

令和元年6月29日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04284

研究課題名（和文）複雑系数理の基礎理論を用いた燃焼振動の非線形ダイナミックスの解明とその新展開

研究課題名（英文）Nonlinear dynamics of thermoacoustic combustion oscillations from the viewpoint of complex mathematical system

研究代表者

後藤田 浩（Gotoda, Hiroshi）

東京理科大学・工学部機械工学科・准教授

研究者番号：00434712

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）：本研究は、これまでの熱工学分野で取り入れられていない先進的な複雑系数理の基礎理論を用いて、燃焼振動の流体力学的構造の解明を行った。また、工学的・工業的に重要な燃焼振動の予兆検知法を提案した。乱流ネットワーク内の強度の高い剥離渦の形成が、燃焼振動の非線形ダイナミックスに重要な役割を演じている。水平可視グラフのモチーフと主成分分析を組み合わせた方法論は、燃焼振動の予兆検知を可能にする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

燃焼振動が生じると、燃焼器の致命的な破損やライフサイクルの低下を引き起こす。そのため、燃焼振動の機構の基礎的解明や予兆検知技術の構築は発電用ガスタービンエンジンや航空エンジンなどの燃焼器開発において重要である。本研究は、複雑系科学の理論とその数理技術を用いて、燃焼振動の時空構造の解明や新しい予兆検知法の提案を行ったものである。本研究期間内に得られた研究成果は、学術的・社会的に意義が高い。

研究成果の概要（英文）：This study has elucidated the spatiotemporal structure in flow velocity field during thermoacoustic combustion oscillations from a viewpoint of complex mathematical system, including an early detection of thermoacoustic combustion oscillations. The formation of the large-scale transverse vortices with high vertex strength in the turbulent network plays an important role in the nonlinear dynamics of thermoacoustic combustion oscillations. Our methodology combining the motif patterns in the horizontal visibility graph and the principal component analysis is feasible for detecting a precursor of thermoacoustic combustion oscillations.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼工学 燃焼振動 非線形力学 複雑ネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

燃焼不安定の非線形ダイナミクスの基礎的な性質の解明とそれに基づく燃焼制御法の体系化は重要な研究課題である。近年進展の著しい複雑系科学の理論と数値技術を燃焼研究の新しい研究手法の開発に応用することは、熱工学分野の新しい展開を切り開いていくだけでなく、高度化する燃焼システムの開発にも大きく寄与するものと思われる。

このような視点に立って、研究代表者は熱物質拡散や浮力による火炎面不安定(参考文献[1],[2])のみならず、電磁熱流体現象の非線形力学系の提案(参考文献[3])などに関する一連の研究を行ってきた。特に、工学的・工業的に重要なガスタービンエンジンで生じる燃焼不安定のダイナミクスを、力学系理論の視点から解明し、その特徴を工学的に利用する研究を進めてきた(参考文献[4-7])。具体的には、希薄予混合ガスタービンモデル燃焼器で発生する熱音響型の燃焼振動を対象とし、燃焼器内の圧力変動から得られる位相空間内の軌道にマルチフラクタル性が存在することや短期予測可能・長期予測不可能性を明らかにしてきた。これらの研究(参考文献[4-7])から、燃焼振動の時空構造の解明と新しい予兆検知法の構築が必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

1. 研究開始当初の背景で述べたように、複雑系科学の視点から、燃焼振動の時空構造の解明や予兆検知法に関する研究は世界的に行われていない。本研究では、これまでの熱工学分野で取り入れられていない統計力学的複雑さや複雑ネットワークなどの先進的な複雑系数理の基礎理論を用いて、燃焼振動の発生・保持に大きく関わる燃焼場の流体力学的構造の解明を行うことを目的とする。また、工学的・工業的に重要な燃焼振動の予兆検知法を提案することも目的とする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 実験装置及び方法

本研究で用いる実験装置は、予混合室、ノズル、燃焼室、冷却部から構成されている(参考文献[6])。燃焼室入口には軸流スワローラーが組み込まれており、予混合気には旋回流が与えられる。燃料にはメタン、酸化剤には空気を用いる。本研究では、燃焼振動の流体力学的構造を明らかにするために、時系列 PIV を用いる。燃焼室内へ DPSS レーザー(Laser QUANTUM 社製 Finesse 波長 532 nm, 出力 8 W, レーザーシート厚 1 mm)を照射し、予混合気に混入させた固体粒子( $\text{SiO}_2$ , 平均粒子径 4  $\mu\text{m}$ )からの散乱光をバンドパスフィルター(LaVision 社製 VZ-Image Filter, 透過中心波長 532 nm, 半値幅 10 nm)と UV レンズ(Nikon 社製 UV-105 mm F4.5)を取り付けた高速度カメラ(Photron 社製 FASTCAM SA-Z)により撮影する。瞬時速度場の算出には LaVision Davis 8.0.6 を使用する。燃焼室内の圧力変動と散乱光画像はパルスジェネレーター(Quantum COMPOSERS 社製 MODEL9212)を用いて同時に計測される。圧力トランスデューサー(JTEKT PD104K-10 kPa)は、燃焼室入口より軸流方向へ 20 mm の壁面に取り付けられている。図 1 に時系列 PIV によって得られた燃焼振動の平均速度場を示す。渦崩壊による再循環流領域(Inner recirculation zone: IRZ), ダンプ領域の循環流領域(Outer recirculation zone: ORZ), スワローラー後流の循環流領域(Recirculation zone: RZ)が形成される(主な発表論文等〔雑誌論文〕[7])。本研究では、これらの循環流を伴った燃焼振動に着目する。

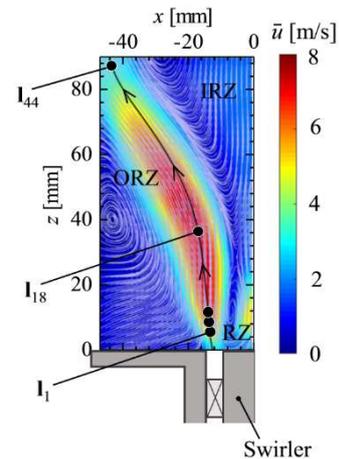


図 1 燃焼振動の平均速度場(主な発表論文等〔雑誌論文〕[7]).  $I_1 = [-13 \text{ mm}, 4 \text{ mm}]$ ,  $I_{18} = [-17 \text{ mm}, 38 \text{ mm}]$ ,  $I_{44} = [-43 \text{ mm}, 88 \text{ mm}]$ .

### 3.2 統計力学的複雑さと複雑ネットワークを用いた解析手法

情報理論の中心的概念であるシャノンエントロピーは乱雑さ、もしくは予測不能性の目安であり、統計熱力学における状態の不確定さを測ったエントロピーに対応する。本研究では、確率分布の形状を不均衡さと関連づけ、燃焼振動の速度変動の複雑さを乱雑さと不均衡さの積として定量化する。乱雑さには順列エントロピー[8]を用い、不均衡さには Jensen-Shannon divergence を用いる。この複雑さは Jensen-Shannon statistical complexity [9]と呼ばれ、 $C_{JS} = H_p Q_{JS}$  で表される。ただし、 $H_p$  を順列エントロピー、 $Q_{JS}$  を Jensen-Shannon divergence とする。 $H_p$  と  $C_{JS}$  から成る二次元平面 complexity-entropy causality plane (CECP) で、位相空間内の遅れ時間  $\tau$  を変化させることで、CECP 内に軌道が描かれる[10]。放物型の軌道が描かれるとき、ダイナミクスは決定論的であり、軌道が  $(H_p, C_{JS}) = (1, 0)$  に向かって右下がりになると、ダイナミクスは確率過程に支配されている。

燃焼振動の渦度場のダイナミクスを複雑ネットワークの視点から明らかにするために、Taira et al. [11]によって提案された乱流ネットワークを導入する。本研究では、重み付きネットワークを考慮し、乱流ネットワークの頂点を計算領域内の各計算格子とする。また、頂点間の結合強度を誘起速度の平均値から推定する。本研究では、ネットワーク構造の繋がりの程度を定量化するために、次数の強度  $s$  を算出する。さらに、本研究では、ネットワークのコミュニティにも着目する。コミュニティの抽出手法には、Blondel ら[12]により提案された Louvain 法を用いる。

燃焼振動の予兆検知を行うために、圧力変動を複雑ネットワークの一つである水平可視グラフ[13]に変換し、その部分グラフに着目する。本研究では、6種類のモチーフを対象に、主成分分析を導入する。

#### 4. 研究成果

図2に位相空間の遅れ時間 $\tau$ を変化させたときの燃焼振動の速度変動 $u'$ の順列エントロピー $H_p$ と Jensen-Shannon statistical complexity  $C_{JS}$ の変化を示す。ただし、ノズル出口付近からせん断層内の代表的な流線に沿った位置 $\mathbf{l}_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 44$ )の $H_p$ と $C_{JS}$ とする。ノズル出口付近の $\mathbf{l}_1$ に着目すると、 $\tau = 6.67 \times 10^{-3} \text{ s}$ ,  $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}$ のとき、 $H_p$ と $C_{JS}$ は、それぞれ、1と0となる。この二つの遅れ時間差は、燃焼振動の卓越した周波数成分の周期に対応する。卓越した周波数成分は、燃焼室入口を固定端、出口を開放端としたときの燃焼室縦方向の1/4波長音響共鳴モードに対応しており、圧力変動と速度変動の卓越周波数は一致している。ファンデルポール振動子に外部ノイズが印加させたときに生成される雑音周期振動では、順列エントロピーと Jensen-Shannon statistical complexity が遅れ時間の変化に対して周期的に変化することが報告されている[10]。CECPに着目すると、 $\tau$ の変化に対して周期的に $(H_p, C_{JS}) = (1, 0)$ に至るような軌道が描かれ、外部ノイズが印加されたファンデルポール振動子の軌道と同様な振る舞いをする[10]。Noirayら[14]は、燃焼振動の圧力変動は外部ノイズ項を有するファンデルポール振動子によって表されることを報告している。これらに基づくと、燃焼振動のノズル出口付近の速度変動は雑音周期振動であり、ノイズが印加されたファンデルポール振動子のダイナミクスと等価であると考えられる。 $\tau$ の変化に対する $H_p$ と $C_{JS}$ の分布は、せん断層を移流する剥離渦による火炎面の巻き込み領域( $j = 17$ )まで保持されている。そして、火炎面の巻き込みが消滅し始める $\mathbf{l}_{18}$ で、 $H_p$ と $C_{JS}$ の分布は大きく変化し、CECPに反時計回りの軌道が描かれ始める。 $\mathbf{l}_{35}$ で $H_p$ の極大値と $C_{JS}$ の極小値が、 $\tau = 5.00 \times 10^{-4} \text{ s}$ で顕著に観察される。Zuninoら[10]の結果に基づくと、 $j \geq 18$ での燃焼振動の速度変動は雑音カオスであると言える。雑音周期振動から雑音カオスへの遷移は、せん断層の代表的な流線のみならず、速度変動の空間二次モーメントでも観察されている[15]。図3に速度変動の動的モード分解のパワースペクトル分布と支配的なモードの空間分布を示す。約150 Hzの卓越した周波数ピークが観察され、1/4波長音響共鳴モードによって誘起される。また、約300 Hzの調和モードも観察される。これらのモードは、雑音周期振動を形成しているノズル出口付近からせん断層の火炎巻き込み領域に対応する $x = -20 \text{ mm}$ ,  $z = 1 \sim 40 \text{ mm}$ で顕著に現れる。 $j \geq 18$ での雑音カオスの形成には、これらのモードの寄与が小さいと思われる。

図4に $s$ の空間分布と渦度場のコミュニティ構造の時間変化を示す。ただし、時刻 $t = 0.501 \text{ s}$ は位相角 $\theta = 270^\circ$ 、 $t = 0.505 \text{ s}$ は $\theta = 90^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ(270^\circ)$ は圧力変動の極大値(極小値)に対応し、中空のプロットはコミュニティの代表点である。また、コミュニティ同士のつながりの強

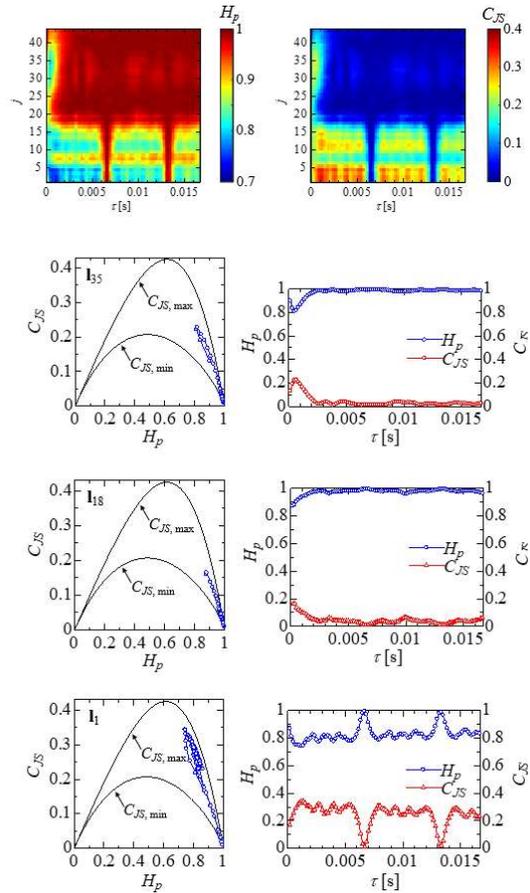


図2 遅れ時間 $\tau$ を変化させたときの順列エントロピー $H_p$ と Jensen-Shannon statistical complexity  $C_{JS}$ の変化ならびに CECP の軌道の変化(主な発表論文等〔雑誌論文〕[7])。ただし、 $\mathbf{l}_1 = [-13 \text{ mm}, 4 \text{ mm}]$ ,  $\mathbf{l}_{18} = [-17 \text{ mm}, 38 \text{ mm}]$ ,  $\mathbf{l}_{35} = [-35 \text{ mm}, 72 \text{ mm}]$ 。

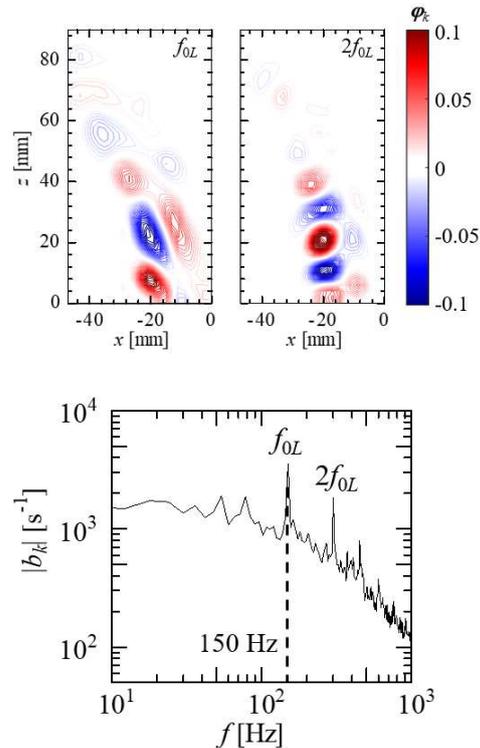


図3 速度変動の動的モード分解のパワースペクトル分布と支配的なモードの空間分布(主な発表論文等〔雑誌論文〕[7])。

さは線の太さで表現されている。  $t = 0.501$  s のとき、  $z \sim 10$  mm で強度の強い primary hub が形成され、コミュニティ間の強い結合が primary hub 間で生じる。コミュニティ間の結合は  $t = 0.503$  s まで保持され、  $t = 0.505$  s になると、コミュニティ間の結合は弱くなる。圧力変動が極大となるとき、ネットワーク構造の中核となる primary hub が消滅し、雑音カオスの形成領域で他のコミュニティ間の結合が不規則的に生じる。ノズル出口付近でコミュニティ間の強い結合を伴う周期的な剥離渦の形成が、燃焼振動の圧力変動の極小値に重要な役割を担っている。図 5 に  $x$  軸に関して  $s$  を空間平均した平均強度  $\bar{s}$  の時間変化を示す。  $0 < z < 38$  mm において  $\bar{s}$  が周期的に高くなり、  $z \geq 38$  mm では不規則的になる。つまり、雑音カオスの形成には、下流領域の不規則な primary hub の出現が重要な役割を演じている。

当量比  $\phi$  を増加させたときの水平可視グラフのモチーフの主成分空間を図 6 に示す。  $\phi$  の増加に伴って、第 1 主成分スコア  $S_1$  は増加する。  $\phi$  が 0.74 から 0.75 に変化するとき、  $S_1$  は負から正に変化する。このように、燃焼振動の前兆が現れるとき、モチーフ 1 の寄与が大きくなる。正規化した第 1 主成分スコア  $S_1^*$  と  $\phi$  の関係を図 7 に示す。  $\phi = 0.70$  から  $\phi$  を増加させていくと、燃焼状態は燃焼振動の形成領域に近づき、  $S_1^*$  は単調に増加する。このことは、正規化した第 1 主成分スコアは燃焼振動付近の燃焼状態を特徴づけられることを示しており、燃焼振動の予兆を検知することが可能である。

本研究では、統計力学的複雑さと複雑ネットワークを用いて、燃焼振動の時空構造を明らかにした。これまで、ケンブリッジ大学、インド工科大学、ベルリン工科大学などを中心に、燃焼不安定の取り扱いに対する力学系理論の重要性が議論されており、研究代表者の研究論文(参考文献[5-7])も多く引用されている。統計力学的複雑さと複雑ネットワークの視点から、燃焼振動の速度場の時空構造を解明したのは本研究が世界で初めてである。また、水平可視グラフのモチーフと主成分分析を組み合わせた方法論が燃焼振動の予兆検知に有用であることを明らかにしたのも本研究が世界で初めてである。これらの研究成果は、世界的に権威ある米国物理学会が出版する学術誌に掲載されており、本研究の世界的な位置づけは高いものと思われる。燃焼振動は圧力変動と熱発生率変動の相互作用によって保持されることから、両者の非線形相互作用を複雑系科学の視点から解明していく必要がある。現在、研究代表者は、同期理論を用いて、非線形相互作用の一端を解明しつつある(主な発表論文等〔雑誌論文〕[1])。今後、移動エントロピー(主な発表論文等〔雑誌論文〕[2])の導入も含め、非線形相互作用を詳細に解明していく。また、圧力変動と熱発生率変動の非線形相互作用を考慮に入れた遷移ネットワークと主成分分析を導入し、燃焼振動のオンライン予兆と回避を行っていく。これらの研究によって得られる成果は、燃焼工学の学理体系化に大きく繋がっていくものと考えている。

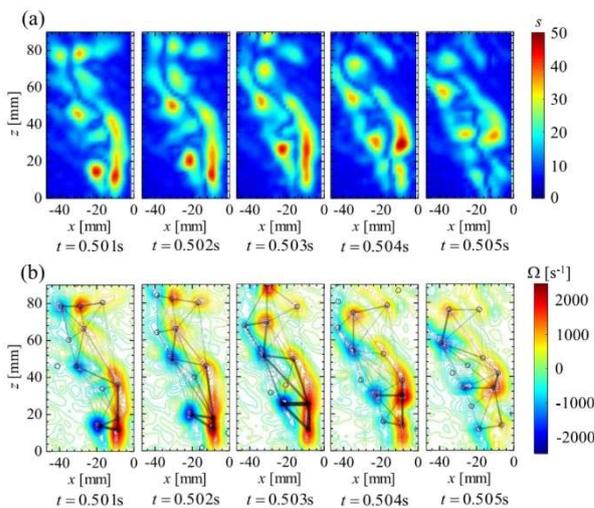


図 4 乱流ネットワークの次数  $s$  の空間分布と (b) 渦度場のコミュニティ構造の時間変化 (主な発表論文等〔雑誌論文〕[7]).

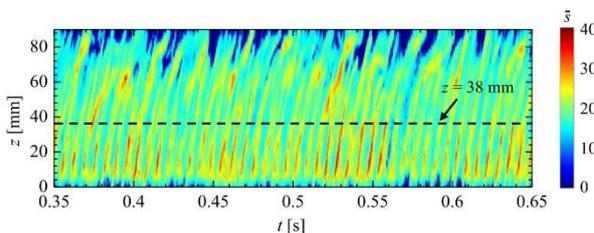


図 5  $x$  軸に関して  $s$  を空間平均した平均強度  $s$  の時間変化(主な発表論文等〔雑誌論文〕[7]).

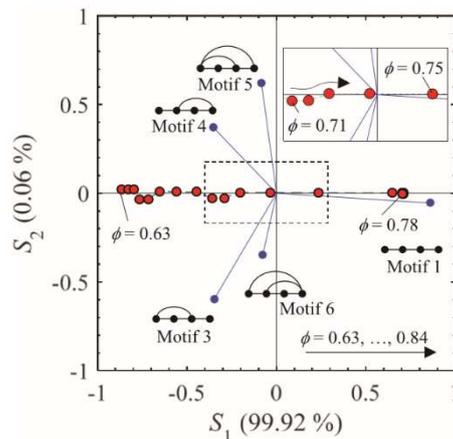


図 6 当量比  $\phi$  を増加させたときの水平可視グラフのモチーフの主成分空間(主な発表論文等〔雑誌論文〕[7]).

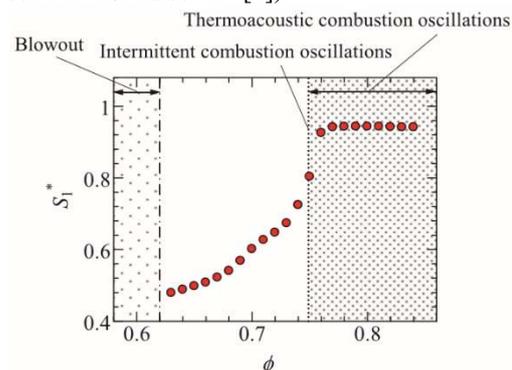


図 7 正規化された第 1 主成分スコア  $S_1^*$  と当量比  $\phi$  の関係(主な発表論文等〔雑誌論文〕[7]).

## 参考文献

- [1] H. Gotoda, T. Miyano, and I. G. Shepherd, *Physical Review E*, vol. 81, 026211, 2010.
- [2] H. Gotoda, T. Ikawa, K. Maki, and T. Miyano, *Chaos*, vol. 22, 033106, 2012.
- [3] H. Gotoda, R. Takeuchi, Y. Okuno, and T. Miyano, *Journal of Applied Physics*, vol. 113, 124902, 2013.
- [4] H. Gotoda, H. Nikimoto, T. Miyano, and S. Tachibana, *Chaos*, vol. 21, 013124, 2011.
- [5] H. Gotoda, M. Amano, T. Miyano, T. Ikawa, K. Maki, and S. Tachibana, *Chaos*, vol. 22, 043128, 2012.
- [6] H. Gotoda, Y. Shinoda, M. Kobayashi, Y. Okuno, and S. Tachibana, *Physical Review E*, vol. 89, 022910, 2014.
- [7] H. Gotoda, Y. Okuno, K. Hayashi, and S. Tachibana, *Physical Review E*, vol. 92, 052906, 2015.
- [8] C. Bandt and B. Pompe, *Physical Review Letters*, vol. 88, 174102, 2002.
- [9] A. Rosso, H. A. Larrondo, M. T. Martin, A. Plastino, and M. A. Fuentes, *Physical Review Letters*, vol. 99, 154102, 2007.
- [10] L. Zunino, M. C. Soriano, and O. A. Rosso, *Physical Review E*, vol. 86, 046210, 2012.
- [11] K. Taira, A. G. Nair, and S. L. Brunton, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 795, R2, 2016.
- [12] V. D. Blondel, J. L. Guillaume, R. Lambiotte, and E. Lefebvre, *Journal of Statistical Mechanics*, P10008, 2008.
- [13] B. Luque, L. Lacasa, F. Ballesteros, and J. Luque, *Physical Review E*, vol. 80, 046103, 2009.
- [14] N. Noiray and A. Denisov, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, 3843, 2016.
- [15] 村山聖悟, 二次空気噴射制御による燃焼振動の時空間位相同期の減衰過程, 東京理科大学大学院 修士論文, 2019.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 12 件)

- [1] S. Murayama and **H. Gotoda**, Attenuation behavior of thermoacoustic combustion instability analyzed by a complex-network- and synchronization-based approach, *Physical Review E*, 99, 052222, 2019, DOI: 10.1103/PhysRevE.99.052222, 査読あり.
- [2] T. Hashimoto, H. Shibuya, **H. Gotoda**, Y. Ohmichi, and S. Matsuyama, Spatiotemporal dynamics and early detection of thermoacoustic combustion instability in a model rocket combustor, *Physical Review E*, vol. 99, 032208 (7 pages), 2019, DOI: 10.1103/PhysRevE.99.032208, 査読あり.
- [3] S. Murayama, K. Kaku, M. Funatsu, and **H. Gotoda**, Characterization of dynamic behavior of combustion noise, and detection of blowout in a laboratory-scale gas-turbine model combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, pp. 5271-5278, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.034>, 査読あり.
- [4] H. Kobayashi, **H. Gotoda**, and S. Tachibana, Nonlinear determinism of degenerated combustion instability in a gas-turbine model combustor, *Physica A*, vol. 510, pp. 345-354, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.024>, 査読あり.
- [5] K. Takagi, **H. Gotoda**, T. Miyano, S. Murayama, and I. T. Tokuda, Synchronization of two coupled turbulent fires, *Chaos*, vol. 28, 045116 (6 pages), 2018, <https://doi.org/10.1063/1.5009896>, 査読あり.
- [6] H. Kasuya, **H. Gotoda**, S. Yoshida, and S. Tachibana, Dynamic behavior of combustion instability in a cylindrical combustor with an off-center installed coaxial injector, *Chaos*, vol. 28, 033111 (8 pages), 2018, <https://doi.org/10.1063/1.5025480>, 査読あり.
- [7] S. Murayama, H. Kinugawa, I. T. Tokuda, and **H. Gotoda**, Characterization and detection of thermoacoustic combustion oscillations based on statistical complexity and complex-network theory, *Physical Review E*, vol. 97, 022223 (8 pages), 2018, DOI: 10.1103/PhysRevE.97.022223, 査読あり.
- [8] H. Kobayashi, **H. Gotoda**, S. Tachibana, and S. Yoshida, Detection of frequency-mode-shift during thermoacoustic combustion oscillations in a staged aircraft engine model combustor, *Journal of Applied Physics*, vol. 122, 224904 (6 pages), 2017, <https://doi.org/10.1063/1.5003912>, 査読あり.
- [9] **H. Gotoda**, M. Pradas, and S. Kalliadasis, Chaotic versus stochastic behavior in active-dissipative nonlinear systems, *Physical Review Fluids*, vol. 2, 124401 (15 pages), 2017, DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.124401, 査読あり.
- [10] **H. Gotoda**, H. Kinugawa, R. Tsujimoto, S. Domen, and Y. Okuno, Characterization of combustion dynamics, detection and prevention of an unstable combustion state based on a complex-network theory, *Physical Review Applied*, vol. 7, 044027 (7 pages), 2017, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.044027, 査読あり.

- [11] **H. Gotoda**, H. Kobayashi, and K. Hayashi, Chaotic dynamics of a swirling flame front instability generated by a change in gravitational orientation, *Physical Review E*, vol. 95, 022201 (8 pages), 2017, DIO: 10.1103/PhysRevE.95.022201, 査読あり.
- [12] **H. Gotoda**, K. Hayashi, R. Tsujimoto, S. Domen, and S. Tachibana, Dynamic properties of combustion instability in a laboratory-scale gasturbine model combustor, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 139, 041509, 2017, dio: 10.1115/1.4034700, 査読あり.

[学会発表] (計 17 件)

- [1] 黒坂拓也, 村山聖悟, **後藤田浩**, 二次空気噴射制御による燃焼振動抑制過程の非線形ダイナミクス, 日本機械学会 関東学生会第 58 回学生員卒業研究発表講演会, 2019 年 3 月.
- [2] 増田晋河, 小林翼, **後藤田浩**, 遷移ネットワークを用いた予混合ガスタービンモデル燃焼器での燃焼不安定の検知及び回避, 日本機械学会 関東学生会第 58 回学生員卒業研究発表講演会, 2019 年 3 月.
- [3] **H. Gotoda**, Spatiotemporal dynamics of thermoacoustic combustion oscillations and early detection of lean blowout -Statistical complexity and complex networks, The Korean Society of Combustion, 57th Symposium on Combustion, 2018 年 11 月.
- [4] 村山聖悟, **後藤田浩**, 熱音響燃焼振動の非線形ダイナミクスの基礎的解明 -同期理論と複雑ネットワーク理論の導入-, 日本燃焼学会 第 56 回燃焼シンポジウム, 2018 年 11 月.
- [5] 村山聖悟, 賀来健太郎, **後藤田浩**, 複雑ネットワーク理論による燃焼不安定の流体力学的構造の解明, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2018, 2018 年 10 月.
- [6] T. Kobayashi, M. Funatsu, and **H. Gotoda**, Detection of blowout in a laboratory-scale gas-turbine model combustor, International Symposium on Nonlinear Theory and Its Application 2018, 2018 年 9 月.
- [7] S. Murayama, K. Kaku, M. Funatsu, and **H. Gotoda**, Characterization of dynamic behavior of combustion noise, and detection of blowout in a laboratory-scale gas-turbine model combustor, 37th International Symposium on Combustion, 2018 年 8 月.
- [8] 中野颯太, 村山聖悟, 賀来健太郎, **後藤田浩**, ガスタービンモデル燃焼器で発生する燃焼不安定の非線形ダイナミクス, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2018 年 4 月.
- [9] **H. Gotoda** and S. Murayama, Characterization and detection of thermoacoustic combustion oscillations based on statistical complexity and complex Networks, US-Japan Workshop on Bridging Fluid Mechanics and Data Science, 2018 年 3 月.
- [10] 村山聖悟, 賀来健太郎, **後藤田浩**, 複雑ネットワークに基づく熱音響燃焼振動の特徴化, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017 年 11 月.
- [11] 賀来健太郎, 村山聖悟, **後藤田浩**, 熱音響燃焼振動のネットワーク構造の基礎的解明, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017 年 11 月.
- [12] 村山聖悟, **後藤田浩**, 熱音響燃焼振動の非線形ダイナミクスの特徴化, 第 64 回理論応用力学講演会, 2017 年 8 月.
- [13] 村山聖悟, 賀来健太郎, **後藤田浩**, ガスタービンモデル燃焼器で発生する熱音響燃焼振動のダイナミクス, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, 2017 年 5 月.
- [14] S. Murayama, K. Kaku, and **H. Gotoda**, Randomness of combustion instability in a laboratory-scale gas-turbine model combustor, 8th European Combustion Meeting, 2017 年 4 月.
- [15] Y. Hayashi, M. Funatsu, H. Kobayashi, and **H. Gotoda**, Nonlinear analysis on dynamical motion of combustion instability in a laboratory-scale gas turbine model combustor, 8th European Combustion Meeting, 2017 年 4 月.
- [16] **H. Gotoda**, K. Hayashi, R. Tsujimoto, S. Domen, and S. Tachibana, Dynamical properties of combustion instability in a gas-turbine model combustor, ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2016 年 6 月.
- [17] **後藤田浩**, 熱工学系の非線形力学, 慶應義塾大学大学院環境エネルギー科学特論第 1, 2016 年 5 月.

[その他]

プレスリリース

- [1] 後藤田浩, 衣川輝, 村山聖悟, 徳田功, 不安定な燃焼状態の前兆を検知するための新しい方法論 ~複雑ネットワークの基礎理論を導入~, 東京理科大学 プレスリリース, <https://www.tus.ac.jp/today/20180315140.pdf>, 2018 年 3 月.

ホームページ

<https://www.rs.tus.ac.jp/gotodalab/index.html>