

## LES による予混合火炎の非定常挙動に関する数値計算 Large Eddy Simulation of Unsteady Motion of Premixed Flames

新城 享史 航技研 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1 E-mail: [shinjou@nal.go.jp](mailto:shinjou@nal.go.jp)

立花 繁 航技研 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

溝淵 泰寛 航技研 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

小川 哲 航技研 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

Jurji Shinjo, National Aerospace Laboratory, 7-44-1 Jindaiji-higashimachi, Chofu, Tokyo 182-8522 E-mail: [shinjou@nal.go.jp](mailto:shinjou@nal.go.jp)

Shigeru Tachibana, National Aerospace Laboratory, 7-44-1 Jindaiji-higashimachi, Chofu, Tokyo 182-8522

Yasuhiro Mizobuchi, National Aerospace Laboratory, 7-44-1 Jindaiji-higashimachi, Chofu, Tokyo 182-8522

Satoru Ogawa, National Aerospace Laboratory, 7-44-1 Jindaiji-higashimachi, Chofu, Tokyo 182-8522

Unsteady behavior of partially premixed flames in a combustor is investigated by large eddy simulation (LES) and flamelet model. The pressure fluctuations propagated from the combustor affect the supply ducts of air and fuel, causing the equivalence ratio oscillations. When both fluctuations are in resonance, the flame behavior becomes unstable. If the equivalence ratio variation can be completely damped by control, the flame behavior becomes modest.

### 1. はじめに

NO<sub>x</sub> 等の排出物が少ない燃焼形態として希薄予混合燃焼が注目されている。しかしながら希薄にすることによって燃焼が不安定になり振動燃焼によって消炎や燃焼器の破壊等の不具合が起こることも知られている。したがって、安定な燃焼を実現するためには何らかの受動的・能動的制御が必要になる。

火炎にはいくつかの不安定性があることが知られている<sup>(1-3)</sup>。火炎自体は、流体力学的に不安定であり拡散や熱によっても不安定が起こる。また、燃焼器内での火炎は共鳴や供給システムとのカップリングなどの影響も受ける。

燃料が希薄な場合、燃料過多の場合に比べて当量比変化に対して燃焼速度などはより大きく変化する(図1)。したがって当量比が時間的に変化するならば火炎はより大きな影響を受けると推察される。図2のような燃焼器と供給系で構成された燃焼器システムを考えたとき、燃料・空気の予混合気の供給系が完全に一定な当量比で予混合気を供給することは難しい。したがって燃焼器と供給系の間にあるフィードバックループが形成され不安定が増幅する可能性がある。ここでは、いくつかある不安定性のメカニズムの中で特に入口燃料供給系での予混合気の局所当量比変化が燃焼器内の振動に与える影響について注目して調べることにする。その他の不安定性についても今後調べる予定である。

### 2. モデル

Zinn<sup>(2,3)</sup>らは1次元理論解析(時間遅れ理論)と実験により当量比の変動が実際に燃焼の振動と連動することを示した。図3にその概念を示す。それによると、燃焼器内の火炎が振動している場合、そこから上流へ圧力波が伝播する。するとそれによって予混合気の供給系に影響し、当量比の変化が引き起こされる。局所当量比が周囲と異なるその予混合気塊は燃焼器へ対流

される。それが火炎に到達すれば燃焼するが、燃焼速度や発熱率が周りの予混合気と異なるため、火炎の燃焼形態に変化を与える。それが Rayleigh の条件を満たす時にフィードバックループが形成され、振動が増幅される。したがって、予混合気の対流時間と火炎の振動周期の比がパラメータとなって燃焼システムの安定性を決めることになる。実際に実験ではこのパラメータを変えることにより安定・不安定を作り出している。

しかしながら同時に、燃焼器形状が3次元的であるときや、火炎が比較的長いときなどの条件下では1次元理論はさほど正確に当てはまらないことも指摘している<sup>(2-4)</sup>。これは振動のモードが複数あることなどに起因すると考えられている。

本研究での燃焼器形態の概略は図2にあるようなものとする。燃焼器の入口にはスワローがあり、その上流には予混合気供給系がある。供給系の最上流にある燃料・空気それぞれの貯気槽から等エントロピー過程でスワローへ通じるダクトに燃料・空気が供給され混合されるとする(図4)。したがって、燃焼器の状態の変化が圧力波によってダクトを遡って伝播すると予混合気の当量比が変わる。

Direct Numerical Simulation (DNS)のように細かい計算を適用するのは不可能であり、解析は Large Eddy Simulation (LES) によった。燃焼はモデル化して組み込む。本研究は Peters らによる分類でいわゆる Flamelet モデル<sup>(5-8)</sup>が適用できる範囲にありこれを用いる。したがって、火炎面を不連続面とみなし化学反応を予め解いておくことにより計算負荷を軽減できる。ただし、これによって火炎内の構造を解像できなくなるため、DNS などと連携を取ってモデル化をすることが重要になってくる。

支配方程式としては、質量・運動量・エネルギーの各式に加えて火炎面 ( $G$ )、混合分率 ( $Z$ ) の式を同時に解く。

$$\frac{\partial \rho G}{\partial t} + \frac{\partial \rho G u_j}{x_j} = \rho s_L |\nabla G|$$

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \frac{\partial \rho Z u_j}{x_j} = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z)$$

G はその符号により未燃・既燃を区別し、火炎面の形状を表現する。本解析では、 $G > 0$  を既燃領域、 $G < 0$  を未燃領域、 $G = 0$  を火炎面と定義した。 $s_L$  は層流燃焼速度であり、既燃側から未燃側へ火炎面が伝播していくことがわかる。層流燃焼速度は火炎面内の解像ができないと求められないため、本モデルでは実験値から与える。

Z は混合気の燃料と空気の割合を表し、局所当量比に相当する。Z は局所当量比  $\phi$  と関連して

$$Z = \phi Z_{st} / (1 - Z_{st} + \phi Z_{st})$$

と定義される。ここで  $Z_{st}$  は stoichiometric なもので水素では 0.028 である。Z の支配式には拡散の影響が考慮されている。

これらの支配方程式に LES の空間フィルタリング (Favre フィルタリング) をかける。ここではサブグリッドスケールモデルは Dynamic Smagorinsky モデルとしている。フィルターをかけた G - 方程式の燃焼項は非線形になるためモデル化が必要になる。ここでは

$$\rho s_L \tilde{|\nabla G|} = \tilde{\rho} \tilde{s}_T \tilde{|\nabla \tilde{G}|}$$

とするモデルを用いる。この際に層流燃焼速度は乱流燃焼速度に置き換える。乱流燃焼速度は

$$\tilde{s}_T / s_L = 1 + C (q / s_L)^n$$

とするモデルを用いる。ここで C、n はモデル定数、q は乱流インテンシティである。

Z の値などから、予め計算しておいたテーブルを参照することによって各化学種の分率が算出される。各化学種の質量分率は、関数型の確率密度関数 (PDF) を仮定し与えた。温度は

$$\sum_i \tilde{Y}_i h_i(\tilde{T}) = \tilde{h}(\mathbf{x}, t)$$

を解くことによって求められる。ここで右辺は流体計算により求まる量、左辺には各化学種の生成熱が考慮されている。

### 3. 結果

計算の初期条件は、一様流圧力 1 気圧、温度 800K、流速 40m/s、当量比 0.7 の水素予混合気とした。

燃焼器断面形状は矩形とした。長さ等の条件は表 1 に示す。

今回の計算は比較的小型の燃焼器で行っているが、全体を大きくしたスケールでの計算も行っている。燃焼器長さ と 供給系インレットダクトの長さの比は、Zinn の時間遅れ理論で安定・不安定の各領域に入るように変えた。ケース 4 は当量比変動がないと仮定したものである。

図 5 に、ケース 1 のある瞬間の燃焼器内の温度等値面 (1200K) を示す。スワラー部から火炎が発達し燃焼器後方に高温の生成ガスが流れている様子がわかる。この図ではわからないがこの形は時間的に変化する。

図 6 にはケース 1 の場合の圧力と入口局所当量比の時間履歴を示してある。ただし、両者の測定点は同一ではない。実際に局所当量比は燃焼器からの影響を受けて変動することがわかる。

各ケースの燃焼器内のある期間の圧力履歴を図 7 に示す。これは燃焼器上部壁の上流から 1 / 3 の位置で測定した値である。点線群が入口局所当量比変動を含めたケース (1 - 3) 実線は入口局所当量比変動が全くないと仮定したケース 4 のものである。実際に局所当量比の変動が存在する場合は存在しない場合に比べて振動の振幅が大きめに出ることがわかる。また、局所当量比変動があり能動制御として燃焼器の形状を変えた場合 (ケース 1 - 3) であるが、基本的には振幅にあまり変化が見られない。

そこで、ケース 1 の場合について圧力履歴を Fourier 解析してみた。図 8 にその結果を示す。周波数としていくつかのモードが存在していることがわかる。図 9 にはある瞬間の軸方向の圧力分布を示す。単一のモードではなくいくつかのモードがあることがわかる。ゆえに、時間遅れ理論で予想されるようなはっきりとした結果にはならなかったと考えられる。このことから、燃焼器の形状変化だけによってこの種の振動を抑えようとするのは容易ではないことが推察される。

当量比変動が完全になくとも燃焼の振動がまだ残っているのは、火炎自体に不安定性のメカニズムが残っているからである。したがって、供給系とのカップリングを断ち切ってもある程度までしか振動を抑えることはできない。これは実験でも同じ結果である<sup>(2,3)</sup>。

燃焼の不安定性をはかる指標に Rayleigh Index がある。時間的、空間的に平均をとったグローバルな Rayleigh Index は

$$R = \frac{1}{V} \frac{1}{T} \int \int_{TV} p'(\mathbf{x}, t) q'(\mathbf{x}, t) dV dt$$

と定義される。今回のケースにおいて計算するとケース 1 で  $4.7 \times 10^{-4}$ 、ケース 3 で  $5.0 \times 10^{-4}$ 、ケース 4 で  $0.8 \times 10^{-4}$  [ $J^2/m^6/s$ ] となり、実際に当量比変動がある場合は不安定性が強いことがわ

かる。しかしながら既に述べたように、火炎の不安定性のメカニズムはこれだけではないのでケース4でも火炎の不安定性は残る。これが Rayleigh Index にも現れている。

火炎自体の流体力学的不安定性を制御する方法としてまず考えられるのは燃焼器にスピーカーなどを用いて何らかの圧力波形を印加する方法である。今後は、このような方法と組み合わせた解析を進めていく予定である。

#### 4. まとめ

燃焼器システムのシミュレーションを行った。燃焼器内の振動が供給系に伝わり、燃焼器入口からの予混合気の当量比変化が共鳴すると火炎の振動を増幅することがわかった。また当量比変化がないとすると振動が小さいこともわかったが、火炎自体の不安定性により振動はまだ残る。

#### 5. 参考文献

- (1) Candel, S., M., Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1992, pp. 1277-1296
- (2) Zinn, B. T., Lieuwen, T. and Neumeier, Y., "Combustion Instabilities in Low NOx Gas Turbines and Their Active Control", AGARD/NATO Research and Technology Agency's Symposium on Gas Turbine Engine, Combustion, Emissions and Alternative Fuels, 1998
- (3) Lieuwen, T. and Zinn, B. T., AIAA Paper 98-0641, 1998
- (4) Straub, D. L. and Richards, G. A., ASME Paper 98-GT-492, 1998
- (5) Menon, S., Combust. Sci. and Tech., 84:51 (1992)
- (6) Muller, C. M., Breitbach, H. and Peters, N., Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1994, pp. 1099-1106
- (7) Peters, N., Turbulent Combustion, Cambridge University Press, 2000
- (8) Cook, A. W. and Riley, J. J., Combust. Flame, 112:593 (1998)

Table 1. Simulation conditions

Case	#1	#2	#3	#4
Combustor length	0.116 m	0.076 m	0.113 m	0.116 m
Inlet duct length	0.004 m	0.004 m	0.007 m	0.004 m
Equivalence ratio	Variable	Variable	Variable	Fixed at 0.7

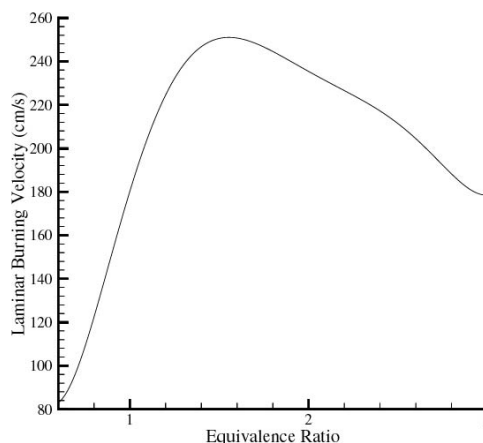


Fig. 1 Equivalence ratio vs. flame speed (for H2)

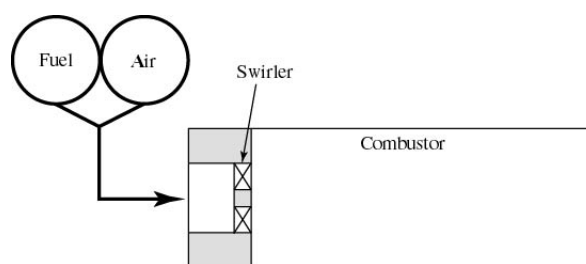


Fig.2 Combustor configuration

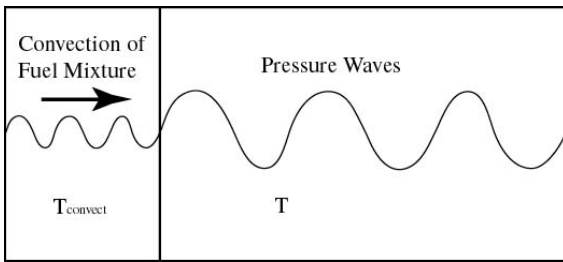


Fig. 3 Concept of time-lag theory

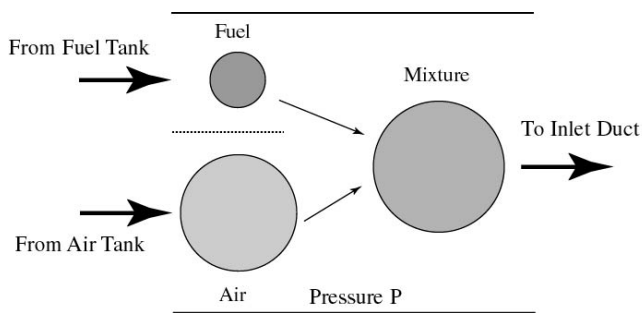


Fig. 4 Inlet model

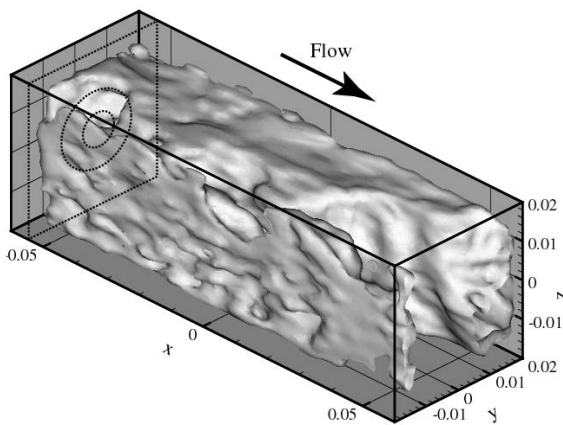


Fig. 5 Instantaneous temperature isosurface (1200K)

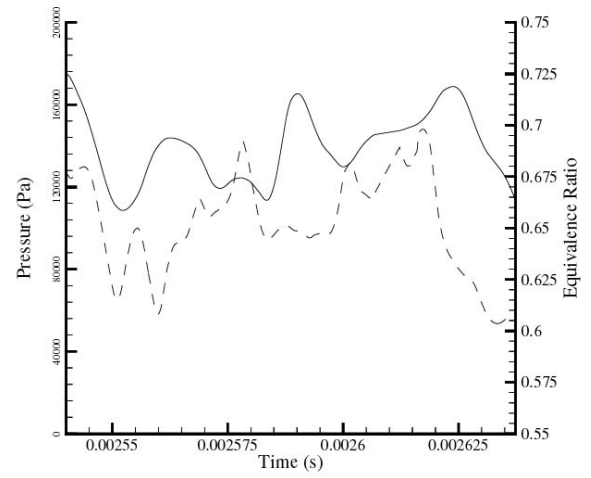


Fig. 6 Time traces of pressure and equivalence ratio (case #1)  
(solid: pressure and dashed: equivalence ratio)

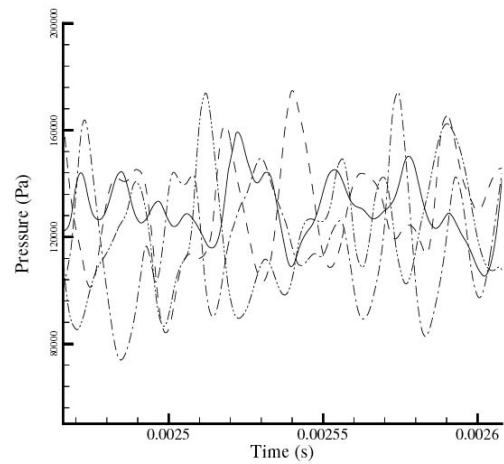


Fig. 7 Pressure traces (dashed: case #1, dashed-dotted: case #2,  
dashed-double-dotted: case #3 and solid: case #4)

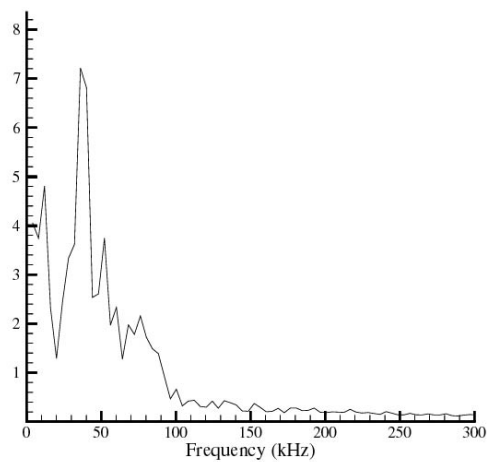


Fig. 8 Frequency analysis

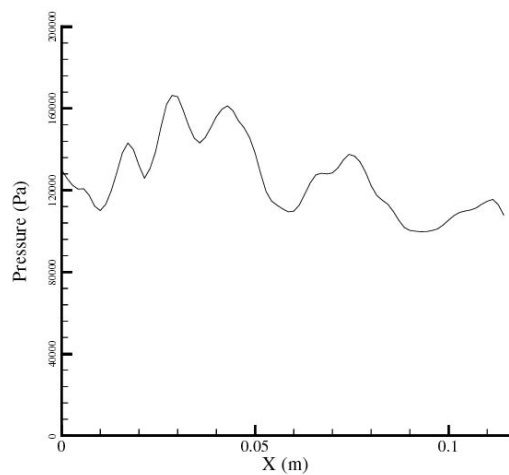


Fig. 9 Instantaneous spatial profile of pressure