

希薄予混合燃焼器内の燃焼挙動に関する数値解析

新城淳史、松山新吾、溝淵泰寛、小川哲
宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部

Numerical Study on Combustion Dynamics in a Lean Premixed Combustor

by

J. Shinjo, S. Matsuyama, Y. Mizobuchi and S. Ogawa

ABSTRACT

This study presents numerical simulation results of combustion dynamics in a lean premixed combustor. The combustor is a swirl-stabilized gas turbine model combustor installed at Aerospace Research Center (ARC), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). The methane/air lean premixed gas is used at the preheated temperature of 700K, pressure 1atm and equivalence ratio 0.5. Without control, large pressure oscillations are observed in the combustor mostly with longitudinal acoustic modes. The basic mode is quarter-wave mode. The pressure waves induce periodical vortex shedding from the combustor dump plane, thus changing the flame shape and location. This leads to temporal and spatial fluctuations in heat release rate, and the Rayleigh index, the correlation between pressure and heat release fluctuations, indicates that these fluctuations are coupled to sustain combustion oscillations. Secondary fuel injection control is introduced to change the coupling between these factors. This numerical simulation succeeds in reproducing reduced combustion oscillations with constant injection of 3% fuel through the swirler hub injection ports. The change in flame shape is reproduced and the reduced amplitude can be attributed to the change in heat release distribution as the Rayleigh index implies. Thus, it is expected that the amplitude may be reduced further when injection phase control is additionally introduced with a feedback control system, and this is our future research subject.

1. はじめに

近年環境問題がますます重要視されており、航空用あるいは産業用のガスタービンに対するNOx等の排ガス規制も年々厳しくなっている。従来型の拡散燃焼方式に比べ、NOx等の燃焼生成物を低く抑えることができる新たな燃焼方式の実用化が求められている。

そのような燃焼方式の一つに、希薄予混合燃焼がある。これは燃料・酸化剤を予め混合しておき燃焼室で燃焼させるものである。予混合燃焼では、当量比が1から外れた混合比でも火炎を形成することができるため、従来型の拡散燃焼に比べて火炎温度を低くすることができる。この特性により、局所的な高温によって形成されるNOxを抑制することができる。

しかしながら、予混合燃焼方式では、安定燃焼域が狭く燃焼が不安定になりやすいという欠点をもつ。このことは、作動中での燃焼の吹き消えや振動による燃焼器システムへの機械的ダメージ等の原因になり、場合によっては致命的になることもある。特に航空機用ガスタービンでは、幅広い作動条件に渡って安定に燃焼することが要求されるため、燃焼不安定性の克服が強く求められる。

これまで、希薄予混合燃焼において燃焼安定化のためにさまざまな手法が試されてきた。受動的制御では、燃焼器形状の変更、ダンパーとしての共鳴器の設置等の手法が使われてきた。システムがシンプルで済む反面、ある特定の振動に対してだけしか効果がないため、制御としてはロバスト性に欠ける。一方、能動的制御では、さまざまな作動条件下でロバストに機能することが期待される反面、システムは複雑になり構築も難しい。これまでいくつかの報告がなされているがまだまだ研究の余地は大きい[1-6]。

本研究では、ガスタービン燃焼器を模したスワロー型希薄予混合燃焼器内の流れ場を数値解析しその燃焼挙動を説明することを目的とする。更に、不安定な燃焼場に制御を施し、その効果と流れ場の変化を見る。制御の手段としては2次燃料噴射を用いる。これは、流れ場の中に少量の2次燃料を噴射することによって発熱場を変化させ制御を実現するものである。スピーカのような音響機器とは違い、

制御出力を大きく取れるので実燃焼器への応用につながるものである。

対象とする燃焼器は、JAXA 航空宇宙技術研究センターに設置されたモデル燃焼器と同様の形態・条件である[1]。この燃焼器を用いた実験と相互に補完する形で現象解明と制御の実現を行った。図1に燃焼器の概要を示す。燃焼器は本体長さ630mmであり、断面は100mmの正方形である。燃焼器入口部に内径20mm、外径50mmのスワローが取り付けられてあり未燃予混合気回転をかける。スワローのハブ部には制御のための2次燃料を噴射する孔が12個開けられており別系統から燃料を噴くことができる。燃焼器前方部は光学的計測を可能にするために石英ガラスの壁面になっている。燃料には主燃料・2次燃料ともメタンを用いた。実験で基準となる流れ条件は、未燃ガス温度700K、圧力1気圧、スワロー部での未燃ガス速度を90m/s、当量比を0.5と設定した。

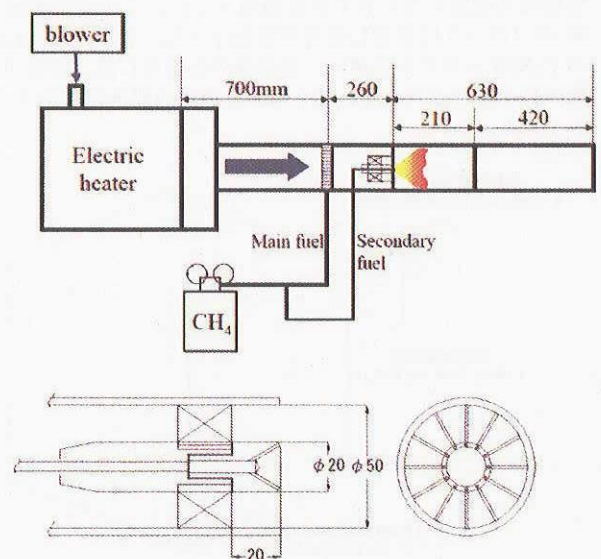


図1 対象とする燃焼器システム
(上段) 全体図 (下段) スワロー部

2. 解法

対象とする流れ場では音響的な振動が現象に重要な影響を与えるため、流れ場の基礎方程式は3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式である。乱流の扱いは、流れ場が実スケールかつ非定常であるため Large Eddy Simulation (LES) に基づいた。ここでは乱流場のサブグリッドスケールモデルはダイナミック Smagorinsky モデルで与えた。

考えている流れ場の条件では、グリッドスケールに比べて予混合火炎厚さは薄く LES の格子では解像できないため何らかの火炎モデルが必要になる。ここでは、予混合火炎面を未燃ガスと既燃ガスの境界面とみなして火炎の伝播を追跡する手法をとった[7]。このことにより火炎内部での化学反応は予め計算してテーブルとして持っており、流体の計算からは化学反応計算を分離できる。火炎面の伝播速度（燃焼速度）については、層流燃焼速度は CHEMKIN による計算で与えた。火炎の伝播式は

$$\frac{\partial \rho G}{\partial t} + \frac{\partial \rho G u_i}{\partial x_i} = \rho_u s_L |\nabla G| \quad (1)$$

で与えられ、一般に G 方程式と呼ばれている。ここでは $G=0$ を未燃ガス、 $G=1$ を既燃ガスとした。LES 空間フィルタリング後のサブグリッド乱流による効果は、半経験的に与えられる次式を用いた。

$$\frac{\tilde{s}_L}{s_L} = 1 + C \left(\frac{u'_{sgs}}{s_L} \right)^n \quad (2)$$

$$u'_{sgs} = C_s \Delta \sqrt{\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}}$$

これにより、乱流強度が上がるにつれて火炎面積が増加する効果を考慮する。

2次噴射時など燃焼器内に局所的な濃度分布が存在する場合は、混合分率の式も同時に解き、局所的には拡散火炎 flamelet の式を適用する。

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \frac{\partial \rho Z u_i}{\partial x_i} = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \quad (3)$$

燃焼器内の音響振動が現象を決定する要因の一つであるため、圧縮性解法（Roe スキーム）を用いた有限音速の圧力波を捉えられるようにした。

本計算では、燃焼器本体、上流スワラ部および下流流出領域を設置し合わせて計算領域とした。この計算領域を60のブロックに分割し並列計算を行った。計算機は JAXA の CeNSS システムを使い、自動並列も併用した。総格子点数は約1千万点である。図2に計算領域の概念図を示す。

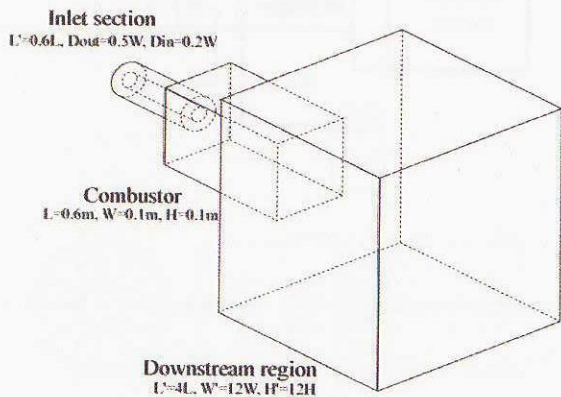


図2 計算領域概念図

境界条件は、最下流では圧力固定、流入条件は Poinsot らの手法[8]に基づいた。壁面は滑り無しとした。

3. 結果および考察

3. 1 制御なしの場合

流れ場の条件は、実験と同じく、未燃ガス温度 700K、圧力 1 気圧、未燃ガス速度を 90m/s、当量比を 0.5 と設定した。実験においてこの条件では逆火は観察されていない。

図3に、時間平均した流れ場を、軸方向速度と流線で示す。流入予混合気は旋回がかかっているため、燃焼器中心軸上に再循環領域が形成される。この再循環流れによって高温の既燃ガスが上流に戻され、火炎が燃焼器入口に保持される。

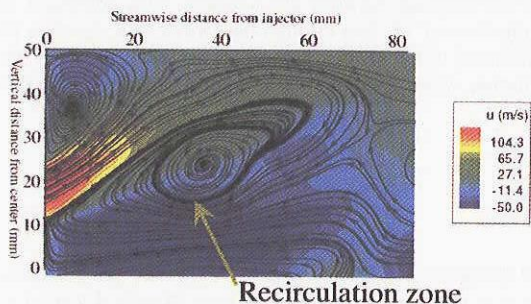


図3 時間平均した流れ場。燃焼器入口付近上半分を示す。

瞬間の火炎形状は、乱流場との干渉で複雑な形状をしている。図4にある瞬間の火炎形状を示す。

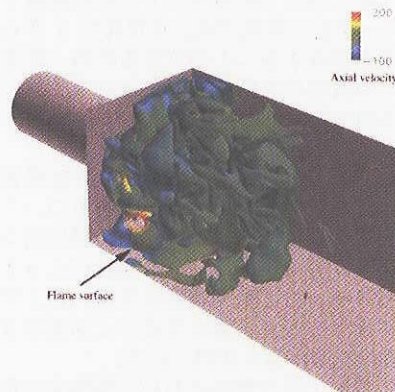


図4 ある瞬間の火炎形状

燃焼器内部には、特定の振動モードが励起される。実験と同様の燃焼器入口から 10mm 下流の燃焼器壁面上の位置で測った燃焼器圧力の時間履歴および FFT の結果を図5に示す。

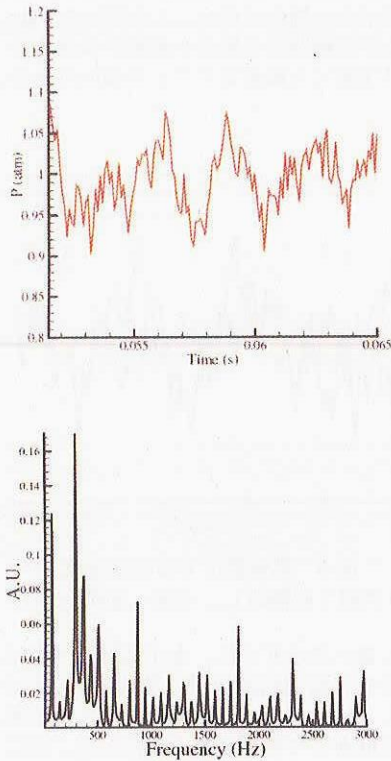


図5 燃焼器圧力の時間履歴（上）とFFTの結果（下）

このように燃焼器内で基本モードとして卓越するのは300Hz 弱のモードであり、これは燃焼器長さと同燃焼ガスの音速で決まる4分の1波長モードになっている。実際に実験で確認されたのもこのモードであり、計算での結果と一致している[1]。

この燃焼器縦方向の音響振動により燃焼器入口のスワラダンパ面から流入する予混合気の流れに変動が起こる。ダンパ面からの流入であるので結果としてせん断渦の放出が起こる。図6に4分の1波長モードでのあるサイクルの火炎形状と渦度の変化の様子を示す。

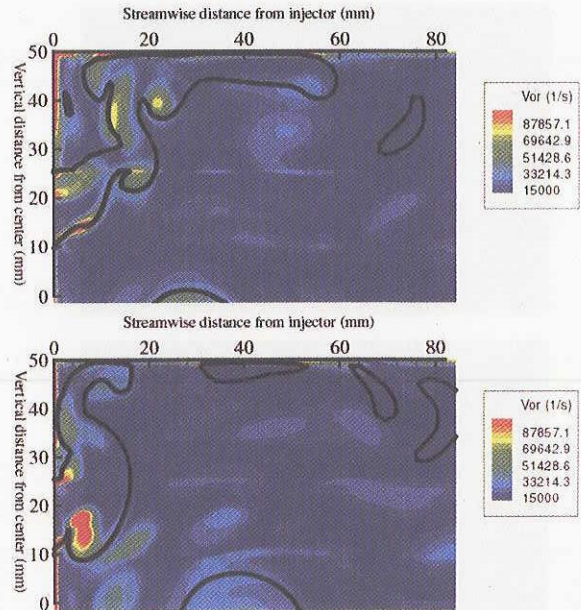


図6 振動サイクルでの火炎形状と渦度の変化
(燃焼器入口付近の上半分を示す。上から、各0度、90度、180度、270度の位相。ここでは圧力が平均から上昇し始める点を0度とした)

火炎形状は、局所の流れ場に大きな影響を受けるため、渦の放出は火炎の形状と位置を時々刻々と変えていく。このため、局所的にも全体的にも発熱量の変化が生じる。

発熱量の変化は、Rayleighの指標

$$R = \frac{\gamma - 1}{\gamma p} \iint p' q' dV dt \quad (4)$$

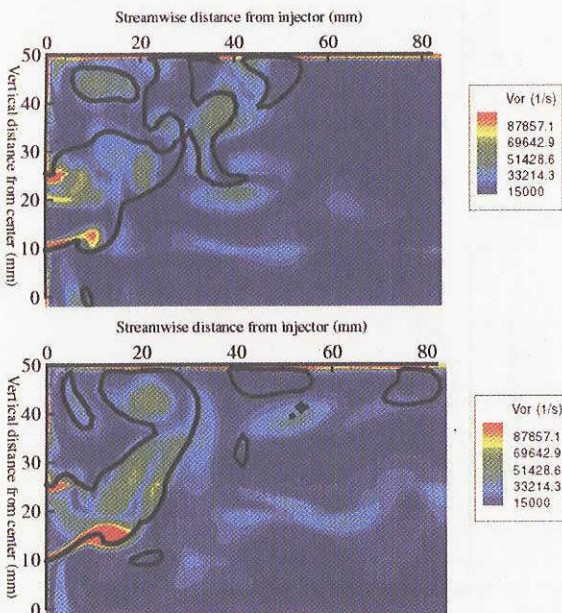
に表されるように、圧力変動との相関で音響エネルギーの生成項として働くことがわかっている[9]。この条件で圧力変動と発熱変動の相関を取ってみると正になっており音響エネルギーの生成に作用している。したがって、燃焼器内の振動を抑制するには、これまで見たような圧力変動、速度変動、発熱変動の間のカップリングを弱めるように作用する制御を加える必要がある。

3. 2 制御ありの場合

次に、2次燃料噴射による制御の効果を調べる。これは、前節で見たように、圧力、速度、発熱のカップリングのうち、発熱場を変化させて振動の抑制を図るものである。

2次燃料は図1で見たスワラ中心のハブ部から12個の小孔を通して導入される。2次燃料は100%メタンであり、メインの希薄予混合気の3%の燃料量を噴く。

実験では、2次燃料を時間的に一定の量で噴く開ループ制御と2次燃料噴射量を燃焼器内の圧力信号からのフィードバックで変化させる閉ループ制御の両方を試している。このとき、開ループ制御では制御無しの状態に比べて17dBの振動の減少、閉ループ制御では更に10dBの減少に成功している[1]。図7に、実験で得られた制御無しおよび開ループ制御時の火炎の直接写真を示す。



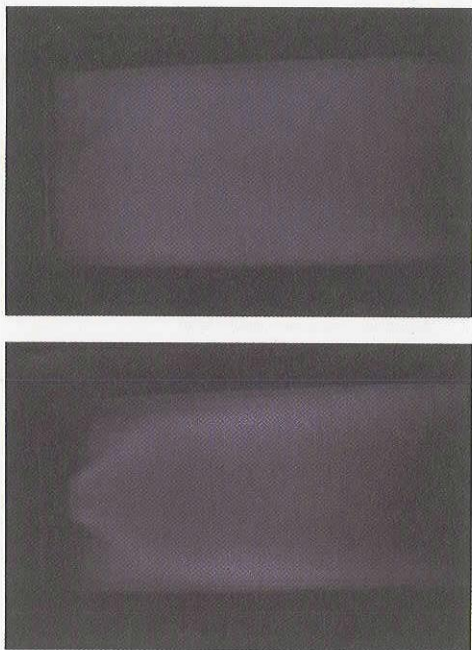


図7 火炎直接写真(上)制御無し(下)開ループ制御

図7からわかるように、2次燃料噴射があるときと無いときで火炎の形状が若干変化していることがわかる。制御が無い場合は、火炎が短く、燃焼器コーナーのリブ部にも火炎が形成されるのに対して、2次燃料の噴射を行ったときはリム部の火炎が外れ、火炎がより後方に伸びていることがわかる。本計算においても、この噴射があるときと無いときでの火炎形状の違いを考慮した。図8にある瞬間の火炎形状を噴射有る無しの状態を示した。このときの噴射は開ループで一定であり、2次燃料流量はメイン燃料の3%とした。

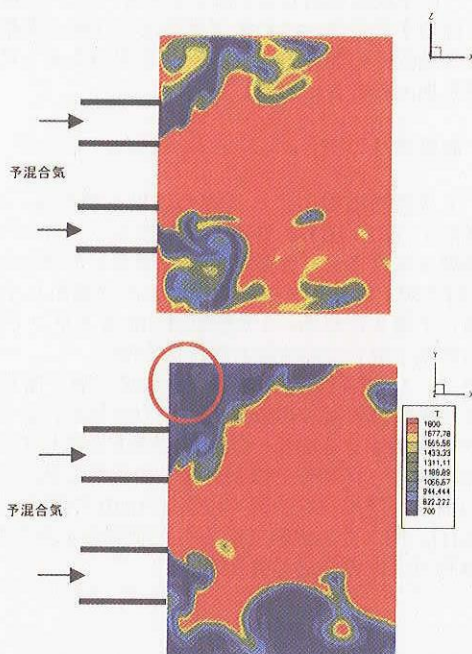


図8 ある瞬間の火炎形状
(上)2次噴射無し(下)2次噴射あり

このときの燃焼器内の圧力振動の履歴を示したのが図9である。制御が無い場合に比べ、2次燃料を一定の割合で噴射したほうが燃焼器内の振動の振幅が減少することがわかる。これは実験でも確認されている傾向である。

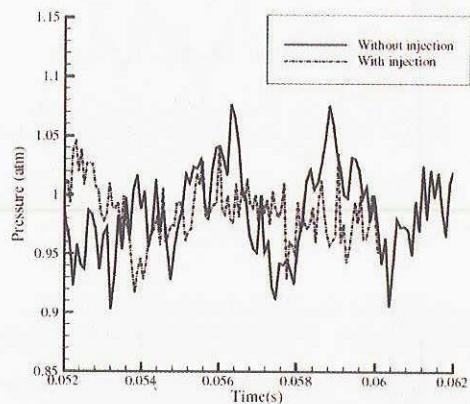


図9 燃焼器圧力の時間履歴
(実線：制御無し、点線：制御あり)

この振幅の違いを示すのに、まず燃焼器内の圧力振動の振幅の空間分布を図10(a)に示す。縦方向の4分の1波長モードが卓越しているのが、振幅は燃焼器入口で最大になり燃焼器出口に向かって減少することになる。次に、図10(b)には時間平均した火炎発熱量の空間分布を示す。前述したように制御無しの場合は火炎が比較的コンパクトに燃焼器入口付近に形成されるのに対して、2次燃料の噴射を行った場合は、火炎が下流方向に伸びた分布になっている。

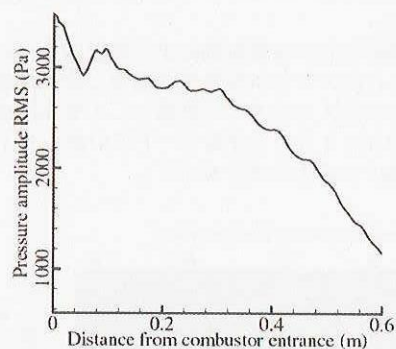


図10(a) 燃焼器内の圧力振動の振幅の空間分布

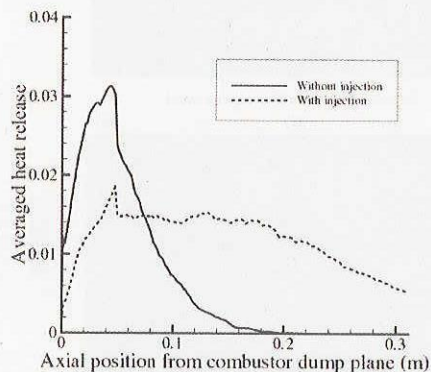


図10(b) 時間平均した火炎発熱量の空間分布

したがって式(4)にあったように Rayleigh の指標を取ると、圧力変動と発熱変動の相関は、2次燃料噴射を行ったときのほうが小さくなることが予想される。実際に本計算において、Rayleigh の指標を空間積分して時間履歴として示したものが図 11 である。

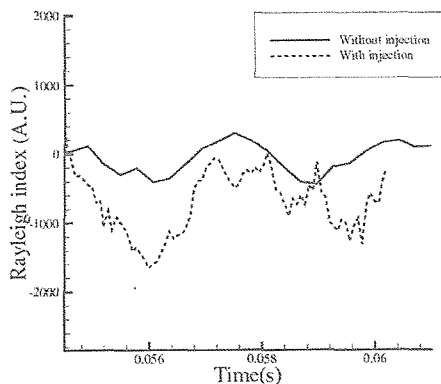


図 11 Rayleigh index の時間履歴
(実線：制御無し、点線：制御有り)

この図からわかるように、制御が無い場合は正になり音響エネルギーが生成されるところがあるのに対して、制御をかけた場合は概ね負になり、音響エネルギーの生成には効いていないことがわかる。したがって、図 9 にあったような振動の振幅の現象につながったと考えられる。

実験では[1]、更に H_2/H_{O_2} 混合フィードバック制御による制御で更なる振動の現象を実現している。このときは燃焼器圧力をトリガーとして 2 次燃料噴射バルブの開度を変化させる。このことにより、式(4)の Rayleigh の指標の中の時間積分に対して圧力変動と発熱変動の位相差を組み込むことができ、適切な位相差を設定すればさらなる振動抑制ができる。本計算では、フィードバック制御は計算途中であり結果がまだ出ていないのでこれは今後の課題としたい。

4. 結論

LES と flamelet 火炎モデルに基づく計算手法を用い、希薄予混合ガスタービン燃焼器内の燃焼挙動の解析を行った。制御としての 2 次燃料噴射が無い場合とある場合の計算を行い、流れ場の様子の違いを考察した。その結果、以下の知見を得た。

- 燃焼器内の振動は、縦方向の音響振動が卓越し、基本のモードは 4 分の 1 波長モードである。この圧力振動の伝播により流入部からの渦放出が誘起される。渦が火炎近傍に近づくとき火炎の形状と位置を変化させるため、結果として発熱率の空間的・時間的変動を生じる。その発熱変動が音響エネルギーにフィードバックされ燃焼器内の振動が持続されている。したがって制御によりそのカップリングを変化させることが振動の抑制を実現することになる。
- 制御として 2 次燃料噴射を用いた。本計算では 2 次燃料を一定の割合で噴く開ループ制御を模擬した。噴射時の火炎形状の変化を考慮すると、火炎が後方に伸びた分、発熱率の空間分布に違いが生じ、Rayleigh の相関が小さくなるため振動が抑制されることが再現された。Rayleigh の指標は音響エネルギーの生成を見るの

に適切な指標であり、燃料噴射量に位相差を付けた場合には更に有効に働く可能性を示唆している。

- 燃焼器圧力を入力とし、2 次燃料流量を出力とするフィードバック制御系の計算は実行中でありその解析は今後の課題である。

参考文献

- 1) Tachibana, S., Zimmer, L., Kurosawa, Y., Suzuki, K., Shinjo, J., Mizobuchi, Y. and Ogawa, S., 2005, Proc. The 6th Sym. Smart Control of Turbulence, pp.181-190.
- 2) Candel, S., Proc. Combust. Inst. 29, 2002, pp.1-28.
- 3) Lee, J.G., Kim, K., and Santavicca, D.A., Proc. Combust. Inst. 28, 2000, pp.739-746.
- 4) Choi, G. M., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Proc. Combust. Inst. 30, 2005, 1807-1814.
- 5) Stone, C., Menon, S., Proc. Combust. Inst. 29, 2002, 155-160
- 6) Shinjo, J., Mizobuchi, Y. and Ogawa, S., Proceedings of the 4th Symposium on Smart Control of Turbulence, Tokyo, 2003
- 7) Peters N., Turbulent Combustion, 2000
- 8) Poinso T., Lele, S., J. Comp. Phys., 101, pp104-129, 1992
- 9) Poinso T. and Veynante, D., Theoretical and numerical combustion, Edwards, 2001

謝辞

本研究は、文部科学省開放的融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」の一環として行われた。ここに記して謝意を表す。