

ダブルット流を用いた火炎の 吹き飛び限界の向上

鮫島 大樹* 陳 仕敏サイモン** 矢野 利明*** 鳥居 修一***

FLAME BLOWOFF LIMIT EXTENSION BY DOUBLET FLOWS

Taiki SAMESHIMA, Sze Man Simon CHAN, Toshiaki YANO and Shuichi TORII

The present study deals with the major parameter governing the positive effects on the blowoff limit extension and lift-off alleviation of turbulent jet diffusion flames when a flame holding technique, named doublet flows, was being used. Doublet flows were formed in a concentric annulus, in which a fuel jet was ejected from a fuel nozzle while air was being sucked into an outer cylinder encompassing the nozzle. Three cylinders of different sizes were employed. The lift-off morphologies of a normal jet flame and flames under the influence of doublet flows were recorded and analyzed by means of an 8mm video camera as well as an image processing device. Results showed that (i) an increase in air-suction volume flow rates extends the blowoff limits and lowers the lifted flames and (ii) the major parameter governing the positive effects is the effective air-suction momentum flux.

Keywords : Doublet flows, Liftoff, Blowoff, Momentum flux

1. 緒 論

ボイラーやガスタービンのような工業用燃焼装置は、安全性が高く、取り扱いが比較的容易である事が望まれるため、逆火の危険のない拡散火炎がよく利用される。これらの燃焼器において、高負荷燃

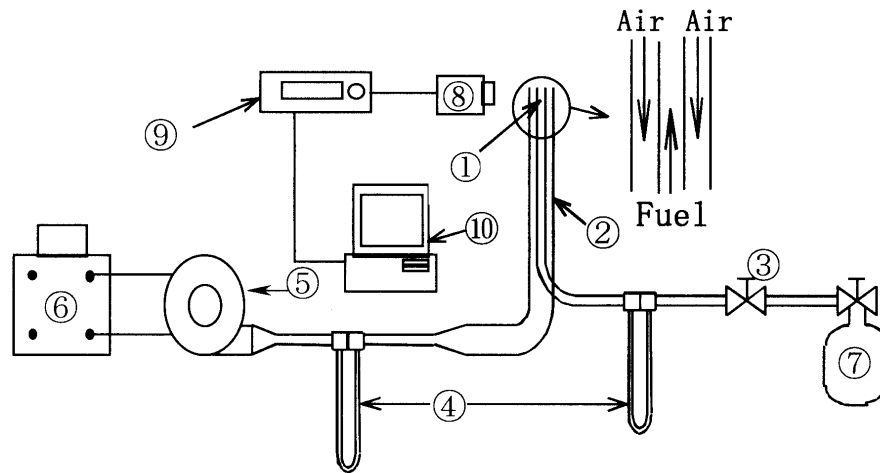
焼を達成させるには燃料流速を大きくする必要があり、しかし、拡散火炎の基部は燃料流速の増加とともにバーナリムから浮き上がり、さらに燃料流速を増加させると火炎は吹き飛んでしまう¹⁾。そこで吹き飛びを起こさずに高負荷燃焼を達成させるために、様々な保炎技術が考案されている。その例として、パイロット火炎を用いて主流となる火炎を安定化させる方法²⁾や、bluff body を用いて比較的安定な渦を発生させ保炎する方法³⁾などがある。著者らは、バーナと同軸上に空気を設置し、内管から燃料の吹き出し、外周空气管から空気を吸い込

2001 年 8 月 31 日受理

* 博士前期課程機械工学専攻

** 博士後期課程システム情報工学専攻

*** 機械工学科



- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Inner fuel nozzle | 6. Voltage alternation device |
| 2. Outer cylinder for air-suction | 7. Fuel bomb |
| 3. Needle valve | 8. Video camera |
| 4. Orifice and manometer | 9. Time device |
| 5. Blower for air-suction | 10. Personal computer |

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Experiment Code	d_f (mm)	d_a (mm)	$Q_a \times 10^3$ (m ³ /s)
①	2.1	9.0	0~1.5
②		13.0	
③		22.3	

むこととせん断流れ場を生じさせ、燃料と空気の拡散混合を促進させるダブルレット流を用いて拡散火炎の吹き飛び制御の研究¹⁾を行ってきた。本研究ではダブルレット流を用いた場合、火炎の浮き上がりや吹き飛びにおよぼす影響を評価するパラメータとして吸い込み空気流速、質量流量、および運動量フラックスに着目し実験を行い、その結果について報告する。

2. 実験装置および実験条件

実験装置の概略を図1に示す。燃料はプロパンを

使用し、ボンベの2次圧は0.5kgf/cm²に設定した。吸い込み空気流量を変化させるためにブロワーを使用した。また、吸い込み空気流量 Q_a と燃料流量 Q_f は、それぞれスライダックとニードルバルブで調節した。実験に使用した外周空気管内径 d_a とバーナ内径 d_f 、および実験条件は表1に示す。実験は外周空気管と吸い込み空気流量 Q_a を変化させて行った。実験前に乱流拡散火炎になることを確認するため、ダブルレット流を使用していない状態で拡散火炎を作り、レイノルズ数 R_e を $R_e=3000$ から10000まで変化させた予備実験を行った。その結果、HottelとHawthorneの結果¹⁾と同様にプロパンを燃焼させ

た場合、火炎が層流から乱流に遷移する Re は 9100 から 10000 迄の間で起きることを確認した。

実験において吸い込み空気流量を一定に保ちながら、燃料流速を徐々に上げていき、火炎が安定してから、8ミリビデオカメラで撮影（シャッタースピード 1/250、明るさ 13）した。また、火炎と背景を識別しやすくする為に黒色で塗った板を火炎の後方に設置した。

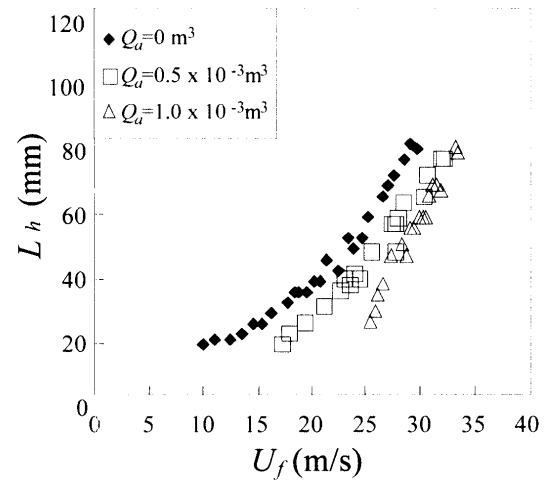
3. 実験の結果および考察

3.1 火炎の浮き上り高さへの影響

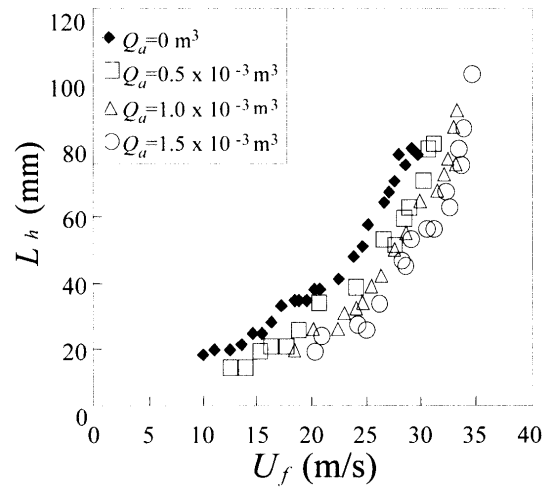
図 2(a) (b) (c) は、表 1 の実験条件(①~③)における代表的な例での、火炎の浮き上り高さ L_h と吸い込み空気流量 Q_a の関係を示している。図 2 において燃料流速 $U_f \doteq 20$ m/s、吸い込み空気流量 $Q_a = 0.5 \times 10^{-3}$ m³/s の点を見ると、内径 $d_a = 9.0$ mm の外周空気管を使用した場合の火炎基部の浮き上がり高さは $L_h \doteq 27$ mm、 $d_a = 13.0$ mm の場合は $L_h \doteq 30$ mm、 $d_a = 22.3$ mm の場合は $L_h \doteq 31$ mm である。これらのことから、吸い込み空気流量 Q_a を増加していくと火炎の浮き上がり高さ L_h は低くなり、火炎基部を引き下げる効果があることがわかる。特に、同一の燃料流速、吸い込み空気流量であっても、外周空気管の内径 d_a が小さいほうが火炎基部を引き下げる効果が高いことがわかる。

3.2 火炎の吹き飛びへの影響

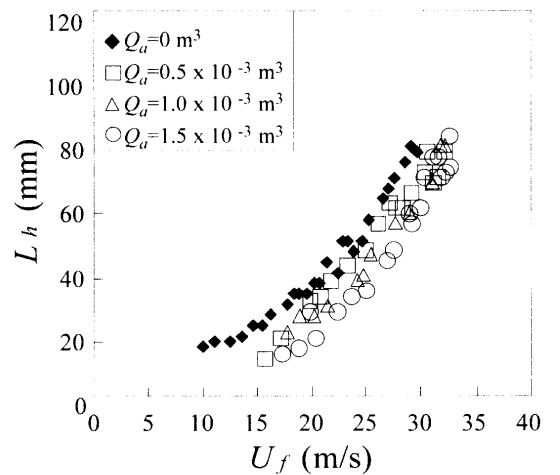
図 3 は、表 1 の実験条件(①~③)における火炎が吹き飛ば燃料流速 U_b と吸い込み空気流速 U_a の関係を示している。吸い込み空気流速 U_a と火炎が吹き飛ば燃料流速 U_b はそれぞれ、ダブレット流を用いていない場合での火炎が吹き飛ば燃料流速 U_{b0} によって無次元化されている。実験の結果より、ダブレット流を用いると火炎の吹き飛び限界が向上されることがわかる。しかし、異なる内径の外周空



(a) $d_a = 9.0$ mm



(b) $d_a = 13.0$ mm



(c) $d_a = 22.3$ mm

Fig. 2 Flame lift-off height L_h against mean fuel flow velocity U_f

気管を用いた場合、同じ吸い込み空気流速比 U_a/U_{fb0} であっても、同じ火炎が吹き飛ぶ燃料流速比 U_{fb}/U_{fb0} は得られない。よって、吸い込み空気流速 U_a は火炎の吹き飛び限界を向上させる効果を評価するパラメータとしては不適切であると考えられる。

図4は、表1の実験条件(①~③)における吸い込み空気質量流量 m_a と火炎が吹き飛ぶ燃料流速 U_{fb} の関係を示している。吸い込み空気質量流量 m_a と火炎が吹き飛ぶ燃料流速 U_{fb} はそれぞれ、ダブレット流を用いていない場合での火炎が吹き飛ぶ燃料質量流量 m_{fb0} と燃料流速 U_{fb0} によって無次元化されている。吸い込み空気質量流量 m_a は式(1)によって求められる⁵⁾。

$$m_a = \frac{\pi}{4} d_a^2 U_a \rho_a \quad (1)$$

同様に、ダブレット流を用いていない場合に火炎が吹き飛ぶ燃料質量流量 m_{fb0} は式(2)によって求められる⁵⁾。

$$m_{fb0} = \frac{\pi}{4} d_f^2 U_{fb0} \rho_f \quad (2)$$

ρ_a と ρ_f は、それぞれ空気と燃料の密度である。実験結果から、火炎の吹き飛び限界は、吸い込み空気質量流量比 m_a/m_{fb0} の増加とともに向上されている。しかし、同じ吸い込み空気質量流量比 m_a/m_{fb0} であっても、同じ火炎が吹き飛ぶ燃料流速比 U_{fb}/U_{fb0} は得られない。よって、吸い込み空気質量流量 m_a は火炎の吹き飛び限界を向上させる効果を評価するパラメータとしては不適切であると考えられる。

上記より、外周気管の断面によって求めた吸い込み空気の平均流速 U_a 、および質量流量 m_a のすべてが火炎に影響をおよぼすのではなく、その範囲には有効領域が存在し、この有効領域内の吸い込み空気が火炎の吹き飛び限界に影響をおよぼすと考えられる。

実験の考察から、火炎基部が浮き上がった状態で

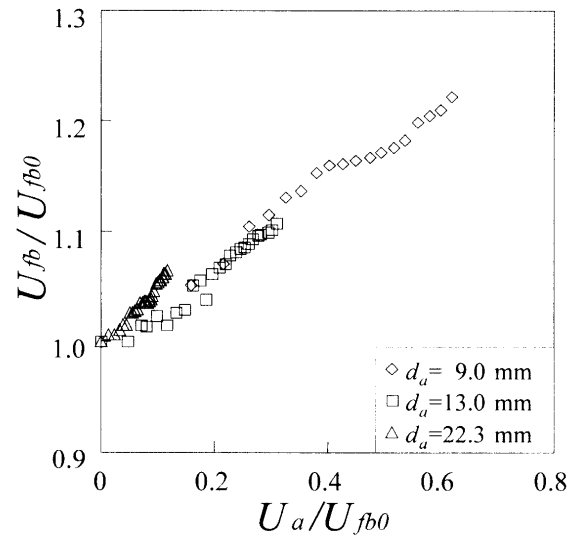


Fig. 3 Effect of air-suction velocity U_a on flame blowoff limits

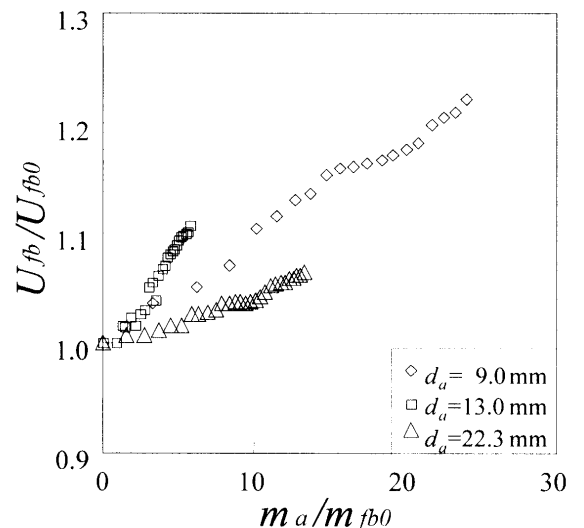


Fig. 4 Effect of air-suction mass flow rate m_a on flame blowoff limits

燃料流速を一定に保ち、ダブレット流を用いて吸い込み空気流量 Q_a をある値にすると、火炎がバーナリムに付着するが、その値を超えると、火炎は外周気管中に吸い込まれる。逆にその値より Q_a を小さくすると、火炎は再び浮き上がる。このことより、火炎基部がバーナリに付着する条件は、この有効領域での吸い込み空気運動量フラックス M_{ae} と燃料運動量フラックス M_f が等しくなることであると考えられる。また、吸い込み空気有効領域は式(3)のよう

に有効直径 d_{ae} で表わされる⁶⁾。

$$d_{ae} = d_f \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \quad (3)$$

M_{ae} および M_{fb} は式(4)と(5)で表わされる⁶⁾。

$$M_{ae} = \frac{\pi}{4} d_{ae}^2 \rho_a U_{ae}^2 \quad (4)$$

$$M_{fb} = \frac{\pi}{4} d_f^2 \rho_f U_f^2 \quad (5)$$

火炎基部がバーナに付着する条件は以下の通りである。

$$M_{ae} = M_{fb} \quad (6)$$

式(3)、(4)、(5)、(6)によって、有効領域での吸い込み空気流速 U_{ae} は式(7)のように表される。

$$U_{ae} = U_f \quad (7)$$

式(7)の燃料流速 U_f は火炎基部が浮き上がる寸前の燃料流速である。これらのことは、有効吸い込み空気運動量フラックス M_{ae} が浮き上がった火炎に影響をおよぼすことを示し、また、 Q_a の増加に伴う M_{ae} の増加は火炎の吹き飛び限界を向上させ、火炎が吹き飛ばす燃料運動量フラックス M_{fb} を増加させると考えられる。ここで、 M_{fb} は式(8)によって求められる。

$$M_{fb} = \frac{\pi}{4} d_f^2 \rho_f U_{fb}^2 \quad (8)$$

Q_a の増加に伴い U_{fb} が増加することは、 M_{ae} の増加によって M_{fb} が増加することを意味し、このことから M_{ae} と M_{fb} の間には火炎の吹き飛び限界を向上させることと何らかの関係があると考えられる。このことを確かめるために、実験(実験条件①～③)によって有効吸い込み空気運動量フラックス M_{ae} と火炎の吹き飛び流速 U_{fb} との関係を調べた。その結果、ある臨界値になると火炎は吹き飛び、その臨界値 C_r を M_{ae} と M_{fb} を考慮して以下のように設定した。式(9)より、 C_r が 1.0068 になると吹き飛びが起き、 M_{ae} は吹き飛び限界と密接な関係があることが考えられる。そこで、式(9)が成り立つかを確認するた

めに、式(10)のように変形し、火炎が吹き飛ばす燃料流速 U_{fb} を求めた。

$$C_r = e^{\frac{M_{ae}^2}{M_{fb}^2} \left(\frac{U_{ae}}{U_{fb}} \right)^2} \quad \text{or} \quad C_r = e^{\frac{d_{ae}^2 \rho_a}{d_f^2 \rho_f} \left(\frac{U_{ae}}{U_{fb}} \right)^2} \quad (9)$$

$$U_{fb} = \left(\frac{d_{ae}^2 \rho_a}{d_f^2 \rho_f \ln C_r} \right)^{\frac{2}{13}} U_{ae} \quad (10)$$

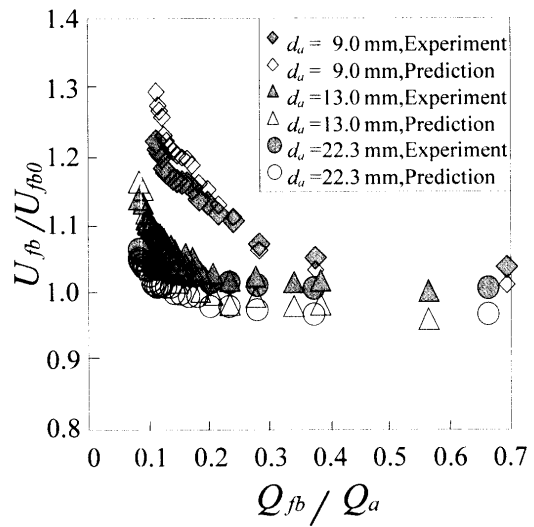


Fig. 5 Dimensionless fuel to air-suction volume flow rate ratio Q_{fb}/Q_a against dimensionless maximum fuel flow velocity ratio at blow-off U_{fb}/U_{fb0} of flames under the influence of doublet flows and a normal jet flame

式(10)によって求められた値と実験条件(①～③)における実験値と比較し、その結果を図5に示す。図5は火炎が吹き飛ばす燃料流量 Q_{fb} と吸い込み空気流量 Q_a との比に対し、ダブルット流を使用した場合に火炎が吹き飛ばす燃料流速 U_{fb} とダブルット流を使用していない場合に火炎が吹き飛ばす燃料流速 U_{fb0} との比による関係を示している。この図より、式(10)による計算値は実験値とほぼ一致することがわかる。よって、有効吸い込み空気運動量フラッ

クス M_{ae} は、ダブレット流を用いた場合に火炎の吹き飛び限界を向上させる効果を評価するパラメータとして適していると考えられる。

4. 結論

ダブレット流が火炎の吹き飛びに与える影響を評価するパラメータについて実験的に解析を行った結果、次のような結論を得た。

- (1) ダブレット流を用いることにより、浮き上がった火炎基部を引き下げ、火炎の吹き飛び限界を向上させることができる。
- (2) ダブレット流が火炎におよぼす影響を評価するパラメータとして、有効吸い込み空気運動量フラックスは適している。

5. おもな記号

C_r : ダブレット流を用いた場合に火炎の吹き飛びがおきる臨界値
 d_a : 外周空気管内径(mm)
 d_{ae} : 吸い込み空気の有効直径(mm)
 d_f : バーナの内径(mm)
 L_h : バーナリムから測定した軸方向の火炎基部の浮き上がり高さ(mm)
 m_a : 吸い込み空気の質量流量(kg/s)
 m_{fb0} : ダブレット流を用いていない場合に火炎が吹き飛ぶ燃料質量流量(kg/s)
 M_{ae} : 有効吸い込み空気運動量フラックス ($\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$)
 M_f : 燃料運動量フラックス($\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$)
 M_{fb} : ダブレット流を用いた場合に火炎が吹き飛ぶ燃料運動量フラックス($\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$)
 Q_a : 吸い込み空気流量(m^3/s)
 Q_f : 燃料流量(m^3/s)

Q_{fb} : ダブレット流を用いた場合に火炎が吹き飛ぶ燃料流量(m^3/s)

Re : レイノルズ数

U_a : 吸い込み空気の平均流速(m/s)

U_{ae} : 有効吸い込み空気流速(m/s)

U_f : 燃料流速(m/s)

U_{fb} : 火炎が吹き飛ぶ燃料流速(m/s)

U_{fb0} : ダブレット流を用いていない場合に火炎が吹き飛ぶ燃料流速(m/s)

ρ_a : 空気密度(kg/m^3)

ρ_f : 燃料密度(kg/m^3)

参考文献

- 1) Hottel H.C. and Hawthorne W.R., 3rd Symposium (International) on Combustion, pp.254-266, (1949)
- 2) Jensen W.P. and Shipman C.W., 7th Symposium (International) on Combustion, pp.674-680, (1959)
- 3) Zulkoski E.E. and Marble F.E., Proceedings of the Gas Dynamics Symposium On Aerothermochemistry, Northwestern University Press, Evanston, pp.205-210, (1956)
- 4) 陳、荒木、矢野、鳥居、飯野、第 36 回燃焼シンポジウム、pp. 259-261、(1998)
- 5) 辻 正一、燃焼器工学、日刊工業新聞社、p. 50、(1969)
- 6) ベア/シガー、燃焼の空気力学、日本熱エネルギー技術協会、p. 15、(1976)