

流量変動が同軸流拡散火炎のすす排出に及ぼす影響*

末永 陽介^{*1}, 小沼 真祐^{*2}, 北野 三千雄^{*3}

Influences of Fluctuating Flow Rate on Soot Emission from Coflow Diffusion Flame

Yosuke SUENAGA^{*1}, Shinsuke KONUMA and Michio KITANO

^{*1} Dept. of Mechanical Engineering, Iwate University,
4-3-5 Ueda, Morioka-shi, Iwate, 020-8551 Japan

We experimentally investigated the soot emission characteristics of the coflow diffusion flame undergoing periodic fluctuation of fuel and air flow rates. The flame has been acoustically forced using sine-wave excitation of a loudspeaker attached to the upstream side of the burner. A fuel (propane) and an air are supplied respectively from inner tube and outer tube. The obtained results are summarized as follows: (1) The soot emission characteristics of the unsteady flame are worse than that of the steady flame. (2) The air flow rate at the soot limit increases monotonously as the mean value of fluctuating fuel flow rate increases as for the soot limit curve when frequency f is small. However, the soot limit curve becomes S shape when f is large. (3) Bulge and the separation of the flame tip are observed at $f=16\text{Hz}$ and the soot emission characteristics deteriorate further. (4) Soot limit curve of the air flow rate change flame is similar to that of the fuel flow rate change flame.

Key Words : Combustion, Diffusion Flame, Soot Emission, Soot Limit

1. 緒 言

拡散火炎は伝播性を持たないため、予混合火炎と比較して安全性が高い。また、混合器を必要としないので燃焼器の構造は単純である。したがって、拡散火炎は多くの燃焼器で用いられている。しかしながら、炭化水素系燃料を用いると容易にすすが排出されるという欠点がある。

拡散火炎からのすす排出に関する研究として、同軸流拡散火炎を用いた研究がある。大塚・北野⁽¹⁾はこの火炎のすす限界には、空気流速、空気比、燃料流量、燃焼管直径が関係することを示した。Kitano and Otsuka⁽²⁾は軸方向に伸長の効果を受ける層流拡散火炎のすす限界について調査し、通常同軸流拡散火炎に比べて、すす排出が抑制されることを明らかにしている。これらの研究で対象とした同軸流拡散火炎は、ある燃焼条件において Kelvin-Helmholtz 型の不安定性に起因する振動現象（フリッカリング）が起こる⁽³⁾。このフリッカリング火炎を、燃料流量を周期的に変動させることで模擬した実験研究がある^{(4)~(7)}。これらの研究では、光学的手法を用いて、時間変化する火炎内部のすす濃度を計測している。その結果、周期的に流量変動させた火炎内部のすす濃度は、その平均燃料流量で形成させた定常火炎に比べて高くなることを示している。また、定常火炎に対する変動火炎のすす濃度の増加割合は、燃料の種類によって異なることも示している。

以上、同軸流拡散火炎を用いたすす排出に関する研究例について述べた。先の燃料流量を周期的に変動させた研究^{(4)~(7)}では、燃料と酸化剤の流量や変動周波数の設定値がかなり限定的である。したがって、本研究では、燃料あるいは空気の流量範囲と変動周波数を種々変化させたときのすす排出率とすす排出限界を調査する。

* 原稿受付 2011 年 5 月 22 日

^{*1} 正員、岩手大学大学院工学研究科（〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5）

^{*2} 東北パイオニア(株)

^{*3} 正員、フェロー、岩手大学（名誉教授）

E-mail: suenaga@iwate-u.ac.jp



2. 実験装置および方法

2・1 燃焼器

燃焼器の概略を図 1 に示す。燃焼器は内管と外管からなる同軸二重円管構造である。内管は内径 7mm のステンレス製、外管は内径 45mm の黄銅製である。外管出口より下流側には内径 46mm のガラス製の燃焼管を設置している。内管および外管・内管の環状部からそれぞれ、燃料と空気を供給した。燃料にはプロパンを使用した。空気流は上流において発泡金属板で整流される。また、燃焼管出口には外気が燃焼管内に流入しないよう、直径 20mm のオリフィスを設置した。

2・2 燃料および空気供給方法

流路系の概略を図 2 に示す。燃料はボンベから、空気はコンプレッサーから供給される。流量はオリフィス流量計とニードルバルブで調節した。燃料と空気の流量変動にはスピーカーを用いた。スピーカーは、電力増幅器で増幅されたオシレーターからの正弦波信号で駆動される。流量の変動振幅はこの駆動電圧を調整することで変化させる。実際の燃料流速の変動振幅は、バーナ出口の上流に設置された熱線風速計 (KANOMAX : System1000) により測定した。空気流速の変動振幅も同様の方法で測定するが、燃料および空気流速の測定位置は燃料管出口端面からそれぞれ、55mm と 65mm 上流である。得られた流速を管内の平均流速とし、これに流路面積を乗じて流量を算出した。流量変動のイメージを図 3 に示す。時間平均流量を Q_{im} 、流量の変動振幅を ΔQ_i とすると、流量 Q_i は、 $Q_i = Q_{im} \pm \Delta Q_i$ で変化する。ここで添え字の i は成分であり、燃料と空気についてそれぞれ、 f と a で区別する。本実験では流量の変動振幅を、燃料については $\Delta Q_f = 0.85 \text{ cm}^3/\text{s}$ (実効値 $0.6 \text{ cm}^3/\text{s}$)、空気については $\Delta Q_a = 35.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ (実効値 $25 \text{ cm}^3/\text{s}$) の一定値とした。

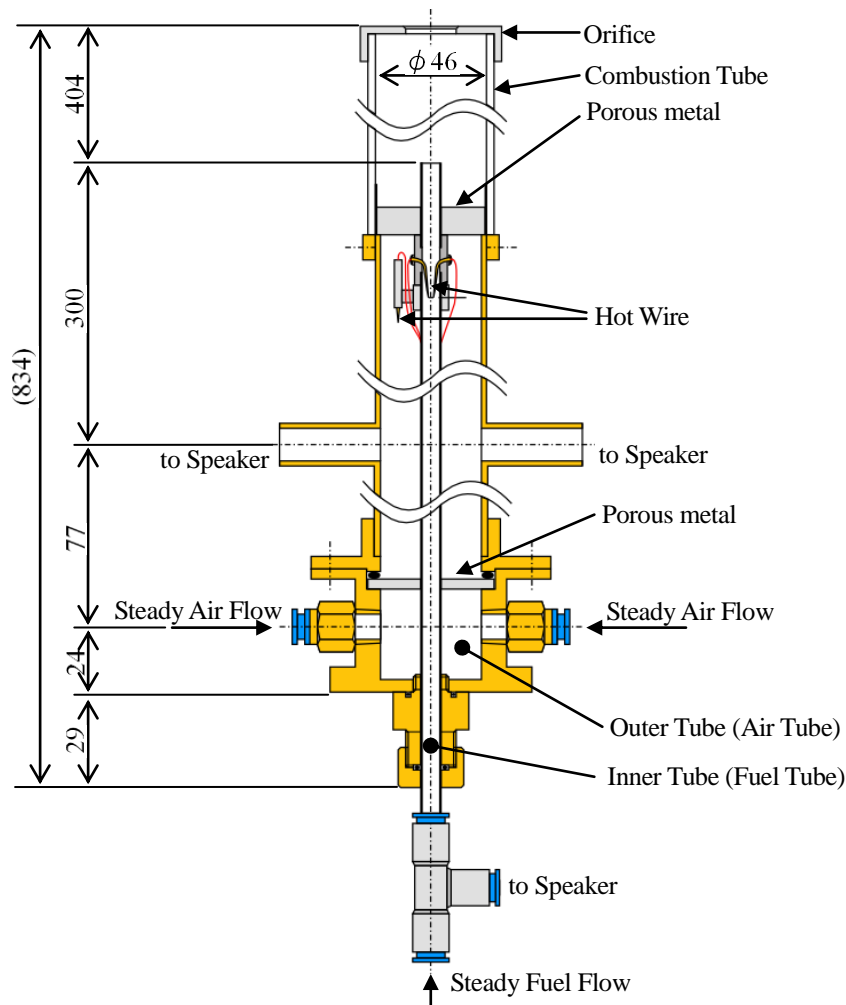


Fig.1 Schematic of the burner

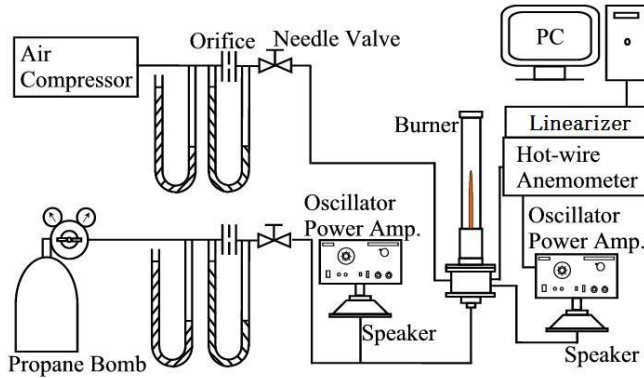


Fig.2 Schematic of gas supplying system

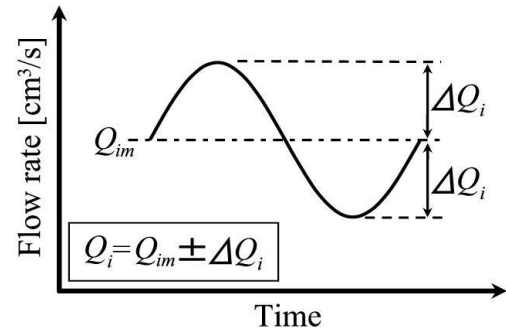


Fig.3 Image of fluctuating flow rate

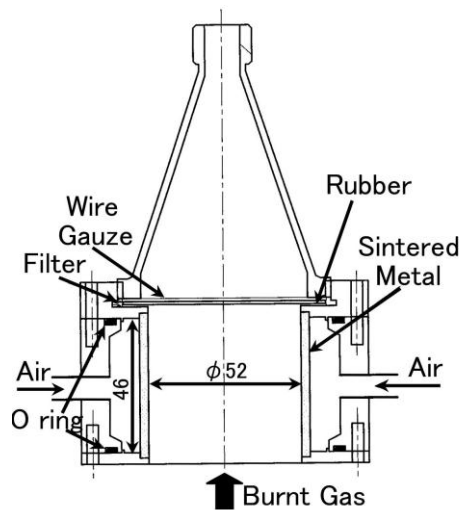


Fig.4 Schematic of soot collection trap

2・3 すず排出量の測定方法

燃料流量 Q_f を一定として空気流量 Q_a を減少させてゆくと、あるいは Q_a を一定として Q_f を増大させてゆくと、やがて火炎からすすが排出される。すす排出量を定量的に評価するため、フィルターを用いてすすを捕集した。捕集器の概略を図4に示す。フィルターには直径70mm、耐熱温度500℃、捕集効率(0.3 μ mDOP%) 99.99%のガラス繊維製の濾紙(TOYO: GB-100R)を用いた。濾紙にはすす前物質も付着することが予想されるが、付着したもの全てをすすとし、採取前後の濾紙の全重量の差分をすす排出量とした。また、濾紙に含まれる水分は、採取前後において乾燥器にて1時間乾燥させることで取り除き、デシケーターで放冷させてから、濾紙の質量を測定した。すすを含む燃焼ガスの吸引は燃焼管出口上部で行った。捕集器内壁に設置した焼結金属円筒からは、空気を200cm³/sで流出させ、捕集器へのすすの付着を防いだ。この空気流は燃焼ガスの冷却作用もある。燃焼ガスは真空ポンプ(ULVAC: GVD-050A)を用いて吸引した。吸引流量は50L/minである。

2・4 すず排出限界の測定方法

すす排出限界の測定にはダストメータ(島津製作所: Duster2000F)を用いた⁽¹⁾⁽²⁾。燃焼ガスは燃焼管出口上部に設置した漏斗から、流量約12L/minで吸引した。吸引した燃焼ガスは、発光部と受光部(CdSセル)の間に置かれたガラス繊維製の濾紙(Prefilter: AP20 ϕ 25)を通過する。濾紙へのすす堆積量の増加につれて透過光量は減少するが、これを電気信号に変えメータに表示する。本研究におけるすす排出限界は、便宜的に、3分間ダス

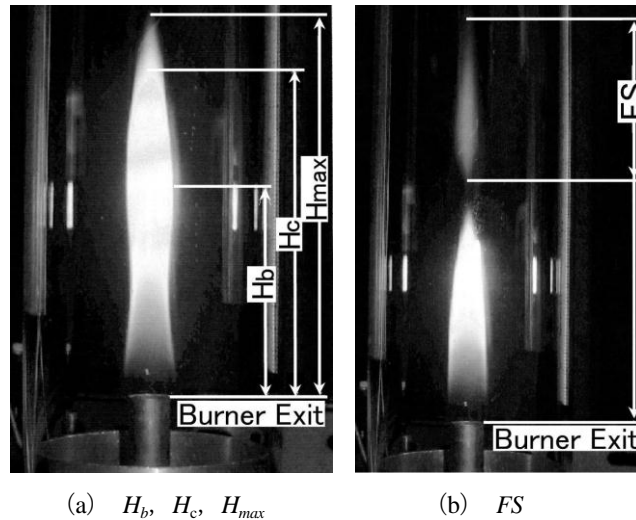


Fig.5 Definition of symbols of flame heights

トメータで燃焼ガスを吸引し、ダストメータの指針がその最大指示値を超えたときの燃料流量または空気流量とした⁽¹⁾⁽²⁾.

2・5 火炎高さ測定方法

火炎は水平方向からデジタルビデオカメラで撮影した。カメラの撮影速度は 30FPS であるため数周期分を撮影し、1 周期分の結果として整理した。画像の一例を図 5 (a) と (b) に示す。いずれも燃料流量を変動させた火炎の画像である。図 5 (a) の火炎にはくびれと膨らみが見られる。燃料管出口を基準として、画像上で、火炎としてみなせる最高点までを可視火炎高さ H_{max} 、火炎先端付近の温度が高いために、完全に白色に見える最も高い点までを火炎反応帯高さ H_c 、火炎の膨らみが最大となる位置までをバルジ高さ H_b と定義し、それぞれ目視により測定した。また、(b) のように火炎先端が分離する場合には、分離部分を FS (Flame Separation) と定義し、図中には FS の存在する位置とその長さがわかるように示した。

3. 実験結果および考察

3・1 すず排出率

図 6 (a), (b), (c) はそれぞれ、定常および燃料流量の変動周波数 f が 4Hz と 16Hz の火炎におけるすす排出率 S を一定空気流量 Q_a に対して示している。燃料流量の変動振幅 ΔQ_f は $0.85 \text{ cm}^3/\text{s}$ である。すす排出率 S は計量したすすの重量を燃焼ガスの吸引時間で除した値である。なお、すべての実験において、吸引時間がすす排出率 S に影響しないよう、燃焼ガスは変動周波数によらず 1000 周期以上の時間をかけて吸引された。

図 6 (a) より定常火炎の S は Q_a に対して直線的に減少するが、その傾きは非常に大きく、すす排出率は空気流量に対して非常に敏感である。また、同じ S において、 Q_f の増加は Q_a を増加させる。

図 6 (b) の $f=4\text{Hz}$ において、(a) の定常火炎の結果と同じ S および $Q_f=Q_{fm}$ の条件で比較したとき、4Hz の Q_a は定常火炎の数倍となっており、すすが排出され易いことを示している。この原因として、火炎先端が流量変動に十分追従できる比較的低い周波数では、変動する燃料流量の最大値 ($Q_{fm}+\Delta Q_f$) となる時刻近傍で、多くのすすが排出されているものと予想される。

図 6 (c) の $f=16\text{Hz}$ において、 S の曲線は Q_a に対して単調減少ではなく極大値が存在する。この傾向は $f=8\text{Hz}$ や 20Hz でも見られた。また、 S が極大となる Q_a は、同じ Q_{fm} で比較したとき、 f の増加につれて増大した。この極大値の存在については次節でまとめて考察する。

図 7 は $Q_{fm}=2.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $\Delta Q_f=0.85 \text{ cm}^3/\text{s}$ としたとき (Q_f は $1.35 \sim 3.05 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で変動) の、各 f において $S=0.02 \text{ mg/s}$ となる Q_a を示している。比較のために、同じ S における定常火炎の $Q_f=2.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ と $3.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ の結果も

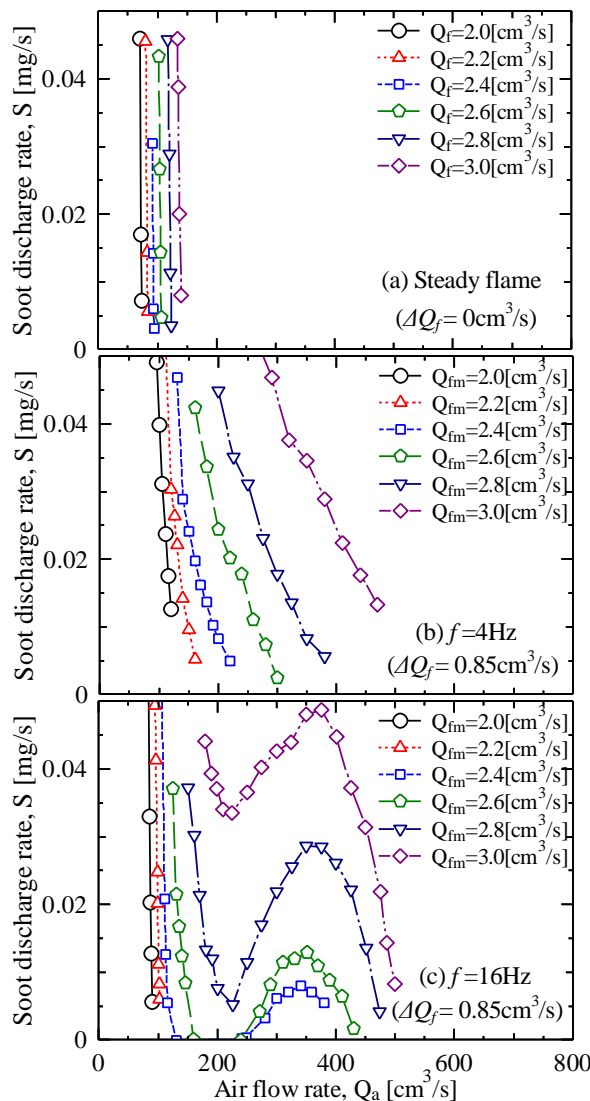


Fig.6 Effects of air flow rate on soot discharge rate

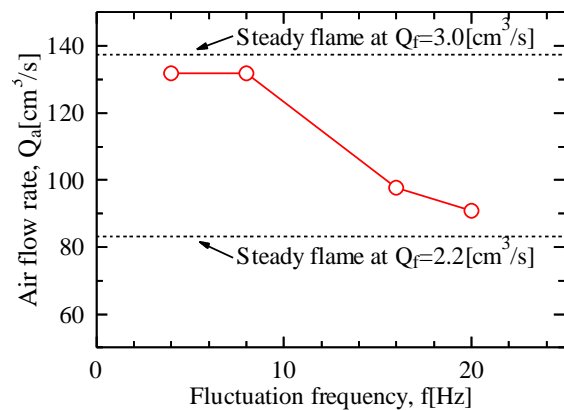


Fig.7 Effects of fluctuation frequency on air flow rate at $S=0.02$ mg/s

示す。火炎が追従しやすい比較的低い周波数 ($f=4$ Hz, 8 Hz) では、定常火炎の $Q_f=3.0$ cm³/s における空気流量と同程度の Q_a が必要であり、変動する燃料流量が最大 ($=3.05$ cm³/s) となる時刻近傍で全排出すす量の大部分が排出されていると推察できる。一方、 f が大きくなると、ここでのように Q_{fm} が小さい場合には変動の効果が現れず、変動火炎の Q_a は、 Q_{fm} に等しい $Q_f = 2.2$ cm³/s の定常火炎における Q_a に接近する。以上のことから、 f の小さい火炎から排出されるすすを、 Q_{fm} に対応する定常火炎のすす排出率まで低下させるには、少なくとも変動火炎の燃料流量の最大値 ($Q_{fm} + \Delta Q_f$) に近い定常火炎の Q_a まで空気流量を増加させる必要がある。

3・2 燃料流量変動火炎のすす排出限界

図 8 は燃料流量を変動させたときのすす排出限界を示している。横軸は平均燃料流量 Q_{fm} 、縦軸はすす排出限界空気流量 $Q_{a,sl}$ である。比較のために定常火炎の結果も示す。限界曲線を境界に上側が非すす排出領域、下側がすす排出領域である。変動火炎の $Q_{a,sl}$ は定常火炎よりも高く、その差は Q_{fm} の大きい領域で大きい。 $f=2$ Hz では定常火炎の限界曲線とその傾向が類似しているが、 $f=8$ Hz 以上の曲線は、S 字形状である。この傾向は前節でみられた $f=16$ Hz のすす排出率 S の結果と類似している。また、S 字形状の左側凸部における $Q_{a,sl}$ は、 f の増加に

つれて大きく、これもすす排出率の変化と定性的に一致している。なお、この図より、本実験条件におけるすす排出限界曲線のS形状左側凸部の Q_{fm} は、 $f=16\text{Hz}$ が最も低い。

図9 (a), (b) はそれぞれ、 $f=2\text{Hz}$, $Q_{fm}=3.0\text{cm}^3/\text{s}$ および $f=16\text{Hz}$, $Q_{fm}=2.21\text{cm}^3/\text{s}$ での火炎反応帯高さ H_c と可視火炎高さ H_{max} の時間変化を示す。なお、 16Hz においては、火炎の分離と膨らみ(バルジ)が観察されたため、分離した火炎子の位置とその長さ FS とバルジ高さ H_b も示した。横軸の時間は実時間 t を1周期あたりの時間 T で除している。なお、 H_c は輝炎の領域であり、すすの発光領域である。このすすは H_c から H_{max} の領域で酸化することになる。この H_c と H_{max} との差が大きいとき、すすは酸化されずに排出され易いことを意味する⁽¹⁰⁾。

図9 (a) は $f=2\text{Hz}$ の結果である。 H_{max} と H_c の両方がほぼ正弦波的に変動し、 H_{max} と H_c が極大・極小となる時刻も同じである。また、 H_{max} と H_c との差は、 H_{max} が最大となる時刻の方が H_{max} が最小となる時刻よりも大きい。前節において、低周波数においては燃料流量が最大となる時刻近傍ですが排出されやすいことを述べた。低周波数における火炎は流量変動に追従して、その高さが変化すると考えられるが、 2Hz においても、 H_{max} と H_c とが最大となる時刻において、 H_{max} と H_c との差が大きくなる。このことが、すす排出を促進させる原因である⁽¹⁰⁾。

図9 (b) は $f=16\text{Hz}$ の結果である。 H_{max} と H_c はノコギリの歯のような時間変化を示す。また、 H_{max} と H_c の極大・極小となる時刻に位相差が見られる。とりわけ両者が極大となる時刻の位相差が大きい。本研究では、 f が大きいほどこの位相差が大きい。なお、この f ではバルジも観察される。バルジはすす排出限界曲線のS字部分の右側凸部から観察され始め、S字部分の左側凸部で最も発達し、すすが排出され易い状態となった。 $f=16\text{Hz}$ において観察される火炎の分離は、限界曲線のS字部分の左側凸部 $Q_{fm}=2.21\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_{a,sl}=300\text{cm}^3/\text{s}$ から $Q_{fm}=3.6\text{cm}^3/\text{s}$,

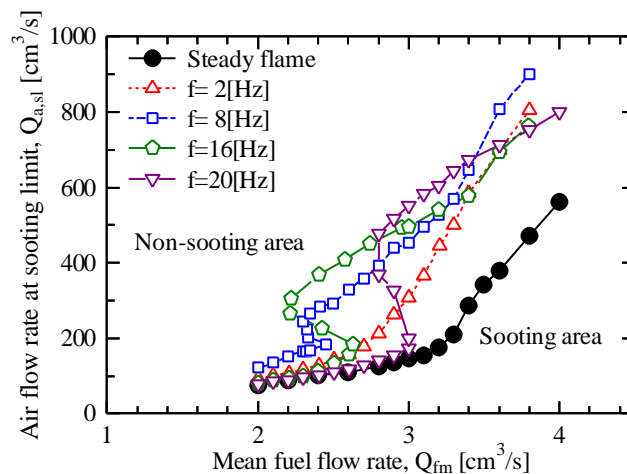
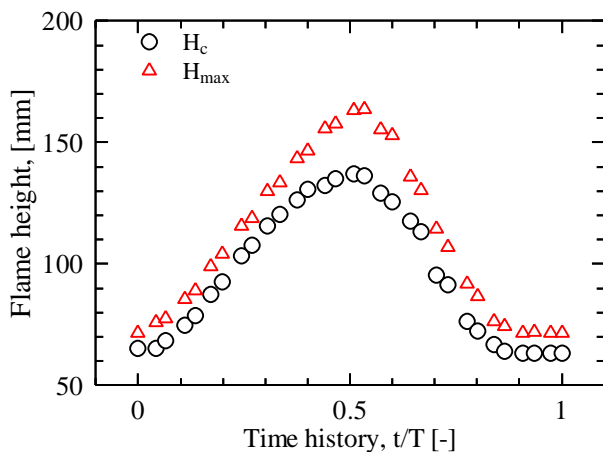
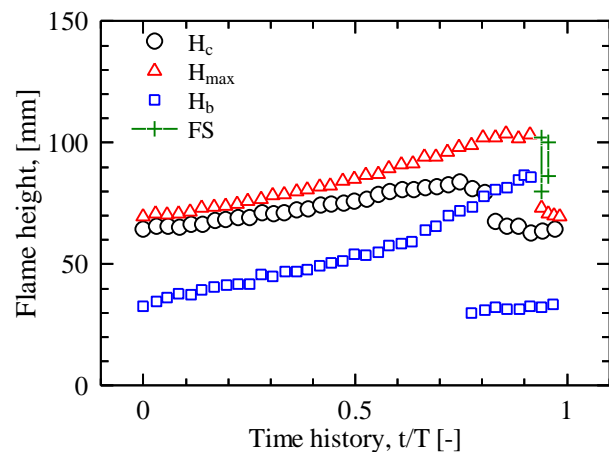


Fig.8 Soot limits of steady flame and fluctuating flame when fuel flow rate is fluctuated ($\Delta Q_f=0.85\text{cm}^3/\text{s}$)



(a) $f=2\text{Hz}$ ($Q_{fm}=3.0\text{cm}^3/\text{s}$, $\Delta Q_f=0.85\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_a=Q_{a,sl}=310\text{cm}^3/\text{s}$)



(b) $f=16\text{Hz}$ ($Q_{fm}=2.21\text{cm}^3/\text{s}$, $\Delta Q_f=0.85\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_a=Q_{a,sl}=300\text{cm}^3/\text{s}$)

Fig.9 Time variations of flame heights when fuel flow rate is fluctuated

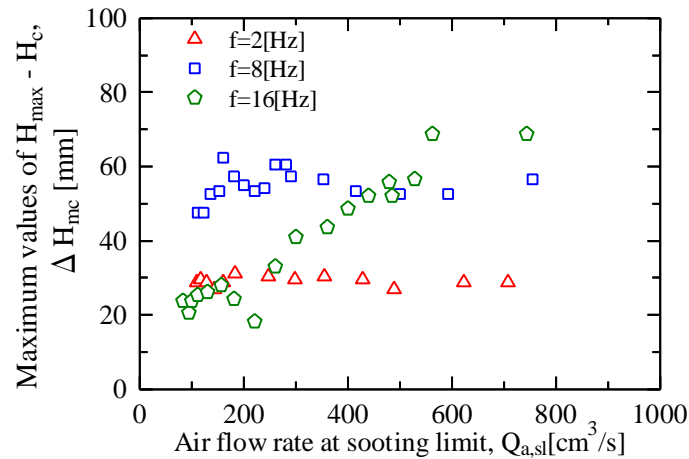


Fig.10 Relationship between air flow rate at sooting limit and the maximum value of difference between H_{max} and H_c .

$Q_{a,sl}=693.9\text{cm}^3/\text{s}$ まで見られた。なお、 $f=20\text{Hz}$ においてはバルジやくびれが観察されなかった。この要因の一つとして、 f が大きいほど燃料流速の測定位置から燃料管出口までの速度変動振幅の減衰の程度が顕著になる、ことが考えられる。

以上、燃料流量変動火炎は定常火炎よりもすすが排出され易いこと、 f の増加につれて、すす排出限界曲線が S 字形状になること、 H_{max} と H_c の時間変化には位相差が見られ、火炎の分離やバルジが観察されることを述べた。まず定常火炎よりも燃料流量変動火炎の方がすすが排出され易い原因について考える。Smyth et al.^{(4)~(7)} は、同軸噴流拡散火炎の燃料流量を周期的に変動させたときのすすの生成と酸化について研究を行っている。彼らの研究においても火炎の分離が観察されている。彼らは、火炎の分離した部分においてすすが激しく酸化すること、分離して下流に流された火炎子内部の中心付近においてすす濃度が高いことを示している。したがって、本研究で対象とする火炎においても、火炎先端で分離した火炎子内部や長く伸びた可視火炎内部に存在するすすが、酸化されずに放出されていると考えられる。以上のことから、燃料流量変動火炎が定常火炎よりもすすが排出され易い原因を、低周波数と高周波数に分けて整理すると次のようになる。図 9 (a) に示される $f=2\text{Hz}$ のような f の小さい火炎においては、前節において示されるように、変動する燃料流量の最大値で律せられるすす排出特性を示し、 H_{max} が最大となる時刻において多くのすすが排出される。一方、図 9 (b) に示される $f=16\text{Hz}$ のように大きな f においては、 H_{max} と H_c とが最大となる時刻に位相差が見られ、この時刻における長く伸びた可視火炎先端内部のすすや、火炎先端で分離した火炎子内部のすすが、酸化されずに排出される。したがって、燃料流量変動火炎は定常火炎よりもすすが排出され易い。なお、図 8 に見られるように、 Q_{fm} が小さいときの $f=16\text{Hz}$ と 20Hz のすす排出限界曲線は、定常火炎とほぼ一致する。この原因は、これらの f における、 Q_{fm} が小さいときの H_{max} と H_c の変動振幅が、図 9 (b) で示されるものよりかなり小さいことと関係している。

H_{max} と H_c との差が大きい時刻において、すすは酸化されずに排出され易い。したがって、図 10 には図 8 で得られた各 f のすす排出限界曲線に沿う空気流量 $Q_{a,sl}$ に対して H_{max} と H_c との差の最大値 ΔH_{mc} を示した。なお、 $f=16\text{Hz}$ においては火炎先端が分離するため、分離が見られない時間内の結果を用いて整理した。図より、 $f=2\text{Hz}$ においては、 ΔH_{mc} は $Q_{a,sl}$ によらずほぼ一定である。 $f=16\text{Hz}$ においては、すす排出限界曲線に S 字形状が現れる $Q_{a,sl}$ 付近で複雑な変化を示すが、 $Q_{a,sl}$ に対して ΔH_{mc} は増加傾向を示す。 $f=8\text{Hz}$ も S 字形状が現れる $Q_{a,sl}$ 付近において ΔH_{mc} は複雑な変化を示す。8Hz の ΔH_{mc} は $Q_{a,sl}$ の全範囲において $f=2\text{Hz}$ よりも高いが、ほぼ一定値を示す。したがって、 $f=8\text{Hz}$ の火炎特性は 2Hz と 16Hz との性質が組合わされた特性といえる。 ΔH_{mc} は、 $Q_{a,sl}=100\text{cm}^3/\text{s}$ 近傍において、 $f=8\text{Hz}$ 、2Hz、16Hz の順に低く、図 8 のすす排出限界曲線の $Q_{fm}=2.0\text{cm}^3/\text{s}$ におけるすす排出し易い順と対応している。また、 $f=16\text{Hz}$ と 8Hz とを比較すると、 $f=16\text{Hz}$ の ΔH_{mc} は $Q_{a,sl}=400\text{cm}^3/\text{s}$ を超えると $f=8\text{Hz}$ よりも大きく、この結果もすす排出限界曲線で見られたすす排出のし易さと対応している。

$f=16\text{Hz}$ の結果についてより詳しく考察する。図 10 の ΔH_{mc} は $Q_{a,sl}=160\text{cm}^3/\text{s}$ で極大となり、 $220\text{cm}^3/\text{s}$ で極小となる。この $Q_{a,sl}$ の範囲において、 $Q_{a,sl}$ の増加につれて ΔH_{mc} は減少するが、 ΔH_{mc} が極大の時、バルジが観察され始める。 $Q_{a,sl}=220\text{cm}^3/\text{s}$ を超えると、火炎のくびれた部分からの分離が観察され、バルジ部分が火炎子となって下流へ流される。この火炎子中央部

分のすす濃度が高いことが先の研究⁴⁾で示されており、バルジの形成はすす排出を促進させることになる。このバルジの出現は、本研究と類似の流れ場を対象とした Katta et al. の数値解析⁽⁸⁾⁽⁹⁾においても報告されている。この研究では燃料流量増加時期に形成される火炎内側の渦がバルジの出現にかなり影響を及ぼしているように見える。しかしながら、本研究では、 ΔQ_f を一定としているにも関わらず、 $f=16\text{Hz}$ の $Q_{fm}=2.4\text{cm}^3/\text{s}$ において、 Q_{asl} が小さいときの H_{max} と H_c は、その変動振幅が小さい。しかしながら、 Q_{asl} が大きくなると H_{max} と H_c の変動振幅が明確に現れる。先の研究⁽⁸⁾において、燃料流量の変動によって、火炎の外側に大きな渦が形成されることが示されているが、本研究結果より、火炎の外側に形成される渦のスケールや回転強さは、外管から供給される空気流量と密接に関係していることが推測できる。すなわち、 Q_{asl} の大きさが火炎外側に形成される渦スケールなどを変化させ、上下に変動する火炎の高さやバルジの出現、そして火炎の分離にも影響を及ぼす。したがって、すす排出には ΔQ_f の他に Q_{asl} も密接に関係しており、燃料流量の振動が火炎の外側に形成される渦を誘起し、フリッカリング火炎のように火炎が振動することですす排出が促進される。16Hz の場合は、 Q_{asl} が $220\text{cm}^3/\text{s}$ を超えるとバルジの出現に加え火炎先端が分離するので、すす限界曲線の S 字形状左側凸部の Q_{fm} が他の f より低い。なお、 $f=8\text{Hz}$ では 16Hz で見られた火炎先端の分離やバルジは確認されない。しかしながら、燃料流量の強制振動によって火炎の高さは変化し、その外側には渦が形成されていると考えられる。したがって、8Hz の結果は、16Hz で見られる燃料流量の強制振動によって生成される渦が関係するすす排出促進効果と、2Hz で見られる低周波数域特有の燃料流量の最大値で律せられるすす排出効果とが組み合わされた特性といえる。その結果、 $f=8\text{Hz}$ においても小規模ではあるがすす排出限界曲線に S 字形状が現れたと考えられる。

3・3 空気流量変動火炎のすす排出限界

図 11 は空気流量を変動させたときのすす排出限界である。横軸は限界時の燃料流量 $Q_{f,sl}$ 、縦軸は平均空気流量 Q_{am} である。図より、 f の増加につれて限界曲線は定常火炎のそれより上方に移動しておりすすが排出されやすくなることがわかる。 f が 8Hz より大きくなると、限界曲線に S 字形状が見られる。この結果は燃料流量を変動させた場合と非常に類似しており、すす排出のメカニズムも類似しているものと考えられる。

図 12 は $f=16\text{Hz}$ における可視火炎高さ H_{max} 、火炎反応帯高さ H_c 、バルジ高さ H_b 、火炎先端が分離した部分 FS の時間変化を示す。この結果はすす排出限界曲線の S 字形状の左側凸部に対応する。この図から、燃料流量変動時と同様に、空気流量を変動させた場合も、 H_{max} と H_c はノコギリの歯のように変化する。また、 FS は時間の経過につれて上方へ、その長さを短くしながら移動しており、火炎子内のすすが酸化されないまま排出されているものと推察できる。

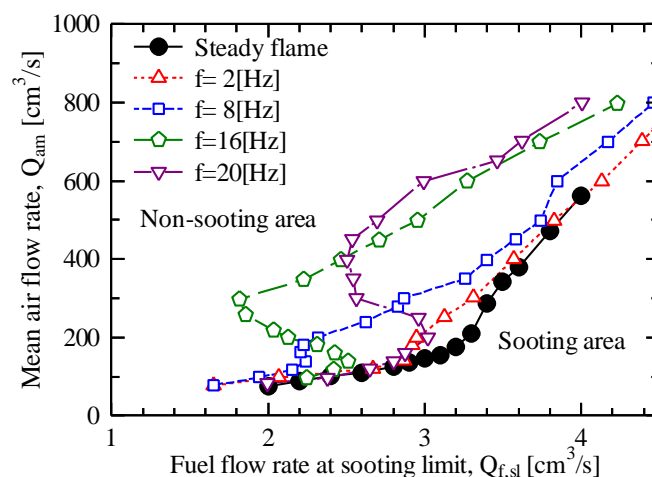


Fig.11 Soot limits of steady flame and fluctuating flame when air flow rate is fluctuated ($\Delta Q_a=35.4\text{cm}^3/\text{s}$)

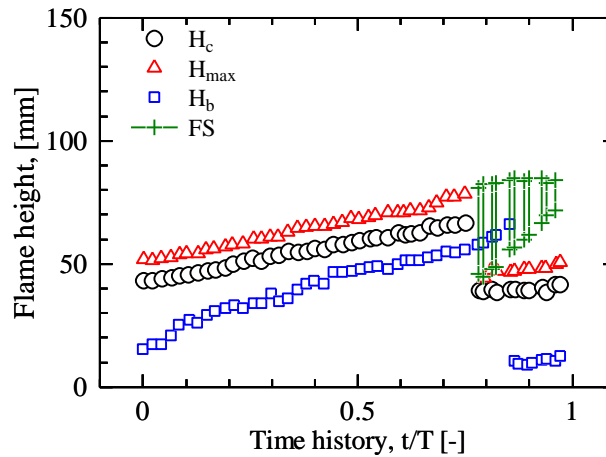


Fig.12 Time variations of flame heights when air flow rate is fluctuated ($Q_{air}=300.0\text{cm}^3/\text{s}$, $\Delta Q_a=35.4\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_f=Q_{f,sl}=1.8\text{cm}^3/\text{s}$)

4. 結 言

同軸噴流拡散火炎を用いて、燃料流量を周期的に変動させたときのすす排出率と燃料および空気流量の周期変動がすす排出限界に及ぼす影響について実験的に調査した。得られた知見を以下に要約する。

- (1) 空気流量 Q_a のわずかな変化が、定常火炎のすす排出率 S を大きく変化させる。
- (2) 定常火炎および燃料流量の変動周波数 f が小さい火炎の S は、 Q_a に対して単調減少するが、 f が大きい火炎の S は、 Q_a に対して極大値をもつ。
- (3) 燃料流量変動火炎の S を定常火炎と同じにするには、より多くの空気流量が必要となる。
- (4) 燃料流量および空気流量を変化させたとき、16Hz において火炎先端の分離やバルジが観察される。
- (5) すす排出限界曲線においても、定常火炎より燃料流量あるいは空気流量を変動させた火炎の方がすすが排出されやすい。
- (6) 燃料流量および空気流量のいずれを変化させても、 f の増加につれて、すす排出限界曲線に S 字形状部分が現れる。

文 献

- (1) 大塚芳郎, 北野三千雄, “層流拡散炎のすす限界”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 48, No.433 (1982), pp. 1818-1825.
- (2) Kitano, M. and Otsuka, Y., “Suppression Effects of Stretching Flow on Soot Emission from Laminar Diffusion Flames”, *Combustion Science and Technology*, Vol.42, (1985), pp.165-183.
- (3) Buckmaster, J. and Peters, N., “The Infinite Candle and its Stability-a Paradigm for Flickering Diffusion Flames”, *Symposium (International) on Combustion*, Vol.21, (1986), 1829-1836.
- (4) Smyth, K. C., Harrington, J. E., Johnsson, E. L. and Pitts, W. M., “Greatly Enhanced Soot Scattering in Flickering CH_4/Air Diffusion Flame”, *Combustion and Flame*, Vol.95, (1993), pp.229-239.
- (5) Shaddix, C. R., Harrington, J. E. and Smyth, K. C., “Quantitative Measurements of Enhanced Soot Production in a Flickering Methane/Air Diffusion Flame”, *Combustion and Flame*, Vol.99, (1994), pp.723-732.
- (6) Shaddix, C. R. and Smyth, K. C., “Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames”, *Combustion and Flame*, Vol.107, (1996), pp.418-452.
- (7) Smyth, K. C., Shaddix, C. R. and Everest, D. A., “Aspects of Soot Dynamics as Revealed by Measurements of Broadband Fluorescence and Flame Luminosity in Flickering Diffusion Flames”, *Combustion and Flame*, Vol.111, (1997), pp.185-207.
- (8) Katta, V. R. and Roquemore, W. M., “Role of Inner and Outer Structures in Transitional Jet Diffusion Flame”, *Combustion and Flame*, Vol.92, (1993), pp.274-282.

- (9) Katta, V. R., Hsu, K. Y. and Roquemore, W. M., “Local Extinction in an Unsteady Methane-Air Jet Diffusion Flame” , *Symposium (International) on Combustion*, Vol.21, (1998), pp.1121-1129.
 - (10) 大塚芳郎, 石橋洋二, “層流拡散炎の完全燃焼に関する実験的研究”, 日本機械学会論文集, Vol. 41, No.349 (1975), pp. 2733-2742.
-