

平成 23 年 6 月 24 日現在

機関番号：34315
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21760165
 研究課題名(和文) 非線形カオス力学による燃焼ダイナミックスの決定論的性質の解明とその応用
 研究課題名(英文) Elucidation of deterministic nature in combustion instability from a viewpoint of nonlinear chaos dynamics
 研究代表者
 後藤田 浩 (GOTODA HIROSHI)
 立命館大学・理工学部・准教授
 研究者番号：00434712

研究成果の概要(和文):

非線形動力学理論と複雑ネットワーク理論の視点から、旋回流を伴う希薄予混合火炎の不安定な火炎面挙動の決定論的性質を明らかにした。火炎面挙動の決定論的性質の抽出には、位相空間内の軌道群の平行度を定量化する並進誤差法とニューラルネットワークに基づく動径基底関数ネットワーク法を用いた。これらの手法を用いることで、火炎面挙動の時間変動から構築される位相空間内の軌道群の動的特徴は低次元の決定論的カオスであることが明らかとなった。さらに、火炎面挙動の時間変動は、短期予測可能・長期予測不可能の特徴を有することも明らかとなった。また、浮力と遠心力による流体力学的な不安定によって生じる燃焼生成物内の渦挙動が、火炎面挙動を不安定化させることも明らかとなった。

研究成果の概要(英文):

We experimentally investigated the deterministic nature in the dynamic behavior of a lean swirling premixed flame generated by a change in gravitational orientation from the viewpoint of nonlinear dynamics and complex network theory. The translation error and radial basis function network are applied to quantify the deterministic nature in flame front fluctuations. The results obtained in this work clearly demonstrate that the dynamic behavior of flame front fluctuations represents low-dimensional deterministic chaos.

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：燃焼, 反応流, 複雑系, カオス, 熱流体, ニューラルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

近年、燃焼科学・物理分野において、燃焼ダイナミックスと決定論的カオスの関連性が着目されつつある。しかしながら、非線形動力学理論や複雑ネットワーク理論の視点から、複雑に変動する燃焼ダイナミックス

の決定論的な特徴を解明するような研究は、国内外で報告されていない。このような研究背景に基づいて本研究テーマの着想に至った。

2. 研究の目的

自然対流によって誘起される浮力と燃焼ダ

イナミックスの周期的・カオスの挙動の発生との関連性を明らかにすることは、燃焼物理分野のみならず、熱流体科学分野において非常に重要である。申請者は、旋回流を伴う希薄予混合火炎を対象に、通常重力場(+1G)と逆重力場(-1G)で火炎面挙動を調べ、逆重力場でのみ、複雑な変動を伴う不安定な火炎面挙動が発生し、火炎面に作用する浮力の向きが火炎面挙動に重要であることを明らかにした[3]。非線形動力学理論や複雑ネットワーク理論に基づく時系列解析は、複雑に変動する非線形現象の解明に対して有効な手法の一つである。しかしながら、これらの理論に基づいて複雑に変動する火炎面挙動の決定論的な特徴を解明するような研究例はない。

そこで、本研究では、旋回流を伴う層流予混合火炎の希薄限界付近で形成される不安定な火炎面挙動[3]に対して非線形動力学理論や複雑ネットワーク理論に基づく時系列解析を適用し、火炎面挙動の決定論的な特徴を解明することを目的とする。また、火炎面挙動の発生メカニズムについても検討を加える。

3. 研究の方法

(1) 実験条件及び方法

本研究では、逆重力場における旋回流予混合火炎を形成させることが可能な実験装置を用いる[3]。予混合気としてメタン/空気混合気を使用し、当量比 ϕ を0.68とする。バーナー管出口から噴出される予混合気の断面平均速度を(リチャードソン数 $R_i > 0.1$: 浮力支配)から1.6 m/s ($R_i < 0.1$: 慣性力支配)まで変化させ、予混合気に旋回流を与える(スワール数 $S = 0.70$)。火炎面の可視化にはレーザートモグラフィ法を用い、可視化された火炎面の2次元断面像は高速度ビデオカメラによって毎秒1000コマで10秒間撮影される(データの総数 $N = 10,000$)。なお、2次元断面像の空間分解能は1 pixel = 0.04 mmとする。バーナー管の中心軸上における火炎面の平均位置からの変動値 Δy_f (mm)を測定し、 Δy_f の時間変化に対して並進誤差法と動径基底関数ネットワーク法を適用する。不安定な火炎面挙動の発生メカニズムを明らかにするために、燃焼生成物と周囲大気との界面の挙動をレーザートモグラフィ法によって調べる[3]。

(2) 並進誤差法

火炎面の位置変動 Δy_f は、次式で示される埋め込み次元定理を用いて、時間遅れ座標系へ変換される。 t_i ($i = 1, 2, \dots, M$) を変

化させることによって、 D 次元の位相空間内に軌道が描かれる。

$$\mathbf{X}_i = (\Delta y_f(t_i), \Delta y_f(t_i - \tau_0), \dots, \Delta y_f(t_i - (D-1)\tau_0))$$

ただし、 \mathbf{X}_i を位相空間内の軌道上の点、 τ_0 を埋め込み時間、 D を埋め込み次元とする。 τ_0 は相互情報量から算出される。

火炎面挙動の決定論的な特徴を定量化するために、位相空間内の近接する軌道の平行度を測定する[2-5]。まず、時刻 t_j の位相空間内にある $\mathbf{X}(t_j)$ について、 K 個の最近傍ベクトル $\mathbf{X}(t_j)$ ($j = 1, 2, \dots, K$)を探す。最近傍ベクトル $\mathbf{X}(t_j)$ のそれぞれについて、 T_0 だけ時間が経過した後、 $\mathbf{X}(t_j + T_0)$ になる。ただし、 T を時間ステップとする。このとき、時間の経過に伴う各軌道の変化は $\mathbf{v}(t_j) = \mathbf{X}(t_j + T_0) - \mathbf{X}(t_j)$ によって近似的に表すことができ、 $\mathbf{v}(t_j)$ の方向の分散は並進誤差 E_{trans} として次式で表せる。本研究では、 $\mathbf{X}(t_i)$ を無作為に100個選択し、その平均値を E_{trans} として求める。 E_{trans} の値が低いほど、軌道群の平行度は高くなる。

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

$$\hat{\mathbf{v}} = \frac{1}{K+1} \sum_{i=0}^K \mathbf{v}(t_j)$$

なお、 E_{trans} の推定における統計誤差を抑えるために、無作為に選択した M 個の $\mathbf{X}(t_i)$ に関する E_{trans} の中間値を求める操作を Q 回繰り返す。この操作を Q 回繰り返したときの E_{trans} の平均値を E_{trans} を表す。位相空間内の軌道に決定論的な特徴が観察されるにつれて、 $E_{trans} \rightarrow 0$ となっていく。

(3) 動径基底関数ネットワーク法

動径基底関数ネットワークは、局在化した基底関数の重ね合わせにより、任意関数の補間を行う脳の構造と機能に関連した手法である。本研究で用いる動径基底関数ネットワーク[1]は、ガウス関数を基底関数とする。動径基底関数ネットワークの出力ベクトル $\hat{\mathbf{x}}(t_i)$ は次式で表される。ただし、入力ベクトル $\mathbf{x}(t_i)$ を $(\Delta y_f(t_i + T\Delta t), \Delta y_f(t_i + 2T\Delta t), \dots, \Delta y_f(t_i + PT\Delta t))$ 、 P は出力層の数とする。なお、本研究では $P=1$ とする。

$$\hat{\mathbf{x}}(t_i) = \sum_{h=1}^{N_h} c_h \exp\left\{-\beta_h \|\mathbf{x}(t_i) - \boldsymbol{\theta}_h\|^2\right\}$$

また、 N_h は使用すべき基底関数の個数、つまり隠れ層ノード数であり、 c_h , β_h , $\boldsymbol{\theta}_h$ は学習によって最適化されるパラメータとす

る。パラメータの最適化は、以下に示す確率的勾配降下法を用いる。 N 対の学習データである実測値と予測値について、学習誤差 E を次式で評価する。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\Delta y_f(t_i + T \Delta t) - \hat{\Delta y}_f(t_i + T \Delta t)]^2$$

得られた学習誤差を用いて、次式で c_h , h , h をそれぞれ時間変化させ、誤差が適当な値以下になったとき学習を終了させる。

$$\frac{dc_h}{ds} = \omega_1 \frac{\partial E}{\partial c_h}$$

$$\frac{d\beta_h}{ds} = \omega_2 \frac{\partial E}{\partial \beta_h} + \eta(s)$$

$$\frac{d\theta_h}{ds} = \omega_3 \frac{\partial E}{\partial \theta_h} + \eta(s)$$

ここで、 η はランダムノイズとし、局所最適解を避けるために用いる。

4. 研究成果

逆重力場において、断面平均流速 $U_0 = 1.0$ m/s, 1.6 m/s のときに形成される不安定な火炎面挙動の時間変動 Δy_f と周波数解析の結果を図 1 に示す。 $U_0 = 1.0$ m/s のとき、 Δy_f は約 3.8 Hz 程度の強い周期振動を伴いながら、複雑に変動している。 $U_0 = 1.6$ m/s のとき、 Δy_f は $U_0 = 1.0$ m/s の場合と比較して、より複雑に変動するが、周期振動は残っている。 燃焼生成物と周囲大気との界面の挙動を図 2 に示す。 $U_0 = 1.0$ m/s のとき、遠心力不安定によって燃焼生成物内に不安定な渦構造が形成され、界面も不安定になる。 $U_0 = 1.6$ m/s のとき、間欠的な渦崩壊が生じながら、界面が変動するようになる。 逆重力場では、密度の重い低温の予混合気の下に密度の軽い高温の燃焼生成物が形成されるため、火炎面挙動は浮力の影響を受けやすくなる。渦挙動によって生じる燃焼生成物内の流れの変動が不安定な密度成層状態にある火炎面に影響を与え、レーリー・テラー不安定に関連した流体力学的不安定が火炎面形状にゆがみを与え、と思われる [3]。火炎面挙動に及ぼす界面の変動の影響をより詳細に検討するために、バーナー管中心軸上における界面の位置変動 Δy_i と周波数解析の結果を図 3 に示す。 $U_0 = 1.0$ m/s のとき、 Δy_i は約 3.3 Hz の周期振動を伴って変動している。この振動の周波数は、火炎面挙動の支配的な振動の周波数にほぼ一致している。 Δy_i の時間変化は U_0 の増加に伴って複雑になるが、約 3 Hz の周期振動が保持されたままである。これらの結果は、不安定な

火炎面挙動に含まれる低周波の振動が燃焼生成物内の不安定な渦挙動によって引き起こされることを十分に示している。界面の可視化と位置変動の結果から、浮力と遠心力による流体力学的な不安定によって生じる燃焼生成物内の渦挙動が、火炎面挙動の不安定化に重要な役割を果たしていると考えられる。

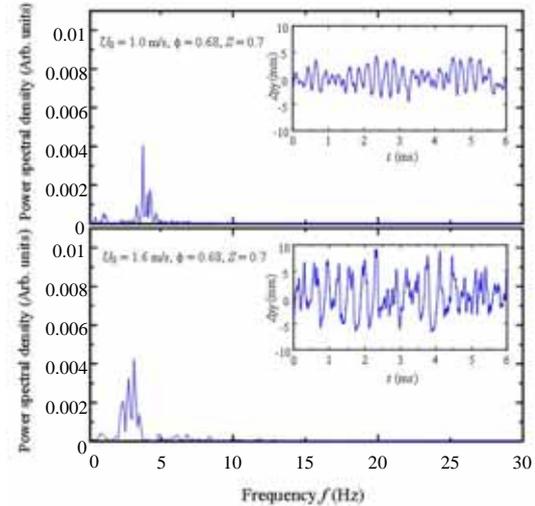


Fig. 1 Time variation of deviation from mean value of flame front location and power spectrum

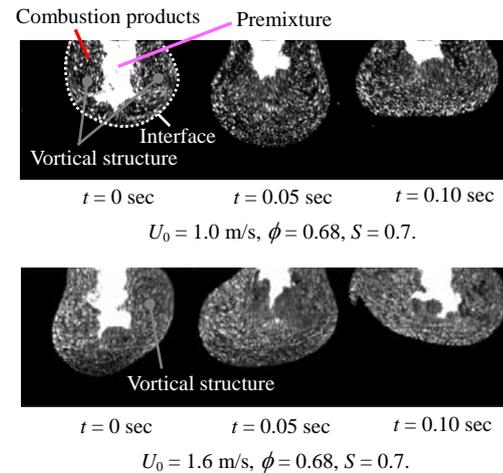


Fig. 2 Time evolution of products/air interface in inverted gravity

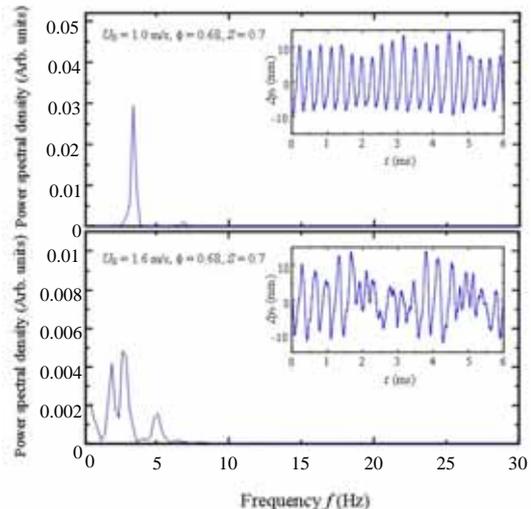


Fig. 3 Time variation of deviation from mean value of products/air interface location and power spectrum

並進誤差 E_{trans} と断面平均流速 U_0 の関係を図 4 に示す。 $U_0 = 1.0$ m/s のとき、 E_{trans} の値は約 0.018 である。 この値はレーリー・ベナル対流を記述する数値モデル方程式、いわゆる、ローレンツ方程式から得られる低次元の決定論的カオスの場合 ($E_{trans} = 0.015$) とほぼ同程度である。 つまり、 $U_0 = 1.0$ m/s のときに形成される不安定な火炎面挙動は低次元の決定論的カオスであると判定できる。 図 3 と相互情報量によって得られた結果 [3] に基づくと、火炎面挙動に含まれる不規則成分が燃焼生成物内の渦挙動によって引き起こされる周期振動に重畳した結果、火炎面挙動は低次元の決定論的カオスになると考えられる。 U_0 を 1.6 m/s まで増加させると E_{trans} の値は約 1.5 倍まで増加するが、火炎面挙動は中次元の決定論的カオスへ移行せず、低次元の決定論的カオスのままであることもわかる。

図 5 に断面平均流速 $U_0 = 1.0$ m/s のときの Δy_f を動径基底関数ネットワークを用いて短期的に予測した結果を示す。 なお、入力ベクトル D の値を 3、予測ステップ時間 $T\Delta t$ の値を 2 ms とした。 また、時刻 $t = 0$ s から 10 s までの Δy_f を学習に使い、 $t = 10$ s から 15 s までの Δy_f を予測する。 図 5 より、火炎面挙動の実測値 (青色) と予測値 (赤色) がほぼ一致していることがわかる。 予測値と実測値の予測誤差 E_p と予測ステップ時間 $T\Delta t$ との関係を図 6 に示す [1]。 予測ステップ T の増加に伴い予測誤差 E_p は単調に増加し、 $E_p = 1$ に近づいていくことがわかる。 他方、ランダムサロゲートデータの場合、予測時間ステップに依存せず、常に $E_p = 1$ である。 つまり、火炎面挙動には、短期予測可能・長期予測不可能の特徴も有していることがわかる。 以上の結果から、浮力支配領域 (リチャードソン数 $R_i < 0.1$) だけでなく、慣性力支配領域 ($R_i > 0.1$) においても、火炎面挙動は低次元の決定論的カオスであると結論づけることができる。

Buoyancy-dominated region Momentum-dominated region

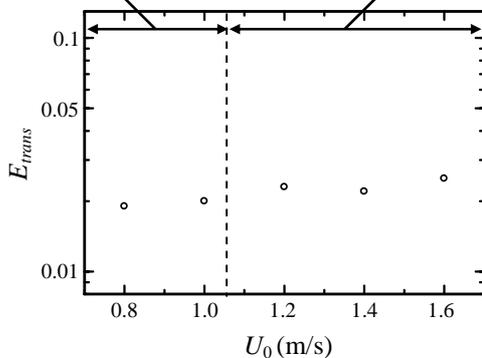


Fig. 4 Variation in E_{trans} , as a function of U_0 at $\phi = 0.68$, $S = 0.7$.

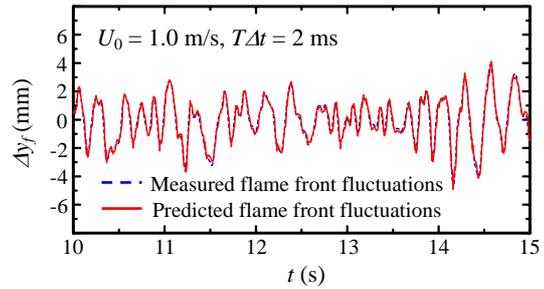


Fig. 5 Time variations in predicted flame front fluctuations Δy_f at $U_0 = 1.0$ m/s under different prediction step times $T\Delta t = 2$ ms.

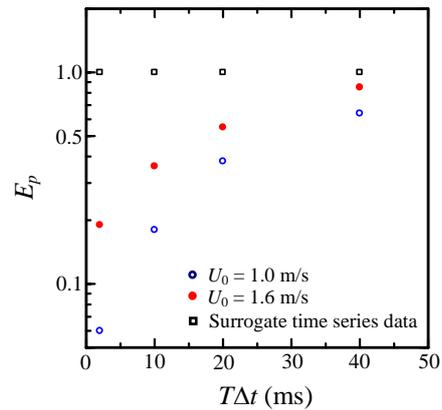


Fig. 6 Variations in the prediction error E_p for original time series data at $U_0 = 1.0$ and 1.6 m/s and the random shuffle surrogate time series data as a function of the prediction step time $T\Delta t$.

5. 参考文献

- [1] **H. Gotoda**, M. Amano, K. Maki, H. Nikimoto, T. Miyano, Deterministic nature in dynamic motion of lean swirling premixed flame generated by change in gravitational orientation – Nonlinear forecasting based on the complex network theory, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011 (査読中).
- [2] **H. Gotoda**, H. Nikomoto, T. Miyano, S. Tachibana, Dynamic properties of combustion instability in a lean premixed gas-turbine combustor, *Chaos*, vol. 21, 013124 (11 pages), 2011.
- [3] **H. Gotoda**, T. Miyano, I. G. Shepherd, Experimental investigation on dynamic motion of lean swirling premixed flame generated by change in gravitational orientation, *Physical Review E*, vol. 81, 026211 (10 pages), 2010.
- [4] **H. Gotoda**, K. Michigami, K. Ikeda, T. Miyano, Chaotic oscillation in diffusion flame induced by radiative heat loss, *Combustion Theory and Modeling*, vol. 14, pp. 479-490,

2010.

[5] **H. Gotoda**, Y. Asano, K. H. Chuah, G. Kushida, T. Miyano, Dynamic behavior of buoyancy-induced flame oscillation under swirling flow -Nonlinear time series analysis in combination with surrogate data method-, *Combustion Science and Technology*, vol. 182, pp. 1820-1840, 2010.

6. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

(1) **H. Gotoda**, T. Miyano, I. G. Shepherd, Experimental investigation on dynamic motion of lean swirling premixed flame generated by change in gravitational orientation, *Physical Review E*, vol. 81, 026211 (10 pages), 2010.

(2) **H. Gotoda**, K. Michigami, K. Ikeda, T. Miyano, Chaotic oscillation in diffusion flame induced by radiative heat loss, *Combustion Theory and Modeling*, vol. 14, pp. 479-490, 2010.

(3) **H. Gotoda**, Y. Asano, K. H. Chuah, G. Kushida, T. Miyano, Dynamic behavior of buoyancy-induced flame oscillation under swirling flow -Nonlinear time series analysis in combination with surrogate data method-, *Combustion Science and Technology*, vol. 182, pp. 1820-1840, 2010.

(4) S. Matsubara, **H. Gotoda**, A. Adzlan, T. Ueda, Experiments on dynamical behavior of near-field region in variable property jet with swirling flow, *Experiments in Fluids*, 2011 (印刷中).

(5) **H. Gotoda**, H. Nikomoto, T. Miyano, S. Tachibana, Dynamic properties of combustion instability in a lean premixed gas-turbine combustor, *Chaos*, vol. 21, 013124 (11 pages), 2011.

〔学会発表〕(計10件)

(1) **後藤田 浩**, カオス理論に基づく燃焼ダイナミックスの決定論的特徴の解明とその工学的応用, 日本伝熱学会 関西支部第17期定時総会第1回講演討論会, 2010/05/07, 同志社大学, 京都.

(2) 井川 拓哉, 天野 真仁, **後藤田 浩**, 宮野尚哉, 立花 繁, ニューラルネットワークを用いた希薄予混合ガスタービン燃焼の圧力変動の短期予測, 第47回伝熱シンポジウム, 2010/05/26 札幌コンベンションセンター, 北海道.

(3) **後藤田 浩**, 宮野 尚哉, Ian G Shepherd, 旋回流予混合火炎のカオスの挙動, 第47回伝熱シンポジウム, 2010/05/28, 札幌コンベンションセンター, 北海道.

(4) A. Adzlan, S. Matsubara, **H. Gotoda**, T. Ueda, Effects of density variation on the dynamic characteristic of coaxial swirling jet flow, *14th International Conference Heat Transfer*, 2010/08/10, Washington D.C., USA.

(5) **H. Gotoda**, T. Miyano, I. G. Shepherd, Dynamic motion of lean swirling premixed flame generated by change in gravitational orientation, *63th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society*, 2010/11/22, California, USA.

(6) 井川 拓哉, 天野 真仁, **後藤田 浩**, 宮野尚哉, 立花 繁, 決定論のカオス理論に基づく希薄予混合ガスタービン燃焼の圧力変動の短期予測, 第48回燃焼シンポジウム, 2010/12/1, 福岡ガーデンパレス, 福岡.

(7) 天野 真仁, 井川 拓哉, **後藤田 浩**, 宮野尚哉, 立花 繁, 動径基底関数ネットワークを用いた希薄予混合ガスタービン燃焼の圧力変動の短期予測, 第48回燃焼シンポジウム, 2010/12/2, 福岡ガーデンパレス, 福岡.

(8) 天野 真仁, 井川 拓哉, **後藤田 浩**, 宮野尚哉, 立花 繁, 複雑ネットワーク理論による希薄予混合ガスタービン燃焼の圧力変動の短期予測, 日本機会学会関東支部, 2011/3/19(講演論文集), 慶応義塾大学, 神奈川県.

(9) 牧 紘士郎, 天野 真仁, 宮野 尚哉, **後藤田 浩**, ニューラルネットワーク法を用いた旋回流希薄予混合火炎の不安定挙動の決定論的性質の解明, 日本機会学会関西支部第86期定時総会講演会, 2011/03/20, 京都工芸繊維大学, 京都.

(10) **後藤田 浩**, 宮野 尚哉, Ian G Shepherd, 回転流中に形成される希薄予混合火炎の挙動に及ぼす重力方向の影響, 日本物理学会年会, 2011/3/26, 新潟大学, 新潟.

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・准教授
研究者番号:00434712