スピーカー型シンセティックジェットによる 浮き上がり火炎の能動制御*

小河原 加久治^{*1}, 西村 龍夫^{*1}, 桑原 大輔^{*2}
北澤 雅之^{*1}, 石田 喜一^{*2}

Active Control for Lifted Flame using a Speaker-Driven Synthetic Jet

Kakuji OGAWARA^{*3}, Tatsuo NISHIMURA, Daisuke KUWAHARA,
Masayuki KITAZAWA and Yoshikazu ISHIDA

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Lifted flame would be helped high-intensity combustion system like gas turbine for NO_x reduction and improve the limit of flame's blowing off. While lifted flame has various instabilities, flame control technology is necessary for fame stabilizing. In this paper, a speaker-driven synthetic jet actuator for lifted flame control is proposed, and the active control of the height of lifted flame is performed using this actuator. This type of actuator has the advantage of fitting to existing combustion systems and produces high speed jet. Th performance of the speaker-driven synthetic jet actuator is examined by experiments that reduce the height of lifted flame of a propane diffusion flame. In the active control of the height of lifted flame, the Delayed Feedback Control method considering delay time for a control law is applied. The frequency of synthetic jet is fixed and velocity of jet is changed by the control law. The results show that the synthetic jet can lower the instabilities of lifted flame.

Key Words: Active Control, Lifted Flame, Speaker-Driven, Synthetic Jet Actuator

1. 結 論

ガスタービンに代表される実用の燃焼場では、高い熱量を得るために高負荷燃焼が行われる。このとき火炎の吹き飛びを防ぐ保炎技術が重要な問題となる。その対策として、従来ではスワローヤブラフボディを使用して循環流を発生させる方法が用いられるが、これらの受動的制御では火炎を意図した燃焼状態に維持することは難しい。非定常な挙動を示す火炎をさまざまな流動条件の下で制御するためには、燃焼場への状態フィードバックが不可欠である。

今後の燃焼器には高負荷、高効率の他にクリーンな燃焼技術が求められる。最近の燃焼研究において、環境汚染物質である NO_x の排出低減に浮き上がり火炎が有効である¹⁾ことが報告されている。浮き上がり火炎とは、火炎がバーナリムから浮き上がり、浮き上がった状態で火炎が留まる現象である。火炎基部上流で空気と燃料の混合が促進されるため、NO_x 低減に効果的な火炎形態であると指摘されている。この現

象は、燃料噴出速度だけでなく燃焼器の構造や燃料の種類によっても異なる。そして、この状態を放置すると火炎の吹き飛びを引き起こす危険性があることから、その保炎制御技術が必要となる。

既往の浮き上がり火炎制御の研究として、マイクロアクチュエータ群による制御^{2, 3)}やスピーカーを用いた制御⁴⁾が効果を挙げている。前者はノズル内壁に設けた 18 個の電磁アクチュエータを、後者は整流部の壁に取り付けたスピーカーを用いることで、混合気に変動を加え、浮き上がり火炎を安定化させている。しかし、これらの制御装置では構造が複雑で既存の燃焼設備に対しての設置が難しいという問題がある。

本研究では、構造が簡易で既存装置にも取り付け可能なスピーカー型シンセティックジェットアクチュエータ(SSJA)を開発し、実際に浮き上がり火炎に対する有効性を示した。そして、シンセティックジェットにより火炎リフト高さを能動制御し、浮き上がり火炎の安定化を目的とした。

2. スピーカー型シンセティックジェット

火炎を吹き消すことなく火炎基部上流で周囲空気と燃料との混合を促進するためには、周囲流体への吹

* 原稿受付 2005 年 7 月 19 日。

^{*1} 正員、山口大学工学部(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)。

^{*2} 山口大学大学院理工学研究科。

E-mail: ogawara@yamaguchi-u.ac.jp

き出しと吸い込み動作を可能とするシンセティックジェットアクチュエータが有効であると思われる。本研究では、その駆動動力として作製、制御が容易であるという観点からスピーカーを用いた、スピーカーを用いた既往の研究として、スピーカーによって励起した空気噴流の特性を調査し、推進機構として応用する研究が行われている⁵⁾。

2.1 SSJAの構造 図1にSSJAの概観と構造を示す。本アクチュエータは、スピーカー(PIONEER TS-W202F)、縮流部および整流部で構成されている。信号発生器(HEWLETT PACKARD 3312A)で矩形波信号を生成し、アンプ(SONY TA-V7700)によって増幅後、スピーカーに入力し、吹き出しと吸い込みの組み合わせによる空気噴流を励起する。アクチュエータの出口部における噴流の流速と周波数は、アンプへの入力電圧と信号の周波数によって変化させる。

Fig.1 Speaker-driven synthetic jet actuator

2.2 アクチュエータ特性実験 本アクチュエータは、スピーカーに縮流部と整流部を取り付けることで、スピーカー単体とは異なる特性を持つ。スピーカー、縮流部及び整流部の個々の基本的特性を調査するために、図2に示す各型における出口流速を熱線流速計(TESTO 425)で測定した。各型の寸法値は図1と同様である。Type Dはスピーカーボックス後端が密閉されているが、その他の型は後端が開放されており、空気の流れが可能となっている。熱線流速計は噴流出口中央から1cm離れた位置に設置した。ここで、シンセティックジェットの特性上、流速は常に変化しているため10秒間の平均流速を流速と呼ぶことにする。図3は各型における噴流の周波数に対する出口流速を示している。ただし、アクチュエータへの入力電圧は全て13.5V(30Hzのとき)とした。ここで、各

型(Type A~D)の流速が、どの周波数で最大となるかを明確にするために、図3中に各型の流速の最大値から横軸(周波数軸)に対して垂線(破線)を加えた。

スピーカー単体(Type A)の場合は、30Hzで最速となる。スピーカー噴流の流速は振動板の振幅に左右されるため、入力信号の周波数が低い程噴流の流速は速くなる。しかし、低い周波数でスピーカーを正確に駆動することは難しく、本研究で用いたスピーカーの再生周波数帯域は25~4000Hzであるため、本実験では30Hzのとき最大流速を示した。スピーカー単体では入力周波数による流速の差が顕著ではなく、最大流速も他のタイプに比較して低い。スピーカー単体に縮流部を設ける(Type B)と、再生周波数帯域下限において流速が最大となる。さらに、整流部を装着する(Type C)と再生周波数帯域の下限より低い周波数(15Hz)において最大流速を示した。そして、その値は縮流比に対応した流速となった。また、スピーカー後端の開閉の影響については(Type CとType D)、スピーカー後端を開放した方が速い流速を得ることができ、流速のピークも顕著であることが分かる。

Fig.2 Some types of the actuator used in the experiment

Fig.3 Relation between velocity and frequency of synthetic jet (Type A~D)

アクチュエータへの入力電圧一定の条件で、図2に示した各型のアクチュエータ以上の流速を得るためには、さらに縮流比を大きくする必要がある。そこで、図4に示すような縮流部の組み合わせを考案した。同様に測定結果を図5に示す。

Fig.4 Some types of the high velocity actuator

Fig.5 Relation between velocity and frequency of synthetic jet (Type E-G)

図3、図5からアクチュエータ出口での最大流速と周波数の関係は、縮流部と整流部の有無によって変化することが分かる。縮流部のみの場合 (Type B, E) の最大流速が最速であった。一方、整流部を設けた場合 (Type C, D, F, G) ではスピーカーの再生周波数帯域下限より低い周波数 (10~20Hz) において流速にピークがある。この結果は、縮流部に整流部を設置した場合は流速のピークが顕著であるという報告⁵⁾と一致する。噴流の流速が速い程、火炎に与える影響は大きくなるが、流速分布が一様でない場合はその影響が一様でない。そこで、アクチュエータ出口の流速分布を調査し、流速の一様性を確認することにした。アクチュエータ出口中央を原点として熱線流速計を上下に移動させ、各点における流速を測定した。Type EとType Gの測定結果を図6、図7に示す。図6から縮流部のみ (Type E)、出口流速は速くなるが流速分布が一様でなくなる。この傾向は中心から離れるにしたがって著しくなる。一方、整流部を設けた場合 (Type G) は、図7に示すように流速の一様性が縮流部出口

に比べて改善されている。また、Type GはType Eに比べて流速のピークが顕著であることから、入力周波数によって流速を制御することが容易であると考えられる。以上から、浮き上がり火炎制御を目的としたSSJAの構成には、縮流部と整流部をそれぞれ二つ備えたTypeGを適用した。

Fig.6 Velocity distribution at the outlet (Type E)

Fig.7 Velocity distribution at the outlet (Type G)

3. 浮き上がり火炎の計測

本章では制御対象である浮き上がり火炎を観察し、その安定性について考察する。本実験には燃焼器にブラフボディ型燃焼器を使用し、燃料にプロパンを用いた。図8に燃焼装置の概略を示す。燃料は圧力調整機において圧力を調整し、ロータメータにおいて流量を制御して燃焼器に供給される。燃焼器は同軸噴流型になっており、ブラフボディ中央部のノズル (内径 $D=3[\text{mm}]$) より燃料を噴出する。

Fig.8 Combustion equipment

実験はブラフボディ型燃焼器において、静止空气中にノズルから燃料を噴出させ、そこに形成される拡散火炎を CCD カメラにより撮影した。図 9 に本実験において観察される噴流拡散火炎の各燃料流速における瞬時画像を示す。ここで、 H/D は燃料噴出口から火炎基部までのリフト高さ H とノズル径 D の比を示し、この比により火炎のリフト高さを表す。

図 9 から火炎形態は大きく分けて付着火炎と浮き上がり火炎の 2 種類に分類される。ここで、付着火炎とは火炎基部がバーナリムに付着した状態で安定している火炎であり、浮き上がり火炎とは火炎基部がバーナリムから浮き上がり、浮き上がった状態で留まっている火炎である。図 9 において(a)は付着火炎、(b)~(f)は浮き上がり火炎となっている。

図 10 に燃料流速 U_j と H/D の変動範囲の関係を示す。 U_j の増加に伴って H/D は線形的に増加し、それに伴って H/D の変動も増加して燃焼騒音の発生が顕著になる。ここで、火炎の安定性については様々な見方があり、火炎の吹き飛び、浮き上がり、燃焼振動・騒音などの不安定要素の抑制を実現することが火炎の安定性の見方である。浮き上がり火炎の特性としてリフト高さが大きくなるほど、火炎基部上流の部分予混合化が促進され、低 NO_x 燃焼が期待できる²⁾。しかし、リフト高さの増大に伴って吹き飛びの危険性が高まり、図 10 に示したようにリフトの変動も増大することから燃焼振動や燃焼騒音の発生が問題となる。このように、浮き上がり火炎の安定性には火炎のリフト高さが深く関わることから、本研究では H/D を火炎の状態量として扱う。 H/D が抑制され、その変動が小さい場合において、火炎が安定したと見なしている。

Fig.10 Relation between fuel velocity and lifted height

4. SSJA の浮き上がり火炎に対する有効性

本章においては、考案した SSJA の浮き上がり火炎に対する有効性について確認する。図 11 に実験装置の概略を示す。本実験は、ブラフボディ型燃焼器において形成した浮き上がり火炎の火炎基部に対して、噴流（シンセティックジェット）を噴出することで行う。ただし、燃料流速は $U_j = 25.9$ [m/s] とし、 $H/D = 0$ に固定した。計算機で生成した矩形波信号をアンプにより増幅し、アクチュエータに入力することで噴流を励起させる。アクチュエータは噴出口をノズル先端より水平方向に 5 cm ずらし、15 cm 離して設置した。これは噴流が火炎を吹き消すことなく、有効に作用する位置を実験的に求めたものである。アクチュエータへの入力周波数と入力電圧を変化させ、同じ入力周波数の場合でも異なる流速の噴流を誘起させるようにした。火炎の撮影は高速度カメラ（PHOTRON Fastcam-X1280、解像度：256×1280 pixel、濃度表現：カラー 8 bit）により、125 Hz（シャッタースピード 1/125 s）で行った。

Fig.9 Instantaneous images of the natural lifted flame at increasing velocities, U_j [m/s]

撮影した画像から H/D を算出し、この値を火炎の状態量として用いた。

図 12 に噴流の流速 v とアクチュエータへの入力周波数 f を変化させた場合の火炎画像と 5 秒間の H/D の変化を示す。ただし、4 枚の画像は左から右に時間経過しており 1/30 s 毎の火炎画像である。(a) は初期状態 ($H/D = 20$) の浮き上がり火炎であり、(b)～(d) はアクチュエータ作動時の浮き上がり火炎である。また、(b)～(d) のグラフ中の ΔS は、初期状態に対する火炎基部 (部分予混合火炎) の面積変動を表すものであり、以下の式で定義している。

$$\Delta S = \frac{S - S_{H/D=20}}{S_d} \quad (1)$$

ただし、 S は噴流を与えた時の火炎基部面積、 $S_{H/D=20}$ は初期状態における火炎基部面積、 S_d はノズルの出口面積である。

図 12 (b) と (c) は、入力周波数が 10 Hz で流速が異なる場合である。同一周波数のため流速による影響のみが表われている。いずれの場合も、噴流によって火炎のリフト高さが大きく抑制されていることが分かる。特に $v \geq 2.0$ [m/s] の場合 (図 12 (c))、噴流が火炎に吹き付けられた瞬間 (火炎画像の両端) において $H/D = 0$ 付近にまで抑制されている。これは火炎がノズル出口に完全再付着したことを意味し、火炎の吹き飛びや逆火を誘発する危険性が高い。また、 ΔS も最大となり、噴流により火炎全体の形状が乱れてしまっている。笠木らによると、噴流の周波数が低い場合、大きな速度変動が時空間的に安定な火炎伝播を妨げると言われている²⁾。したがって、低周波領域の噴流では、リフト変動が大きく火炎の吹き飛びを誘発しやすいと考えられる。

図 12 (c) と (d) は、流速が 2.0 m/s で、周波数が異なる場合である。 $f = 10$ [Hz] の場合 (図 12 (c)) に比べて、 $f = 30$ [Hz] の場合 (図 12 (d)) では、リフト高さの抑制効果は小さいが、 ΔS は最小であり火炎画像を見ても形状の乱れはほとんどない。笠木らによると、噴流の周波数が高い場合、燃料流速及び混合気濃度の変動が低減されると言われている²⁾。したがって、高周波領域の噴流では、燃料流速と火炎伝播速度が釣り合う位置が時空間的に安定に存在して火炎が保持されることが考えられる。

ここで、SSJA の周期的噴流が火炎のリフト高さが低減するメカニズムについて考察する。噴流によって火炎内側せん断層に乱れが誘起され²⁾、火炎

基部上流において周囲空気と燃料の混合が促進される。これにより可燃混合気を含む混合層が発達し、火炎基部での部分予混合燃焼がノズル軸の中心付近まで行われるため、部分予混合火炎の基部位置 (リフト高さ) が低減すると考えられる。

以上より SSJA の浮き上がり火炎に対する効果について以下にまとめる。

- (1) 噴流の流速が速いほど、火炎のリフト高さの抑制効果は大きい。
- (2) 噴流の周波数が低いほど、火炎のリフト高さ抑制効果は大きい。火炎形状を乱し、火炎の吹き飛びを誘発する危険性がある。
- (3) リフト高さの抑制効果は、噴流の流速よりも周波数による影響が大きい。

以上から、浮き上がり火炎のリフト高さを安定して抑制するには、噴流の流速と周波数の関係が重要であることが分かる。そこで、SSJA の浮き上がり火炎に対する有効範囲を明確にするために、図 13 のようなマップを作成した。図は初期状態 ($H/D = 20$) の浮き上がり火炎に対するアクチュエータの有効範囲であり、横軸はアクチュエータへの入力電圧、縦軸は噴流の平均流速である。 H/D の範囲を 3 つの領域に分けて評価しており、 H/D の値が小さいほどリフト高さの抑制効果が顕著であることを表している。火炎の状態による最適なリフト高さが分かれば、図 13 のマップを用いてリフト高さに応じた入力周波数と入力電圧を決定することが可能である。

Fig.11 Schematic of the experimental setup

Fig.12 Instantaneous time-series images of the lifted flame per 1/30 second ($U_j=25.9$ [m/s])

Fig.13 Effective map of SSJA

5. 能動制御実験

図 11 の実験装置を用いて火炎リフト高さの能動制御実験を行った。制御手法にカオス制御手法の一つである遅延フィードバック制御 (DFC) を用いることで、システムの遅れ時間を考慮し、火炎のリフト高さの変動の安定化を試みた。

5. 1 遅延フィードバック制御 (DFC) DFC は、 τ_d 時刻過去の状態を目標値として、システムをリミットサイクルに収束させることを目的とする制御手法である。遅れ時間を有するシステムにおいて発振を抑制する効果が期待される。目標軌道を厳密に求める必要がないため、OGY 制御と比較して簡便な手法であるといえる⁶⁾。目標周期 τ_d やゲイン K_d の設定によっては発振が増幅されることもあり、理論的にパラメータを決定することは難しい。ここでは、実験的にこれらのパラメータを求めた。図 14 に提案する制御システムを示す。ここで、 $x(t)$ は状態量、 $u(t)$ は制御入力、 r は目標値、 τ_d は目標周期である。式(2)は DFC の制御則あり、 K_n 、 K_d はそれぞれ比例制御と DFC の重みを表す。また、システムの 1 サイクルの処理時間を τ_s で定義した。今回使用した計算機では 1 サイクルの処理時間は約 47[ms]であった。これに SSJA の動作時間を含め、 $\tau_s=0.1[s]$ とした。高速度カメラによって火炎画像を取得した後、計算機においてリフトの状態を推定する。算出した H/D の値から式(2)と図 13 のマップに従ってアクチュエータへの入力決定し、火炎のリフト高さを目標とする状態に制御する。

Fig.14 Active Feedback Control System

$$u(t) = K_n(r - x(t - \tau_s)) - K_d(x(t - \tau_s - \tau_d) - x(t - \tau_s)) \quad (2)$$

5. 2 実験条件及び実験方法 前章で述べたように、SSJA のリフト抑制効果は噴流の流速が速く、周波数が低いほど大きい。また、噴流の周波数がリフト抑制に与える影響は流速よりも顕著であったが、低い周波数は火炎形状を乱し吹き飛びを誘発する危険性が高い。本実験では、火炎のリフト高さの抑制とリフト高さの抑制とリフト変動の安定化を目的とするため、比較的周波数が高く安定してリフトを抑制できる 45Hz を選択した。

実験は、浮き上がり火炎基部に対して噴流を噴出し、火炎リフト高さを目標値まで抑制する。さらに DFC によってリフトの変動を安定に保つように制御をかける。前章と同様に燃料流速は $U_f=25.9$ [m/s] とし、 $H/D=20$ に固定した。目標値 r は 45 Hz のリフト抑制範囲から $r=12$ とした。比例制御ゲインは $K_n=1.0$ とし、目標周期 τ_d やゲイン K_d はパラメータとして変化させた。

5. 3 実験結果及び考察 図 15、図 16 に実験結果を示す。100 s よりアクチュエータを作動させた。両図共に 0~100 s までは制御を施していない状態であり、火炎の揺らぎのため H/D が非定常に変動している。図 15 はアクチュエータの入力周波数 45Hz、入力電圧 8.4V に固定して制御をかけない場合である。

Fig.15 Experimental results without active control

図 16 は、アクチュエータの入力周波数は 45 Hz で固定し、入力電圧に変化を加えて DFC を適用した場合である。このとき $\tau_d=1.0[s]$, $K_d=2.0$ に設定した。

Fig. 16 Experimental results with active control
($\tau_d=1.0$ s, $K_d=2.0$)

図 15 と図 16 を比較すると、能動制御の有無に関わらず 100 s 以降の H/D は目標値近くに抑制されていることが分かる。しかし、出力一定の場合（図 15）は、抑制後の H/D の変動が大きく 150 s 付近から不安定となっている。これに対して DFC を適用した場合（図 16）では、H/D が目標値近くで安定して抑制されていることが分かる。ここで、実験結果を定量的に評価するために、以下の式で表される評価関数 σ を用いる。

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (3)$$

ただし、 σ_1 はリフト高さ H/D の標準偏差、 σ_2 は目標値との残差である。 σ の値が小さいほど、H/D が目標値近くに安定して抑制されていることを表している。実験結果から計算した σ の値を表 1 に示す。(a)~(d)は、DFC 有りで τ_d と K_d の値を変化させた場合である。

Table.1 Estimation of stability for DFC

		σ_1	σ_2	σ
Without DFC		3.59	4.87	4.23
With DFC	(a) $\tau_d=1.0$ $K_d=2.0$	2.87	2.93	2.90
	(b) $\tau_d=1.0$ $K_d=3.0$	3.34	3.36	3.35
	(c) $\tau_d=2.0$ $K_d=2.0$	3.26	3.30	3.28
	(d) $\tau_d=3.0$ $K_d=2.0$	4.41	4.83	4.62

(a), (b)は、 τ_d が同じで、 K_d が異なる場合である。 σ_1 , σ_2 ともに $K_d=2.0$ の方が小さい。

(a), (c), (d) は K_d が同じで、 τ_d が異なる場合である。 $\tau_d=1.0$ [s] と $\tau_d=2.0$ [s] の場合に顕著な差は見られな

いが、 $\tau_d=3.0$ [s] の場合は σ が最大となっており、DFC なしの場合よりも不安定な発振状態に陥っている。

以上から、 $\tau_d=1.0$ [s], $K_d=2.0$ において、H/D を目標値近くに最も安定して制御することができた。

6 結 言

浮き上がり火炎安定化のためにスピーカー型シンセティックジェットアクチュエータ (SSJA) を提案した。SSJA の構成には、その噴流特性から縮流部と整流部をそれぞれ二つ備えた Type G を適用した。シンセティックジェットの流速と周波数を変化させ、浮き上がり火炎のリフト抑制に対する効果を調査した。その結果、噴流の流速が速く、周波数が低いほどリフト抑制効果が大いことが分かった。また、噴流の周波数がリフト抑制に与える影響は流速よりも顕著であった。次に、噴流周波数を 45Hz に固定して遅延フィードバック制御 (DFC) 手法を用いた火炎リフト高さの能動制御実験を行った。その結果 $\tau_d=1.0$ [s], $K_d=2.0$ において、火炎を目標値近くに最も安定して制御することができた。

文 献

- 1) 上島光浩・ほか 4 名：高温空気流中における浮き上がり噴流火炎の予混合化燃焼と NOx 低減、機論，71-701, B(2005), pp.310-315
- 2) 栗本直規，鈴木雄二，笠木伸英：マイクロアクチュエータ群による噴流拡散火炎の能動制御、日本機械学会熱工学講演会講演論文集，pp.451-452(2001)
- 3) 栗本直規，鈴木雄二，笠木伸英：同軸噴流メタン拡散火炎の浮き上がり構造の能動制御，第 41 回伝熱シンポジウム，pp.195-196(2003)
- 4) Y.C.Chao,D.C.Wu and C.H.Tsai : Effects of Acoustic Excitation on the Combustion and Pollution Emission Characteristics of a Jet Flame, IJ.Trans. Phenomena, Vol.2 No.3(2000)
- 5) Daniel E. Paxson, Mark P. Wernet and Wentworth T. John : An Experimental Investigation of Unsteady Thrust Augmentation Using Speaker-Driven Jet, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp.1-12(2004)
- 6) 潮俊光：カオス制御，朝倉書店，pp.33-36(1996)