選択
3. 学会等名 第34回 数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富士原健斗, 高島遼一, 杉山千尋, 田中信和, 野原幹司, 野崎一徳, 滝口哲也
2. 発表標題 口唇口蓋裂者の音声認識のためのデータ拡張方式の検討
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinaga T., Nozaki K., Yokoyama, H. and Iida A.
2. 発表標題 Aeroacoustic simulation on a simplified vocal tract model with tongue movement for the articulation of [s]
3. 学会等名 Proceedings of 12th International Conference on Voice Physiology and Biomechanics (ICVPB2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshinaga T., Nozaki K., and Iida A.
2. 発表標題 Relationships between turbulent flow configuration and sound source location of Japanese sibilant fricatives
3. 学会等名 Proceedings of 12th International Seminar on Speech Production (ISSP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshinaga T., Nozaki K., Yokoyama, H. and Iida A.
2. 発表標題 Aeroacoustic simulation on sibilant fricative production using a volume penalization method
3. 学会等名 Proceedings of 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) and ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉永司, Rafia Inaam, 荒井隆行, 横山博史, 飯田明由
2. 発表標題 リード式人工声帯の空力音響シミュレーション
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉永司, Rafia Inaam, 荒井隆行, 横山博史, 飯田明由
2. 発表標題 人工声帯の流体 構造 - 音響連成シミュレーション
3. 学会等名 第 34 回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lu, Hsuehju; Li, Chunggang; Iida, Akiyoshi; Yoshinaga, Tsukasa; Nozaki, Kazunori; Tsubokura, Makoto
2. 発表標題 A framework for simulation of sibilant fricatives using implicit compressible flow solver
3. 学会等名 APS Division of Fluid Dynamics (Fall) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsukasa Yoshinaga, Kazunori Nozaki, Shigeo Wada, Akiyoshi Iida
2. 発表標題 Effects of vocal tract geometrical differences on flow and sound of sibilant fricatives
3. 学会等名 Acoustical Society of America (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉永司, 野崎一徳, 和田成生
2. 発表標題 摩擦音/s/及び/sh/発音の被験者の違いを表す口腔単純形状モデルの構築
3. 学会等名 システム制御情報学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野崎一徳, 山田朋美, 笹井正志, 岡真太郎, 林美加子
2. 発表標題 構音障害に関する物理的に非線形な病理の解明に向けた取り組み
3. 学会等名 システム制御情報学会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 野崎一徳, 杉山千尋, 畠中耕平, 中川真智子, 阪井丘芳, 野原幹司, 苅安誠, 山城隆, 古郷幹彦
2. 発表標題 摩擦子音構音時の鼻咽頭閉鎖機能における物理的戦略
3. 学会等名 流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山岡義昭, 林賢悟, 坂本尚久, 野中丈士, 吉永司, 野崎一徳
2. 発表標題 大規模数値計算結果の時空間分布変化を考慮した適応的 In-Situ 可視化
3. 学会等名 流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsukasa Yoshinaga, Kazunori Nozaki, Shigeo Wada
2. 発表標題 Individual Differences of Airflow and Sound Generation in the Vocal Tract of Sibilant /s/
3. 学会等名 Interspeech2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiaki Yamaoka, Kengo Hayashi, Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka
2. 発表標題 In-Situ Adaptive Timestep Control and Visualization based on the Spatio-Temporal Variations of the Simulation Results
3. 学会等名 In Situ Infrastructures for Enabling Extreme-scale Analysis and Visualization (ISAV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiaki Yamaoka, Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka
2. 発表標題 Adaptive Spatial and Temporal Sampling for In-situ Visualization
3. 学会等名 The 2nd R-CCS International Symposium, Poster presentation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山岡 義昭, 林 賢悟, 坂本 尚久, 野中 丈士, 吉永 司, 野崎 一徳
2. 発表標題 In-situ可視化向け適応的時間サンプリング法
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム (CFD33)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kento Fujiwara, Ryoichi Takashima, Chihiro Sugiyama, Nobukazu Tanaka, Kanji Nohara, Kazunori Nozaki, Tetsuya Takiguchi
2. 発表標題 Data augmentation based on frequency warping for recognition of cleft palate speech
3. 学会等名 2021 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsukasa Yoshinaga, Kohei Tada, Kazunori Nozaki, Akiyoshi Iida
2. 発表標題 A Simplified Model for the Vocal Tract of [s] with Inclined Incisors
3. 学会等名 Proc. Interspeech 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「ヒ」と「シ」の発音を混同するメカニズムをリアルタイムMRIとスーパーコンピュータにより解明  
[https://www.eurekalert.org/pub\\_releases\\_ml/2021-04/tuot-4040721.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases_ml/2021-04/tuot-4040721.php)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野原 幹司  (Nohara Kanji)  (20346167)	大阪大学・歯学研究科・准教授   (14401)	
研究分担者	坂本 尚久  (Sakamoto Naohisa)  (20402745)	神戸大学・システム情報学研究科・准教授   (14501)	
研究分担者	吉永 司  (Yoshinaga Tsukasa)  (50824190)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教   (13904)	
研究分担者	和田 成生  (Wada Shigeo)  (70240546)	大阪大学・基礎工学研究科・教授   (14401)	
研究分担者	山田 朋美  (Yamada Tomomi)  (70452448)	大阪大学・歯学研究科・助教   (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	笹井 正思  (Sakai Tadashi)  (90283796)	大阪大学・歯学部附属病院・助教    (14401)	
研究分担者	阪井 丘芳  (Sakai Takayoshi)  (90379082)	大阪大学・歯学研究科・教授    (14401)	
研究分担者	滝口 哲也  (Takiguchi Tetsuya)  (40397815)	神戸大学・都市安全研究センター・教授    (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関