

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03192

研究課題名（和文）集中系モデルを用いた発声障害診断技術の開発

研究課題名（英文）Development of vocal disorder diagnosis method by using concentrated mass model

研究代表者

石川 諭（Ishikawa, Satoshi）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60612124

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、声道内の空気を集中系でモデル化し、マイクで測定した音声データから声帯部の流速変動を逆解析する発声障害診断手法を提案する。研究期間内では、人間の発声機構を模した発声モデル（簡易モデルと詳細モデル）を作製して、模型出口の音から声帯部の速度変動を逆解析し、診断手法の妥当性を検証した。そして、発声障害患者の音声データを用いて声帯部の速度変動を逆解析し、声帯ポリープ、ポリープ様声帯、声帯麻痺などの疾患ごとの速度変動波形をある程度分類できた。さらに、声帯の振動含めた音声生成解析モデルを作成し、人間の発声メカニズムを明確にして、いくつかの発声障害をシミュレーションできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

喉頭がん、声帯ポリープなどの発声障害は早期発見が重要である。発声障害の診断では、画像診断の他に音声検査（GRBAS尺度）が行われているが客観性に乏しい。音声から声帯部の流速変動（声帯音源波）を推定できれば、声帯の病変が直接的に影響するため、病変をより正確に知ることができる。本研究では、マイクで測定した音声から声帯音源波形を逆解析する診断手法を提案した。提案手法は計算負荷の少ない診断手法であるため、音声障害診断への適用のみならず集団検診やインターネットを利用したスクリーニング診断にも展開できる。また、音声生成解析モデルを作成し、発声メカニズムや疾患による音声変化のメカニズムの一部を明確にした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we propose a method for diagnosing vocal dysfunction in which air in a vocal tract is modeled as a concentrated mass model and flow velocity waveform in the vocal folds are inversely analyzed from voice data measured by a microphone. During the research period, a vocalization model (simple model and detailed model) imitating human vocalization mechanism was produced, and the velocity waveform in the vocal cords was inversely analyzed from the sound at the model exit, and the validity of the diagnostic method was verified. Then, we analyzed the velocity waveform in the vocal cords using the voice data of dysphonia patients, and classified the velocity waveforms for each disease such as vocal cord polyps, polyp-like vocal cords, and vocal cord paralysis. Furthermore, we made a speech generation analysis model including vocal cord vibrations, clarified the human vocalization mechanism, and simulated some vocalization disorders.

研究分野：機械力学

キーワード：発声障害診断 音声生成解析 声帯振動 自励振動 集中系モデル 喉頭がん 声帯ポリープ 声帯麻痺

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

喉頭がん、声帯ポリープなど喉の声帯付近(図1)の異常による発声障害は早期発見が重要である。これらの病変は声帯の振動に影響を与え、嗄声と呼ばれるしわがれ声などの症状が現れる。発声障害の診断では、画像診断の他に音声検査が行われ、GRBAS尺度が使用されている[1]。これは、医師が声を聞き、声の粗糙性や氣息性などを4段階で評価するものであるが、主観的な評価であるため、医師によって判断が異なる問題がある[1]。客観的な評価手法として、音声の平均ピッチ周期、ピッチ周期の変動特性などの特徴パラメータを音声から算出する研究[2]があるが、臨床現場で広く利用されるには至っておらず[1]、病変と特徴パラメータの物理的な因果関係も不明である。音声検査において、音声から声帯部の流速変動(声帯音源波、図3)を推定できれば、声帯の病変が直接的に影響するため、病変をより正確に知ることができるが[3]、逆問題となるため声帯音源波形の一般解を求めることは難しい[3]。このように、客観的な発声障害診断手法が求められ、声帯部の流速変動解析することが有力な手段となり得る。

2. 研究の目的

本研究では声道内の空気を集中系でモデル化し、マイクで測定した音声データから声帯音源波形を逆解析する発声障害診断手法を提案する。そして、発声装置を製作し、提案手法の妥当性を検証する。さらには、各疾患による声帯音源波形の変化の特性および変化のメカニズムを実体模型の実験や声帯の自励振動を含めた音声生成解析により確認し、発声機構および疾患発声時物理的メカニズムを明確にし、診断に有用な知見(治療後の変化など)を得ることを目的とする。提案診断手法は1次元の解析モデルを用いた計算負荷の少ない簡易的な診断手法であるため、音声障害診断への適用のみならず集団検診やインターネットを利用したスクリーニング診断にも展開できる。

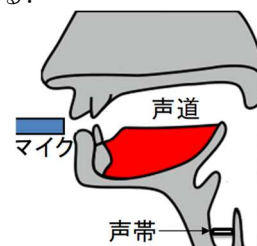


図1 声道断面図

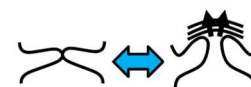


図2 声帯振動



図3 声帯音源波

3. 研究の方法

人が声を発するとき、声帯が振動して(図2)呼気の流速が変動し、図3のような声帯音源波を形成する。この音源波が声道(図1)を通過し、声道の周波数特性により音声となる。本研究では、マイクで測定した音声データから声帯音源波を逆解析する。逆解析は以下の手順で行う。

- (i) 声道を断面積の異なる円筒管を連結した形状で近似し、空気を質点・結合ばね・結合減衰で構成される集中系でモデル化(図4)。
- (ii) 測定した母音音声(図5(a))の周波数スペクトルの包絡線からフォルマント周波数 F_1, F_2, F_3, F_4 (声道内の共鳴周波数)を算出し(図5(b))、4次までのフォルマント周波数と集中系モデルの固有振動数が一致するように声道形状を同定する(図5(c))。
- (iii) 測定音声波形(図5(a))を同定した声道の唇部に音圧として与え、伝達マトリクス法(集中系モデル)により声帯部の速度変動(図5(d))を逆解析する。

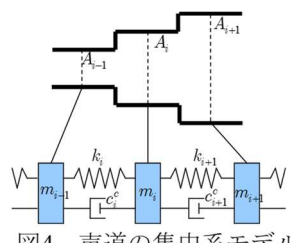


図4 声道の集中系モデル

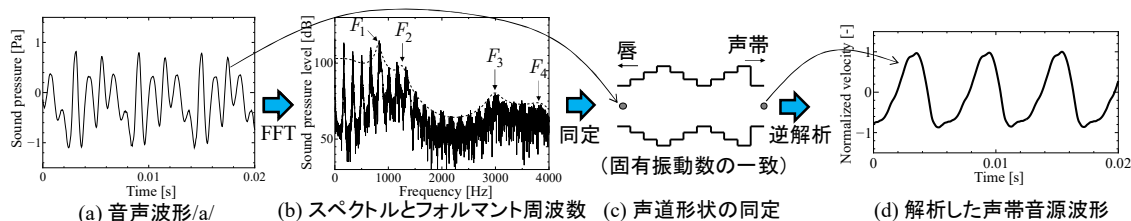


図5 声帯音源波の解析手順

この逆解析手法による診断技術を開発するために、以下の取組みを遂行した。

- (1) アクリルで作成した声道模型内の空気をピストンで加振し、声道模型出口の音からピストンの速度変動を逆解析し、簡単な系における声帯音源波逆解析手法の妥当性を検証する。
- (2) ヒトの気道・声帯・声道を模して、発声模型を製作する。この発声模型を用いて発声時の声帯部流速変動を測定し、声帯音源波逆解析結果と比較することによりヒトに近い場合の逆解析手法の妥当性を検証する。
- (3) 声帯の自励振動を含めた音声生成解析モデルと自励振動の実験装置を製作し、発声時の自励振動発生メカニズムを探る。
- (4) 発声障害患者の音声データを用いて声帯音源波形を逆解析し、声帯ポリープ、声帯結節、声帯麻痺などの疾患ごとの声帯音源波形を分類し、疾患を特定する診断の可能性を検証する。

4. 研究成果

研究期間内に得た本研究の成果を以下にまとめる。

(1) ピストン加振声道模型による逆解析手法の妥当性確認

声帯音源波形逆解析手法の妥当性を検証するため、図6のようなアクリル製の声道模型の下端からピストン加振する実験装置を作製した。図の声道模型は日本語母音/a/の形状である。声道出口のマイクで測定した音からピストン部分の速度を逆解析し、加速度ピックアップで計測したピストン速度と比較する。

集中系モデル（声道内の音響解析）を用いて、声道内の固有振動数とフォルマント周波数（図5(b)）が一致するように声道形状を同定する。図7が声道形状の同定結果であり、赤が初期形状を/a/の声道形状にした場合、青が初期形状を/u/の場合、緑が初期形状を直管にした場合の同定結果である。これより、初期形状によって同定した形状が異なるが、どの形状も固有振動とフォルマント周波数が一致していることを確認している。図8は音圧波形（図5(a)）から図7の声道形状を用いて逆解析した声帯音源波形（赤、青、緑）とピストン速度（黒）を比較したものである。各初期形状

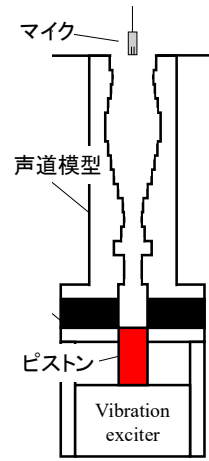


図6 発声実験装置

の声帯音源波形とピストン速度は振幅が異なるものの、波形はよく似ている。図9は、図8の各声帯音源波形を振幅で正規化したものであり、どの初期形状においてもよく一致していることが分かる。これより、声道形状同定時の初期形状によらず、逆解析した声帯音源波形の形状は一致する。このことは別途、数学的に証明している。図10は声帯音源波形とピストン速度を正規化して比較したものであり、逆解析した声帯音源波形とピストン速度の波形がよく一致していることが分かる。以上より、提案した声帯音源波逆解析手法がピストン加振する簡易的な実験装置を用いて妥当性を確認した。

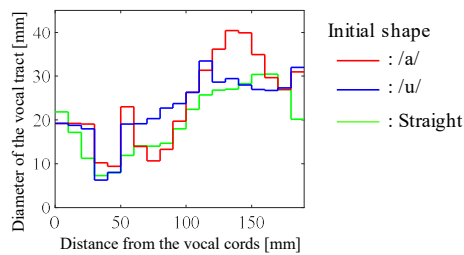


図7 声道形状同定結果

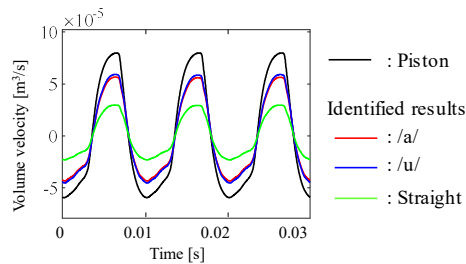


図8 声帯音源波形（逆解析）とピストン速度

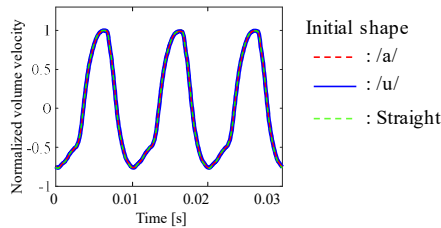


図9 声帯音源波形（正規化）

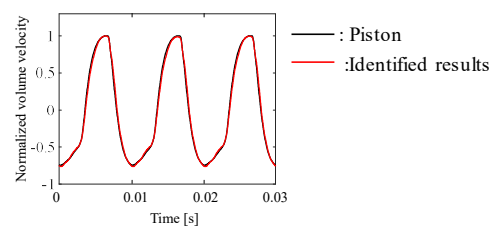


図10 声帯音源波形とピストン速度（正規化）

(2) 発声模型にいる逆解析手法の妥当性確認

実際の発声に近い状況における声帯音源波形逆解析手法の妥当性を検証するために、図11のような発声模型を製作した。アクリルパイプで気道と声道を作成し、声帯はシリコンチューブの両端を器具で固定している。気道部分のパイプをエアーコンプレッサーに接続して空気を流して声帯を振動させ、出口の音声をマイクで流速変動をレーザー・ドップラー流速計で計測する。

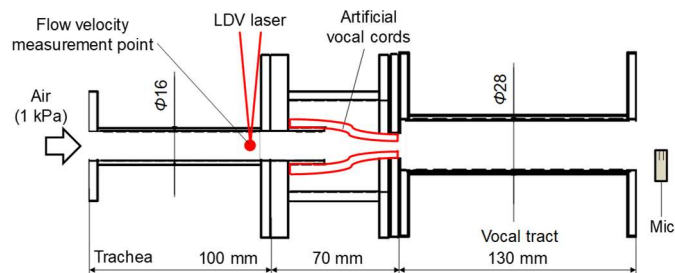


図11 発声模型

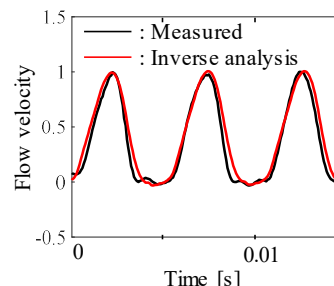


図12 声帯音源波形（正規化）

マイクで測定した音声波形から逆解析した声帯音源波形を図 12 に示す．赤線が逆解析した結果，黒線はレーザー・ドップラー流速計で計測した流速である．これより，逆解析した声帯音源波形が計測した流速波形とよく一致していることが分かる．以上より，ヒトの発声機構を模した発声モデルにおいても，声帯音源波形の逆解析手法の妥当性を確認した．

(3) 音声生成解析モデルの開発と自励振動メカニズムの解明

病変による声帯音源波形変化の特性およびメカニズムを把握するため，声帯部の自励振動を含めた気道から声道までの音声生成モデルの作成と，声帯の自励振動の発声メカニズムの解明を行った．これまでの音声生成モデルとしては，Ishizaka ら[4]の 2 質点モデルなどがあるが，実際の声帯の形状・物性から 2 質点モデルのパラメータを決定することが難しく，実際の声帯の自励振動を再現することが困難な問題があった．汎用数値解析ソフトを用いた構造 - 流体連成解析を行えば実体に即した解析ができるが，計算負荷が大きくなり，自励振動メカニズムの解明が難しい．

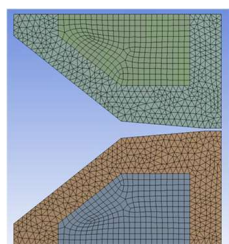


図 13 有限要素モデル

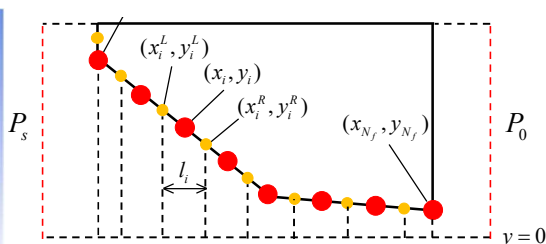


図 14 声帯振動節点と流体解析要素

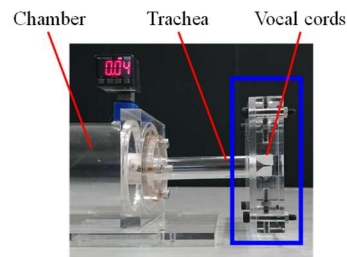


図 15 発声模型

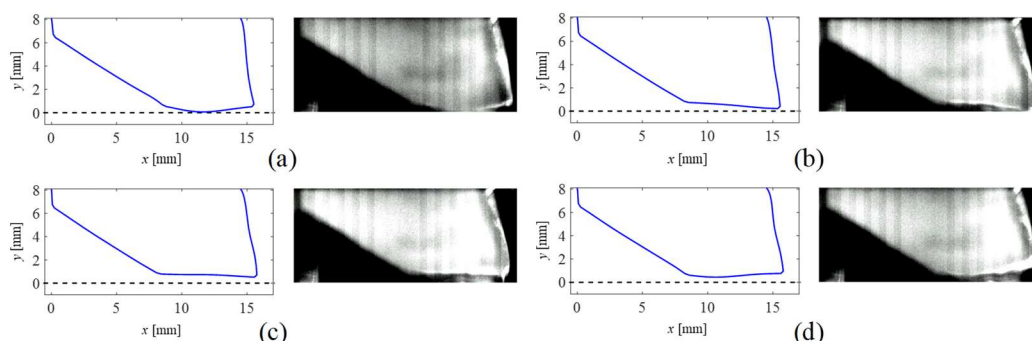


図 16 声帯振動時の形状（左：解析結果，右：高速度カメラ撮影結果）

そこで，声帯部分を有限要素法でモデル化し，モード解析を用いた 2 次元声帯振動モデルと 1 次元流体解析モデルを連成させた音声生成モデルを作成した．声帯は図 13 のように有限要素法でモデル化し，モード解析を用いて 2 次元声帯振動モデルを作成する．このとき，振動変位の節点は，図 14 の赤点で示すように声帯の表面に取る．流体解析は図 14 の点線の短冊状要素をとり，Ishizaka ら[4]と同様にベルヌーイの定理を用いて 1 次元流体解析モデルを作成する．そして，声帯振動モデルと流体解析モデルを連成させて音声生成解析を行う．このモデルは声帯振動の実体に即しながら計算負荷が小さい解析モデルである．

提案モデルの妥当性を確認するため，実際の声帯に近い形状の人工声帯を用いた発声模型を作製し，解析結果と実験結果の比較を行う．図 15 は作製した発声模型を示し，声帯部分は実際の声帯に近い形状をシリコンで作成したものを用いている．声帯の自励振動は高速度カメラで撮影する．図 16 は解析結果と高速度カメラによる撮影結果を比較したものであり，声帯振動の 1 周期を 4 分割したときの声帯形状を示している．この図では上側の声帯のみの形状を示しているが下側の声帯は上下対称になっている．上下の声帯の接触点が上流側から下流側へ向かい，その後上下の声帯が離れる様子を解析でよく再現できている．以上より，音声生成解析モデルは妥当であるといえる．このように，解析結果と声帯自励振動の詳細な比較を行った研究はこれまでに見当たらない．

さらに，シューティング法を用いた非線形定常周期解の求解を行い，自励振動解の発生領域の把握や自励振動の発生メカニズムを解明した．図 17 は，声帯のヤング率 E_c と肺圧 P_s を変化させたときの解の存在領域を示し，色は流速変動の振幅を表し，白色は解が存在しない領域を示している．この図より，声帯材料が柔らかく，肺圧が高いほど声

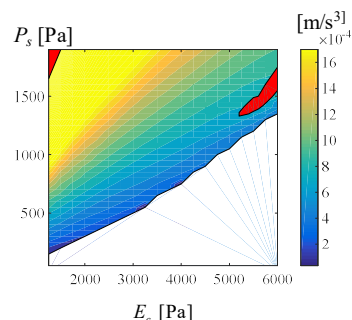


図 17 解の存在領域

帯の自励振動が起こり易いことが分かる。また、赤色の領域は Hopf 分岐による不安定解を示し、倍周期解が発生し得ることを確認した。その他、様々な考察を行い、自励振動は声帯の 2 次と 4 次のモードが支配的であること、2 次と 4 次のモードがある位相差をもって振動することで、流体から声帯に振動エネルギーが入ることなど、自励振動のメカニズムが分かった。

(4) 各疾患における声帯音源波形の特性および変化のメカニズム

発声障害患者の音声データを用いて声帯音源波形を逆解析し、疾患を特定する診断の可能性を検証する。ここでは、声帯ポリープ、ポリープ様声帯、声帯麻痺について検討する。声帯ポリープや声帯結節は、声帯の一部にポリープや結節ができるため、声帯が閉じることができない。図 18(a), (b)は、健全者と声帯ポリープ患者の音声から逆解析した声帯音源波形である。健全者の声帯音源波形は、声帯が閉じきり、谷が長くなっているが、声帯ポリープでは正弦波に近い波形となる。2 mm のポリープが存在することを想定して解析した結果が図 18(c)であり、声帯音源波が正弦波になることを再現できている。次にポリープ様声帯は、声帯全体がむくみ、腫れあがる疾患であるが、図 19(a), (b)にポリープ様声帯患者 2 名の音声から逆解析した声帯音源波形を示す。声帯ポリープと同様に谷の区間は短い、正弦波とは異なりいびつな波形となっている。ポリープ様声帯の解析として、声帯全体を柔らかくして解析を行うと声帯音源波形が図 19(c)のようになり、いびつな波形が再現できている。声帯麻痺は片側の声帯が麻痺して振動しなくなる症状であり、図 20 に声帯麻痺患者 2 名の音声から逆解析した声帯音源波形を示す。声帯麻痺では、声帯音源波形が非定常な振動波形になっている。しかしながら、音声生成解析でこの現象を再現できておらず、課題が残る。

以上より、発声障害の各疾患によって声帯音源波形は異なり、解析でもある程度再現できた。このことより、提案した声帯音源波形逆解析手法を用いることによる発声障害診断の可能性は十分にある。

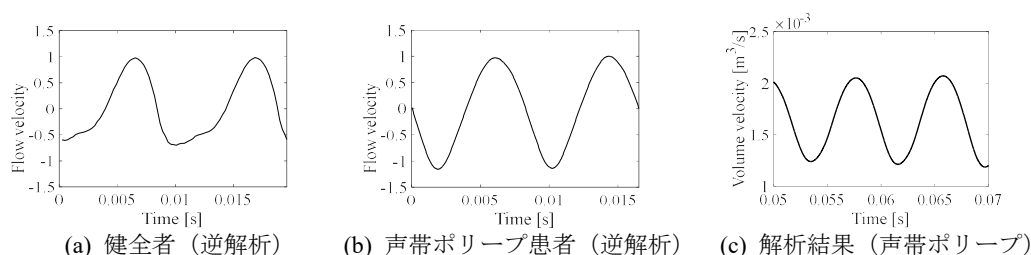


図 18 声帯音源波形逆解析結果と音声生成解析結果

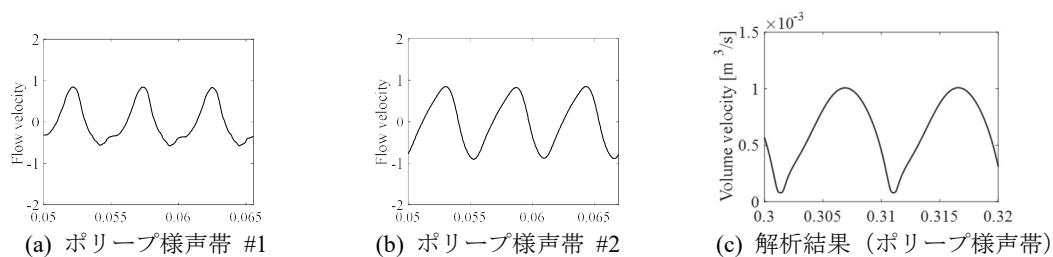


図 19 声帯音源波形逆解析結果と音声生成解析結果 (ポリープ様声帯)

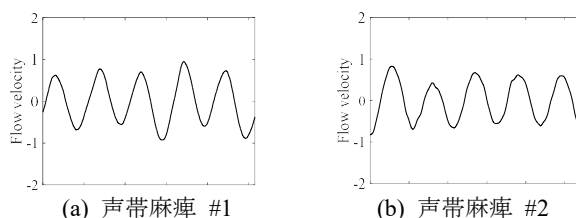


図 20 声帯音源波形逆解析結果 (声帯麻痺)

<引用文献>

- [1] 日本音声言語医学会編, 新編 声の検査法, 医歯薬出版, 2009.
- [2] H. Kasuya, S. Ogawa, Y. Kikuchi, S. Ebihara, An acoustic analysis of pathological voice and its application to the evaluation of laryngeal pathology, *Speech communication*, Vol. 5, pp.171-181, 1986.
- [3] 小林健二編, 音・振動による診断工学, コロナ社, 2000.
- [4] K. Ishizaka, J. L. Franagan, Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords, *The Bell System Technical Journal*, Vol.51, No.6, pp.1233-1268, 1972.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kazuya Yokota, Satoshi Ishikawa, Yosuke Koba, Shinya Kijimoto, Shohei Sugiki	4. 巻 150
2. 論文標題 Inverse analysis of vocal sound source using an analytical model of the vocal tract	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 89-103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.005	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 横田 和哉, 石川 諭, 雫本 信哉, 木庭 洋介
2. 発表標題 声道解析モデルを用いた音声診断技術の開発
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横田 和哉, 石川 諭, 雫本 信哉, 木庭 洋介
2. 発表標題 声道解析モデルを用いた発声障害診断技術の開発
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yokota Kazuya, Ishikawa Satoshi, Koba Yosuke, Kijimoto Shinya
2. 発表標題 INVERSE ANALYSIS OF VOCAL SOUND SOURCE BY ACOUSTIC ANALYSIS OF THE VOCAL TRACT
3. 学会等名 The 26th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田 和哉, 石川 諭, 雫本 信哉, 木庭 洋介, 杉木 昭平
2. 発表標題 声道解析モデルを用いた医療応技術の開発
3. 学会等名 機械力学・計測制御部門講演会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuya Yokota, Satoshi Ishikawa, Shinya Kijimoto, and Yosuke Koba
2. 発表標題 Acoustic diagnosis of voice disturbance using analytical model of the vocal tract
3. 学会等名 25th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横田 和哉, 石川 諭, 雫本 信哉, 木庭 洋介
2. 発表標題 声道解析モデルを用いた音声診断技術の開発
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田 和哉, 石川 諭, 雫本 信哉, 木庭 洋
2. 発表標題 モード解析を用いた音声生成解析モデルの開発
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹崎 公祐, 横田 和哉, 石川 諭, 木庭 洋, 雉本 信哉
2. 発表標題 声道解析モデルを用いた医療応用技術の開発
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	木庭 洋介 (Koba Yosuke) (20380602)	九州大学・工学研究院・技術専門職員 (17102)	
連携研究者	近藤 孝広 (Kondou Takahiro) (80136522)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	