

内部混合型二流体噴射弁による省エネ型・低公害

廃油燃焼バーナーの噴霧特性と燃焼特性

玉木伸茂*、清水正則*、廣安博之**

Spray Characteristics and Combustion Characteristics of Low Energy Type and Low Emission Waste Oil Combustion Burner by Internal Mixing Twin-Fluid Atomizer

Nobushige TAMAKI, Masanori SHIMIZU, Hiroyuki HIROYASU

Abstract

The recycling and effective use of waste materials are regarded as very important from a resources saving view point. Waste oil, such as waste engine oil, the leftover oil is usually of a high viscosity, low quality and includes water. The purpose of this study is to develop a waste oil combustion burner, which is able to atomize high-viscous and a large quantity of waste oil using low energy and is able to reduce pollutant emissions. The internal mixing twin-fluid atomizer developed in this study is mixed waste oil and atomizing air with a swirling flow in the mixing chamber. The waste oil combustion burner consists of an internal mixing twin-fluid atomizer and a flame holder. The effects of the kinematic viscosity of the liquid, geometric shapes of atomizer and flame holder on spray characteristics and combustion characteristics were investigated. The results indicated that atomization of a large quantity of high-viscous liquid was achieved with low energy of atomizing air, and high effective and stable combustion of waste oil were achieved with low energy. Moreover, the flame is mainly luminous, blow-off of the flame takes place hardly, smoke emission is little.

Key Words: Atomization, Combustion, Twin-Fluid Atomizer, Oil Burner, High-Viscous Liquid, Waste Oil

1. 緒言

船舶や自動車機関から排出される残渣油、オイル廃液のような廃油は用途がほとんどなく、最適な処理方法も確立されていない。省資源と廃油処理に関わる経費節減の目的から、新しい熱エネルギーとして廃油の有効利用と最適な処理方法の確立が望まれている。

本研究の目的は、省資源と省エネルギーの観点から、廃油を小さな動力で微粒化させることができ、廃油の燃焼時に黒煙や大気汚染物質の排出量が少なく、濃度が低くなる燃焼バーナーを開発することである。著者らは、これまでに廃油を小さな動力で微粒化できる内部混合型二流体噴射弁の開発に主眼を置き、液体の動粘度、噴射弁と保炎器の幾何学形状・

*近畿大学工学部機械工学科

*Department of Mechanical Engineering,
School of Engineering, Kinki University

**近畿大学工業技術研究所

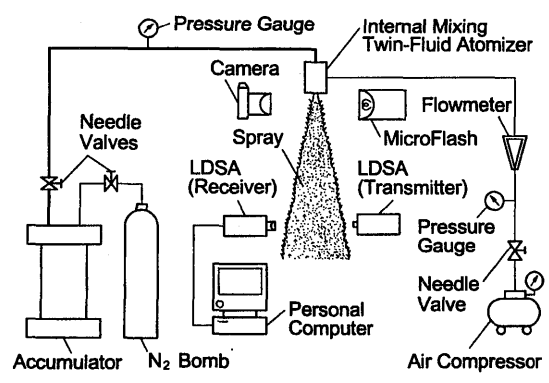
**Research Institute of Industrial Technology,
Kinki University

寸法を種々に変化させて、高粘度液体燃料の微粒化と廃油の燃焼に及ぼす影響を調べた¹⁾⁻³⁾。その結果、現在、使用されている燃焼バーナーにおいて、燃料の微粒化に必要な動力の約 30 %の動力で稼働でき、廃油の燃焼時において、トレードオフの関係にある一酸化炭素 CO と窒素酸化物 NOx の同時低減が可能である廃油燃焼バーナーを開発した。これらの結果は、主に廃油の流量が比較的少ない場合であり、廃油は日々堆積しているのが現状であるため、大量の廃油を消費する必要がある。

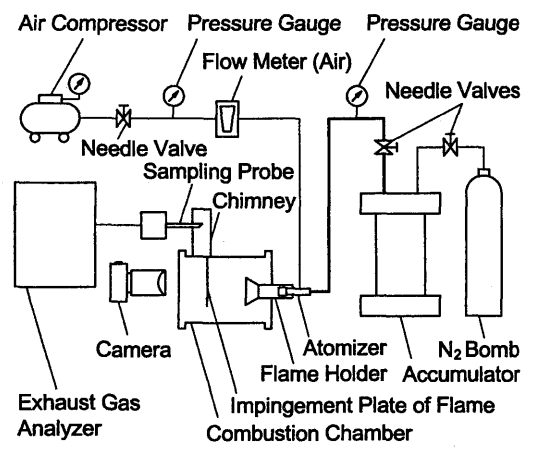
そこで、本報では、廃油の流量を大幅に増加させた時 (400 l/h)、噴霧の微粒化に及ぼす影響と大量の廃油の微粒化に必要な微粒化用空気流量を調べた。また、従来よりも廃油の流量が増加した時 (15 l/h)、保安器の幾何学寸法が燃焼火災に及ぼす影響を調べ、最適な燃焼状態が得られる形状・寸法を決定した。

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略を示す。図 1(a) は噴霧特性測定用の実験装置であり、(b) は燃焼特性と排出ガス



(a) 噴霧特性測定用



(b) 燃焼特性と排出ガス特性測定用

図 1 実験装置の概略

特性測定用の実験装置である。供試液体は、非燃焼実験において 300 K で動粘度がガソリンに相当する $\nu_f=0.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の水、船舶廃油に相当する $\nu_f \approx 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ およびこれらの中間の $\nu_f \approx 200 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ のグリセリン水溶液を用い、燃焼実験において 300 K で動粘度が $\nu_f=350 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の船舶廃油を用いた。船舶廃油の成分と割合は、試供される船舶廃油により変動するため一定にできないが、ほぼ同一の動粘度を有する船舶廃油を用いた。船舶廃油は、船舶燃料の残渣油やエンジンオイル廃液の他に水分が多く含まれている。

図 1(a) より、非燃焼実験において、供試液体は窒素ポンペで加圧して噴射弁に供給し、微粒化用空気はコンプレッサを用いて噴射弁に供給した。噴射弁の混合室内の流動状態は、マイクロフラッシュを用いて散乱光撮影した。噴霧角は、デジタルカメラで散乱光撮影した画像から直接測定した。噴霧粒径は、フランホーファ回折理論に基づく粒度分布解析装置 (東日コンピュータアプリケーションズ社製、LDSA-1400A) を用いて行い、(1) 式に示すザウタ平均粒径⁴⁾で測定結果を整理した。ここで、 d_i は液滴の直径、 n_i は直径 d_i の液滴の個数である。

$$D_{32} = \frac{\sum_i n_i \cdot d_i^3}{\sum_i n_i \cdot d_i^2} \dots\dots\dots (1)$$

図 1(b) より、燃焼実験において、廃油は窒素ポンペで加圧し、微粒化用空気はコンプレッサを用いて噴射弁に供給した。燃焼用空気は、燃焼時の燃焼器内外の圧力差によって燃焼器内に自然に流入する空気を用いた。燃料の着火は、プロパンガスのパイロット炎を保安器後方から数秒間挿入して行った。火災の燃焼状態は、燃焼容器を取り外した状態で、保安器前方と側方からの写真撮影により観察した。燃焼条件として、廃油の質量流量は $M_f=15 \text{ g/s}$ (廃油の噴射圧は $P_f=0.39 \text{ MPa}$)、微粒化用空気の質量流量は $M_a=2.0 \text{ g/s}$ (微粒化用空気圧は $P_a=0.24 \text{ MPa}$) である。

図 2 に燃焼器の概略を示す。燃焼器は、内径 $\phi 560 \text{ mm}$ 、長さ約 1000 mm の円筒形であり、燃焼器入口から 600 mm の位置に火災の衝突板を設けた。廃油の燃焼状態は、燃焼器を取り外した状態で保安器前方と側方からの写真撮影により観察した。

図 3 に内部混合型二流体噴射弁の概略を示す。また、図 4 に内部混合型二流体噴射弁の詳細を示し、図 5 にノズルチップの詳細を示し、表 1 に噴射弁の

諸元を記す。本研究で考案した内部混合型二流体噴射弁は、混合室内で液体と微粒化用空気が混合した後、噴孔から噴出する構造になっている。金ら^{5), 6)}の研究から、内部混合型二流体噴射弁の特性は、混合室内の気液の流動状態によって大きく変わることが明らかになっている。本研究の目的は、廃油のような微粒化し難い高粘度液体を小さな動力で微粒化させることである。そのため、混合室内で液体に大きなく乱が与えられ、液体と空気の混合を促進させることが重要であり、微粒化用空気の流入孔に旋回角 $\theta'=45\text{ deg.}$ を設けた。混合室内に供給する液体流入孔の噴孔数は、6個 ($n=6$) とした。また、混合室の高さは $h=2, 10, 30\text{ mm}$ とし、噴射弁出口の噴孔数 N は、噴孔の総断面積が同一で単噴孔 ($N=1$)、多噴孔 ($N=4$) とした。

図6に噴射弁を設置した状態における保炎器の概略を示す。本研究では、火炎を安定燃焼させるために円錐型保炎器⁷⁾を用いた。保炎器入口から噴射弁の噴孔出口までの距離は、40 mm で一定とした。保炎器直管部の直径は、 $D=\phi 80\sim\phi 140\text{ mm}$ 、保炎器直管部の長さは、 $L=260\text{ mm}$ で一定とし、保炎器直管部に設けた空気流入孔の直径は、 $\phi 12\text{ mm}$ で一定とした。

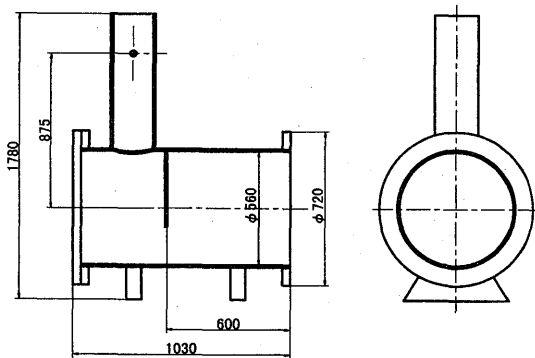


図2 燃焼器の概略

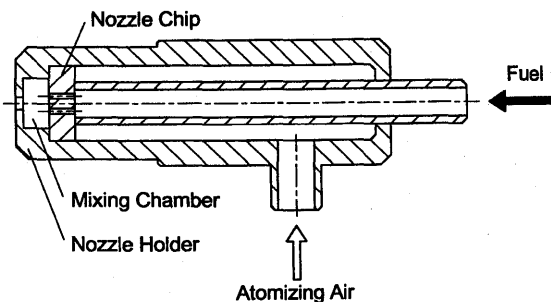


図3 内部混合型二流体噴射弁の概略

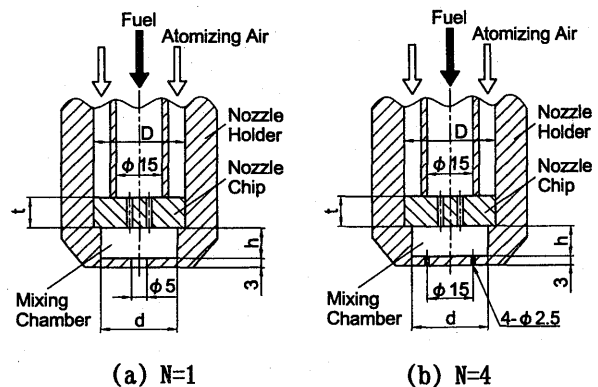


図4 内部混合型二流体噴射弁の詳細

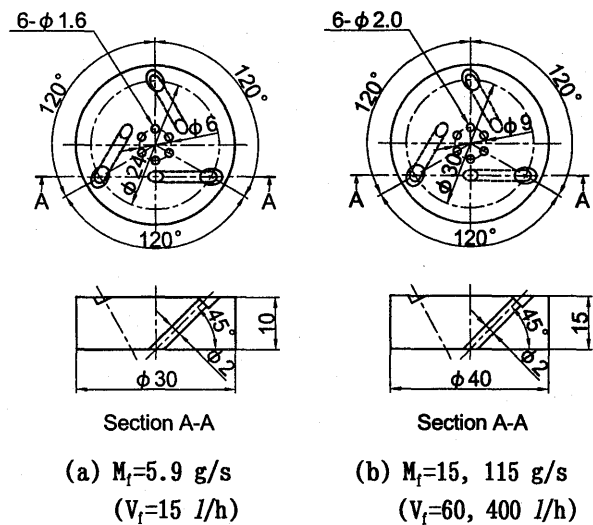


図5 ノズルチップの詳細

表1 噴射弁の諸元

	D mm	t mm	d mm	h mm
$M_f=5.9\text{ g/s}$	$\phi 30$	10	$\phi 25$	2,10,30
$M_f=15\text{ g/s}$	$\phi 40$	15	$\phi 35$	2,10,30
$M_f=115\text{ g/s}$				

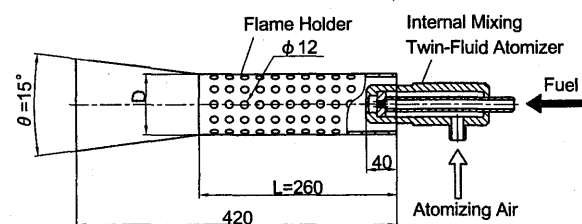


図6 保炎器の概略

3. 実験結果および考察

3.1 噴霧粒径測定位置の影響

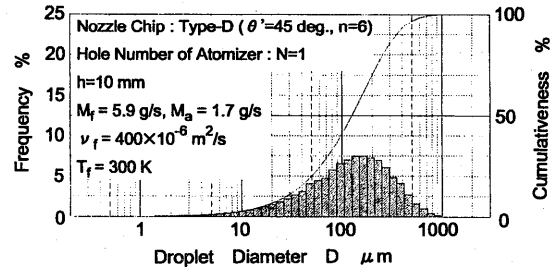
初めに、噴霧粒径の測定位置を決定するために、噴射軸方向に測定位置を変化させてザウタ平均粒径を測定した。図7に噴射軸方向に測定位置 z を変化させた時のザウタ平均粒径の変化を示す。

図7より、各測定位置において、測定されたザウタ平均粒径にはばらつきがあるものの、測定位置が噴射弁の噴孔出口から $z=180$ mm までは、測定位置に依らず、ほぼ同じザウタ平均粒径が得られている。しかし、 $z=200$ mm を超えると、ザウタ平均粒径は大きくなる傾向が見られる。この結果より、ザウタ平均粒径の測定位置は、噴射弁の噴孔出口から $z=150$ mm の位置に決定した。

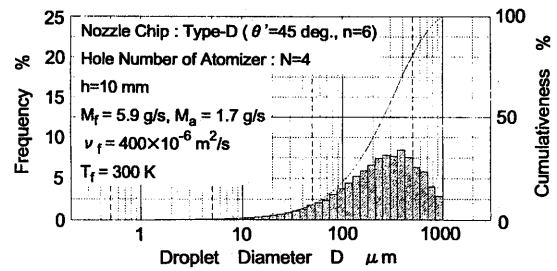
3.2 噴射弁の噴孔数の影響

図8に動粘度 $\nu_f \doteq 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ における単噴孔 ($N=1$) と多噴孔 ($N=4$) の噴射弁の粒度分布を示す。燃料の質量流量は $M_f=5.9 \text{ g/s}$ 、微粒化用空気の質量流量は $M_a=1.7 \text{ g/s}$ である。図8より、 $N=1$ の場合、約 $150 \mu\text{m}$ の比較的小さな粒径が多く分布しているが、 $N=4$ の場合、 $100 \mu\text{m}$ 以下の粒径の頻度は約 20% と少なく、約 $200 \sim 600 \mu\text{m}$ の比較的大きな粒径が多く分布しており、粒度分布は噴射弁の噴孔数 N の違いによる影響が顕著に現れている。

図9に噴射弁の噴孔数 N がザウタ平均粒径に及ぼす影響を示す。図9(a)は動粘度 $\nu_f=0.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、(b)は $\nu_f \doteq 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合であり、燃料の質量流量は $M_f=15 \text{ g/s}$ である。図9(a)より $\nu_f=0.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合、噴射弁の噴孔数 N に依らず、微粒化用空気の質量流量 M_a の全範囲において、

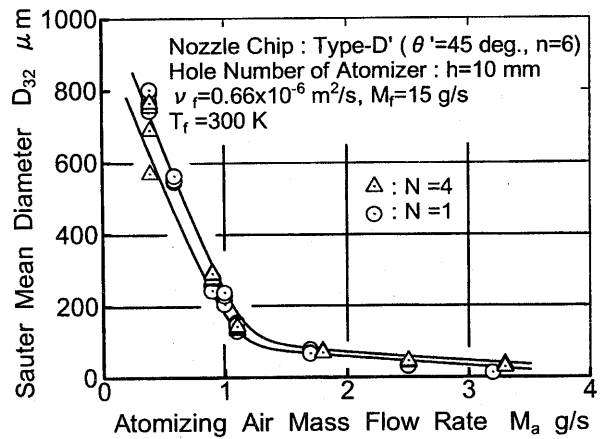


(a) $N=1$

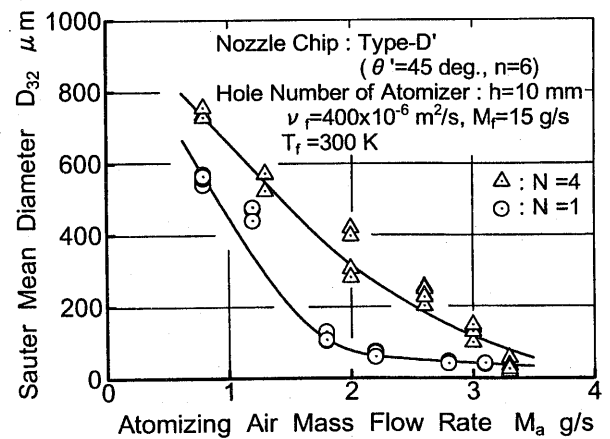


(b) $N=4$

図8 噴射弁の噴孔数が粒度分布に及ぼす影響



(a) $\nu_f=0.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



(b) $\nu_f \doteq 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

図9 噴射弁の噴孔数がザウタ平均粒径に及ぼす影響

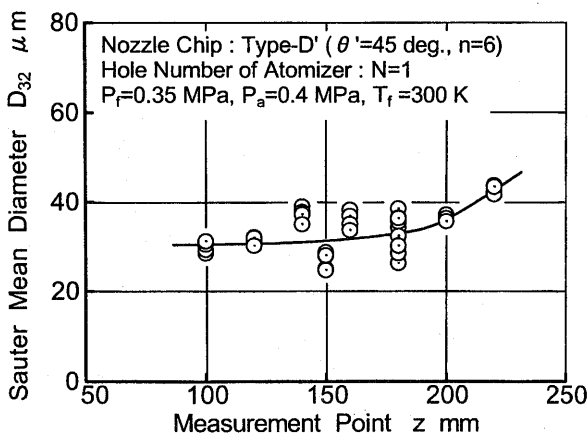


図7 噴霧粒径測定位置がザウタ平均粒径に及ぼす影響

M_a に対するザウタ平均粒径の値はほとんど同じであり、噴射弁の噴孔数 N の影響は見られない。一方、図 9(b)より $\nu_f \doteq 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合、噴射弁の噴孔数 N に依らず、ザウタ平均粒径は M_a の増加に伴い小さくなる。しかし、同じ M_a で比較すると、 $N=1$ の噴射弁は $N=4$ の噴射弁よりもザウタ平均粒径が小さくなっている。噴孔の総断面積が同じである場合、小さな噴孔を有する多噴孔の噴射弁の方が微粒化し易く、小さな液滴が得られることが予想されたが、 $N=4$ の噴射弁の場合、噴孔径が小さくなっているため、高粘度液体を用いると、混合室内で分裂した液体が噴出し難くなり、 $N=1$ の噴射弁よりも噴射弁出口における噴出速度が低下し、微粒化状態が悪くなるものと考えられる。

3.3 混合室の高さの影響

混合室の容積は、液体と微粒化用空気の混合促進に影響を及ぼすものと思われる。そこで、混合室の直径を一定とし、混合室の高さ h を変化させて混合室の高さの影響を調べた。図 10 に混合室の高さ h が噴霧角に及ぼす影響を示し、図 11 にザウタ平均粒径に及ぼす影響を示す。燃料の質量流量は $M_f=15 \text{ g/s}$ 、微粒化用空気の質量流量は $M_a=3.0\sim 3.2 \text{ g/s}$ である。

図 10 より、 $h=2 \text{ mm}$ の場合、液体の動粘度に依らず、噴霧角は大きくなっており、 h が高くなるにつれて噴霧角は小さくなっていき、 $h=10 \text{ mm}$ 以上になると、噴霧角はほとんど変化しない。この傾向は動粘度に依らず、同じである。

図 11 より、 $\nu_f=0.66 \times 10^{-6}$ 、 $\nu_f \doteq 200 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合、 h が高くなっても、ザウタ平均粒径はほとんど変化しないが、 $\nu_f \doteq 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合、 h が高くなるにつれてザウタ平均粒径は大きくなり、微粒化状態が悪くなるのがわかる。この結果から、 h が低い噴射弁は、高粘度液体の微粒化に適していることがわかる。

一般に、低粘度液体燃料は微粒化し易いため、低粘度液体燃料の噴霧角は、高粘度液体燃料の噴霧角よりも大きくなると思われるが、図 10 に示した結果は、この逆の傾向が現れている。これは、 $h=2 \text{ mm}$ について見ると、図 11 に示すザウタ平均粒径の大きさを比較しても明らかなように、高粘度液体の噴霧液滴は、低粘度液体の噴霧液滴よりも大きいため、微粒化用空気の旋回流を付加されて噴射弁から噴出した噴霧液滴は、噴射軸に対して半径方向の運動量が大きくなるものと考えられる。また、微粒化用空気の質量流量が多くなると、噴霧内への空気の巻き込

みが顕著になり、噴霧の広がりを抑制するようになるものと考えられる。したがって、噴射軸に対して半径方向の運動量が小さく、この空気の巻き込みの影響を大きく受ける低粘度液体の噴霧角の方が小さくなるものと考えられる。

3.4 液体の質量流量の影響

廃油は日々堆積しているため、大量に消費する必要がある。図 12 に最適な幾何学形状寸法の噴射弁を用いて、液体の質量流量 M_f を最大 $M_f=115 \text{ g/s}$ (液体の体積流量 $V_f=400 \text{ l/h}$) まで大幅に変化させた時のザウタ平均粒径の変化を示す。図 12(a)は $\nu_f=0.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合を示し、(b)は $\nu_f \doteq 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合を示す。

図 12(a)より、微粒化用空気の質量流量 M_a を増加させていくと、 M_f に依らず、最小で約 $40 \mu\text{m}$ のザウ

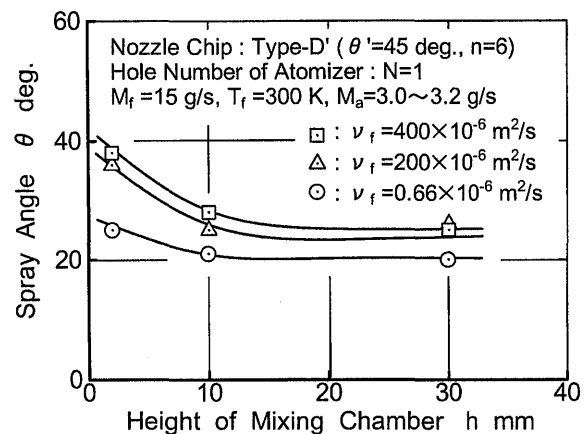


図 10 混合室の高さが噴霧角に及ぼす影響

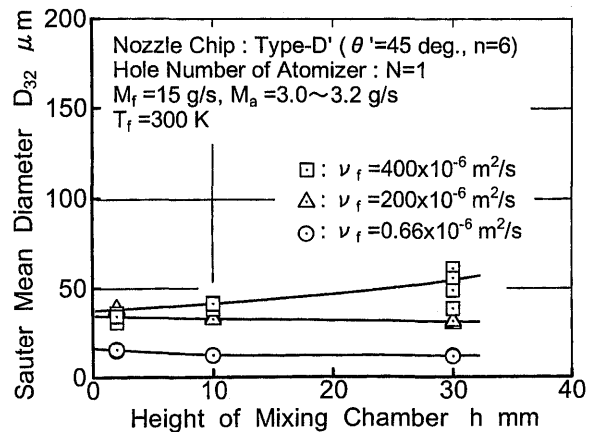
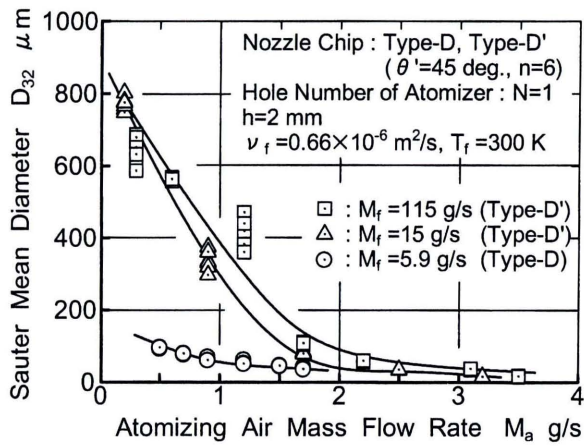


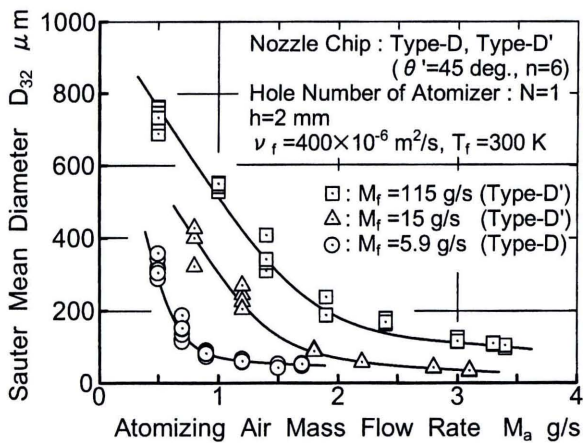
図 11 混合室の高さがザウタ平均粒径に及ぼす影響

タ平均粒径が得られている。 M_f が比較的少ない場合 ($M_f=5.9$ g/s)、 M_a が約 1.7 g/s において最小のサウタ平均粒径が得られている。また、 M_f が多い場合 ($M_f=115$ g/s)、 M_a が約 3.4 g/s において最小のサウタ平均粒径が得られており、 M_f が 115 g/s まで大幅に増加しても、 M_a を約 2 倍増加させることにより、サウタ平均粒径が小さな噴霧が得られることがわかる。

また、図 12(b)より、 $M_f=5.9, 15$ g/s の場合、 M_a を増加させていくと、 $M_a=1.7$ g/s においてサウタ平均粒径が約 40 μm の小さな粒径が得られている。一方、 $M_f=115$ g/s の場合、最大の微粒化用空気の質量流量 $M_a=3.4$ g/s におけるサウタ平均粒径は、 $M_f=5.9$ g/s の時に得られた最小のサウタ平均粒径と比較して大きくなっている。しかし、 $M_f=115$ g/s において、 M_a の増加に対するサウタ平均粒径の変化から、 $M_f=5.9$ g/s で最小のサウタ平均粒径が得られた M_a ($M_a=1.7$



(a) $\nu_f = 0.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



(b) $\nu_f = 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

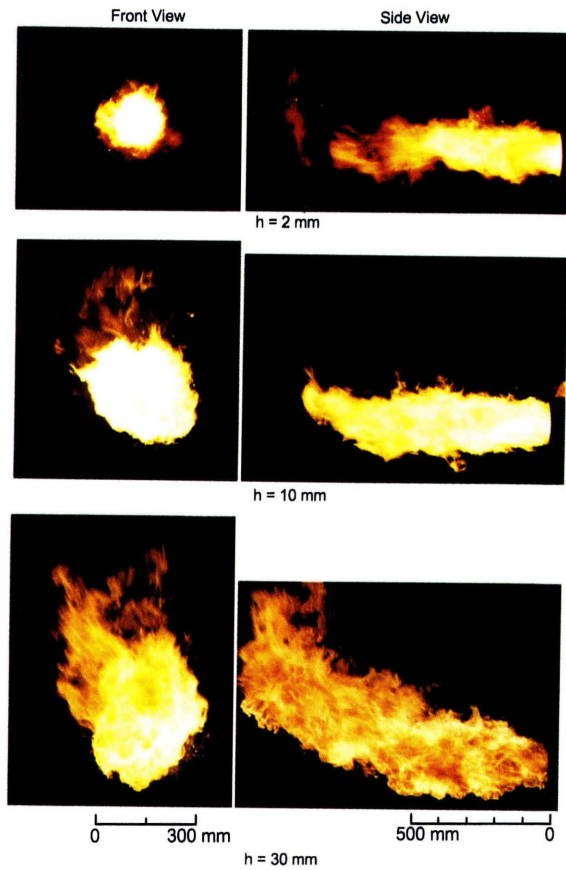
図 12 液体の質量流量がサウタ平均粒径に及ぼす影響

g/s) の約 3 倍増加させることにより、 M_f が少ない場合に相当するサウタ平均粒径が得られることが予想される。

3.5 混合室の高さが燃焼火炎に及ぼす影響

図 13 に混合室の高さ h が廃油の燃焼に及ぼす影響を示す。廃油の質量流量は $M_f=15$ g/s、微粒化用空気の質量流量は $M_a=2.0$ g/s である。図 13 より、 h の増加に伴い、火炎は長くなっている。 $h=2$ mm の場合、 h が高い噴射弁と比較して火炎は短くなっており、火炎は輝炎の領域が少なく、脈動を伴った不安定な燃焼をしていることが観察された。これは、 h が低い場合、 h が高いものと比較して混合室内で微粒化用空気に与えられた旋回流が、噴出する噴霧に大きく影響を及ぼし、半径方向の運動量を増加させるものと思われる。その結果、噴霧の広がりが大きくなり、短炎燃焼を起こすものと考えられる。

さらに h が高くなると ($h=10$ mm)、火炎は輝炎であり、未燃の燃料油滴や黒煙の発生はほとんど観察されず、安定燃焼をしている。さらに h が高くなる



Type - L1(D = ϕ 80 mm), Type - D, $M_f = 15$ g/s, $M_a = 2.0$ g/s, $\nu_f = 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_f = 300$ K

図 13 混合室の高さが廃油の燃焼に及ぼす影響

と ($h=30$ mm)、火炎は長く、赤橙色の火炎になり、黒煙が大量に発生するのが観察された。

これらの結果から、混合室の高さが $h=10$ mm の噴射弁を用いると、輝炎が得られ、黒煙の発生がほとんど無く、吹き消えが起り難い安定した燃焼状態が得られることがわかった。

3.6 保炎器直管部の直径が燃焼火炎に及ぼす影響

保炎器の直径が再循環領域内において火炎の安定燃焼に大きく影響するものと思われる。そこで、保炎器直管部の直径を $D=\phi 80\sim\phi 140$ mm まで変化させて火炎の観察を行った。図 14 に保炎器直管部の直径 D が廃油の燃焼に及ぼす影響を示す。廃油の質量流量は $M_f=15$ g/s、微粒化用空気の質量流量は $M_a=2.0$ g/s である。

図 14 より、 D が大きい保炎器の場合 ($D=\phi 120$ mm、

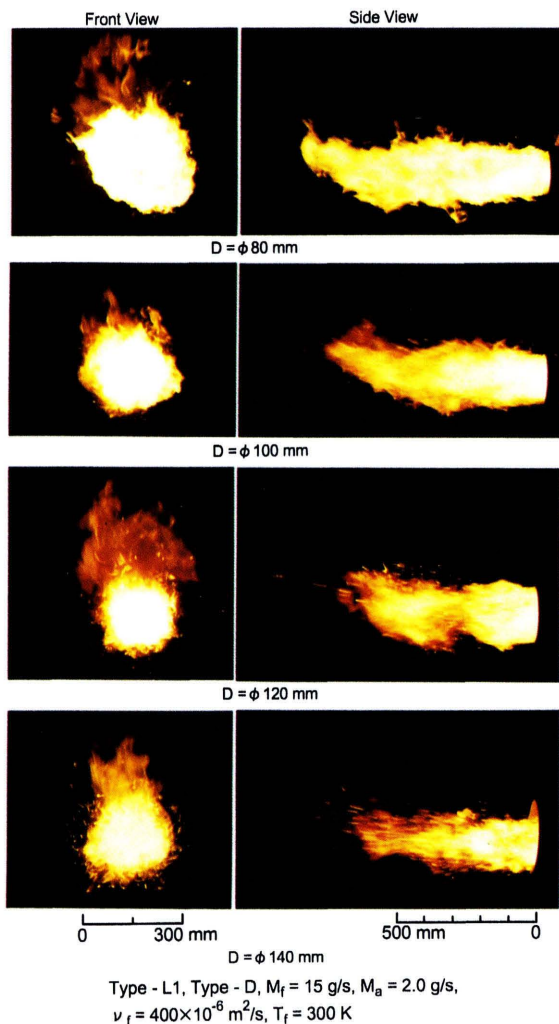


図 14 保炎器直管部の直径が廃油の燃焼に及ぼす影響

$\phi 140$ mm)、火炎全体が赤橙色で短く、火炎の先端から多数の未燃の燃料油滴が生成されている。また、黒煙や未燃炭化水素である白煙の排出量が非常に多く、火炎は脈動を伴った不安定な燃焼をしていることが観察された。

一方、 D が小さい保炎器の場合 ($D=\phi 80$ mm)、火炎は輝炎であり、黒煙や未燃の燃料油滴の発生が少なくなっていることが観察された。

これらの結果から、保炎器直管部の直径を噴射弁の外径寸法に応じて最適な大きさにすると、比較的少ない微粒化用空気流量 M_a で輝炎が得られ、黒煙がほとんど発生しない安定燃焼が可能であることがわかる。

以上の結果から、単噴孔 ($N=1$) で混合室の高さが $h=10$ mm の噴射弁を用い、本研究で使用した外径 $\phi 50$ mm の噴射弁に対し、保炎器直管部の直径が $D=\phi 80$ mm の保炎器を用いると、比較的少ない微粒化用空気流量で輝炎が得られ、黒煙がほとんど発生しない火炎が得られる。また、吹き消えが起り難く、安定した燃焼状態が得られることが明らかになった。

4. 結言

- (1) 噴射弁の噴孔数 N は、液体の動粘度に依らず、ザウタ平均粒径に影響を及ぼす。また、混合室の高さ h は、低粘度液体の場合、噴霧特性に影響を及ぼさないが、高粘度液体の場合、噴霧特性に影響を及ぼす。
- (2) 液体の質量流量 M_f が大幅に増加した場合 ($M_f=115$ g/s)、微粒化用空気の質量流量 M_a を約 2~3 倍増加させることにより、 M_f が少ない場合 ($M_f=5.9$ g/s) に相当するザウタ平均粒径を得ることが可能である。
- (3) 燃焼火炎は、混合室の高さ h と保炎器直管部の直径 D に大きく影響される。
 - (a) $h=2, 30$ mm、 D が噴射弁の外径 ($\phi 50$ mm) に対して大きい場合 ($D=\phi 120, \phi 140$ mm)、火炎は赤橙色であり、黒煙の排出量が多く、脈動を伴った不安定な燃焼状態になる。
 - (b) $h=10$ mm、 D が小さい場合 ($D=\phi 80$ mm)、火炎は輝炎であり、未燃の燃料油滴や黒煙の発生はほとんど観察されず、吹き消えが起り難い安定した燃焼状態が得られる。
- (4) 本研究で開発した廃油燃焼バーナーは、燃料の質量流量 M_f が大幅に増加しても、 M_f が少ない時に得られたザウタ平均粒径に匹敵する小さな噴霧液滴を得ることができる。また、比較的少

ない微粒化用空気流量で輝炎が得られ、黒煙がほとんど発生しない火炎が得られる。

謝辞

本研究は、第27回（平成12年度）財団法人 岩谷直治記念財団 科学技術助成金によった。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- (1) 河口勇治・玉木伸茂・清水正則・廣安博之，省エネルギー型・低公害廃油燃焼バーナーの開発研究（Ⅰ），内部混合型二流体噴射弁による高粘度液体噴流の微粒化，日本エネルギー学会誌，82-10，pp. 772-779，2003.
- (2) 玉木伸茂・清水正則・廣安博之・河口勇治，省エネルギー型・低公害廃油燃焼バーナーの開発研究（Ⅱ），内部混合型二流体噴射弁による廃油の燃焼と排出ガス特性，日本エネルギー学会誌，82-10，pp. 780-786，2003.
- (3) 玉木伸茂・清水正則・廣安博之，内部混合型二流体噴射弁による高粘度液体噴流の微粒化，第8回微粒化アジア会議，第12回微粒化シンポジウム講演論文集，pp. 315-320，2003.
- (4) 日本液体微粒化学会編，アトマイゼーション・テクノロジー，微粒化の基礎と基本用語辞典，森北出版株式会社，34，2001.
- (5) 金相進・西田恵哉・廣安博之・近藤真也，内部混合型二流体噴射弁による液体の微粒化特性（Ⅰ），日本エネルギー学会誌，76-3，pp. 220-228，1997.
- (6) 金相進・西田恵哉・廣安博之・近藤真也，内部混合型二流体噴射弁による液体の微粒化特性（Ⅱ），日本エネルギー学会誌，76-4，pp. 305-312，1997.
- (7) 小林清志・荒木信幸・牧野敦，機械工学基礎講座燃焼工学基礎と応用，理工学社，pp. 202-203，1988.