旋回火炎におけるすすの排出特性について*

西 田 修 身**

Exhaust Characteristics of the Soots from Turbulent Swirling Flame

By Osami Nishida

In the general combustor, fuel and air are fed separately and combustion occurs primarily within a spacially limited zone. Turbulent mixing rates in such a system have important effects on the emission of pollutants such as unburned hydrocarbons and soot.

The main purpose of the present paper is to investigate on the control of the soot emission due to the different swirling intensities of combustion air flow. The blades of the swirl generator can change continuously from 0° to 70° (θ_b : swirl angle) in order to increase the tangential velocities. Characteristics of soot emission are measured in propane/air diffusion flames of two typically different combustor of parallel and enlarged types paying special attention to the roles of gas temperature on the behavior of soot formation and decomposition in the flames. Profiles of soot concentration together with gas temperature and entrainment rate of O_2 are measured in all flames.

When the swirl angle (θ_b) is raised, both of the soot formation and decomposition rates increases. The larger angle of the θ_b results in the lower exhaustion of soot. However, in the enlarged combustor, finally exhausted soot concentration in the $\theta_b = 70^\circ$ becomes much higher than that in the smaller angle $\theta_b = 60^\circ$ for the decay of soot decomposition in the down-stream.

1. ま え が き

すす発生を抑制するためには、燃料と空気の混合を良好にすることが考えられる。これらの混合を促進する燃焼法として旋回流火炎が一般に用いられている。この種、火炎の流れの機構と混合特性を明白にするための研究がかなり進んでいる。しかしながら、すすの発生特性についての報告が非常に少なく、とくにガス燃料を用いて、基礎的立場から研究された例は見当らない。過去の報告のすべては液体燃料を用いて行っている。Gills¹⁾はロータリーバーナを用いて Cup の回転数を高くするほどすす量の低減効果が大きいと報告している。Drake ら²⁾は蒸発量 9 ton/hr のボイラで空気流に旋回を加えて実験をしており、バーナのレジスタベーンの角度が 40 度位まではすす発生量が低減されるが、40 度より大きくなると再びすす発生量が増加することを報告している。また広安ら³⁾は定格燃焼器で非定常な噴霧火炎で旋回器の回転速度によるすす生成による影響を調べた結果、燃焼初期段階を除いては 5000 rpm で最もすす生成量が少なく

なると報告している。以上の測定例はすべて排気管出口の代表場での測定報告である。研究の目的が若干異なった報告として、D'Alessio ら⁴⁾は弾性及び非弾性散乱光の強度を測定する方法で、#2 燃料油で空気流に旋回を加えた影響を、すすによる散乱と液滴からの散乱を区別しながら測定しており、高いスワールの火炎ほど、滴及びすすの散乱光強度が小さいと報告している。

本報告ではプロパン・空気系の火炎でノズル及び炉の形態をかえて、空気に旋回をくわえ、すすの発生状況を測定した。さらに空気温度を加熱したり、窒素ガスを燃料中に添加した場合についても測定し、種々検討を試みた。

2. 実験装置及び方法

2.1 燃焼器 旋回燃焼器の詳細を図 1 に示す。燃焼用空気はブロワーにより 2 方向から強制通風により空気予熱室へ供給される。加熱法は 5 本のシリコニット (14mm 径、長さ 900 mm、出力 3.16 kW) で形成されている。加熱された空気は縮流部、補助空気予熱室 (マイクロヒータ、O. D ϕ 1.6 mm、長さ 5000 mm、 $R_0 = 11.0 \Omega/m$) を通過し、仕切板を通り、周囲より半径方向に取り付けた 8 枚の対称翼からなる旋回発生用案内羽根 (以

* 原稿受付 昭和 60 年 11 月 30 日

昭和 60 年秋季学術講演 (昭和 60 年 10 月 23 日)

** 正会員 神戸商船大学 (神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

図3 光学系測定装置

の体積流量 (L/min) を示す。

2.2 測定法 燃焼炉出口断面でのすすの数密度及び体積分率の測定に使用した光学測定装置の概略を図3に示す。光源にはレーザー (He-Ne, 波長 632.8 nm , 出力 5 mW) を使い、レーザー本体の前に光ファイバースコープを固定した。光線は光ファイバースコープ先端から約 60° の広がり角度をもって平凸レンズを経た後、平行光線となり測定部に入射する。測定部からの透過光は平凸レンズにより集光され、さらに平凹レンズを経た後、再び平行光線となり光ファイバースコープにより暗箱内の光電管により受光され、電気信号に変換された後、ミリボルト計により読みとった。測定位置は平行炉においてはノズル先端からの高さ $L_c = 600\text{ mm}$ 、拡大炉においては $L_c = 550\text{ mm}$ に設置した。以上の方法により読み取った入射光及び透過光強度により、すすの数密度及び体積分率はすす粒子径を電子顕微鏡撮影写真から投影面積の測定により得た平均凝集体の体面積平均粒子径 ($\bar{D}_{32s}$) 150 nm に対して、平均減衰係数 ($\bar{Q}_{ext}$) を 1.0 ($m = 1.56 - i \cdot 0.52$, m : 複素屈折率, i : 虚数の単位) として計算した。すす重量濃度の測定法は従来から行ってきた等速吸引によるサンプリング法⁵⁾ によった。温度測定には Pt-Pt-Rh (13%), $\phi 0.1\text{ mm}$ 熱電対で計り、ふく射による補正は行っていない。また、酸素濃度はガスサンプリングプローブにより捕集し、ジルコニア式酸素濃度計 (富士産業株式会社製) で、連続的に測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 火炎形状 表1のような4種類の火炎について、旋回強度を変えることによって火炎形状を観察した。全般的に平行炉による (A) と (C) 型火炎、拡大炉による (B) と (D) 型火炎はよく類似している。(A) と (C) 型火炎は $\theta_b = 0^\circ$ では火炎全長は約 $480 \sim 500\text{ mm}$ で燃料

ノズル先端から約 200 mm の高さ付近までの上流域では乱れがなく、下流域で若干の乱れが生ずる程度のローソク炎が伸長した棒状火炎を形成する。旋回羽根角度を増していくと、火炎はねじれ、下流域での乱れが激しくなり、火炎長さは短く、ノズル近傍で半径方向に広がりをもつ火炎へと遷移して行く。さらに旋回羽根角度を増すと、火炎長さは短くなり半径方向への広がりも大きくなり、ノズル近傍の上流域でも乱れを生じ、全体的に凹凸の激しい火炎となる。旋回羽根角度 70° において、約 250 mm の火炎長さになる。拡大炉である (B) と (D) 型火炎で

は平行炉に形成される火炎にくらべて全体的に火炎長さは短く、半径方向に大きく広がった乱れの大きな火炎となる。旋回を与えない場合 ($\theta_b = 0^\circ$) は火炎長さは約 240 mm 程度で、ノズルから約 30 mm までは乱れは小さく、少しゆらぎを生ずる程度であるが、下流へ行くにしたがって乱れが大きくなり、半径方向に大きく広がりを有する逆円すい状火炎となる。旋回羽根角度を増していくと、逆円すい状火炎はノズル近傍でさえ凹凸の激しい乱れを形成し、火炎長さの短いボール状火炎へと遷移していく。さらに旋回羽根角度を 70° と大きくすると、ボール状火炎の下流端が部分的な浮き上がりを生じる様になる。以上の4種類の火炎 [(A), (B), (C), (D)] における旋回羽根角度と火炎長さの関係を図4に示す。火炎長さは同一条件で数枚直接撮影 (シャッター・スピード: $1/500$ で撮影) した写真から決定した。平行炉に形成される (A), (C) 型

図4 火炎長さ

火炎では、旋回羽根角度を大きくするにしたがい火炎長さは単調に短くなり、 $\theta_b=70^\circ$ の場合は $\theta_b=0^\circ$ にくらべ約1/2の長さになる。また、拡大炉に形成される(B)、(D)型火炎では旋回羽根角度の変化に対する火炎長さの変化は平行炉ほど大きくなく、全体的に変化率は小さい。

3.2 旋回強度に対するすす排出特性 平行炉による(A)、(C)型火炎における数密度(N_s : Particles

/cm³)及び体積分率(V_s : cm³/cm³)を図5(a),(b)に示す。(A)型火炎では、数密度及び体積分率ともに旋回羽根角度0°において $N_s \doteq 50 \times 10^7$ Particles/cm³, $V_s \doteq 2.6 \times 10^{-7}$ cm³/cm³となり、羽根角度の増加に伴い単調に減少し、旋回羽根角度70°において、 $N_s \doteq 10 \times 10^7$ Particles/cm³, $V_s \doteq 0.6 \times 10^{-7}$ cm³/cm³を示す。(C)型火炎は(A)型火炎と同じような傾向を示すが、全

図5 平行炉での(A)、(C)型火炎からのすす排出量 ($L_c=600$ mm位置)

図6 平行炉での(A)及び(C)型噴流の酸素濃度分布 (旋回羽根角度 $\theta_b=70^\circ$)

 図7 (A)型火炎の燃焼ガス温度分布(L_c :軸方向, R :半径方向)

体の排出レベルは低くなる。これは燃料噴出速度が大きいため空気の誘入は著しく火炎の乱れは若干激しくなり、周囲空気との混合が活発なため、すすの排出量は減少し数密度、体積分率ともに全体的に減少する。この検証として、プロパンガスの換りに、同量の炭酸ガスを噴出した場合、周囲流である空気の誘入量の差異を酸素濃度分布で示したのが図6(a), (b)である。なお、旋回角度は 70° である。図より、(C)型噴流ではノズル先端から50 mm付近で、酸素濃度はほとんどフラットな分布となり、ノズル噴出口径が小さくなるほど、一次及び二次流の混合が迅速になるといえる。平行炉に形成される旋回火炎で燃料流速に関係なく、旋回羽根角度の増加に伴い燃焼炉出口でのすす排出量は単調に減少する原因は旋回空気流の半径方向及び周方向の運動量が大きくなれば燃料噴流中心の燃料過濃な領域への酸素混入率が増大し、反応の進行が促進され未燃分の排出が抑制されるためと考えられる。図7(a), (b), 図8(a), (b)に(A)型火炎の旋回羽根角度 0° と 60° の場合についての火炎後流域の温度履歴及び火炎軸方向のすす重量濃度と温度分布を示した。図7(a)より、 $\theta_b = 0^\circ$ では $L_c = 250$ mm付近までは鞍型分布を呈し、十分に火炎中心部まで反応は進んでいない、さらに図8(a)においても、温度ピーク位置は300 mm付近であり250 mm近傍で最もすすが生成されている。しかしながら、 $\theta_b = 60^\circ$ では図7(b)において、

図8 (A)型火炎の火炎軸方向のすす重量濃度と温度分布

$L_c = 250$ mmの付近で、すでに火炎中心部で反応が進行しており、つり鐘状の分布を示している。このことは図8(b)においても同様であり、反応が全体に上流側にシフトしている。ゆえに旋回を加えることによって、燃料と空気の混合が促進され、反応が速くなる。すすの生成速度も同様に速くなるが分解に要する時間が十分存在するため、最終的な排出量は著しく低減される。

図9に拡大炉による(B)と(D)型火炎におけるすすの体積分率を示す。両火炎とも平行炉による(A)と(C)型火炎の結果にくらべると、すすの排出量は著しく減少し、数密度及び体積分率は $1/10$ のオーダーとなる。(B)型火炎では数密度及び体積分率は旋回羽根角度 0° において最高値($N_s = 35 \times 10^6$ Particles/cm 3 , $V_s = 2.2 \times 10^{-8}$ cm 3 /cm 3)となり、羽根角度の増加に伴い単調に減少するが、旋回羽根角度 60° において最低値($N_s = 18 \times 10^6$ Particles/cm 3 , $V_s = 1.0 \times 10^{-8}$ cm 3 /cm 3)を示した後、再び旋回羽根角度 70° において増加する。(D)型火炎は(B)型火炎と同じ傾向を示すが、燃料噴出速度の増大に伴う乱れの形成により周囲空気との混合が活発で、排出されるすすの数密度及び体積分率は全体的に(B)型火炎にくらべ減少する。図10(a), (b)及び図11(a), (b), (c)に(B)型火炎についての旋回羽根角度に対する温度履歴と火炎軸方向のすす重量濃度と温度分布を示した。図10より、 $\theta_b = 0^\circ$ ではノズル近傍の火炎中心部の反応が十分進行していないが、 $\theta_b = 60^\circ$ ではノズル先端部から、燃料と空気の混合が促進され、反応が進行している。図11から、旋回強度を増すと温度ピーク値の位置が上流側へ移行し、すす生成速度が速くなる。 $\theta_b = 60^\circ$ ではすすの分解も進行し、最終的には低濃度となる。しかし、 $\theta_b = 70^\circ$ においては空気の横方向流量が増すため、 $L_c = 80$ mm以降での温度レベルが $\theta_b = 60^\circ$ の場合[(b)図]より

図9 拡大炉での(B), (D)型火炎からのすす排出量($L_c = 550$ mm)

図 10 (B)型火炎の燃焼ガス温度分布

低くなることより、すすの分解が不十分であり、最終的なすす排出量は増加する。

3.3 燃焼状態をかえた場合のすす排出特性

燃料流量 ($0.6 L_N/\text{min}$) を一定とし、燃料中に窒素ガスを添加した場合のすす排出特性についてのべる。図 12 には拡大炉による (B) と (D) 型火炎に窒素ガスを $0.1 L_N/\text{min}$ 添加した場合のすす体積分率 (V_S) を示す。その場合の燃料ノズル噴出時の平均流速 (U_0) 及びレイノルズ数 (Re) は (B) 型火炎では $U_0 = 0.41 \text{ m/s}$, $Re = 500$, (D) 型火炎では $U_0 = 0.93 \text{ m/s}$, $Re = 750$ となる。なお、この場合の両火炎の火炎形状は窒素ガス無添加の場合にくらべて、火炎の乱れが若干増し輝度が低下する。両火炎ともすすの体積分率は窒素ガス無添加時 (図中破線で示す) にくらべて、旋回羽根角度に対して同じような傾向で減少するが、窒素ガスの添加によって著しく減少する。窒素ガス添加によりすすの排出量が低減する原因として燃料ノズル噴出時の速度の増加に伴い火炎の乱れが増し火炎面積も増大して空気混入が促進されることや燃

料分圧の低下が考えられる。しかし窒素ガスを添加しても両火炎において、最適旋回羽根角度 ($\theta_b = 60^\circ$) 以上の羽根角度の増加に伴うすす排出量の単調減少は見られない。

燃焼用空気温度 (T_{in}) を上昇させた場合の火炎形状 ($T_{in} = 150^\circ\text{C}$) は標準火炎 ($T_{in} = 25^\circ\text{C}$) にくらべて乱れは激しくなり、輝度は増し火炎全体が振動し火炎長さは若干短くなる。図 13 に拡大炉による (B) と (D) 型火炎の燃焼用空気温度を上昇させた場合のすすの体積分率を示す。両火炎とも燃焼用空気温度を上昇させることにより、すす体積分率は著しく減少するが、旋回羽根角度による依存性は標準火炎 (図中に破線で示す) の場合と一致しており、分布形状に差異はなく旋回羽根角度 60° にて最適値を有する。空気温度の上昇にともなうすす排出の低減効果は、火炎温度の上昇により、すすの生成速度が増加するが、それ以上に分解過程が進むため、最終的なすす排出量は低減される⁶⁾。

図 11 (B)型火炎の火炎軸方向のすす重量濃度と温度分布

4. ま と め

プロパン・空気系拡散火炎を用いて、燃料炉及び燃料ノズルを種々変えて、周囲空気流に旋回を与えた場合、火炎形状及びすす排出特性について、測定した結果より、つぎのようなことが明らかになった。

- (1) 旋回羽根角度を増していくと、火炎長さは短くなり、半径方向に広がりをもつ乱れの大きい火炎へと移行していく、平行炉型火炎では、とくにこの傾向が強い。しかしながら、本実験で使用した拡大炉による旋回羽根角度の変化に対する火炎長さはほとんど変化がなかった。
- (2) 空気流に旋回を加えると、反応は全般に上流側に

図 12 燃料中に窒素ガス添加の影響

図 13 燃焼用空気温度を上昇させた場合の影響

移行し、すすの生成は迅速であるのに対して、すすの分解が十分な時間を経て進行するため、最終的なすす排出量は低減される。

(3) 平行炉に形成される火炎では旋回羽根角度の増加に伴いすす排出量は単調に減少する。しかし、拡大炉にて形成される火炎では、すす排出量に対する最適旋回羽根角度($\theta_b = 60^\circ$)が存在し、それ以上の旋回羽根角度ではすすの排出量が増加する。これは、拡大炉では半径方向への空気流量が増し、反応が凍結し、すすの分解が抑制されるためである。

(4) 燃料ノズル内径が小さくなると燃料噴出速度が大きくなるので、火炎の乱れは若干激しくなり、周囲空気

との混合が活発化して、すす排出量は減少する。

(5) 燃料中へ窒素ガスを添加した場合のすす排出量の低減効果は燃料の噴出速度を高めた場合の(4)の結果と同様な現象が見受けられるが、窒素ガス添加による燃料分圧の低下による反応速度の抑制が主原因である。

(6) 燃焼用空気温度を上昇させると、火炎全体の温度が上がる。とくに火炎下流域ですすの分解作用が効果的であり、最終的な排出量は低減される。

おわりに、本研究の遂行にあたって、文部省科学研究(昭 58, 59, 60 年度特定研究 I, 燃焼現象のレーザ計測とモデリング)費及び日本機械学会(RC 61, ディーゼル機関における粒状排出物の低減と低質燃料の燃焼に関する研究分科会: 昭 57, 58, 59 年)の補助を受けた。深く感謝致します。

文 献

- 1) Gills, B. G., Journal of the Institute of Fuel (1973-2), 71.
- 2) Drake, P. F. and Hubbard, E. H., Journal of the Institute of Fuel, XXXIX-302 (1966-3), 98.
- 3) 中西・新井・広安, 日本機械学会論文集, 49-437 (昭 58), 255.
- 4) Beretta, F., Cavaliere, A. and D'Alessio, A., Combustion Science and Technology, Vol. 27 (1982), 113.
- 5) Nishida, O. and Mukohara, S., Combustion and Flame, 47-3 (1982), 269.
- 6) 文献 5) に同じ。

〔質 疑 応 答〕

質問者 東京商船大学機関学科 岡田 博

〔質問〕 測定法について、次の質問をします。

1. 透過法を用いて、粒子径(数)を求めるときは、光の波長に対して粒子径が十分に小さい必要がありますが、この点を考慮してあるか。

2. 図 3 の光学系において、すす粒子による入射光の散乱を検知しないように考慮されているか。考慮されているのであれば説明して下さい。

3. 火炎形状は凹凸の激しいものとなっているが、それらから図 4 の関係を得るには、どのような整理方法を用いたのか。

〔回答〕 (1) G. Mie の光散乱理論より、複素屈折率 $m = 1.56 - i \cdot 0.52$ を用い、粒度分布を考慮して、平均減衰係数 $\bar{Q}_{ext}$ に対する体面積平均粒子径 ($\bar{D}_{32}$) を算出した

結果、 $\bar{D}_{32} = 400 \text{ nm}$ 程度までは $\bar{Q}_{ext}$ が単調に増加しているため、測定が十分可能である。

(2) 光学系より散乱角度 (θ) を最大限に見積もっても 5 度以内となる。また、ラテックス球を蒸留水中に浮遊させた試料で散乱光の有無を調べたが、受光されていないことが検証済である。

(3) 火炎はシャッター・スピード 1/500 で撮影した写真より、図 4 はそれらの写真より、火炎先端の長さを求め、整理したものである。ゆえに、火炎面の乱れの強さ(凹凸状態)は関係ありません。

質問者 広島大学工学部 新井雅隆

〔質問〕 (1) 図 5 では数密度分布と体積分率分布を示していますが、すす粒子の平均粒径を 150 nm として計算した結果であるため、どちらか一方の分布で十分ではないでしょうか。

(2) 火炎軸方向のすす重量濃度と温度分布を比較した図(例えば図 8)を調べると火炎後半部分で温度が 500 K 以下に低下した後でもすす重量濃度が減少している。500 K (227°C) 程度の温度ではすすの酸化による分解反応はほとんどおきないと考えられるから、火炎後半でのすす濃度の減少過程には、生成したすすの半径方向への拡散による減少効果が相当大きいと思われます。このように考えますと、すすの分解による減少効果をこの種の拡散火炎で論ずるには無理があると思われますが、いかがでしょうか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、数密度分布と体積分率分布の両者の表示が必要でない。しかしながら、数密度値及び体積分率値を、定量的に絶対値で理解するためには便利である。

(2) すすの分解効果は温度と酸素濃度によって大きく依存される。図 8 において温度レベルが 800 K 付近まではすす粒子の分解(燃焼)に有効である。火炎後流のこの温度レベルはすす質量濃度分布のピーク値をかなり過ぎた分解領域((a) 図では $L_c = 400 \text{ mm}$, (b) 図では $L_c = 300 \text{ mm}$)である。ゆえに、(b) 図 ($\theta = 60^\circ$) ではとくに低濃度となる。しかしながら、それ以降の領域では拡散の影響あるいは乱流渦崩壊^(付1, 2)の影響のため、低減されると思われる。

(付 1) Magnussen, B. F. and Hjertage., B. H., 16th Symp. (Int.) on Comb., The Combustion Institute, (1977), 719.

(付 2) 西田・向原, 日本舶用機関学会第 36 回(昭 60 年春季)学術講演会講演論文集, (1985), 18.