

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14648

研究課題名（和文）声帯振動と音発生に対する流体－構造－音響連成解析手法の構築

研究課題名（英文）Analysis on fluid-structure-acoustic interaction of vocal fold vibration and sound generation

研究代表者

吉永 司（Yoshinaga, Tsukasa）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：50824190

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）：本研究課題では、声帯振動から発生する声に関する高精度数値解析手法を開発した。気流と音を高精度の有限差分法を用いて同時に計算し、声帯振動を1次元梁やバネ質点系でモデル化することで、実験と比較して十分な精度で音質まで予測できることを示した。従来研究で用いられていた1次元気流モデルと比較することで、声帯周りの3次元気流や圧力分布が、どの程度声帯振動に影響を及ぼすのか明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

声帯から声が発せられる際には、気流と声帯の振動の連成だけでなく、気流から発生する音との連成も考慮する必要がある。本研究で構築した手法では、振動する声帯ひだから音が発生する現象だけでなく、発生した音が声帯振動に及ぼす現象までモデル化できており、工学的な応用先として、より音質の良い人工声帯の開発に活かせるだけでなく、将来的には声帯機能不全による発声障害の原因究明などにも活用できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a high-order accuracy numerical analysis for voice production of vocal fold vibrations. We have shown that the proposed methodology can predict the voice quality with sufficient accuracy compared to experimental results, by using a high-order accuracy finite difference method for the airflow and sound generation and vocal fold modeling with a one-dimensional dynamic beam equation or lumped-mass models. Comparison with the conventional one-dimensional airflow model revealed to what extent the three-dimensional airflow and pressure distributions around the vocal folds affect the vocal fold vibration characteristics.

研究分野：空力音響学

キーワード：声帯 空力音 流体構造連成 自励振動 数値流体解析 発声 有限差分法 人工声帯

1. 研究開始当初の背景

声帯振動による音声の発生は、気流の慣性力と声帯の弾性力による自励振動として起こっており、これまでそのメカニズムを調べるため、様々なモデルが提案されてきた。しかし、数値解析において気流と構造変化、そして音発生の相互作用まで十分な精度で解析できる手法はなかった。これまでの先行研究では、声帯部をばね-質点系で単純化したモデルに対して1次元のベルヌーイの定理に基づく気流モデルで連成振動を解析したり、実験で声帯振動を計測して、その計測した変位を元に解析内で声帯形状を強制振動させて計算した気流のシミュレーション等が行われてきた。また、声帯組織に着目して有限要素法を用いて軟組織の振動特性を解析しているグループもいるが、気流は1次元モデルで単純化している。実際のヒトの声帯および周りの気流は3次元動的な動態を示し、声帯の開閉による強い圧力波と共に、乱気流からの空力音も発生する。それらの音を精度良く計算できている研究グループはほとんどいない。

空力音として発生する音を予測する際には、気流から生まれる数百 Pa の圧力変動から音圧として聞こえる 1 Pa 以下の変動までを計算する必要がある、大きな計算コストがかかることが知られている。さらに、声帯が気流の通過に応じて振動し、発生した音が口腔内で反射・共鳴した際には大きな音圧変動となり、声門を通過する気流や、声帯振動にも影響を与えることが知られている。そのため、流体・構造・音響現象の3つの連成を考慮する必要がある、非常に挑戦的な課題であった。

2. 研究の目的

本研究では、声帯振動から発生する音の詳細なメカニズムを明らかにするため、気流による声帯の振動と音の発生を同時に解析できる流体-構造-音響連成解析手法の構築を行う。気流と音の計算は高精度の有限差分法を用いて行い、声帯の構造解析結果を埋め込み境界法により挿入して気流と構造の相互作用を計算する。これらの手法を単純化した声帯モデルに適用し、実験での音の計測結果と比較することで計算精度を検証する。また、声帯周りの3次元動的な気流が声帯振動に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

3. 1 リード式人工声帯

リード式人工声帯とは、リードと支持部からなり、リードと支持部間の流路に空気が流入することによりリードが振動するモデルである。19世紀に von Kempelen により Speaking machine [1] の声帯部分に用いられ、現在でも手軽に作製できる声帯模擬装置として用いられている [2]。このリード式人工声帯のリード部と支持部を出来るだけ一般男性と同じ特性で音が生成できる条件に設定し、無響室内で一定送気流量のもと音を発生させ、マイクロフォンにより音を計測した。リード式人工声帯のモデルは上智大学の荒井隆行教授から提供を受け、共同研究として実験を実施した。

この実験系に対して、出来るだけ同じ条件となるように解析モデルを構築して、計算精度を検証した。リードの振動部は1次元の梁モデルを用い、リード周りの気流の圧力を外力として運動方程式を計算した。また気流は3次元の圧縮性ナビエ・ストークス方程式を高次精度の有限差分法により計算することで、気流と音を同時に計算した。リードの振動部分に関しては Volume Penalization 法と呼ばれる埋め込み境界法の一つ [3] を用いて、差分法の構造格子上的壁面領域を移動させて表現した。

さらに、人工声帯から出た音が口腔で共鳴して声帯振動へフィードバックを与える現象が上手く表現できるのかを確認するため、狭窄流路をもつ単純声道モデル [2] を声帯下流に設定し、声帯振動がどのように変化するかを調べた。この時、狭窄流路の位置を唇側と声帯側に変化させることで、ストロー発声と呼ばれる声帯を保護した発声法や披裂喉頭蓋の狭窄によるオペラ歌唱を模擬した形状にして、リード式人工声帯の振動と音の発生に与える影響を調べた。

3. 2 声帯2質点モデル

リード式人工声帯はヒトの声帯と同様に気流による自励振動としてリードが振動することで音を発生するが、ヒトの声帯が音を発生する際の主の特徴であるひだの粘膜波動と呼ばれる表面形状の変化を表現することができない。粘膜波動とは、図1に示すように声帯の表面が開放期には下側のひだが閉じていき、上側に向かって開いた形状となり、一方、閉鎖期には下側のひだから開いていくため、下側に開いた形状となり波動のように表面形状が変形することである [4]。そのため、開放期には気流により閉じる方向により力が働き、閉鎖期には開く方向により力が働くことで効率よく発声できることが知られている。このような実際の声帯の形状に近い振動モデルを気流解析に組み込むため、図2に示すような2質点モデルを用いて、声帯の振動を表現した。2つの質点とそれらを繋ぐバネおよびダンパーの定数を調整することで、ヒトの声帯と似た振動を表現することができる。このモデルは Ishizaka ら [5] によって提案され、現在でもよく用いられている。このモデルに対して、3.1節で説明した3次元気流モデルと、これまで用いら

れてきた1次元気流モデルを用いて、その差を比較した。さらに、バネ定数を左右の声帯ひだで変化させ、左右非対称な声帯振動をモデル化した際に、左右の声帯に同じ力がかかる1次元気流モデルと、左右で非対称な圧力分布を考慮できる3次元気流モデルを比較することで、どの程度の左右非対称性において1次元気流モデルが利用できるのかを調べた。

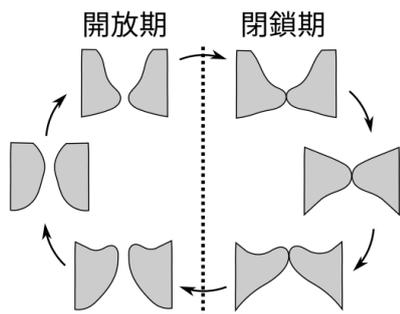


図1 冠状断面における声帯振動のサイクル[4].

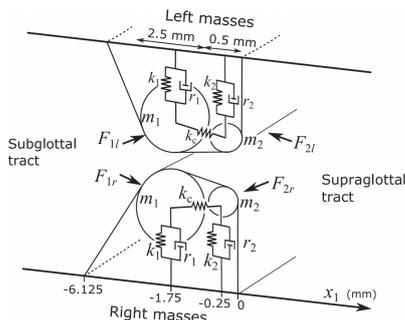


図2 声帯2質点モデル[6].

4. 研究成果

4. 1 リード式人工声帯解析の結果と考察

リード式人工声帯に関して、3. 1節に説明した解析手法を用いることで、気流によるリードの自励振動、そして音の発生までを十分な精度で計算することができた[7-8]. 図3にリード振動から発生した音のスペクトルに関して実験での計測との比較を示す. 基本周波数とその倍音の周波数が実験と計算で一致していることから、リードの振動周波数が解析内で上手く表現できていることがわかる. また、倍音の音量に関しては、3800 Hz までは良好に一致しており、4000 から 5000 Hz にかけては過小評価しているものの、5500 Hz から 7000 Hz にかけても実験と近い結果が得られた.

また、図4に示すように、声帯下流に声道を模擬した 175 mm の流路を設置すると、口腔内の音の共鳴を再現することができ、この発生音についても実験値と比べて 4000 Hz まで良好な一致を示すことがわかった. これらの結果は、本研究での流体-構造-音響連成解析が精度良く計算できていることを示しており、ヒトの声質の予測まで応用できることがわかった. さらに、図5に示すように、声道の咽頭側と口唇側にそれぞれ狭窄流路を設けることで、声帯の振動にどのような影響を与えるのかを調べた結果、狭窄流路の位置によって声帯付近の平均圧力が変化することで、リード振動に影響を与えることが明らかとなった[9].

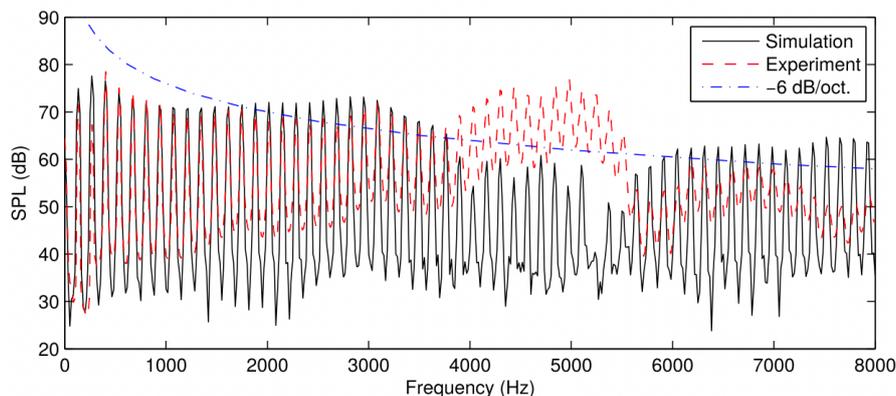


図3 リード式人工声帯から発生した音のスペクトル.

4. 2 声帯2質点モデル解析の結果と考察

声帯2質点モデルでは、よりヒトの声帯形状に近い為、まず声帯周りの気流を解析し、実験と整合性のとれる結果となるのかを確認した. 図6に左右対称および非対称の声帯形状に対する表面圧力分布の比較を示す. 声帯上流から下流にかけて、狭くなっていく流路に対して圧力が減少していき、途中で剥離した後、圧力がやや上昇する. この分布は、声帯形状が左右非対称となると左右の差が強くなり、その傾向も表現できることが確認できた. さらに、計算の格子幅が計算結果に与える影響を調べるため、5種類の計算格子を最小格子幅 0.1 mm (Mesh1) から 0.02 mm (Mesh5) まで用意し、基本周波数と声門開口時間率(OQ)を比較した. その結果、最小格子幅 0.025 mm (Mesh4) と 0.02 mm (Mesh5) はほとんど同じ結果となり、格子幅 0.025 mm で十分であることを確認した. これらの結果より、ヒトの声帯形状に近い2質点モデル周りの気流についても十分な精度で計算できる手法を確立できたことがわかった[6].

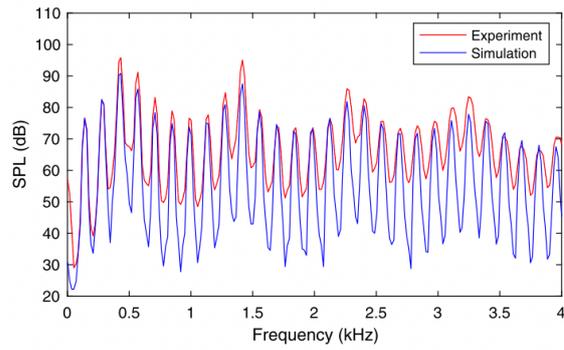


図4 声道を付した際の遠方音のスペクトル.

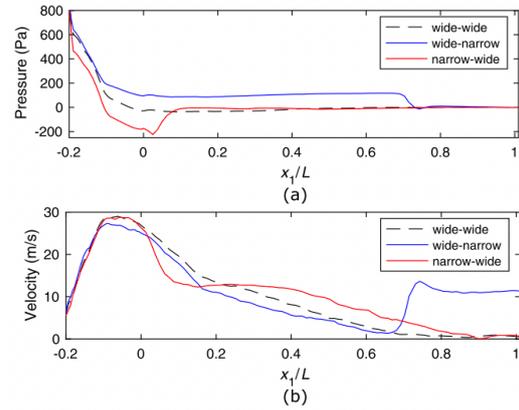


図5 声道の狭窄の影響.
(a) 平均圧力, (b) 平均流速.

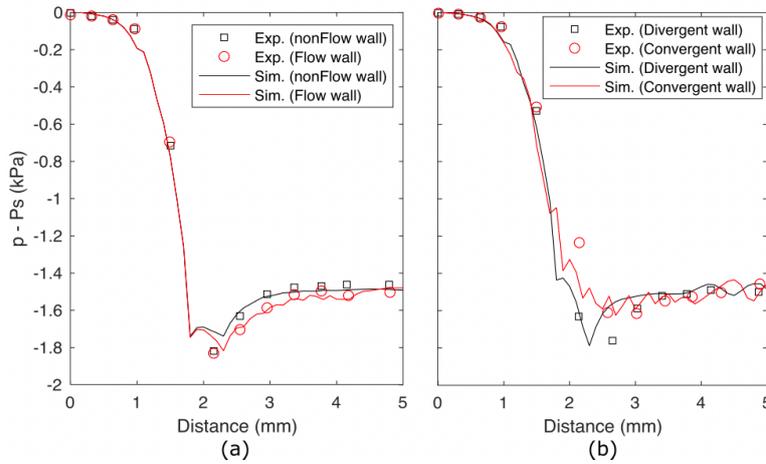


図6 表面圧力分布の実験との比較.
(a) 左右対称, (b) 左右非対称.

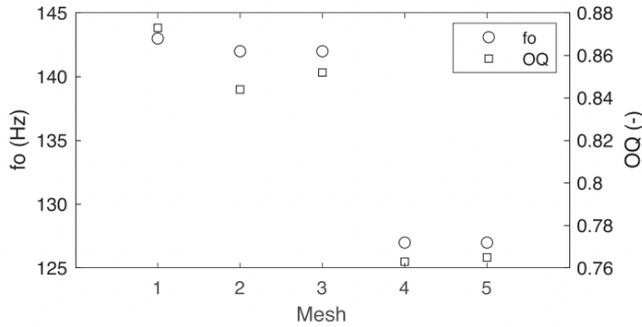


図7 メッシュサイズの影響.

次に、左右の声帯ひだの弾性率を変化させて左右非対称の振動が生まれた際に、3次元的气流が、どの程度振動特性に影響を与えるのか調べた。図8に左右非対称振動の際の声帯周りの流れ場と圧力分布を示す。 $t/T = 0.16$ での開口期では声帯形状は左右対称(図内では上下対称)なもの、閉鎖期の $t/T = 0.78$ や $t/T = 0.96$ では左右対称ではないことがわかる。この時、左右壁の圧力分布を比較(右図)すると、黒線の左側の分布と赤線の右側の分布はほとんど同じ値を示していることがわかり、左右の形状が異なってもそれほど圧力分布には影響しないことがわかった。また、1次元気流モデルによる剥離位置の予測に関して、右図内の矢印で示しているように、3次元気流モデルと概ね一致しており、圧力分布の正確な予測に役立っていることがわかる。

結果として、左右対称な場合でも、ある程度非対称となった場合でも、1次元気流モデルで声帯2質点モデル周りの圧力を十分な精度で予測できることがわかった。ただし、声帯の左右の剛性比が1.6よりも大きい場合には1次元モデルと3次元モデルでは結果が異なり、3次元モデルの活用が必要となる。これらの結果は、声帯の振動様式に関して、気流の3次元性よりも声帯の軟組織をどのようにモデル化するのが重要であることを示唆している。3次元気流モデルはスーパーコンピュータを用いて数日間解析に時間がかかるのに対して、1次元気流モデルは汎用的なPCで数秒で計算することができる。このことから、現在でも1次元気流モデルを活用

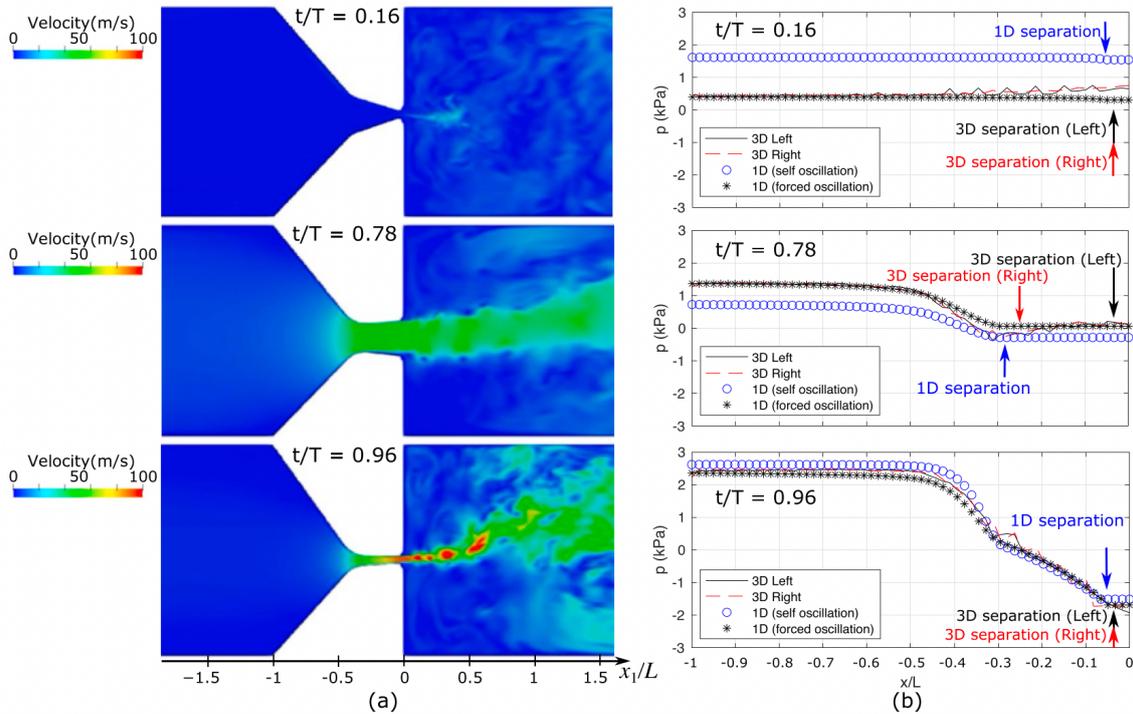


図8 左右非対称の声帯モデル周りの気流と圧力分布の比較。(a)時刻 $t/T = 0.16, 0.78, 0.96$ での流れ場。(b) 3次元気流モデルでの左右の表面圧力分布と1次元モデルの表面圧力分布。

する研究者は多く、今回の結果は1次元気流モデルを活用する研究者にとって重要な結果となる。

さらに、本研究での成果として、声帯周りの流体・構造・音響の連成解析が十分な精度で可能となったことが示された。この成果を発展させることで、より良い人工声帯を開発するための知見が得られる。また、より複雑で3次元的な振動特性を有するヒトの声帯形状に関しても、気流から発生音を予測することができ、病的な声帯をもつ被験者の医療画像やデータなどを活用することで、発声障害の原因究明や治療支援などに大きく貢献することが可能となる。

<引用文献>

- [1] Dudley H, Tarnoczy TH. The speaking machine of Wolfgang von Kempelen. J. Acoust. Soc. Am. 1950;22(2):151-66.
- [2] Arai T. Sliding three-tube model as a simple educational tool for vowel production. Acoust. Sci. Tech. 2006;27(6):384-8.
- [3] Liu Q, Vasilyev OV. A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries. J. Comput. Phys. 2007;227(2):946-66.
- [4] Bailly, L., Henrich, N., Pelorson, X. Vocal fold and ventricular fold vibration in period-doubling phonation: Physiological description and aerodynamic modeling. J. Acous. Soc. Am. 127, 2010; 127(5):3212-3222.
- [5] Ishizaka, K., and Flanagan, J. Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords. Bell system technical journal 1972; 51:1233-1268.
- [6] Yoshinaga, T., Zhang, Z., Iida, A. Comparison of one-dimensional and three-dimensional glottal flow models in left-right asymmetric vocal fold conditions. J. Acoust. Soc. Am., 2022; 152(5):2557-2569.
- [7] Yoshinaga, T., Arai, T., Inaam, R., Yokoyama, H., Iida, A. A fully coupled fluid-structure-acoustic interaction simulation on reed-type artificial vocal fold. Applied Acoustics, 2021; 184:108339.
- [8] 吉永司, 荒井隆行, 横山博史, 飯田明由. 円管型声道を付したリード式人工声帯の流体-構造-音響連成シミュレーション. ながれ: 日本流体力学会誌, 2021; 40(3):227-234.
- [9] Yoshinaga, T., Arai, T., Yokoyama, H., Iida, A. Effects of airflow in constricted vocal tracts on vowel production of the reed-type artificial vocal fold. Acoustical Science and Technology, 2022; 43(5):283-286.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshinaga Tsukasa, Zhang Zhaoyan, Iida Akiyoshi	4. 巻 152
2. 論文標題 Comparison of one-dimensional and three-dimensional glottal flow models in left-right asymmetric vocal fold conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 2557 ~ 2569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0014949	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 該当する

1. 著者名 Yoshinaga Tsukasa, Arai Takayuki, Yokoyama Hiroshi, Iida Akiyoshi	4. 巻 43
2. 論文標題 Effects of airflow in constricted vocal tracts on vowel production of the reed-type artificial vocal fold	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 283 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.43.283	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉永司, 荒井隆行, Inaam Rafia, 横山博史, 飯田明由	4. 巻 40
2. 論文標題 円筒型声道を付したリード式人工声帯の流体-構造-音響連成シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 226-233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinaga Tsukasa, Arai Takayuki, Inaam Rafia, Yokoyama Hiroshi, Iida Akiyoshi	4. 巻 184
2. 論文標題 A fully coupled fluid-structure-acoustic interaction simulation on reed-type artificial vocal fold	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 108339 ~ 108339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apacoust.2021.108339	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, Yokoyama Hiroshi, Shoji Tetsuro, Miki Akira, Iida Akiyoshi	4. 巻 149
2. 論文標題 Global numerical simulation of fluid-structure-acoustic interaction in a single-reed instrument	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 1623 ~ 1632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0003757	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, 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 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Yoshinaga Tsukasa, Zhang Zhaoyan, Iida Akiyoshi
2. 発表標題 Comparison of one-dimensional and three-dimensional glottal flow models in left-right asymmetric vocal fold conditions
3. 学会等名 182th meeting of Acoustical Society of America (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinaga Tsukasa, Zhang Zhaoyan, Iida Akiyoshi
2. 発表標題 Evaluation of the One-Dimensional Glottal Flow Model in Predicting Voice Outcomes of Left-Right Asymmetric Vocal Fold Vibrations
3. 学会等名 15th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田平 拓大, 飯田 明由, 吉永 司
2. 発表標題 無声両唇破裂音/p/の発音を再現する口腔モデルの構築
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉永 司, 飯田 明由
2. 発表標題 発音の空力音シミュレーションと指向性の可視化
3. 学会等名 日本音響学会2023年春季研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Inaam R., Yoshinaga T., Arai T., Yokoyama H., and Iida A.
2. 発表標題 Comparison Between Lumped-Mass Modeling and Flow Simulation of the Reed-Type Artificial Vocal Fold
3. 学会等名 Interspeech 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinaga T., Arai, T., Yokoyama H., and Iida A.
2. 発表標題 The Analysis of Jet Flow and Sound Generation of the Reed-Type Artificial Vocal Fold
3. 学会等名 The 7th International Conference of Jets, Wakes, and Separation Flows (ICJWSF2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉永 司, 荒井 隆行, 横山 博史, 飯田 明由
2. 発表標題 声道内の狭窄と気流がリード式人工声帯の母音生成に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉 正樹, 吉永 司, 荒井 隆行, 飯田 明由
2. 発表標題 電磁制御されたリード式人工喉頭を用いた短時間母音生成
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉永司, 荒井隆行, 横山博史, 飯田明由
2. 発表標題 狭窄を有する声道内の気流と音がリード式人工声帯の振動様式に与える影響
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉永司, 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流体 構造 音響連成解析
3. 学会等名 第41回流力騒音シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉永司, Zhaoyan Zhang, 飯田明由
2. 発表標題 声帯 2 質点モデルに対する3次元圧縮性数値流体シミュレーション
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉永司
2. 発表標題 摩擦音発音の空力音シミュレーション
3. 学会等名 第116回NINJALコロキウム(招待講演)
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 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., 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 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) and ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021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2020年秋季研究発表会
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

〔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

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		
米国	University of California, Los Angeles		
フランス	グルノーブル・アルプ大学 LEGI		