

■特集/FEATURE■

—「不安定」な燃焼/Unstable combustion—

力学系理論を用いた燃焼不安定の非線形特性の解明と工学的応用

Nonlinear Properties of Combustion Instability Based on Dynamical Systems Theory

後藤田 浩*

GOTODA, Hiroshi*

東京理科大学工学部機械工学科 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1
Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

Abstract : Dynamical systems theory conveys striking and useful information for clarifying the hidden nature of irregular temporal fluctuations obtained in a wide spectrum of experiments in the fields of biological medicine, electronic information, mechanical engineering, and many other natural sciences. It extensively covers sphere ranging from the quantification of important nonlinear properties, which yields a physical description of the dynamical structure in phase space, to practical applications such as detection and control. This article presents the availability of dynamical systems theory involving three analytical methods: colored recurrence plots, local predictor, and translation error, to deal with nonlinear dynamics of combustion instability in a laboratory-scale gas-turbine model combustor.

Key Words : Combustion instability, Gas turbine model combustor, Dynamical systems theory

1. 緒言

複雑な非線形現象を数理方程式として記述し、その解の分岐構造やカオス・フラクタル構造を解明する力学系理論は、数物系のみならず、生命医学系や電子情報系などの幅広い分野で取り入れられている。燃焼分野ではあまり馴染みのない力学系理論は、応用数学分野で体系化が進んでいるが、ここ最近、ガスタービンモデル燃焼器で発生する燃焼不安定(燃焼振動と吹き消え)を対象とした実験的・理論的研究に取り入れられ、流体分野の *Journal of Fluid Mechanics* や非線形科学分野の *Chaos* などに研究例が数多く報告されている[1-8]。そして、燃焼不安定の周期倍分岐構造や Ruelle-Takens-Newhouse のシナリオ、マルチフラクタル性が明らかにされつつある。サンフランシスコで開催された第35回国際燃焼シンポジウムの *Acoustically forced flames* と *Flame dynamics* のセッションでも、力学系理論を用いた燃焼不安定の非線形特性の解明がケンブリッジ大学[9]やインド工科大学[10]らの研究グループによって積極的に行われている。他方、著者は、近年進展の著しい複雑系科学の理論と数理技術をガスタービン燃焼不安定の新しい研究手法の開発に応用することは高度化する燃焼器の設

計・制御開発にも大きく寄与すると考え、力学系理論の工学的応用を目的に、宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 推進技術研究ユニットと共同で研究を進めている[11-13]。また、脳・生命システムにおける神経ネットワークの構造に着目したニューラルネットワークを導入し、従来の研究[1-10]では明らかにされていない燃焼不安定の非線形特性の解明も同機構と共同で進めている[14]。

上述のように、ガスタービン燃焼不安定に対して力学系理論が積極的に導入されるようになったのは最近であるが、10年ほど前から力学系理論は熱物質拡散や浮力の影響を受けた様々な火炎の挙動解明にも適用されている[15,16]。これらの研究では、1980年代に提案された位相空間内の軌道不安定性と自己相似性を定量化するリャプノフ指数と相関次元を用いて、火炎面不安定の非線形特性を明らかにしたが、これらの特性量が工学的な応用へ展開されていなかったように思われる。その後、著者らは軌道不安定性の重要な性質である「短期予測可能・長期予測不可能性」に着目した予測法を燃焼研究に初めて導入し、工学的な視点から力学系理論の有用性の一端を明らかにした[17]。この研究成果を踏まえて、ガスタービンモデル燃焼器で発生する突発的な燃焼振動の短期的予測の可能性を明らかにした[11]。近年、記号力学に基づいた順列エントロピー法、粗視化を考慮したマルチスケールエントロピー法の体系化

* Corresponding author. E-mail: gotoda@rs.tus.ac.jp

が著しく進んでいる。さらに、グラフ理論をもとに、脳神経回路網や細胞内の遺伝子・たんぱく質ネットワークの解明に関連した「スモールワールド・スケールフリー性」をキーワードとした複雑ネットワークの体系化も著しく進んでいる。非線形現象を取り扱うための新しい理論と数理工術が記号力学やグラフ理論を中心に展開されており、著者らもガスタービン燃焼不安定[18]のみならず、様々な燃焼現象に対して積極的に導入している[19]。

本稿では、非線形現象を取り扱う上で基本となる力学系理論をガスタービン燃焼不安定に適用し、その非線形特性の解明と工学的応用の可能性を明らかにしたものを紹介する。

2. 実験装置及び方法の概要

本研究で使用する予混合ガスタービンモデル燃焼器の概略図を図1に示す[12,18]。空気供給系、主燃料および二次燃料供給系、燃料-空気混合室、燃焼室、冷却部から構成されており、燃焼室は Tachibana et al. [20,21]によって使用されたものと同様とする。燃料にはメタンを用いる。火炎は燃焼室入口に組み込まれた軸流スワラ（ハブ径 19 mm, スワラ外形 30 mm）によって保持される。燃焼室内の圧力変動 p' [kPa] は、燃焼室入口から軸流方向に 20 mm の位置の燃焼室壁面に取り付けられた圧力トランスデューサー (JTEKT 社製 PD104K-10kPa) を用いて、5 kHz のサンプリング周波数で測定される。予混合気のスワラ断面平均流速 U を 5.0 m/s, 5.8 m/s とし、主燃料流量 Q_{CH_4} を減少させることで当量比 ϕ を 0.75 から 0.49 まで低下させる。また、本研究では、擬似レーリーインデックス R を見積ることで、燃焼振動の駆動領域を調べる。擬似レーリーインデックスの見積りで必要となる OH 自発光強度の測定には、イメージインテンシファイア（浜松ホトニクス製 C10880-03F）付き高速カメラ（Photron 製 FASTCAM SA3）を用いる。

3. 力学系理論に基づく時系列解析

力学系理論に基づく時系列解析は、Takens の埋め込み次元定理[22]を用いて不安定現象の時間変動を遅延座標系に変換し、構築された位相空間内の軌道の静的特徴である自己相似性や動的性質である軌道不安定性を定量化する手法である[23]。レーリー・ベナール対流の数理工式として提案されたローレンツ方程式の解に対して適用されて以来[24]、複雑なダイナミクスの非線形特性を明らかにする上で有用な手法となっている[23]。図2で示されるように、次式を用いて、燃焼不安定の圧力変動 p' を位相空間へ変換し、 t_i ($i = 1, 2, \dots, N$) を変化させることで、 D 次元の位相空間内に軌道を描く。

$$\mathbf{p}(t_i) = (p'(t_i), p'(t_i + \tau_s), \dots, p'(t_i + (D-1)\tau_s))$$

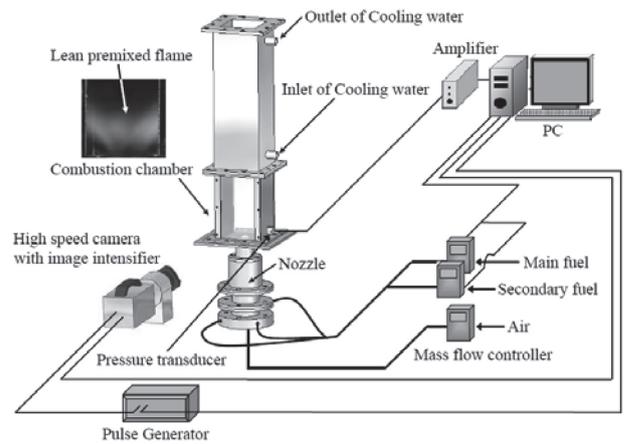


Fig.1 Schematic of the experimental setup.

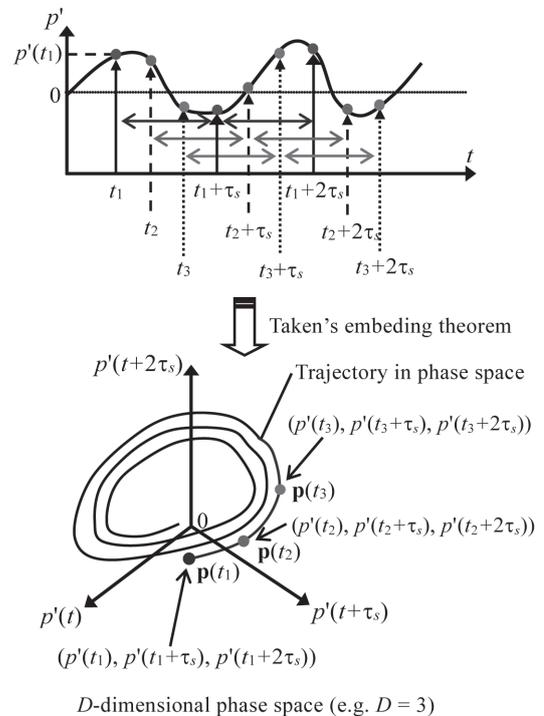


Fig.2 D -dimensional phase space constructed from temporal evolutions of pressure fluctuations p' using Taken's embedding theorem.

ただし、 $\mathbf{p}(t_i)$ を位相空間内の軌道上の点、 τ_s を遅れ時間、 D を位相空間の次元、 N をデータ点数とする。また、誤り近傍ベクトル[25]の影響が無視できる次元を最適な位相空間の次元とし、圧力変動の相互情報量が最初に最小になるときの時間[26]を最適な遅れ時間とする。本研究では、軌道同士の距離の秩序・非秩序構造を明らかにするカラーリカレンスプロット[12]、軌道不安定性を定量化する局所近似予測法[12]と並進誤差法[12]を用いる。

3.1. カラーリカレンスプロット

リカレンスプロットは、位相空間内の2点間距離 $\|\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_j)\|$ を i, j の座標軸から構成される2次元平面上に

binary plot として表示させたものである[27]. 近年, Kabiraj & Sujith [2]は燃焼振動に対してリカレンスプロットを適用している. 他方, 2 点間距離の大きさを画素として描画する方法[12,28]では, リカレンスプロットの構造が $\|\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_j)\|$ の閾値に依存しない利点を有する. 本研究では, 次式を用いて 2 点間距離を量子化し, 256 階調のカラーリカレンスプロットを描く. 圧力変動に決定論的な特徴が存在していれば, カラーリカレンスプロット上に規則正しい配列構造が形成され, ランダム的な特徴が存在していれば, 均一的な構造が形成される.

$$R_{i,j} = \frac{\|\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_j)\| - \|\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_j)\|_{\min}}{\|\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_j)\|_{\max} - \|\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{p}(t_j)\|_{\min}}$$

3.2. 局所近似予測法

近接する軌道群間の距離の時間変化に着目した局所近似予測法は, 軌道不安定性の重要な特徴である「短期予測可能・長期予測不可能性」を調べるのに有用である[11,17,29]. この手法では, まず, 圧力変動を二分する. 圧力変動を予測するためのデータベースとして前半部分を用い, 予測された圧力変動と比較するための参照用データとして後半部分を用いる. 図 3 で示されるように, データベースから構成される位相空間内の軌道の予測される点を $\mathbf{p}(t_p)$ とし, T ステップ後に $\mathbf{p}(t_p + T_s \Delta t)$ に移るものとする. このとき, $\mathbf{p}(t_p)$ に近接する $\mathbf{p}(t_k)$ は $\mathbf{p}(t_k + T_s \Delta t)$ に移る. $\mathbf{p}(t_k + T_s \Delta t)$ を $\mathbf{p}(t_p)$ と $\mathbf{p}(t_k)$ の距離の指数関数で重みづけすることで, $\mathbf{p}(t_p + T_s \Delta t)$ を次式より求める. $\mathbf{p}(t_p + T_s \Delta t)$ を時系列データに逆変換することで, 予測される圧力変動が得られる. 本研究では, 軌道群の決定論的な性質が失われる前に, 軌道群のデータベースを更新させることによって, 圧力変動の短期的な予測を行う[11].

$$\mathbf{p}(t_p + T_s \Delta t) = \frac{\sum_{k=1}^K \mathbf{p}(t_k + T_s \Delta t) \exp(-\|\mathbf{p}(t_p) - \mathbf{p}(t_k)\|)}{\sum_{k=1}^K \exp(-\|\mathbf{p}(t_p) - \mathbf{p}(t_k)\|)}$$

ただし, k を近傍点数, Δt を圧力変動の時間分解能, T_s を予測ステップとし, $k = 1000$, $\Delta t = 0.2 \text{ ms}$, $T_s = 1$ とする. なお, 本手法では, $\mathbf{p}(t_i) = (p'(t_i), p'(t_i - \tau_s), \dots, p'(t_i - (D-1)\tau_s))$ とする.

3.3. 並進誤差法

近接する軌道群の平行度を算出する並進誤差法は, 局所近似予測法と同様に, 軌道不安定性を定量化する上で重要な手法であるが, 本研究では, 燃焼不安定のオンライン回避を行うために並進誤差を検知器として用いる. この方法では, $\mathbf{p}(t_i)$ の最近傍ベクトル $\mathbf{p}(t_k)$ ($k = 1, 2, \dots, K$) のそれぞれについて, T ステップだけ時間が経過した後の $\mathbf{p}(t_k + T \Delta t)$ に着目する. このとき, 各軌道のベクトル $\mathbf{v}(t_k) (= \mathbf{p}(t_k + T \Delta t) - \mathbf{p}(t_k))$ の方向の分散は並進誤差 E_{trans} として次式で表せる. ただし,

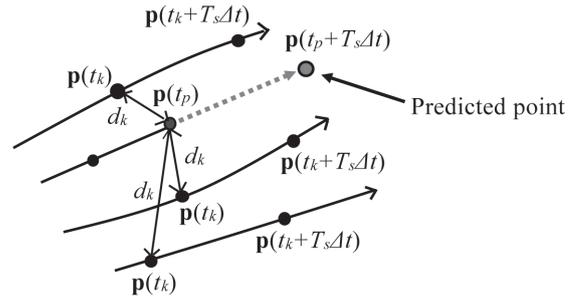


Fig.3 Local prediction method.

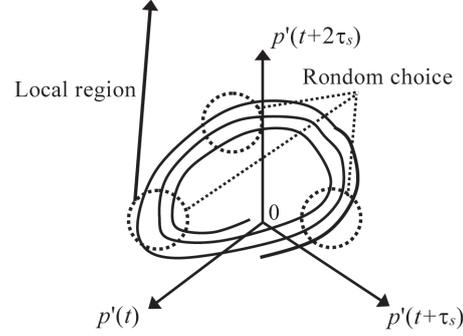
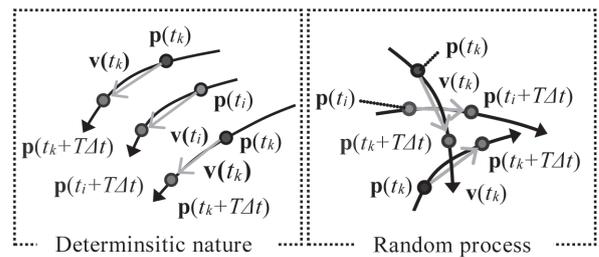


Fig.4 Translation error method.

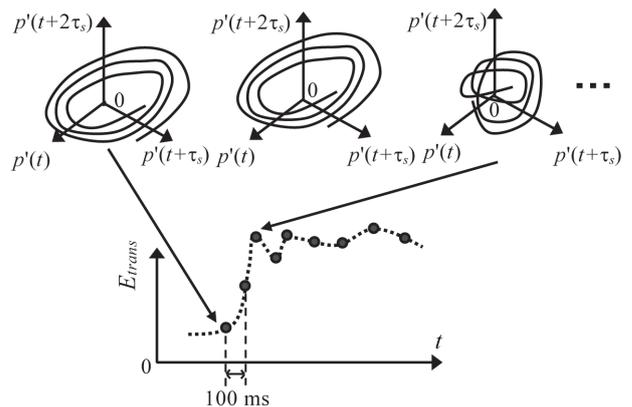


Fig.5 Online detection of combustion instability using translation error.

$\mathbf{v}(t_k)$ を平均化したベクトルとする. 図 4 で示されるように, $\mathbf{v}(t_k)$ が互いに平行であれば, 圧力変動は決定論的な特徴を有し, $\mathbf{v}(t_k)$ が互いに交差していれば, ランダム的な特徴を有する. 本研究では, $\mathbf{p}(t_i)$ を無作為に M 個選択し, その平均値を E_{trans} として求める. 図 5 で示されるように, 100 ms ごとにサンプリングされる圧力変動から並進誤差をオンラ

インで算出させる.

$$E_{trans} = \frac{1}{K+1} \sum_{k=0}^K \frac{\|\mathbf{v}(t_k) - \hat{\mathbf{v}}\|^2}{\|\hat{\mathbf{v}}\|^2}$$

ただし, k を近傍点数, T を時間ステップとし, $k=5$, $T=8$, $M=100$ とする.

4. 結果と考察

4.1. 本研究で観察される燃焼不安定

図6に当量比 ϕ を変化させたときの圧力変動 p' を示す. $\phi = 0.75$ のとき, 振幅が大きく, 周期性の強い振動, いわゆる燃焼振動が顕著に観察される. ϕ を 0.61 まで低下させると, 振幅が急激に小さくなったバーストが間欠的に生じるようになる. このような間欠的な燃焼振動は, プラフポディー型の燃焼器でも観察されている[5]. 吹き消え付近に対応する $\phi = 0.51$ まで当量比を低下させると, 燃焼振動は消滅し, 振幅の小さな不規則変動へ移行するようになる. 図7に圧力変動のパワースペクトルと ϕ の関係を示す. 燃焼振動が形成される $\phi = 0.70$ では, 約 185 Hz に卓越的な周波数ピークが観察され, 圧力変動が間欠的になるまで保持される. 立花らの研究[20,21]に基づくと, 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が卓越されていると考えられる. 燃焼振動が消滅する吹き消え付近では, この共鳴モードは観察されなくなり, パワースペクトル分布も連続的になる. 本研究

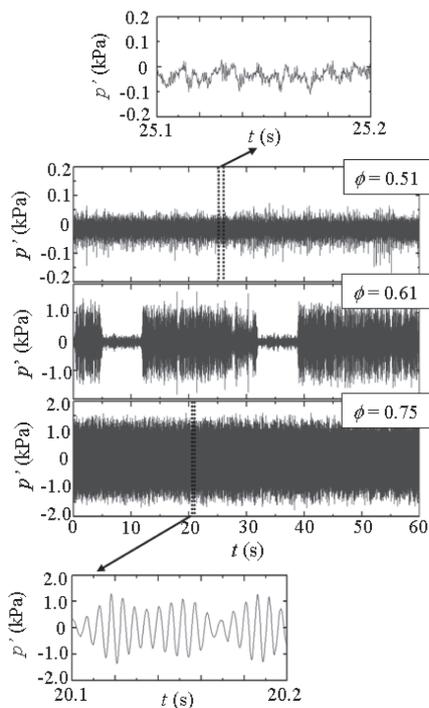


Fig.6 Temporal evolutions of pressure fluctuations p' for different equivalence ratios ϕ .

で形成される燃焼振動の周期性は強いが, サイクルサロゲートを考慮した順列エントロピー法, サイクルネットワーク法と位相空間ネットワーク法による複雑ネットワークを用いることで, 疑周期振動, 高次元性, スモールワールド・スケールフリー性など, 周波数解析では抽出できない複雑なダイナミクスが存在することが明らかにされている[18]. 本研究の燃焼室で形成される流れ場は二つの大きなスケールを伴った再循環流, すなわち旋回流れに起因するスワラ中心軸上の渦崩壊と Damp 領域における循環流から成ると考えられる[21]. そして, 2つの循環流の境界領域におけるせん断層不安定で生成される渦運動に起因した火炎面巻き込みを伴って, 燃焼振動が保持される. 本研究では, 次式で示す擬似レーリーインデックス R を見積ることで, 燃焼振動の駆動領域を調べる.

$$R(x, y) = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} p(t) I_{OH^*Abel}(t, x, y) dt$$

ただし, $p(t)$ はバンドパスフィルタをかけた圧力変動信号, τ はピーク周波数の1サイクルに対応する時間, $I_{OH^*Abel}(t, x, y)$ は位相平均した自発光強度分布のアーベル逆変換後の強度分布とする. 図8に燃焼振動が形成されているときの擬似レーリーインデックス R の空間分布を示す. 上述のせん断層領域で R は大きくなっており, せん断層領域における圧力変動と熱発生率の相互干渉が燃焼振動の保持に対して重要な役割を担っていることを示唆している. 本研究では, 力学系理論を用いたガスタービン燃焼不安定の非線形特性の解明と工学的応用に焦点を当てているが, 今後, 燃焼振

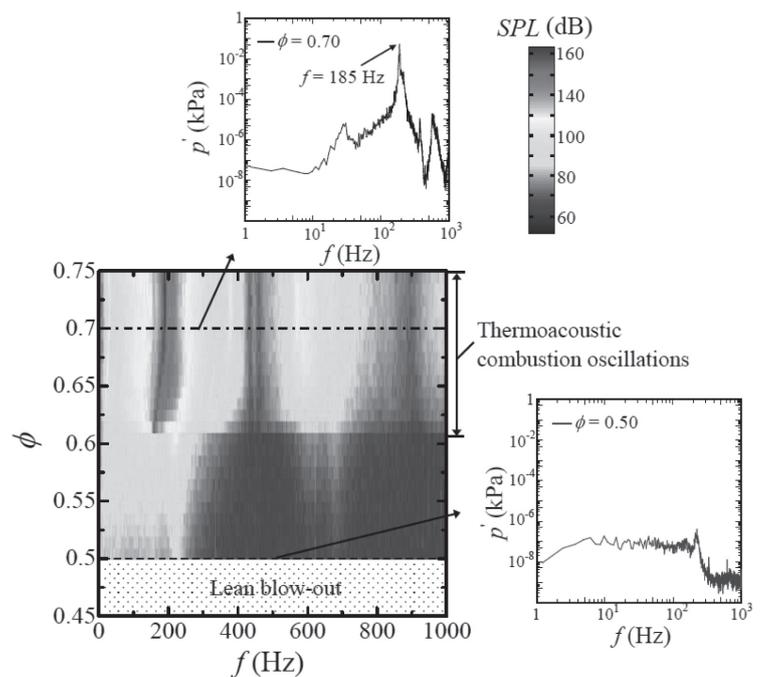


Fig.7 Power spectrum distribution of pressure fluctuations p' for different equivalence ratio ϕ . Thermoacoustic combustion oscillations with dominant frequency $f \approx 185$ Hz are clearly observed at $\phi \geq 0.61$ [13].

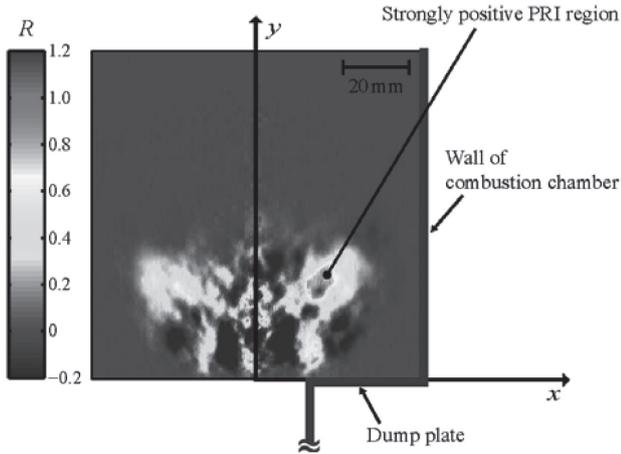


Fig.8 Spatial distribution of pseudo-Rayleigh index in thermoacoustic combustion oscillations [18].

動の保持メカニズムで重要となるせん断層領域の流体力学的構造も明らかにしていく必要がある。

4.2. 燃焼不安定の非線形特性

間欠的な燃焼振動のダイナミクスの一端を明らかにするために、 $\phi = 0.61$ のときに形成される間欠的な燃焼振動のカラーリカレンスプロットを図9に示す。ただし、10秒間の圧力変動 (50000×50000 点) を表示させたものとする。図9(a)で示されるように、カラーリカレンスプロット内では、大きな正方形や長方形が規則的に存在しつつも、カラー分布が均一化した不規則的な構造も有している。 $N = 20000$ から 23000 までの領域を拡大すると、同様な傾向が観察されている。さらに $N = 20100$ から 20400 までの領域を拡大すると、周期的運動の存在を示す対角方向の線が断続的に形成されている。これらの結果から、間欠的な燃焼振動が発生している領域では、周期構造と不規則構造が入り組んだ間欠カオスの存在の可能性が示唆される。

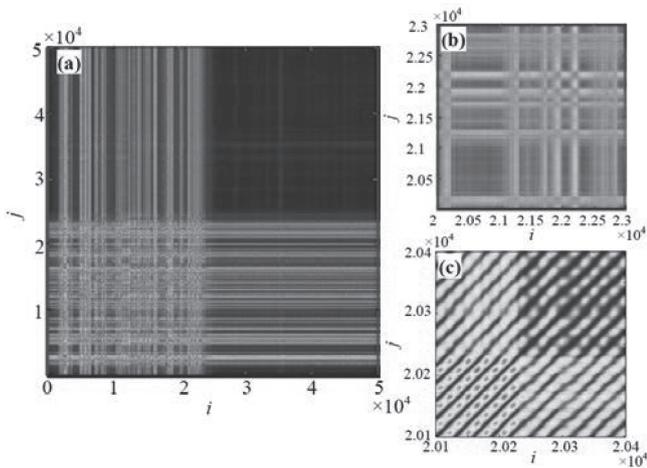


Fig.9 Recurrence plots (RPs) composed of 50000×50000 points for intermittent pressure fluctuations. They consist of large square, rectangular, regular and locally irregular patterns.

間欠カオスの存在についてより詳細な検討を加えるために、局所近似予測法を用いて短期予測可能・長期予測不可能性を明らかにする。局所近似予測法そのものは、Sugihara & May [30]によって1990年代に提案されたものであるが、軌道群の決定論的性質が失われる前にデータベースを更新していない。この点に着目して、最近、著者らは固相と気相に挟まれる薄い液相の変形運動や化学反応面の位相乱流などを記述する一般化されたKuramoto-Sivashinsky方程式から生成される相界面ダイナミクスを対象に、高次元の決定論現象と確率現象を分離する方法論を提案した[31]。この方法では、データベースの更新を考慮した局所近似予測法を用いて、時系列データとその増分過程をそれぞれ短期的に予測させる。そして、両者の短期予測可能・長期予測可能性が一致すればダイナミクスは決定論的として、一致しない場合は確率的として判定する。間欠的な燃焼振動に本手法を適用した結果を図10に示す。なお、横軸は予測時間 t_p を、縦軸は予測値と計測値の相関係数 C を示し、図10の上側はオリジナルデータを、図10の下側はオリジナルデータの増分過程 ($=\Delta p'$) を予測させたものとする。得られた C と t_p の関係は、短期予測可能・長期予測不可能の性質を示しており、両者の分布はほぼ対応している。このことから、間欠的な燃焼振動にはカオス的な特徴を有すると言える。他方、図11で示されるように、吹き消え付近では両者が一致しておらず、吹き消え付近の圧力変動は確率的であると言える。Nair & Sujith [4]は、吹き消え付近の圧力変動にはカオス的な特徴が存在すると報告しているが、古典的なランダムサロゲートを組み合わせたマルチフラクタル解析を導入しているに留まっている。

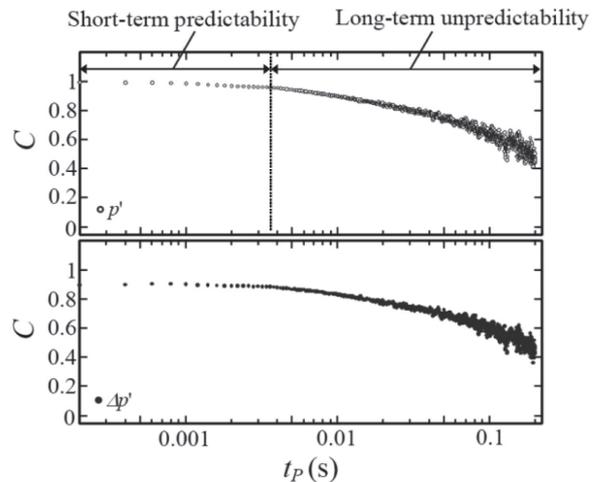


Fig.10 Changes in the correlation coefficient C between the actual and predicted dynamic behaviors in the intermittent pressure fluctuations as a function of the duration t_p of the actual pressure fluctuations added to the library data. Changes in C for increments of $\Delta p' (= p(t_i+1) - p(t_i))$ are also shown as a function of t_p . C for p at $t_p = 2 \times 10^{-4}$ is nearly unity, and remains nearly unchanged up to $t_p = 3.6 \times 10^{-3}$, which is the manifestation of short-term predictability nature. A similar trend is observed for increments of $\Delta p'$ [12].

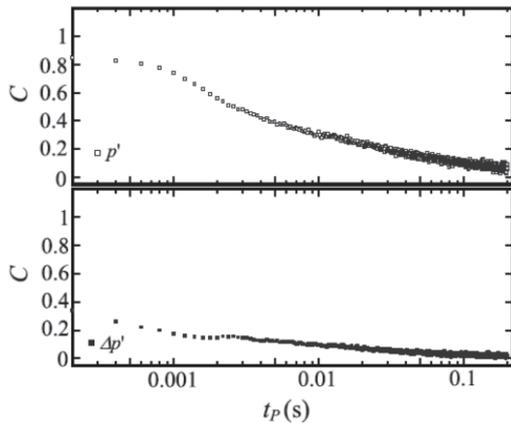


Fig.11 Changes in the correlation coefficient C between the actual and predicted dynamic behaviors of pressure fluctuations close to lean blowout as a function of the duration t_p of the actual pressure fluctuations added to the library data. Changes in C for $\Delta p'$ ($= p'(t_i+1) - p'(t_i)$) are also shown as a function of t_p . C for $\Delta p'$ is almost zero regardless of t_p . This is a distinctive feature of stochastic process [13].

著者らは、決定論現象と確率現象の分離法のみならず、短期予測可能・長期予測不可能性の定量化には、予測可能時間 $t_{p,c}$ と相関係数の勾配 $d \ln C / d \ln t_p$ が重要であることも提案している。図12で示されるように、もし、ダイナミクスが複雑になれば、 $t_{p,c}$ は低下し、 $d \ln C / d \ln t_p$ は増加する。図13に $t_{p,c}$ と $d \ln C / d \ln t_p$ を ϕ で整理した結果を示す。 ϕ が低下し、間欠的な燃焼振動が形成されると、 $t_{p,c}$ は著しく低下し、 $d \ln C / d \ln t_p$ は増加する。吹き消えに近づくに伴って、 $d \ln C / d \ln t_p$ はさらに増加する。これらの結果から、本手法が当量比の低下に伴う燃焼不安定の複雑化を特徴づけるのに有用であると言える。

4.3. 燃焼不安定の事前検知と回避

図14に $\phi = 0.65$ における p' と並進誤差 E_{trans} の時間変化を示す。圧力変動の振幅が急激に変化すると同時に、 E_{trans} の値も大きく変化する。このことは、並進誤差は圧力変動の急激な変化に対して瞬時に応答していることを示しており、並進誤差によって燃焼状態を検知することが可能であると言える。図15に ϕ を変化させたときの圧力変動振幅の標準偏差 p'_{rms} と E_{trans} の関係を示す。 p'_{rms} は ϕ の低下に伴って緩やかに減少し、 $\phi = 0.62$ において燃焼振動が発生しなくなると、急激に減少する。さらに ϕ を低下させると、 p'_{rms} はほぼ一定となる。このことは、吹き消え付近の燃焼状態を p'_{rms} で特徴づけることはできず、 p'_{rms} に閾値を設けても吹き消え付近の燃焼状態を制御することが困難であることを示唆している。他方、並進誤差に着目すると、燃焼振動が発生しなくなる $\phi = 0.62$ で、 E_{trans} は急激に増加する。この傾向は p'_{rms} とほぼ対応している。 ϕ をさらに低下させていくと、 p'_{rms} の場合と異なり、 E_{trans} は吹き消えに至るまで単調に増加する。当量比の低下に伴って、圧力変動の決定論的な特徴が失われていくが、並進誤差は吹き消え付近

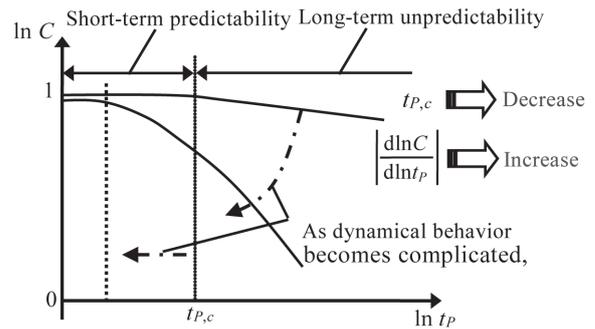


Fig.12 Quantification of short-term predictability and long-term unpredictability characteristics [28].

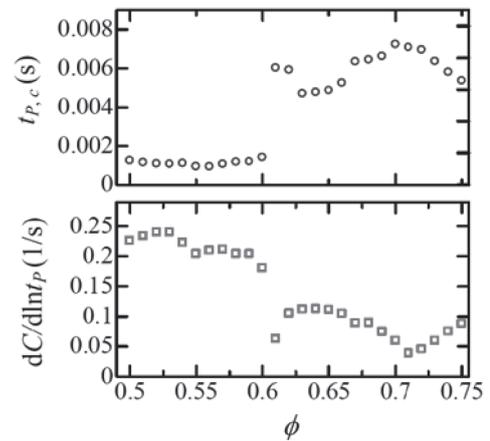


Fig.13 Variations in $t_{p,c}$ and $|d \ln C / d \ln t_p|$ as a function of equivalence ratio ϕ . Both $t_{p,c}$ and $|d \ln C / d \ln t_p|$ abruptly change at $\phi = 0.61$ owing to the appearance of intermittency. The degree of the unpredictability estimated by $|d \ln C / d \ln t_p|$ significantly increases with decreasing ϕ from 0.6 to 0.49, close to lean blowout.

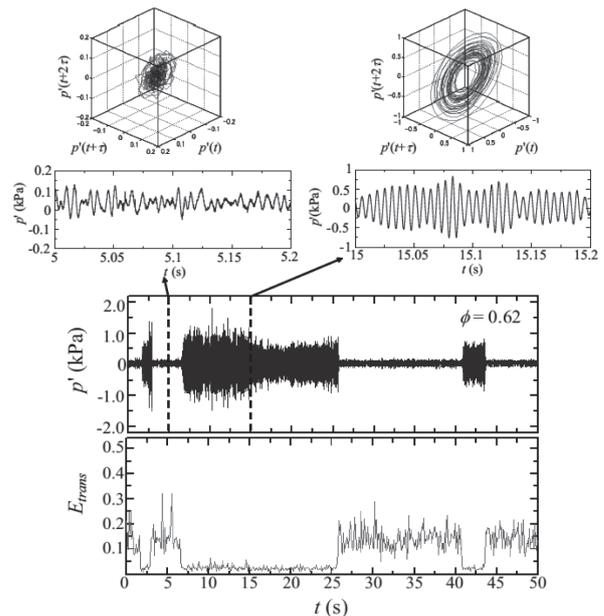


Fig.14 Time variations of pressure fluctuations p' , three-dimensional phase space ($p'(t), p'(t+\tau_s), p'(t+2\tau_s)$), and translation error E_{trans} . The amplitude of p' drastically changes with the onset of intermittency. E_{trans} responds to the drastic change in p' [12].

における燃焼状態の変化を十分捉えている。これらの結果から、本研究で導入する並進誤差法は吹き消え付近の燃焼状態を特徴づけることが可能であり、吹き消えの発生を検知することが可能であると思われる。そこで本研究では、図 15 で示された並進誤差と当量比の関係に着目して、吹き消えのオンライン回避を行う。

図 16 に二次燃料流量を変化させたフィードバック制御を用いて吹き消えの回避を行った結果を示す。図中の点線で示されるように、燃焼状態が吹き消えの領域に至るまで主燃料流量 $Q_{CH4,main}$ のみを徐々に低下させる。本研究では、 $Q_{CH4,secondary} = \alpha (E_{trans} - E_{trans,thre})$ となるように、設定された並進誤差の閾値 $E_{trans,thre}$ とリアルタイムに算出される E_{trans} との差に比例した値を二次燃料流量 $Q_{CH4,secondary}$ と関連づけることで、吹き消えの回避を行う。ただし、 $E_{trans,thre} = 0.15$, $\alpha = 1.0$ とする。図 16 で示されるように、 $Q_{CH4,main}$ を著しく低下させ、吹き消えが発生する条件に至っても、 $Q_{CH4,secondary}$ の増加によって、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、回避されている。 $Q_{CH4,main}$ のみを低下させ、吹き消え領域に至った後に $Q_{CH4,main}$ を増加させた場合の結果を図 17 に示す。図 16 で得られた結果と同様に、吹き消えは回避されている。これらの結果から、並進誤差を検知器に用いることで、吹き消えの回避を行うことが可能であることがわかる。周波数解析を用いた吹き消えのオンライン回避に関する研究[32]も行われているが、本研究で導入した並進誤差は周波数解析では特徴化が困難な燃焼不安定の事前検知・回避を可能にするものと思われる。

5. まとめ

最近、力学系理論がガスタービン燃焼不安定の非線形特性の解明に適用されつつあるが、相関次元、特異性スペクトル、リャプノフ指数やリカレンスプロットが示されているに留まっている。本研究では、位相空間内の軌道不安定性に着目した局所近似予測法と並進誤差法が、燃焼不安定の非線形特性の解明や事前検知・回避に有用であることを明らかにした。

本稿では、力学系理論に焦点を当てたが、著者らは記号力学に基づいた順列エントロピー法も燃焼不安定の事前検知・回避に対して有用であることを報告している[13]。また、インペリアルカレッジロンドン機械工学科との共同研究により、5 サイクル程度の燃焼振動に対しても順列エントロピーが検知器として使用可能であること[33]、宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 推進技術研究ユニットが保有する高圧試験設備を用いた燃焼振動の検知に対しても順列エントロピーが有用であること[34]なども明らかにしつつある。著者らが最近進めている複雑ネットワーク[35]とともに、複雑系数理学の視点から燃焼ダイナミクスの解明とその工学的応用の可能性を明らかにしていきたい。

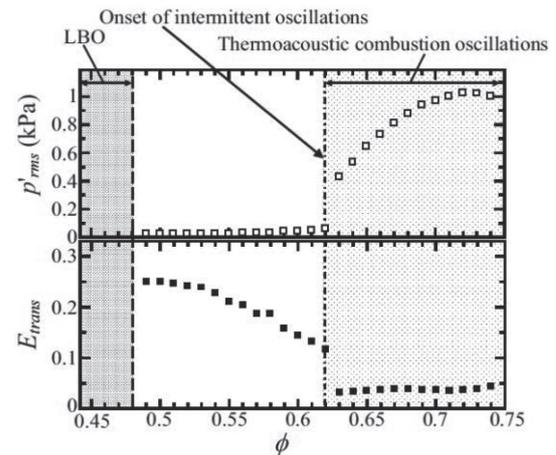


Fig.15 Standard deviation of pressure fluctuations p'_{rms} and translation error E_{trans} as functions of equivalence ratio ϕ . p'_{rms} remains nearly unchanged for $\phi = 0.61$. In contrast, E_{trans} increases as ϕ decreases from 0.61 to 0.49, close to lean blowout (LBO), which shows that the translation error clearly captures the significant change in combustion close to LBO [12].

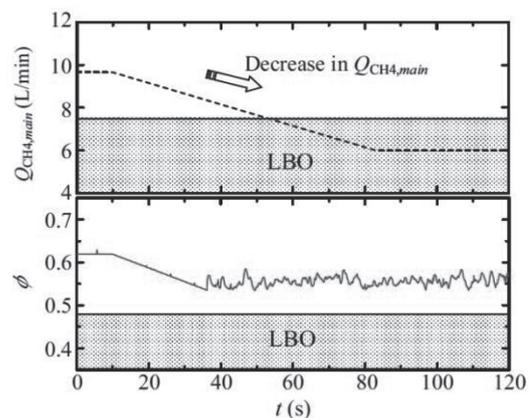


Fig.16 Time variation of equivalence ratio ϕ with decreasing volume flow rate of main fuel $Q_{CH4,main}$. Lean blowout (LBO) is prevented even when $Q_{CH4,main}$ is decreased to 6 L/min [12].

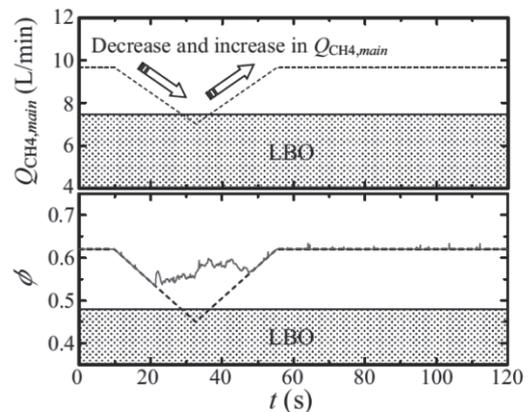


Fig.17 Time variation of equivalence ratio ϕ with decreasing and then increasing volume flow rate of main fuel $Q_{CH4,main}$. The prevention of lean blowout (LBO) is achieved for the transient process as well as for the case of a power reduction [12].

謝辞

本研究は平成 24 年度 科学技術振興機構研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム (A-Step) フィージビリティスタディ・ステージ検索タイプ, 平成 23 年度 科研費若手研究 (A), 平成 23 年度パロマ環境技術開発財団による研究助成によって実施された。ここに深く感謝の意を表す。

References

1. L. Kabiraj, A. Saurabh, R. I. Sujith, *Chaos* 22, 023129, 2012.
2. L. Kabiraj and R. I. Sujith, *Journal of Fluid Mechanics* 713, 376, 2012.
3. V. Nair and R. I. Sujith *Chaos* 23, 033136, 2013.
4. V. Nair and R. I. Sujith, *Journal of Fluid Mechanics* 747, 635, 2014.
5. V. Nair, G. Thampi, R. I. Sujith, *Journal of Fluid Mechanics* 756, 470, 2014.
6. K. Kashinath, I. C. Waugh, M. P. Juniper, *Journal of Fluid Mechanics* 761, 399, 2014.
7. L. Kabiraj, A. Saurabh, N. Karimi, A. Sailor, E. Mastorakos, A. P. Dowling, C. O. Paschereit, *Chaos* 25, 023101, 2015.
8. A. Orchini, S. J. Illingworth, M. P. Juniper, *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, in press.
9. S. Balusamy, L. K. B. Li, Z. Han, M. P. Juniper, S. Hochgreb, *Proceedings of the Combustion Institute* 35, 3229, 2015.
10. V. Nair and R. I. Sujith, *Proceedings of the Combustion Institute* 35, 3193, 2015.
11. H. Gotoda, H. Nikimoto, T. Miyano, S. Tachibana, *Chaos* 21, 013124, 2011.
12. H. Gotoda, Y. Shinoda, M. Kobayashi, Y. Okuno, S. Tachibana, *Physical Review E* 89, 022910, 2014.
13. S. Domen, H. Gotoda, T. Kuriyama, Y. Okuno, S. Tachibana, *Proceedings of the Combustion Institute* 35, 3245, 2015.
14. H. Gotoda, M. Amano, T. Miyano, T. Ikawa, K. Maki, S. Tachibana, *Chaos* 22, 043128, 2012.
15. H. Gotoda and T. Ueda, *Proceedings of the Combustion Institute* 29, 1503, 2003.
16. 門脇敏, 貫井純一郎, 日本機械学会論文集 B 編, 71 巻 711 号, 2748, 2005.
17. H. Gotoda and T. Ueda, *Combustion and Flame* 140, 287, 2005.
18. Y. Okuno, S. Michael, H. Gotoda, *Chaos* 25, 043107, 2015.
19. H. Kinugawa, K. Ueda, H. Gotoda, 2015, under review.
20. 立花繁, L. Zimmer, 黒澤要治, 鈴木和雄, *ながれ* 25, 219, 2006.
21. S. Tachibana, L. Zimmer, Y. Kurosawa, K. Suzuki, *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 3225, 2007.
22. F. Takens, *Lecture Notes in Mathematics* 898, Springer-Verlag, 1981.
23. H. Kantz and T. Schreiber, *Nonlinear time series analysis*, Cambridge University Press, 2004.
24. P. Grassberger and I. Procaccia, *Physical Review Letters* 50, 346, 1983.
25. M. B. Kennel, R. Brown, H. D. I. Abarbanel, *Physical Review A* 45, 3403, 1992.
26. A. M. Fraser and H. L. Swinney, *Physical Review A* 33, 1134, 1986.
27. N. Marwan, R. Carmen, M. Thiel, J. Kurths, *Physics Reports* 438, 237, 2007.
28. H. Gotoda, Y. Okuno, K. Hayashi, S. Tachibana, 2015, under review.
29. H. Gotoda, T. Miyano, I. G. Shepherd, *Physical Review E* 81, 026211, 2010.
30. G. Sugihara and R. M. May, *Nature* 344, 734, 1990.
31. H. Gotoda, M. Pradas, S. Kalliadasis, *International Journal of Bifurcation and Chaos* 25, 1530015, 2015.
32. H. Li, X. Zhou, J. B. Jeffries, R. K. Hanson, *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 3215, 2007.
33. A. E. Bayley, H. Gotoda, Y. Hardalupas, A. M. K. P. Taylor, 2015, under review.
34. 道免昌平, 後藤田浩, 立花繁, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2014, 2014.
35. 衣川輝, 奥野佑太, 道免昌平, 後藤田浩, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015.