

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686037

研究課題名(和文) 複雑数理工学が拓く燃焼不安定の非線形ダイナミックスの解明と工学的応用

研究課題名(英文) Elucidation of nonlinear dynamics of combustion instability based on dynamical system theory

研究代表者

後藤田 浩 (Gotoda, Hiroshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：00434712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年体系化が進んでいる非線形力学の視点から不安定な燃焼現象の非線形ダイナミックスを明らかにしていくことは、基礎燃焼分野の新たな展開を切り開いていくだけでなく、高度化する燃焼器の最適な設計・制御の開発にも大きく寄与する。研究代表者は、希薄予混合ガスタービンモデル燃焼器で発生する燃焼不安定を対象に、非線形力学の視点から燃焼不安定の非線形ダイナミックスを明らかにした。特に、局所近似予測法と並進誤差法によって抽出された予測可能時間と軌道郡の平行度に基づいて、燃焼不安定の短期予測可能性ならびに事前検知・回避可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This report shows the availability of nonlinear time series analysis based on dynamical systems theory to deal with nonlinear dynamics of combustion instability in a laboratory-scale gas-turbine model combustor, which is one of the most fundamentally and practically important combustion systems. The results obtained by the local predictor to extract the short-term predictability and long-term unpredictability characteristics suggest that with decreasing equivalence ratio, periodic thermoacoustic combustion oscillations transit to low-dimensional chaotic intermittent oscillations owing to the intermittent appearance of burst. The principle investigator successfully proposes a novel online detection method using translation error for problematic limiting phenomena such as lean blowout. It allows us to prevent lean blowout without knowing the actual lean blowout limit.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼工学

1. 研究開始当初の背景

燃焼は流動、熱・物質拡散、化学反応が相互に作用し合う複雑な非線形現象であることから、複雑に変動する燃焼不安定の非線形ダイナミクスを明らかにしていくことは重要な研究課題の一つである。特に、近年体系化が進んでいる非線形力学の視点から燃焼不安定の非線形ダイナミクスを明らかにしていくことは、基礎燃焼分野の新たな展開を切り開いていくだけでなく、高度化する燃焼器の最適な設計・制御の開発にも大きく寄与すると思われる。このような視点に立って、研究代表者は、旋回燃焼を対象に熱・物質拡散や浮力不安定によって生じる燃焼不安定のダイナミクスを非線形力学の視点から明らかにしてきた。その結果、燃焼が不安定化する過程に低次元の決定論的カオスが存在することやファイゲンバームのシナリオで表される周期倍分岐が存在することなどを明らかにしてきた。これまで、燃焼分野においても、セル状火炎やパルス燃焼などで観察される燃焼状態とカオスの関連性が議論されている。しかしながら、工学的・工業的に重要なガスタービン燃焼器で生じる燃焼不安定のダイナミクスを、より幅広い非線形力学の視点から解明し、その特徴を工学的な利用へ発展させる研究は行われてこなかった。

2. 研究の目的

1. 研究開始当初の背景に基づいて、超希薄予混合ガスタービンモデル燃焼器で発生する燃焼不安定を対象に、非線形力学の視点から燃焼不安定の軌道不安定性を解明する。抽出された軌道不安定性に基づいて、燃焼不安定の短期予測可能性ならびに事前検知・回避可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で使用する予混合ガスタービンモデル燃焼器は、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いる。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。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)付き高速度カメラ(Photron 製 FAST CAM SA3)を用いる。

非線形力学に基づく時系列解析は、Takens の埋め込み次元定理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。本研究では、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。

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

ただし、 $\mathbf{p}(t_i)$ を位相空間内の軌道上の点、 τ_s を遅延時間、 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を最適な遅延時間とする。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、軌道不安定性を定量化する局所近似予測法と並進誤差法を用いる。

一般的に、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。他方、2 点間距離の大きさを画素として描画する方法では、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(雑誌論文[5])。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。

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

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。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。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(雑誌論文[5])。

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

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、 $k = 1000$, $\Delta t = 0.2$ 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。

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、 $\mathbf{v}(t_k)$ を平均化したベクトルとする。 $\mathbf{v}(t_k)$ 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、 $p(t_i)$ を無作為に M 個選択し、その平均値を E_{trans} として求める。そして、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(雑誌論文[5])。

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

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. 研究成果

図 1 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、ブラフボディー型の燃焼器でも観察されていることが報告されている。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 2 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 $\phi = 0.75$ では、約 170 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。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(雑誌論文[2])。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。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、燃焼振動の駆動領域を調べる。

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

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 3 に燃焼振動が形成され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。

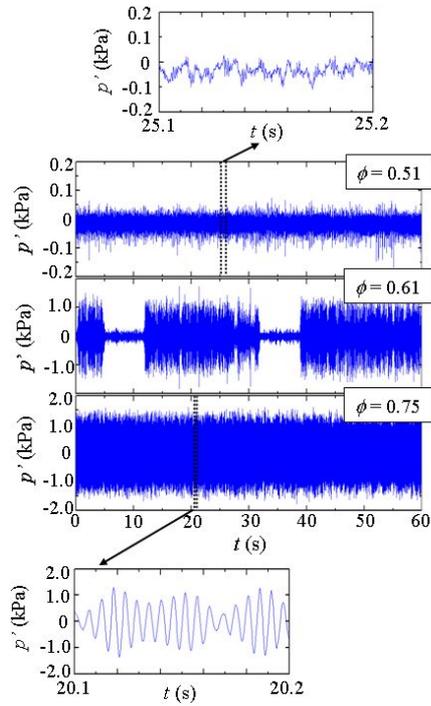


Fig. 1: Temporal evolutions of pressure fluctuations p' for different equivalence ratios ϕ

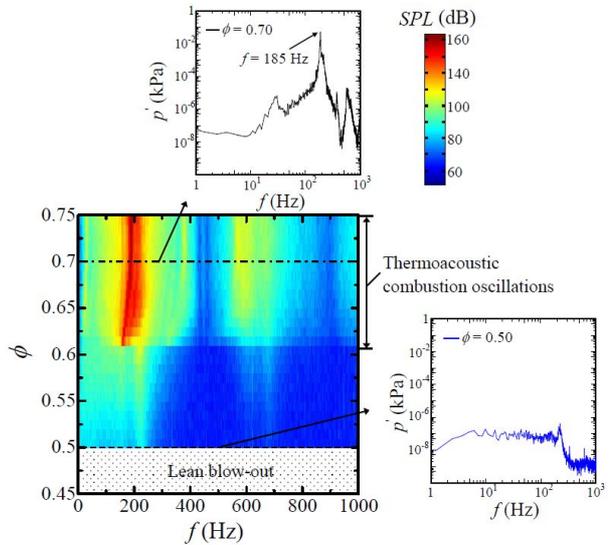


Fig. 2: Power spectrum distribution of pressure fluctuations p' for different equivalence ratio ϕ

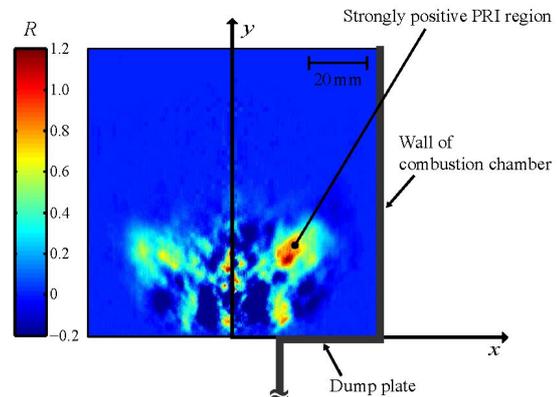


Fig. 3: Spatial distribution of pseudo-Rayleigh index

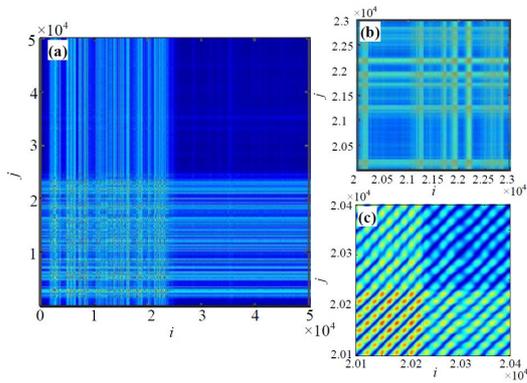


Fig. 4: Recurrence plots (RPs) composed of 50000 \times 50000 points for intermittent pressure fluctuations.

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4に示す。ただし、10秒間の圧力変動(50000 \times 50000点)を表示させたものとする。図4(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。

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。最近、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(雑誌論文[1])。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5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5の上側はオリジナルデータを、図5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6で示されるように、吹き消え付

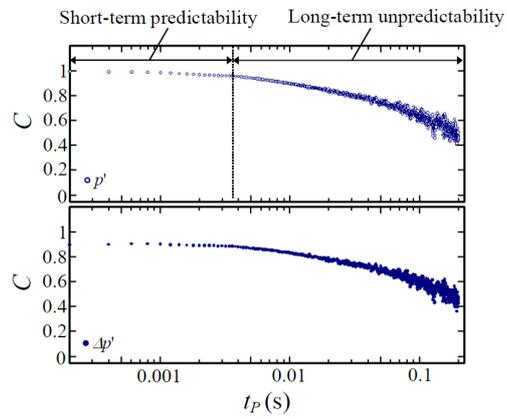


Fig. 5: Changes in the correlation coefficient C between the actual and predicted dynamic behaviors in the intermittent pressure fluctuations as a function of the duration t_p of the actual pressure fluctuations added to the library data. Changes in C for increments of $\Delta p'$ (= $p'(t_{i+1})-p'(t_i)$) are also shown as a function of t_p .

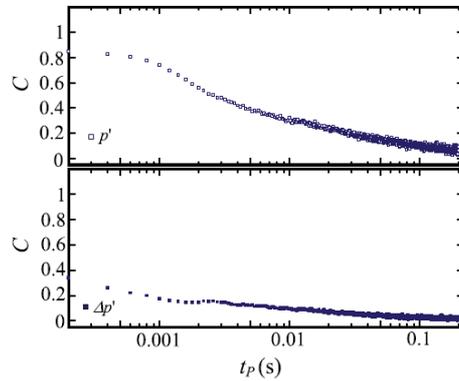


Fig. 6: Changes in the correlation coefficient C between the actual and predicted dynamic behaviors of pressure fluctuations close to lean blowout as a function of the duration t_p of the actual pressure fluctuations added to the library data. Changes in C for $\Delta p'$ (= $p'(t_{i+1})-p'(t_i)$) are also shown as a function of t_p .

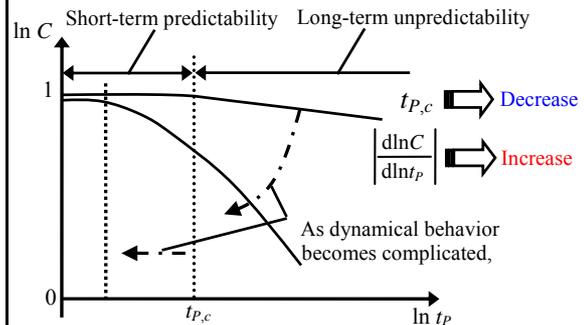


Fig. 7: Quantification of short-term predictability and long-term unpredictability characteristics.

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。研究代表者は、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(雑誌論文[1])。図7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8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。図9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10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、 $\phi = 0.62$ において燃焼振動が発生しなくなると、 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10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11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11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12に

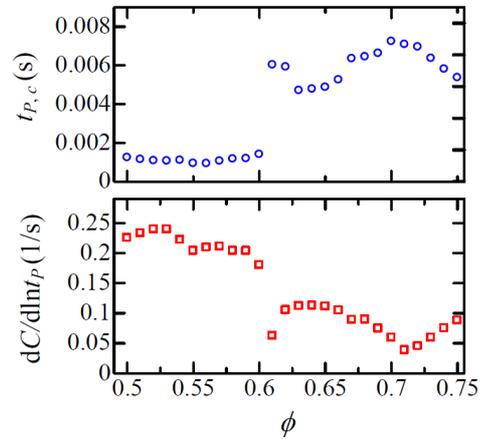


Fig. 8: Variations in $t_{p,c}$ and $|d\ln C/d\ln t_p|$ as a function of equivalence ratio ϕ .

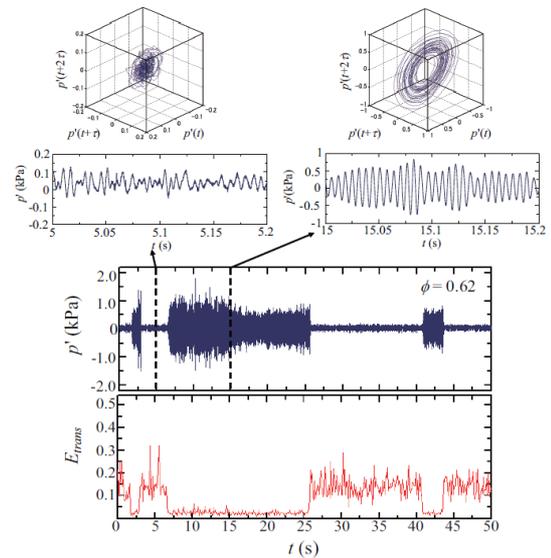


Fig. 9: Time variations of pressure fluctuations p' , three-dimensional phase space ($p'(t)$, $p'(t+\tau)$, $p'(t+2\tau)$), and translation error E_{trans} . The amplitude of p' drastically changes with the onset of intermittency. E_{trans} responds to the drastic change in p' .

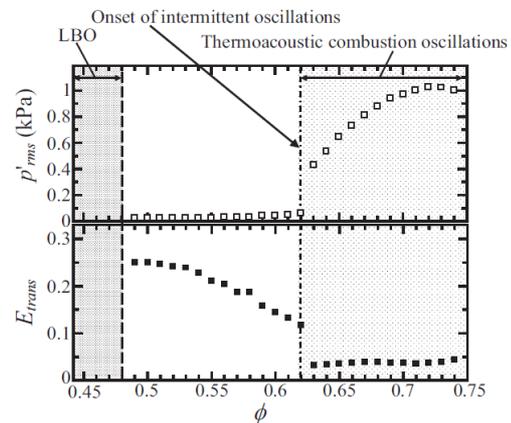


Fig. 10: Standard deviation of pressure fluctuations p'_{rms} and translation error E_{trans} as functions of equivalence ratio ϕ .

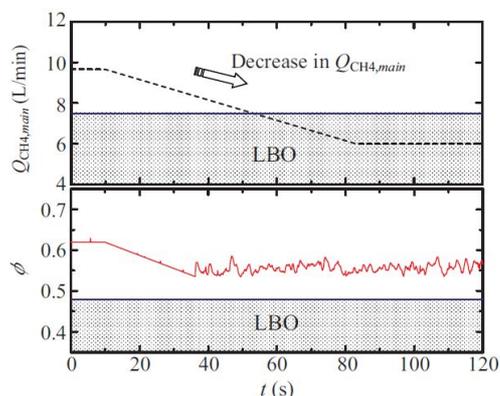


Fig. 11: Time variation of equivalence ratio ϕ with decreasing volume flow rate of main fuel $Q_{CH_4,main}$.

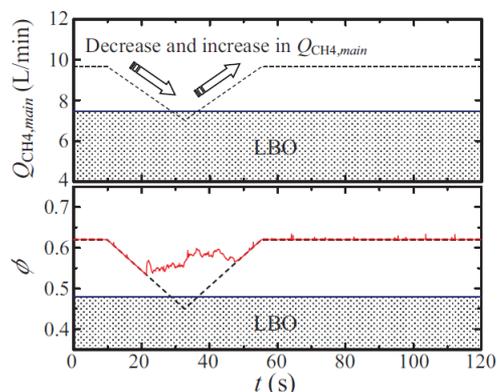


Fig. 12: Time variation of equivalence ratio ϕ with decreasing and then increasing volume flow rate of main fuel $Q_{CH_4,main}$.

示す。図 11 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。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. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

- [1] **H. Gotoda**, M. Pradas, S. Kalliadasis, Nonlinear Forecasting of the Generalized Kuramoto-Sivashinsky Equation, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 25, 1530015, 2015, 10.1142/S0218127415300153, 査読有。
- [2] Y. Okuno, S. Michael, **H. Gotoda**, Dynamics of self-excited thermoacoustic instability in a combustion system: Pseudoperiodic and high-dimensional nature, *Chaos*, vol. 25, 043107, 2015, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4914358>, 査読有。
- [3] A. Adzlan, S. Tsutsumi, **H. Gotoda**, Near-field behavior of variable property jet with swirling flow generated by a change in gravitational orientation, *Physics of Fluids*, vol. 27, 024105, 2015, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4906372>, 査読有。
- [4] S. Domen, **H. Gotoda**, T. Kuriyama, Y. Okuno, S. Tachibana, Detection and prevention of blowout in a

- lean premixed gas-turbine model combustor using the concept of dynamical system theory, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, 3245, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.07.014>, 査読有。
- [5] **H. Gotoda**, Y. Shinoda, M. Kobayashi, Y. Okuno, S. Tachibana, Detection and control of combustion instability based on the concept of dynamical system theory, *Physical Review E*, vol. 89, 022910, 2014, doi: 10.1103/PhysRevE.89.022910, 査読有。
 - [6] **H. Gotoda**, R. Takeuchi, Y. Okuno, T. Miyano, Low-dimensional dynamical system for Rayleigh-Bénard convection subjected to magnetic field, *Journal of Applied Physics*, vol. 113, 124902, 2013, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4795264>, 査読有。
 - [7] **H. Gotoda**, M. Amano, T. Miyano, T. Ikawa, K. Maki, S. Tachibana, Characterization of complexities in combustion instability in a lean premixed gas-turbine model combustor, *Chaos*, vol. 22, 043128, 2012, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4766589>, 査読有。
 - [8] **H. Gotoda**, T. Ikawa, K. Maki, T. Miyano, Short-term prediction of dynamical behavior of flame front instability induced by radiative heat loss, *Chaos*, vol. 22, 033106, 2012, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4731267>, 査読有。
 - [9] **H. Gotoda**, H. Nikimoto, T. Miyano, S. Tachibana, Dynamic properties of combustion instability in a lean premixed gas-turbine combustor, *Chaos*, vol. 21, 013124, 2011, doi:10.1063/1.3563577, 査読有。

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

- [1] 名称: 観測装置及び観測方法
 発明者: **後藤田 浩**, 篠田雄太, 小林将紀, 立花繁
 権利者: 学校法人 立命館, 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
 特願: 112330
 出願年月日: 2012 年 5 月 16 日
 国内外の別: 国内

- [2] 名称: 観測装置及び観測方法
 発明者: **後藤田 浩**, 衣川輝, 奥野佑太, 道免昌平
 権利者: 学校法人 立命館
 特願: 053624
 出願年月日: 2015 年 3 月 17 日
 国内外の別: 国内

〔その他〕

- 受賞
- [1] **後藤田 浩**, 平成 26 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞
 - [2] **後藤田 浩**, 平成 24 年度 日本燃焼学会奨励賞

ホームページ

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/jimu/gotoda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤田 浩(Gotoda Hiroshi)
 立命館大学 理工学部 教授
 研究者番号: 00434712