

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14919

研究課題名（和文）音響的境界条件に音響インピーダンスを適用した燃焼振動現象モデリング手法の構築

研究課題名（英文）Modeling of combustion oscillation using acoustic impedance of as acoustic boundary conditions

研究代表者

上道 茜 (Uemichi, Akane)

早稲田大学・理工学術院・准教授（テニュアトラック）

研究者番号：10734155

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：水素混焼ガスタービンにおいて発生する燃焼振動の発振周波数が、天然ガス専焼の場合と比較して変化することに注目し、研究を進めてきた。本研究では複雑な燃焼現象の適切なモデルリダクションを行い、より複雑な燃焼振動現象を再現することができる低次元モデル構築を試みた。燃焼器よりも上流側にある配管要素を対象とし、音響的境界条件に音響インピーダンスを適用して音響ネットワークモデルを構築して発振周波数を計算したところ、実験で得られた発振周波数に近い値を含んでおり、本研究から燃焼振動の発振周波数の予測の指針が得られた。また、水素の燃焼特性が燃焼振動の発振に多大な影響を与えていることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二酸化炭素を排出しないカーボンニュートラル燃料として、水素をガスタービンの燃料に利用する技術開発が進められている。とりわけ、機器の破損を引き起こし発電プラントの連続稼働を妨げる燃焼振動には回避あるいは抑制しなければならない。しかしながら、水素は従来使われてきた天然ガスなどと燃焼特性が大きく異なることから、燃焼振動を防ぐためには十分に調査する必要がある。本研究では、低負荷かつ物理に基づいたモデルを構築し、燃焼振動の発生予測に貢献することを目指している。本研究からは、燃焼器より上流の配管要素を考慮したモデル構築が重要であることが明らかとなり、プラント設計において重大な示唆を与えるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The oscillating frequencies of combustion oscillations generated in a gas turbine fueled by a hydrogen-containing mixture have been studied, focusing on its change compared to the case of a natural gas-fired gas turbine combustor. This study attempted to develop a low-dimensional model that can reproduce more complicated combustion oscillation phenomena with appropriate model reduction of complicated combustion phenomena. An acoustic network model was developed for the piping elements upstream of the combustor by applying acoustic impedance as the acoustic boundary conditions, and the oscillating frequency was calculated. The calculated values contain comparable values of the measured results. It was also confirmed that the combustion characteristics of hydrogen have a significant effect on the presence or absence of combustion oscillation.

研究分野：エネルギーシステムメカニクス

キーワード：燃焼振動 音響インピーダンス 発振周波数 音響ネットワークモデル 共鳴周波数

### 1. 研究開始当初の背景

火力発電所のガスタービン燃焼器では、燃焼振動が発生することが知られている。燃焼振動の圧力変動は非常に大きいため、発振振動数が燃焼器や後流の構造の固有振動数と一致した場合には、短時間で機器の破損が引き起こされる。工学的にも工業的にも燃焼振動現象を理解することには関心が集まっているが、加振源である燃焼現象が非常に複雑であることから、包括的なモデルが確立されておらず、現象の本質的な理解には至っていない。

研究代表者は、燃料組成が燃焼振動に与える影響に興味を持ち、水素との混焼を対象とした燃焼振動現象の研究を始め、この実験から燃料組成によって燃焼振動発振周波数が変化する現象を発見した<sup>(1)</sup>。天然ガス専焼(天然ガス 100%)の場合には、約 350 Hz の発振が観測され、これは、実験用燃焼器を最も単純化して考えた場合の一次の固有振動数と一致する。ところが、10~40vol.%比率で水素を混合した水素混焼の場合には、200 Hz および 400 Hz 付近での発振が観測された。そこで、水素混焼の場合、燃焼器中の火炎面(急峻な化学反応が起きる界面)の位置や燃焼器内の温度分布といった燃焼特性が変化し、これが音響的境界条件に影響を及ぼしたという仮説を立てた。

### 2. 研究の目的

本研究では、複雑な燃焼現象について適切なモデルリダクションを行い、より複雑な燃焼振動現象をよく再現することができる低次元モデル構築を試みる。特に、燃料組成の変化によって発振周波数のシフトが起きることに着目し、温度による音響的境界条件の変化を表現する手法を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### 3. 1. 管内に温度分布を有する Rijke 管を用いた音響インピーダンス実験

燃料に水素を加えた場合に、燃焼特性が変化したことが発振周波数のシフトをもたらしたという仮説を確認するための実験を行った。具体的には、燃焼器内の既燃ガス温度や火炎面形成位置が燃焼器上流の音響的境界条件に影響を及ぼしたと考えられる。本研究では、音響的境界条件に音響インピーダンスを仮定しているが、音響インピーダンスは高温に達する燃焼実験においては計測が困難であることから、電気ヒータを設置した Rijke 管を製作し、モデル実験を行った。計測は、温度分布を有する Rijke 管の上流および下流に設置したスピーカーで加振し、2 音源法を適用して高感度圧力センサにより音響インピーダンスを計測する。図 1 に 2 音源法の模式図を示す。なお、管内の温度分布は管軸方向に 13 箇所挿入した熱電対を用いて計測した。

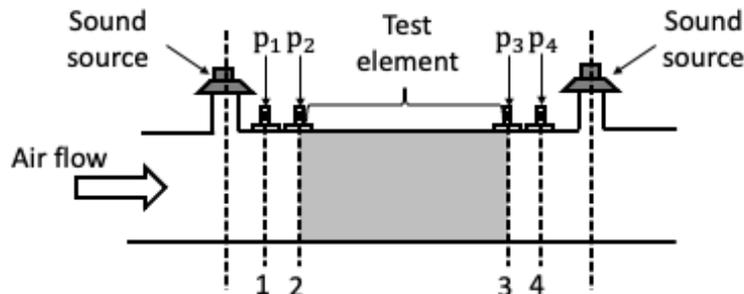


Fig. 1 Schematic of two sound source method.

#### 3. 2. 燃焼器よりも上流の配管を考慮した音響ネットワークモデルの構築

水素混焼の場合に燃焼器よりも上流の配管要素を考慮しなければ得られない発振周波数が得られたことから、燃焼器よりも上流の配管要素を音響ネットワークモデルに追加し、共鳴周波数および発振周波数の算出を行った。燃焼振動実験<sup>(1)</sup>に使用した模擬燃焼器とその上流の配管を対象とした分岐管モデルを構築し、音響的境界条件として音響インピーダンスを用いて、発振周波数の候補である共鳴周波数を算出する。そして、共鳴周波数の中から発振周波数を特定するために成長率を求める。

まず、図 2 に示す分岐管モデルを作成し、共鳴周波数の計算を行った。表 1 に各配管の名前、長さ、内径、温度をまとめる。ここで、①の燃焼器長さには  $3.388 \times 10^{-2} \text{ m}$  の開口端補正をほどこした。また、③のスワラ未燃部長さ  $l_3$  はスワラ上流端から火炎面までの距離であり、当量比によ

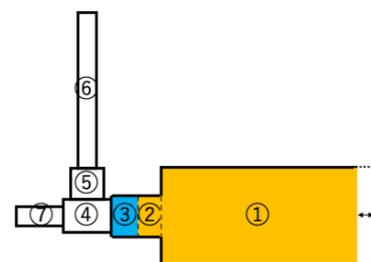


Fig. 2 Piping element of the muck-up experimental apparatus.

て変化する。既燃部温度 $T_h$  [K]についても同様に当量比によって変化する。④のスワラ流路と⑦の燃料供給管は実際には円周上に 8 本の管が並んでいるが、音響共鳴特性を考える際には集合した 1 本の管として扱った。

表 1 に示した 7 つの配管要素に対して、伝達マトリクスと境界条件の音響インピーダンスを用いることで、発振周波数の候補である共鳴周波数を算出した。なお、本研究では燃料供給管を含む分岐管モデルを扱うことから、分岐部における伝達マトリクス $M_B$ を作成した。

このとき、分岐部の伝達マトリクスは、分岐管同士が十分に接近していることから圧力損失が無視できると仮定し、次のように定めた。

$$M_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{Q_3 - Q_7}{Q_3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $Q$ は各配管における体積流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] である。なお、添え字は表 1 に示した配管要素の番号と同様である。

次に、発振周波数を特定するために、成長率 $\alpha$ の計算を行った。成長率は、燃焼による音響エネルギー増幅率 $\alpha_{\text{amp}}$ から圧力損失による音響エネルギー減衰率 $\alpha_{\text{damp}}$ を引いたものであり、式(2)のように表せる。

$$\alpha = \alpha_{\text{amp}} - \alpha_{\text{damp}} \quad (2)$$

ここで、音響エネルギー増幅率 $\alpha_{\text{amp}}$ は  $n$ - $\tau$ モデル<sup>(2)</sup>を用いることで式(3)のように求めた。

$$\alpha_{\text{amp}} = n(\gamma - 1) \frac{\bar{q}}{\bar{p}} \left[ \cos\left(\frac{\pi l_3}{2l_1}\right) \right]^2 \cos(\omega\tau) \quad (3)$$

ただし、 $n$ ,  $\gamma$ ,  $\bar{q}$ ,  $\bar{p}$ ,  $\tau$ はそれぞれ、熱圧力相互作用指標、比熱比、平均熱発生率密度 [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]、平均圧力 [Pa]、遅れ時間 [s] である。 $n$ は文献値<sup>(3)</sup>より 0.05、 $\tau$ は先行研究<sup>(1)</sup>より天然ガス専焼で  $1.321 \times 10^{-2}$  s、水素混焼で  $1.461 \times 10^{-2}$  s を用いた。

音響エネルギー減衰率 $\alpha_{\text{damp}}$ はモデル全体での圧力損失 $p_{\text{loss}}$  [Pa] に起因し、無次元化するためにこれを燃焼器の全圧 $p_1$  [Pa] で割ることで式(4)のように求めた。

$$\alpha_{\text{damp}} = \frac{p_{\text{loss}}}{p_1} \quad (4)$$

モデル全体での圧力損失 $p_{\text{loss}}$ は、管の急拡大、急縮小による圧力損失と管摩擦による圧力損失を足し合わせることで算出した。急拡大、急縮小部における圧力損失計算には ANSYS Fluent による CFD 解析を用いた<sup>(4)</sup>。しかし、実際の模擬燃焼器の形状と流速を用いて解析するには、非常に細かくメッシュを切る必要があるため計算時間が膨大になってしまう。そのため、本研究では急拡大、急縮小部の断面積の比が一致するように 2 つの円管を作成し繋ぎ合わせることで形状を段付き配管に単純化し、小さい流速の条件で行った解析結果から外挿することで圧力損失を求めた。なお、管摩擦による圧力損失は各領域におけるレイノルズ数から管摩擦係数を求めることで算出した。

## 4. 研究成果

### 4. 1. 管内に温度分布を有する Rijke 管を用いた音響インピーダンス実験

熱源 (電気ヒータ) 位置 (ただし、図 1 における圧力センサ 1 からの距離とする)、発熱量 (電気ヒータに与える電流値)、Rijke 管入口流速 (バルク流速) を変化させて実験を行った。

ここでは、熱源位置 0.7 m、Rijke 管入口流速 2.8 m/s とし、発熱量を 0 W (電気ヒータ OFF)、540 W、1080 W と変化させたときの結果を図 3 に示す。左図は音響インピーダンスの絶対値を周波数に対してプロットしたもので、右図は管内温度分布であり、プロットは実測値を実線は実測値の線形補間を表す。なお、温度分布のうち、電気ヒータ挿入位置には熱電対を挿入して実測ができなかったため、与えた電力から計算した値を用いた。

Table 1. List of piping elements for the acoustic model.

Number	Part name	Length m	Inner diameter m	Temperature K
①	Combustor	0.5339	0.1105	$T_h$
②	Swirler high temperature part	0.0760- $l_3$	0.0400	$T_h$
③	Swirler low temperature part	$l_3$	0.0400	298.15
④	Swirler flow path	0.0323	0.0026	298.15
⑤	Casing	0.0760	0.0772	298.15
⑥	Air supply pipe	3.1155	0.0572	298.15
⑦	Fuel supply pipe	0.2100	0.0030	298.15

左図より、電気ヒータが OFF の条件と ON の条件で音響インピーダンスの絶対値がピークをとる周波数が高周波数方向にシフトしており、発熱量が大きいほど高周波側にピークが位置することがわかる。また、熱源位置を変化させた実験では、熱源位置が上流側のほうが音響インピーダンスの絶対値のピーク位置は高周波側になることもわかった。一方で、入口流速を変化させても音響インピーダンスの絶対値のピーク位置はほとんど変化しなかった。したがって、音響インピーダンスは Rijke 管内の温度分布の与え方によって変化する。

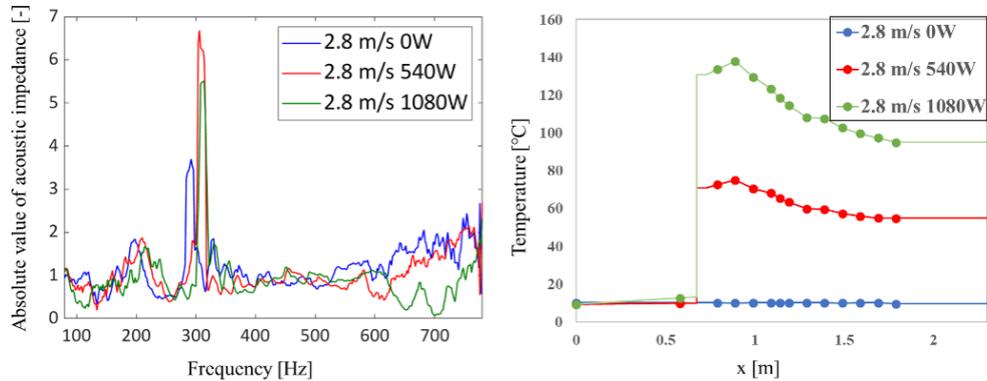


Fig. 3 Effect of temperature profile in the Rijke tube. Left: absolute value of acoustic impedance, right: temperature profiles.

音響インピーダンスの変化は、管内温度による音速  $c$  [m/s] の変化と考えることができる。音速は、 $\gamma$  を気体の比熱比、 $R$  を気体定数 [J/(K·mol)],  $T$  を温度 [K],  $M$  を気体の平均分子量 [g/mol] として  $c = \sqrt{\gamma RT/M}$  で表され、温度の平方根  $\sqrt{T}$  [K<sup>0.5</sup>] に比例する。このことから、周波数に対する音響インピーダンスの絶対値のピーク位置も  $\sqrt{T}$  に比例すると仮定して、 $\sqrt{T}$  に対する音響インピーダンスの絶対値のピーク位置 [Hz] について、音速の定義に基づいた推定値を実線、実験から得られた値をプロットで示す。音速の定義に基づいた推定値は、入口流速を 0 m/s、発熱量 0 W の条件を基準として求めた。また、ここで横軸  $\sqrt{T}$  の温度  $T$  は、管内軸方向平均温度として  $T = \bar{T} = \left( \int_{x=0}^{x=L} T dx \right) / L$  を用いた。ただし、 $x$  は軸方向距離 [m],  $L$  は管全長 [m] である。

図 4 に管内軸方向平均温度の平方根に対して音響インピーダンスの絶対値のピーク位置を周波数により示す。図より、管内軸方向平均温度が上昇するにつれ、推定値および実測値ともに音響インピーダンスの絶対値のピーク値が高周波側にシフトする傾向は一致している。しかしながら、 $\sqrt{T} = 18.0$  K ( $T = 324$  K) 以上では実測された音響インピーダンスの絶対値がピークをとる周波数は推定値を下回ることがわかる。入口流速を 1.4 m/s, 2.8 m/s に変化させて求めた場合にも同様の傾向を示し、実測値の推定値からの差は、管内軸方向平均温度が高くなるにつれて大きくなった。

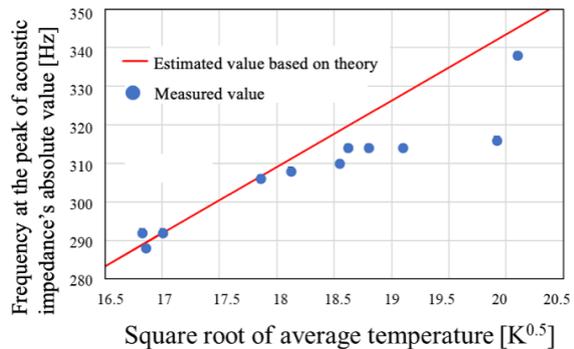


Fig. 4 Frequencies at the peak of acoustic impedance's absolute value for the square root of average temperature in the Rijke tube.

#### 4. 2. 構築した音響ネットワークモデルから得られた共鳴周波数および発振周波数

分岐管モデルを用いて算出した共鳴周波数を図 5 および図 6 に示す。図より、得られたなかで最も低い周波数は約 50 Hz であり、これは燃焼器下流から空気供給管上流までの気柱振動の 1 次モードに相当している。また、先行研究の燃焼振動実験<sup>(1)</sup>で得た発振周波数は天然ガス専焼条件で 350 Hz 付近 (図 5 中に赤色帯で示す)、水素混焼条件で約 200, 400 Hz 付近 (図 6 中に青色帯で示す) であるが、どちらの条件においても実験で得た発振周波数を含む計算結果を得ることができた。

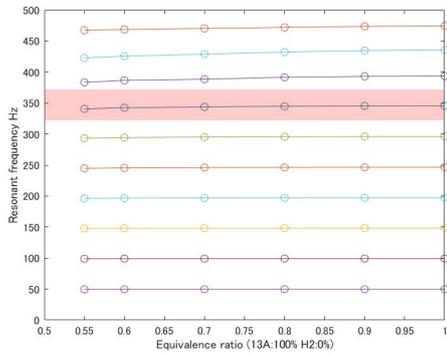


Fig. 5 Calculated resonant frequencies of acoustic impedance considering model (13A:100%, H<sub>2</sub>:0%)

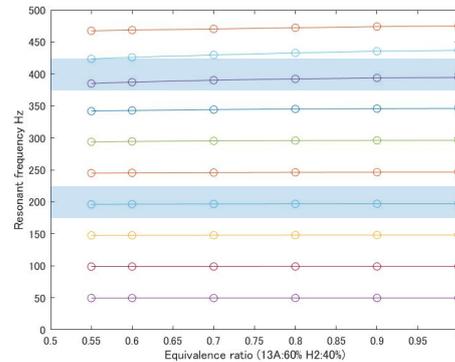


Fig. 6 Calculated resonant frequencies of acoustic impedance considering model (13A:60%, H<sub>2</sub>:40%)

次に、式(2)より計算した成長率を黒の実線で図7および図8に示す。図7は天然ガス専焼で当量比が1.0の条件、図8は水素混焼で当量比が0.6の条件である。図の縦軸は振動の成長率、横軸は周波数である。図中の赤の破線は、図5および図6に示したモデルより算出した共鳴周波数である。したがって、黒色の実線が赤色の破線と交差する点は分岐管モデルで求めた共鳴周波数における成長率を示している。

ここで、成長率は正であれば振動が発振、負であれば減衰することを示す指標であることから、黒色の実線が赤色の破線と交差する点で、成長率が正になるものを発振周波数とすれば、天然ガス専焼では148, 246, 294, 394, 436 Hz、水素混焼では148, 196, 343, 426, 469 Hzで発振する可能性があることが示された。すなわち、モデルから得た発振周波数は、実験で得られた発振周波数に近い値を含んでおり、本研究から燃焼振動の発振周波数の予測の指針が得られたと考える。

このとき、式(3)より成長率の計算に最も影響を与えるのは、火炎の遅れ時間 $\tau$ であることから、水素の燃焼特性が燃焼振動の発振有無に多大な影響を与えていることが確かめられた。

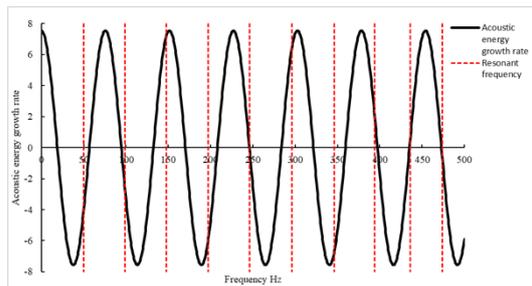


Fig. 7 Relation between frequency and acoustic energy growth rate (13A:100%, H<sub>2</sub>:0%, equivalence ratio = 1.0)

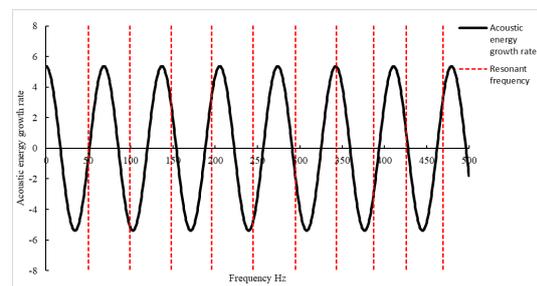


Fig. 8 Relation between frequency and acoustic energy growth rate (13A:60%, H<sub>2</sub>:40%, equivalence ratio = 0.6)

#### 参考文献

- (1) 上道茜, 金築一平, 金子成彦, 「音響的境界条件を考慮した燃焼振動発振周波数の検討」, 日本機械学論文集, Vol. 84 (2018) pp.17-00514, doi: <https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00514>
- (2) Ibrahim, Z.M., Williams, F.A., Buckley, S.G., & Lee, J.C.Y. "An Acoustic Energy Approach to Modeling Combustion Oscillations." Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. Volume 1: Combustion and Fuels, Education. Barcelona, Spain. May 8–11, 2006. pp. 77–86. ASME. Doi: <https://doi.org/10.1115/GT2006-90096>
- (3) Crocco L, and Cheng S.I., "Theory of combustion instability in liquid propellant rocket motors," Princeton Univ Nj; AD688924, 1956.
- (4) 新木悠斗, 上道茜, 山崎由大, 金子成彦, 「ピッチング加振を受ける水平円筒容器内スロッシングの1次共振波高に対する多孔版による減衰効果のCFDを用いた評価」, 日本機械学論文集, Vol. 84 (2018) pp.17-00507, DOI: 10.1299/transjsme.17-00507.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Uemichi Akane, Lyu Yifan, Kusaka Jin, Kaneko Shigehiko	4. 巻 1
2. 論文標題 Examination of Resonant Frequencies Generated by Combustion Oscillation in a Combustor Fueled by a Hydrogen-Natural Gas Mixture and an Upstream Pipe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 1: Acoustics, Vibration, and Phononics	6. 最初と最後の頁 V001T01A016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/IMECE2021-68521	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 Uemichi Akane, Mitani Kan, Yamasaki Yudai, Kaneko Shigehiko	4. 巻 144
2. 論文標題 Oscillating Frequencies Generated by Combustion Oscillation in a Combustor Tube Fueled by Natural Gas and a Hydrogen Mixture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Pressure Vessel Technology	6. 最初と最後の頁 PVT-21-1034
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4052308	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 Uemichi Akane, Mitani Kan, Yamasaki Yudai, Kaneko Shigehiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Examination of Oscillating Frequencies Generated by Combustion Oscillation Considering Temperature Distribution in a Combustor Tube Fueled by Natural Gas and Hydrogen Mixture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME Pressure Vessel and Piping Conference 2020	6. 最初と最後の頁 V004T04A002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/PVP2020-21231	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9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 上道茜, 呂逸凡, 草鹿仁, 金子成彦
2. 発表標題 水素混焼焚きガスタービン燃焼器で発生する燃焼振動の共鳴周波数の検討
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上道茜
2. 発表標題 水素混焼ガスタービン燃焼器で発生する燃焼振動の研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第22回秋季技術交流フォーラム、16 - B室：機械の音と振動研究懇話会「流体関連振動騒音の事例紹介と最新の研究動向」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akane Uemichi, Yifan Lyu, Jin Kusaka, Shigehiko Kaneko
2. 発表標題 Examination of Resonant Frequencies Generated by Combustion Oscillation in a Combustor Fueled by a Hydrogen-Natural Gas Mixture and an Upstream Pipe
3. 学会等名 ASME. IMECE2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井亮汰, 金子成彦, 上道茜
2. 発表標題 水素混焼ガスタービンで発生する燃焼振動の発振周波数の計算
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第28期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akane Uemichi
2. 発表標題 Examination of oscillating frequencies generated by combustion oscillation considering temperature distribution in a combustor tube fueled by natural gas and hydrogen mixture
3. 学会等名 Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akane Uemichi, Kan Mitani, Shigehiko Kaneko
2. 発表標題 Examination of Oscillating Frequency in Combustion Oscillation Using Acoustic Impedance as Acoustic Boundary Conditions
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Fluid-structure interaction; in honour of Michael Paidoussis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋野広祐, 上道茜, 山崎由大, 金子成彦
2. 発表標題 吸排気系を含む燃焼器を模した管の管内温度分布が音響的境界条件に与える影響の把握
3. 学会等名 日本機械学会年次大会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三谷冠, 上道茜, 山崎由大, 金子成彦
2. 発表標題 燃焼器内軸方向温度分布を考慮した燃焼振動共鳴周波数の検討
3. 学会等名 日本機械学会年次大会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋渡淳, 上道茜, 秋澤淳
2. 発表標題 燃焼器を模した管の管内温度分布の変化が音響インピーダンスに与える影響
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 第26期総会・講演会
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
研究協力者	金子 成彦 (Kaneko Shigehiko)  (70143378)	早稲田大学・理工学術院・教授  (32689)	
研究協力者	草鹿 仁 (Kusaka Jin)	早稲田大学・理工学術院・教授  (32689)	
研究協力者	山崎 由大 (Yamasaki Yudai)  (60376514)	東京大学・新領域創成科学研究科・教授  (12601)	
研究協力者	秋澤 淳 (Akisawa Atsushi)  (10272634)	東京農工大学・工学研究院・教授  (12605)	

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
---------	---------