



2018年3月15日

報道関係各位

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  
立命館大学

研究の要旨

東京理科大学 工学部 機械工学科 後藤田浩 准教授、立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 衣川輝 学生(当時)、東京理科大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 村山聖悟 学生、立命館大学 理工学部 機械工学科 徳田功 教授らの研究グループは、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の一つとして、複雑ネットワークの有用性を示した。

●本研究成果は米国物理学会の学術誌『Physical Review E』に2018年2月27日付け、『Physical Review Applied』に2017年4月27日付けで公開された。

【研究者】

後藤田 浩 (東京理科大学 工学部 機械工学科 准教授)

衣川 輝 (立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 修士課程2年生 研究当時)

村山 聖悟 (東京理科大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 修士課程1年生)

徳田 功 (立命館大学 理工学部 機械工学科 教授)

【本研究のポイント】

- ・ 水平可視グラフのモチーフと主成分分析を用いることで、燃焼振動の前兆を検知することが可能。
- ・ 垂直可視グラフの平均次数を用いることで、吹き消えの前兆を検知することが可能。

【研究の背景】

燃焼は現代社会におけるエネルギー供給技術として重要な役割を担っているが、「燃焼振動」<sup>(1)</sup>や「吹き消え」<sup>(2)</sup>などの不安定な燃焼状態の発生が燃焼器開発で問題となる。燃焼器や燃料インジェクタが、燃焼振動による強い圧力変動に長時間さらされると、疲労による致命的な破損が懸念される。また、燃焼器への燃料噴射量を減らしていくと、化学反応が持続できなくなり、やがては火炎が消えてしまう、いわゆる、吹き消えが発生する。燃焼振動や吹き消えの事前検知技術の開発は、発電用ガスタービンエンジンや航空エンジンのみならず、さまざまな燃焼器開発において重要となっている。

近年、複雑ネットワークの基礎理論の体系化が著しく進展し、時系列を数学的な表現であるネットワークへ変換することで、時系列に内在する情報を抽出する試みが行われている。時系列を短い区間で分割し、その時間発展に基づく幾何学的パターン、いわゆる、モチーフに着目した解析手法は、力学系の解構造の変化を捉える際に有用となりつつある。しかしながら、複雑ネットワークの基礎理論に着目して、不安定な燃焼状態の前兆を検知する方法論は提案されてこなかった。

## 【研究内容と成果の概要】

① 複雑ネットワークの一つである水平可視グラフに着目し、水平可視グラフのモチーフと主成分分析を組み合わせることで、燃焼振動の事前検知を試みた。実験室レベルの燃焼器を用いて、当量比 $\phi$ <sup>(3)</sup>を増加させたときのモチーフの主成分空間を図 1 に示す。ただし、燃焼器内の圧力変動から水平可視グラフのモチーフを構築する。なお、本実験条件では、 $\phi \geq 0.76$  のときに燃焼振動が形成される。図 1 で示されるように、 $\phi$ 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ことを発見した。正規化した第 1 主成分スコア $S_1^*$ と $\phi$ の関係を図 2 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 主成分スコアと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いる。

② 複雑ネットワークの一つである垂直可視グラフに着目し、垂直可視グラフの平均次数を用いて、吹き消えの事前検知と回避を試みた。なお、本研究では、視力を考慮に入れた垂直可視アルゴリズムも提案している<sup>(注)</sup>。当量比 $\phi$ を減少させたときの平均次数 $\langle k \rangle$ の変化を図 3 に示す。ただし、本実験条件では、 $\phi = 0.61$  のときに燃焼振動が、 $\phi = 0.50$  のときに吹き消えが発生する。 $\phi = 0.6$  から $\phi$ を減少させていくと、燃焼状態は吹き消えに近づき、 $\langle k \rangle$ は減少する。このことは、垂直可視グラフの平均次数と吹き消え付近の燃焼状態を特徴づけられることを示している。

平均次数に閾値を設け、吹き消えの回避を行った結果を図 4 に示す。なお、本実験では、燃焼器に供給する主燃料流量 $Q_{main}$ のみを低下させ、吹き消え領域に至らせる場合(図 4(a))と吹き消え領域に至った後に $Q_{main}$ を増加させる場合(図 4(b))を対象とする。図 4 で示されるように、吹き消えが発生する当量比よりも高い当量比を維持しながら、吹き消えの発生が回避されている(緑色)。このように、垂直可視グラフの平均次数は吹き消えの事前検知と回避に有用であることを発見した。

(注) 視力を考慮に入れた垂直可視アルゴリズムは、研究代表者らによって特許開示されている(発明の名称: 観測装置および観測方法、特開 2016-173211)。

## 【今後の展開】

本研究では、不安定な燃焼状態として、実験室レベルの燃焼器で発生する燃焼振動と吹き消えに着目し、これらの前兆を検知するための新しい方法論の一つとして、複雑ネットワークの基礎理論の有用性を示した。水平可視グラフのモチーフと主成分分析を組み合わせることで燃焼振動の前兆を、また、垂直可視グラフの平均次数を用いることで吹き消えの前兆を、検知できる可能性を発見した。今後、さまざまな燃焼器を対象に、本研究成果の有効性を示していく必要があるが、複雑ネットワークは燃焼分野における新しいヘルスマニタリング技術の体系化に寄与していくことが期待される。

## 【謝辞】

本研究は、科研費 基盤研究 B (課題番号: 16H04284, 研究課題: 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クスの解明とその新展開)の助成を受けて実施されたものである。

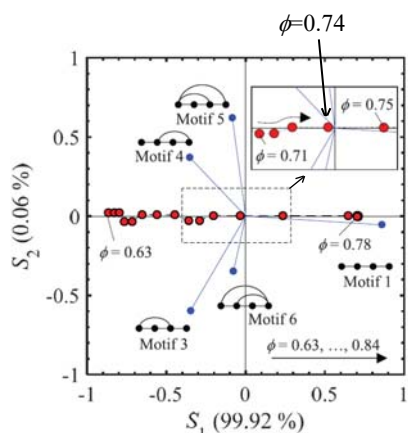


図1 当量比 $\phi$ を増加させたときのモチーフの主成分空間

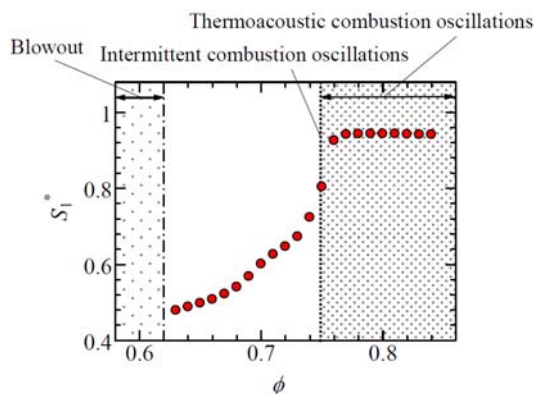


図2 正規化された第1主成分スコア $S_1^*$ と当量比 $\phi$ の関係

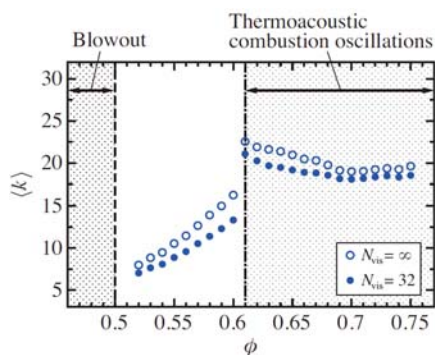


図3 平均次数 $\langle k \rangle$ と当量比 $\phi$ の関係

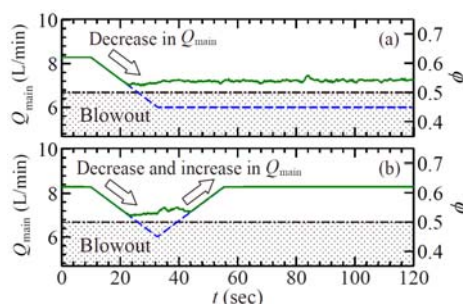


図4 平均次数 $\langle k \rangle$ を検知器に用いた吹き消えの回避

### 【発表雑誌】

(1) 雑誌名: Physical Review E

論文タイトル: Characterization and detection of thermoacoustic combustion oscillations based on statistical complexity and complex-network theory

著者: Shogo Murayama, Hikaru Kinugawa, Isao T. Tokuda, and Hiroshi Gotoda

DOI 番号: 10.1103/PhysRevE.97.022223

(2) 雑誌名: Physical Review Applied

論文タイトル: Characterization of combustion dynamics, detection, and prevention of an unstable combustion state based on a complex-network theory

著者: Hiroshi Gotoda, Hikaru Kinugawa, Ryosuke Tsujimoto, Shohei Domen, and Yuta Okuno

DOI 番号: 10.1103/PhysRevApplied.7.044027

### 【用語説明】

(1) 燃焼振動: 燃焼反応による熱発生率と圧力変動の相互干渉によって発生する音圧レベルの高い熱音響自励現象

(2) 吹き消え: 燃焼反応速度の低下に伴う失火現象

(3) 当量比: 燃焼器に供給される燃料と酸素の濃度比を完全燃焼における濃度比で正規化した物理量

～本件に関するお問い合わせ～  
東京理科大学 研究戦略・産学連携センター  
〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3  
TEL : 03-5228-7440 FAX : 03-5228-7441

TEL : 03-5228-7440 FAX : 03-5228-7441