

## アクティブ制御による振動燃焼の抑制

Active control of combustion-driven oscillations in a gas-turbine combustor

\* 総合技術研究本部 航空エンジン技術開発センター (Aeroengine Technology Center)

\*\* 航空プログラムグループ 環境適応エンジンチーム (Clean Engine Team)

\*\*\* 総合技術研究本部 事業推進部 (Program Management and Integration Department)

立花 繁\*, ジマー ロレント\*, 黒澤 要治\*\*, 鈴木 和雄\*\*\*

Shigeru Tachibana\*, Laurent Zimmer\*, Yoji Kurosawa\*\*, Kazuo Suzuki\*\*\*

### Abstract

An active control of combustion driven oscillations occurring in a lean premixed model combustor is demonstrated by means of a secondary fuel injection. An unstable condition, which leads to self-excited pressure oscillations beyond 170 dB, is chosen as control target. Keeping the inlet air temperature, the air mass flow rate and the overall equivalence ratio, respectively, at 700 K, 78 g/s and 0.50, different secondary fuel injection strategies are examined. One is a steady injection method and the other is a feedback control, which was designed by the mixed  $H^2/H^\infty$  control algorithm. The feedback control with 3% of secondary fuel performs peak pressure reduction of 27 dB, which is almost 10 dB larger than that of the steady injection method.

### 1. はじめに

航空機エンジンから排出される  $\text{NO}_x$  を低減するための燃焼法として、近年、希薄予混合燃焼方式が注目されている。予混合燃焼では、当量比の調整によって火炎温度を低く抑えることで、 $\text{NO}_x$  排出を抑制できるメリットを有している。その一方で、振動燃焼、吹き消え、逆火といった燃焼不安定性の発生しやすいことが問題となっており、広い作動範囲で安定した燃焼をいかに実現するかが、実用化の鍵となっている。中でも、強い圧力振動を伴う振動燃焼は、エンジンの致命的な破損やライフサイクルの低下につながるため、その抑制が燃焼器開発において必要不可欠な要素となっている。従来、振動燃焼の制御にはパッシブ制御が用いられてきたが、エンジンごとに異なる燃焼器形状への適用や広い作動範囲への適用に困難性があり、より適応性の高い振動燃焼の抑制が望まれるようになってきた。このような背景のもと、近年では、燃焼不安定性にアクティブ制御を適用する研究が盛んに行われるようになってきている[1,2]。アクチュエータとして、高速応答バルブを燃料供給ラインに組み込むことで、燃料流量に変動を与える燃料噴射制御がその主流となっている。燃料流量の変動は、火炎に到達した時点で発熱率変動として作用する。振動燃焼は、燃焼器内部の音響場と火炎（発熱率）との強い相互作用によって生じる現象なので、燃料噴射の位相と振幅を制御することによって、この相互作用を弱める方向に働かせることがアクティブ制御の狙いである。筆者らのグループでは、ここ数年、二次燃料噴射を利用した振動燃焼のアクティブ制御に関する研究を実施してきた[3-8]。そして平成17年度は、それまで取得した膨大なデータの解析を進め、結果を論文としてまとめた[9-12]。本稿では、これらの中から振動燃焼の抑制制御に関する主だった結果について報告したい。

## 2. 研究の概要

制御実験は、メタン-空気予混合燃焼器の燃料希薄条件で発生する振動燃焼を対象として行われた。制御アルゴリズムには、混合 $H^2/H^\infty$ 制御[13]を採用した。非制御時（二次燃料噴射なし）や二次燃料の定常噴射時と比較して、アクティブ制御を適用することで、制御効果にどのような違いがあらわれるのかに着目して結果の考察を行う。

## 3. 成果の概要

### 3. 1 実験装置の概要

燃焼実験装置の概要を図 1 に示す。燃焼室は、100mm × 100mm の矩形断面を有しており、上流側 210mm は可視化の目的で四面が石英ガラスで囲まれている。下流側の 420mm は水冷式のダクトとなっている。火炎は、燃焼室入口に組み込まれた軸流スワラによって保持される。軸流スワラの中心軸（ハブ）は、二次燃料インジェクタとしての機能を備えている。このスワラの概略図と燃焼室組み込み時の写真を、それぞれ、図 2(a), (b) に示す。スワラは、45 度の旋回角を持つ 12 枚のブレードで構成される。二次燃料は、主燃料とは別系統で供給され、ハブ先端の周上に等間隔で 12 ヶ所、中心軸に対して 30 度の傾きをもつ直径 0.8mm の細孔から噴射される。図 3 には制御と計測のシステム構成が示されている。燃焼器壁面の圧力変動は、圧力トランスデューサを用いて計測した。混合室に 1 ヶ所 (PT1) と燃焼室に 3 ヶ所 (PT2-PT4) の合計 4 ヶ所で計測を行った。PT2 の圧力変動信号は、火炎自発光画像計測のための ICCD カメラのトリガー信号にもなっている。さらに、この PT2 からの信号は、制御時には、コントローラへの入力信号として用いられている。アクチュエータとして、高速応答バルブが二次燃料供給ラインに組み込まれている。コントローラからのコマンドによって流路開度が変動し、それに伴って、二次燃料の流量に変動が与えられる。

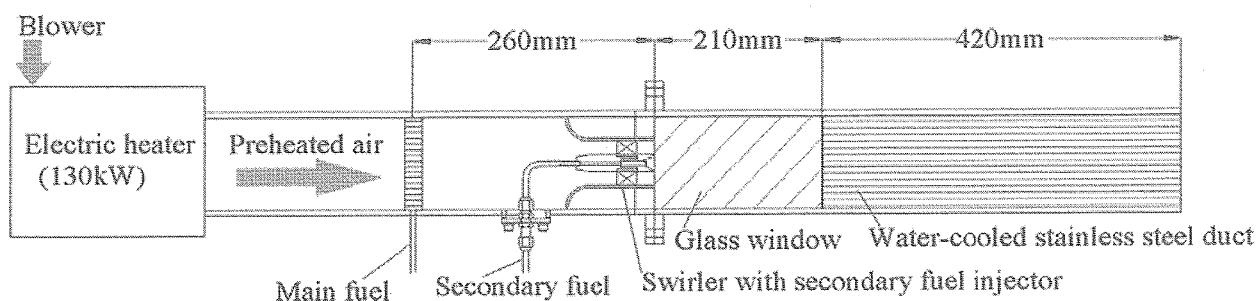


Fig.1 Combustion test rig

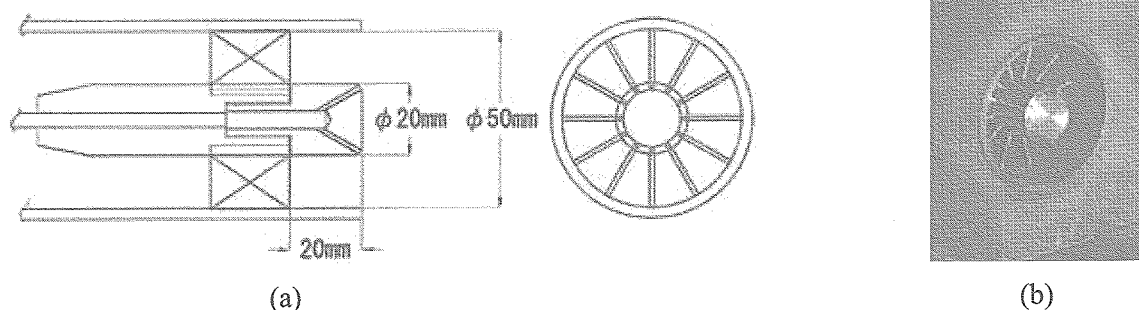


Fig.2 Design of the axial swirler with a secondary fuel injector (a) and its photo from downstream side (b)

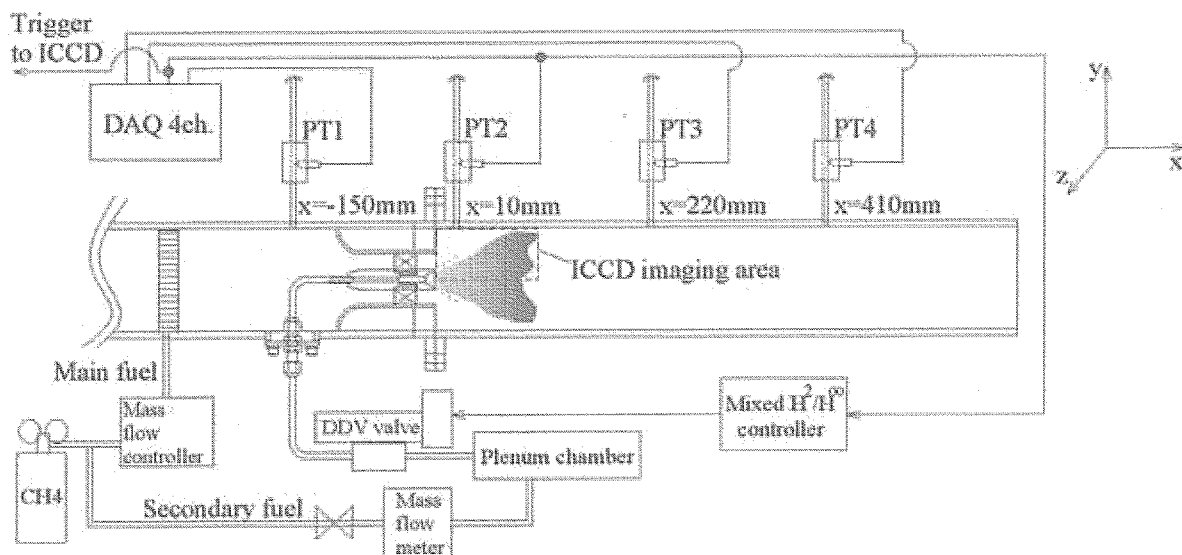


Fig.3 System for measurement and control

### 3. 2 燃焼器の振動特性と制御対象条件

二次燃料噴射を行わずに、主燃料のみを用いて、当量比を増加させていったときの PT2 における圧力振動スペクトルの推移を図 4 に示す。この実験では、入口温度、空気流量を、それぞれ、700K、78g/s（スワラ断面流速 $\sim 90\text{m/s}$ に相当）とし、主燃料流量を増やすことで、当量比を 0.43 から 0.60 まで、0.01 刻みで増加させている。スペクトルピークに着目すると、当量比 0.45 の条件で音圧レベル 160dB を超えるピークがあらわれ、当量比 0.48 では、170dB に到達する。当量比 0.48-0.55 の間では、170dB ピークを持続しつつ、当量比の増加に伴って、ピーク周波数が 230Hz 付近から 300Hz 付近へとシフトしている。そして、当量比 0.55-0.56 の間で、にわかに振動が治まり、そのまま当量比 0.60 までなだらかにピークを下げていく。PT2-PT4 の 3 ヶ所で計測されたスペクトルピーク値の比較から、当量比 0.45-0.55 にかけての不安定モードは、燃焼器縦方向の 1/4 音響モードであることが報告されている[11]。また、燃焼器出口のガス分析結果[10]から、当量比 0.50 付近の強い圧力振動が発生する条件は、低 NO<sub>x</sub>、CO 排出を示す条件と重なっていることも報告されている。低エミッション性を示しながら強い圧力振動の発生する条件として、当量比 0.50 の条

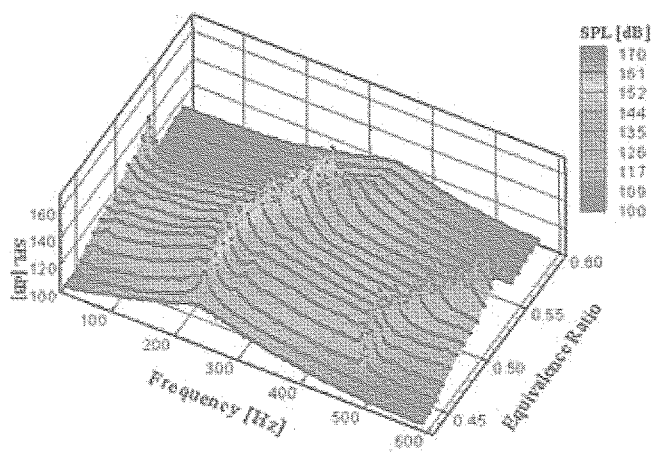


Fig.4 SPL spectra when increasing equivalence ratio from 0.43 to 0.60.  $T_{in}=700\text{K}$ ,  $Q_{air}=78\text{g/s}$ . [9]

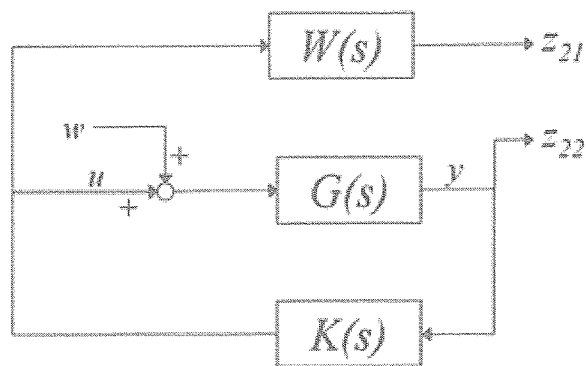


Fig.5 Block diagram of the control system.  $y$  is the observed output from the system,  $u$  is the control input and  $w$  is the disturbance.  $z_{21}$  and  $z_{22}$  are the control variables with respect to the control input and the observed output, respectively.

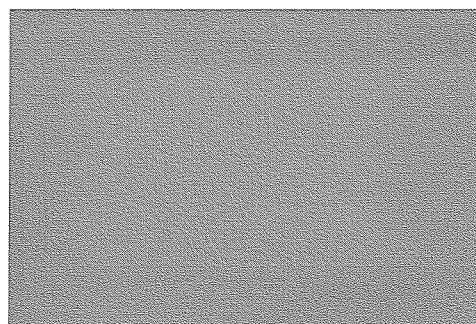
件を制御の対象とした。全体当量比を 0.50 で一定に保ちながら、二次燃料噴射制御を行う。

### 3. 3 二次燃料噴射によるアクティブ制御

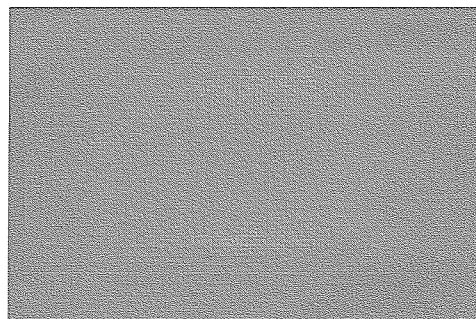
混合 $H^2/H^\infty$  制御系のブロックダイアグラムを図 5 に示す。  $G(s)$  ,  $K(s)$  は、それぞれ、系の伝達関数とコントローラを意味している。  $y$  は系の出力,  $u$  は制御入力,  $w$  は外乱,  $z_{21}$  は制御入力に対する制御量,  $z_{22}$  は出力に対する制御量をあらわしている。  $w$  から  $z_{21}$  までの $H^\infty$  ノルムについての制約条件のもとで、  $w$  から  $z_{22}$  までの $H^2$  ノルムを最小化するように制御系が設計された。 実験モード解析に基づくシステム同定試験と制御系設計の詳細については、文献[10,13]に報告されている。

二次燃料噴射制御においては、(コントローラによる流量変動の付与なしに) 定常的に噴射させるだけでも、火炎構造が変わることによって燃焼器の音響特性が変化することに注意しなければならない。 非制御/定常噴射/制御時の火炎の様子を、それぞれ、図 6 (a) -

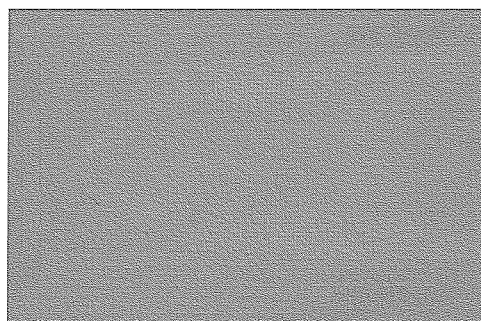
(c) に示す。 図中、左端が燃焼室入口で混合ガスは右向きに流入する。 非制御時と制御時で火炎の様子が大きく異なることがわかる。 非制御時は、スワールハブ後流とダンプ部の両方に火炎が存在することがわかる (図 6 (a))。 これに対し、二次燃料の定常噴射を行うと、スワールハブ後流にラップ状に広がる火炎構造が強く現われ、ダンプ部におけるリム火炎の存在範囲が小さくなることがわかる (図 6 (b))。 そして、アクティブ制御時には、ダンプ部のリム火炎が見られなくなる (図 6 (c))。 これらの特徴から、外側再循環領域における火炎の挙動と燃焼器の振動特性との間に強い相関があることが示唆さ



(a) No control case



(b) Steady injection case



(c) Active control case

Fig.6 Direct images of the flames.  $T_{in}=700K$ ,  $Q_{air}=78g/s$ , Overall ER=0.50, SFP=3%.

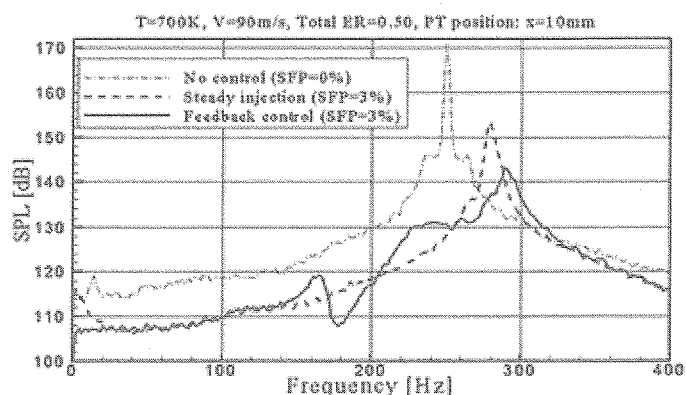


Fig.7 SPL spectra of no control, steady injection and active (feedback) control cases.  $T_{in}=700K$ ,  $Q_{air}=78g/s$ , Overall ER=0.50, SFP=3%.[10]

れる。実際、圧力変動と OH\* 自発光変動との間の位相相関解析から、定常噴射時には外側再循環領域に強い相関を示す領域が存在することが報告されている[11]。このような火炎構造の変化は、二次燃料噴射の量、位置、角度に強く依存するため、コントローラの設計を行う事前段階で、これらの要素をパラメータとした実験を行って、効果的なインジェクタ形状を決定することが重要である。筆者のグループでは、パラメトリックスタディを実施し、本稿で扱うインジェクタが効果的な形状を有していることを示している[11]。

図 7 は、総燃料流量に対する二次燃料流量の割合 (Secondary Fuel Percentage, 以下, SFP.) が 3% の条件における制御結果を示している。比較のため、非制御時 (即ち、振動燃焼発生時) と定常噴射時のスペクトルも示している。非制御時に 171dB あったピークレベルは、二次燃料の定常噴射によって 154dB まで 17dB 低減する。この状態で混合  $H^2/H^o$  コントローラを導入することによって、定常噴射のピークレベルから、更に 10dB の低減効果が得られることがわかる。前者が火炎全体構造の変化による効果、後者がフィードバック制御による音響低減効果とすることができる。

#### 4. まとめ

希薄予混合ガスタービン燃焼器で発生する振動燃焼を対象として、二次燃料噴射によるアクティブ制御を実施した。実験は、入口温度 700K、空気流量 78g/s、全体当量比 0.50、二次燃料割合 3% の条件において行われた。二次燃料の定常噴射制御によって、振動燃焼発生時のピークレベルから 17dB の低減効果が得られた。その上で、混合  $H^2/H^o$  コントローラによるフィードバック制御を導入することで、定常噴射時のピークレベルから、更に 10dB の低減効果が得られた。

関連して行ってきた研究で、本稿では紹介されなかったトピックとして、二次燃料割合を変化させたときの制御効果の違いや NOx 排出への影響[11]、自発光センサーの適用可能性に関する研究[6]、レーザー誘起プラズマ分光分析法による振動燃焼時の当量比変動の計測[12]などが挙げられる。

この分野の研究開発は、エンジンメーカーと大学・公的研究機関との共同研究という形で、特に欧米において、盛んに行われている。航空用・産業用の実用エンジンに搭載されるためには、高温高圧環境下において、広い作動範囲でロバストな制御技術が実証されなければならない。現段階では、そのような技術は確立されておらず、高速応答性、高振幅な動作性、高い耐久性を備えたアクチュエータの開発や作動条件によって変化する複数の音響モードへの対応など、克服すべき技術課題が多数存在する。基礎的な観点から見ても、剥離渦－火炎間、壁面－火炎間の干渉問題のような燃焼器内部における非定常現象の解明やそのモデル化、流入速度擾乱に対する乱流火炎の応答性の研究など、興味深いテーマが複数挙げられる。このような現況から、今後も、基礎・応用双方の観点から、燃焼制御に関する研究が、盛んに取り組まれていくものと考えられる。

また、エンジンの健全性モニタリング技術や異常検知技術といった観点からの燃焼計測・解析技術も重要視されている。航空機エンジンは、いわゆる MRO ビジネスの一つと位置づけられ、このような技術の高度化によって、メンテナンスコストが削減されることは、エンジンメーカーにとって、非常に魅力的なことであるに違いなく、今後ますます、注目されていくことが期待される。我々のグループにおいても、上述の観点から、燃焼状態診断センサーの研究開発に取り組んでいるところである[4,6,12,14,15]。

本研究は、文部科学省の開放的融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」の支援によって実施された。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.210, Edited by Lieuwen,T.C. and Yang, V. (2005)
- [2] Dowling, A.P. and Morgans, A.S., "Feedback Control of Combustion Oscillations", *Annu. Rev. Fluid Mech.* 37 (2005) pp.151-182.
- [3] Tachibana, S., Zimmer, L., Yamamoto, T., Kurosawa, Y., Yoshida, S. and Suzuki, K. "Toward active control of turbulent combustion. Development of the demonstration combustor system", *Proc. of the 5th Symposium on smart control of turbulence*, (2004) pp175-183.
- [4] Zimmer, L., Tachibana, S. "Utility of chemiluminescence monitoring for active control of combustion", *Proc. of the 5th Symposium on smart control of turbulence*, (2004) pp85-94.
- [5] Tachibana, S., Zimmer, L., Kurosawa, Y., Suzuki,K., Shinjo, J., Mizobuchi, Y. and Ogawa, S., "Active Control of Combustion Oscillations in a Lean Premixed Combustor by Secondary Fuel Injection", *Proc. The 6th Sym. Smart Control of Turbulence* (2005) pp.181-190.
- [6] Zimmer, L., Tachibana, S., Tanahashi, M., Shimura, M. and Miyauchi, T., "Sensors for Active Control of Turbulent Combustion", *Proc. The 6th Sym. Smart Control of Turbulence* (2005) pp.163-172.
- [7] 立花繁, Zimmer Laurent, 黒澤要治, 鈴木和雄 "メタン-空気予混合燃焼器における振動燃焼の2次燃料噴射による能動制御", *日本流体力学会年会 2005 講演論文集*(2005年9月7日) p.254.
- [8] 立花繁, Zimmer Laurent, 黒澤要治, 鈴木和雄 "希薄予混合モデル燃焼器における振動燃焼のフィードバック制御", *第43回燃焼シンポジウム講演論文集* (2005年12月6日, 東京), pp. 214-215.
- [9] 立花, ジマー, 黒澤, 鈴木"二次燃料噴射による振動燃焼の能動制御", *ながれ*, 25巻 第3号 (2006) pp.219-227.
- [10] Tachibana, S., Zimmer, L., Kurosawa, Y., Suzuki,K., Sato, H., Hayashi, A. K., Nishidome, C. and Kajiwara, I., "Active Control of Combustion Oscillations in a Lean Premixed Gas-Turbine Combustor" *Int. J. Vehicle Des.* (2006)(to appear)
- [11] Tachibana, S., Zimmer, L., Kurosawa, Y., Suzuki,K., "Active Control of Combustion Oscillations in a Lean Premixed Combustor by Secondary Fuel Injection Coupling with Chemiluminescence Imaging Technique" *Proc. Combust. Inst.* (2007) (to appear)
- [12] Zimmer, L. and Tachibana, S., "Laser Induced Plasma Spectroscopy for local equivalence ratio measurements in an oscillating combustion environment", *Proc. Combust. Inst.* (2007) (to appear)
- [13] 下嶋, 松永, 小池, 梶原, "モード解析に基づく複数の制御音源を用いたフィードバック音響制御", *日本機化学会論文集(C編)*, 65巻 633号(1999) pp.1849-1856.
- [14] Koyama, M., Fujiwara, H., Zimmer, L. and Tachibana, S. (2006) "Effects of swirl combination and mixing tube geometry on combustion instabilities in a premixed combustor", *Proc. of ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air* 8-11 May 2006, Barcelona, Spain, GT2006-90891.
- [15] 立花, Zimmer, 黒澤, 鈴木 "ダンピングファクターによる振動燃焼制御効果の評価について", *日本流体力学会年会 2006*, (2006年9月17日, 福岡)