

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

DME 噴霧燃焼における火炎基部での混合の抑制による火炎輝度の変化

Attainment of Luminous DME Spray Flame by Controlling Air Mixing at the Flame Base

小林 雅律^{*1,3}・井口 明¹・前田 和夫¹・平山 幸治¹・阿蘇谷 利光¹・塩谷 仁²・小熊 光晴²
藤田 修³

KOBAYASHI, Masanori^{*1,3}, IGUCHI, Akira¹, MAEDA, Kazuo¹, HIRAYAMA, Koji¹, ASOTANI, Toshimitsu¹,
SHIOTANI, Hitoshi², OGUMA Mitsuharu², and FUJITA, Osamu³

¹ 出光エンジニアリング(株) 〒261-8501 千葉市美浜区中瀬 1-3
Idemitsu Engineering Co., Ltd., 1-3, Nakase, Mihama-Ku, Chiba, Japan

² (独)産業技術総合研究所新燃料自動車技術研究センター 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564, Japan

³ 北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
Hokkaido Univ., N13, W8, Kita-ku, Sapporo, Japan

2008年1月25日受付; 2008年4月6日受理/Received 25 January, 2008; Accepted 6 April, 2008

Abstract : To apply DME fuel to existing heavy oil boilers, technology that attains the luminous combustion is vital for maintaining the radiant heat transfer. Through this research, a simple method with installation of circular conic shroud on the burner tip is proposed to realize the luminous DME flame. By attaching the optimum-designed shroud, DME spray flame becomes more radiative, and the intensity of radiant heat transfer is increased. Measurements of PM (Particulate Matter) size distribution prove the formation of soot from DME in the luminous flame. Attaching a shroud induces the inhibition of mixing DME spray and circulation flow beside the burner tip, and a fuel-rich area is formed near the burner. As a result of the flow field change, in comparison to a conventional burner, a wider area for thermal decomposition of DME and formation of soot is attained. The improvement of radiant heat transfer of this luminous combustion method is confirmed by application test to the actual boiler.

Key Words : Flame, Burner, Thermal Radiation, Swirl, DME, Boiler, Luminous Flame, Soot, Shroud

1. 緒言

DME (ジメチルエーテル) は、燃焼時の排ガスがクリーンで取り扱いも容易なことから、次世代の燃料として注目されている。DME 燃料はボイラやガスタービン、ディーゼル機関、民生機器、燃料電池など様々な機器に適するが、新たな燃料の速やかな普及には、既に広く利用され、かつ1台当たりの消費が大きいボイラでの使用が効果的である。

現在、日本国内のボイラの約8割は重油を燃料としているが、これをDME 焚きに転換する際に問題となるのが、火炎輝度の低さ[1,2]である。DME 火炎の輝度が低いのは、燃焼時に生成するすすの少なさに起因するが、低輝度ゆえの輻射熱量の減少がボイラ性能に影響を及ぼす場合があ

る。特に、重油専用に設計された中規模以上のボイラは、輻射伝熱による集熱を前提にしていることから、そのままDME に転換すると、火炉での集熱が十分に出来ず、高温の排気が炉頂に到達して蒸気過熱器の温度超過を起こしやすい。これを避けるためにはボイラ負荷を下げざるを得ず、結果としてボイラ能力の低下を招くことになる。従って、火炎の輝度を向上させ、輻射伝熱量を確保することは、既存重油ボイラへのDME の適用を進める上で重要である。

ガス体燃料の輝炎化については、都市ガス等で多く報告されているが[3,4]、DME に関しては、従来からすす生成を抑制する燃料と捉えられており[5]、積極的に輝炎化する燃焼手法の研究は見あたらない。一方、数値解析を通じてDME からすすが生成する可能性を示唆する報告はあり[6,7]、さらに筆者らは、DME の噴流拡散火炎を用いて、特定の燃焼雰囲気においてはDME からすすが生成するこ

* Corresponding author. E-mail: masanori.kobayashi@si.idemitsu.co.jp

とを実験的に確認している[8]. 従って, 実際のボイラにおいても, バーナ構造や燃焼条件を工夫すれば, DME 火炎を輝炎化できる可能性がある.

これまで筆者らは, 既存重油ボイラの燃料転換を容易にする目的で, 加圧した DME を液体のまま重油バーナで噴霧燃焼させる方式を試みてきたが[9], その過程で, バーナ先端に氷状の固形物が付着する現象が観察されることがあった. LPG の噴霧燃焼で同様の現象が報告されていることから[10], 燃料の気化潜熱で水分が凍結し, 燃料を取り込みつつ水和物を生成するアイシング現象と考えられる. この氷塊が大きく成長した際に, 本来青色を呈する DME 火炎が輝炎化する場合があることが見出された. そこで, この輝炎化の要因を探れば, DME 火炎を安定的に輝炎に保持できるバーナの開発につながると考え, 本研究に取り組んだ.

本研究では, ノズル周囲にアイシング現象に模した部品を装着し, DME の噴霧挙動およびすす生成に与える影響を考察した. また, これをもとに実際のボイラに同様の部品を装着することで, 輻射伝熱量の変化等, ボイラ性能への影響を検証した.

2. ノズル形状の変更による輝炎化の検討

2.1. 試験装置

まず, DME 噴霧燃焼における輝炎化の検討を行った装置について述べる. 装置の概略フローは図1の通りである. 貯槽に充填した DME を窒素で蒸気圧以上に加圧し, ベーパーロックを防止しつつ液体のままバーナに供給する. 配管およびバーナ内での DME の気化を防止し, かつ燃焼負荷の調整幅を取るために, DME の最高供給圧力は, 3.0 MPa に設定されている. また, 重油も専用のポンプで供給できることから, 同条件下で燃焼特性の比較も可能である.

試験燃焼炉は炉内径 800 mm, 炉長 1500 mm で, 水冷ジャケット構造となっている. 水冷ジャケットはバーナ軸方向に 500 mm ごとに独立した 3 ブロックで構成され, 各ブロックの炉壁は黒色に塗装されており, それぞれの水温上

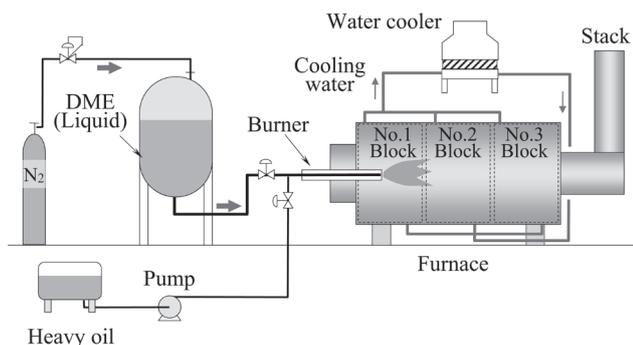


Fig.1 Diagram of the experimental system

昇および水量から, ブロックごとの集熱量を計測できる.

バーナの構造は図2の通りである. 燃焼空気は一次・二次に分けて供給され, 火炎を安定させるため, 一次空気にはスワローにより旋回がかけられる. バーナノズル部は産業用の重油ボイラに多く用いられる中間混合型二流体式を採用し, 燃料を微粒化するための噴霧媒体には圧縮空気をを用いた. DME の噴霧角はバーナ軸に対して 30°, 噴霧孔は $\phi 0.5 \text{ mm} \times 3$ 孔である.

2.2. 輝炎化手法の検討

図3に, DME および重油を噴霧燃焼させた際の火炎を示す. いずれも燃焼負荷は 420 MJ/h とし, 排ガス中の酸素濃度が 6% となるよう空気供給量を調整している. DME の火炎色はうすい青色で, 重油に比べてきわめて輝度が低い. そこで, 輝炎化を図るために空気供給量や一次・二次空気比率の調整, ノズル孔径の拡大による噴霧の粗粒化など, より燃焼不良を起こしやすい条件を試みたが, DME の場合, 一貫して青炎を維持し, 輝炎化は困難であった.

一方, DME 燃焼時に, バーナ先端に図4に示すようなアイシング現象が発生し, 燃焼に影響を及ぼすことがあった. 氷状の固形物は噴霧孔周囲に発生し, ある程度の大きさになると自然に脱落するが, 噴霧孔を覆うように筒状に成長した際には, 特に火炎後半部の輝度が増し, 明るい輝炎となった.

そこで, これと類似の構造体を装着することで, 同様の現象が生じるかどうかを確認することにした. 具体的には, バーナ先端にアイシング現象を模した金属製の筒をノズル周囲を覆うように取り付け, その形状による火炎色や燃焼状態の変化を観察した. 以降, この金属筒をシュラウドと称する. シュラウドと DME のノズル孔との干渉を避けるため, シュラウド装着時はバーナ軸方向に噴霧する単孔のバーナノズルを用いた.

また, 輝炎燃焼に適した形状を見極めるため, シュラウドは内部が円筒状のものと, 円錐状に開いているものの 2 タイプについて, 各部の寸法が異なる 16 種類を試作した. 試作品の形状を図5に, また各部の寸法を表1に示す. シュ

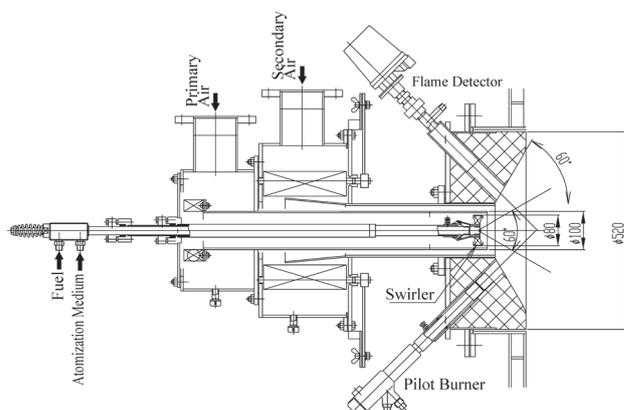


Fig.2 Structure of liquid fuel burner

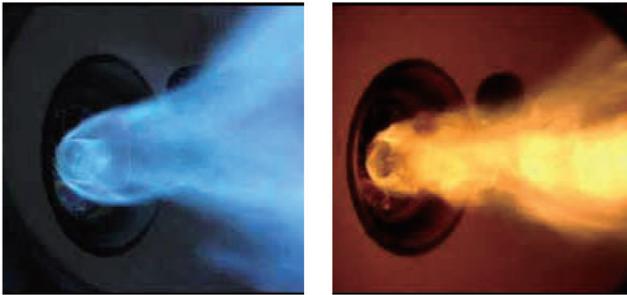


Fig.3 Flame picture of DME (left) and heavy oil (right)

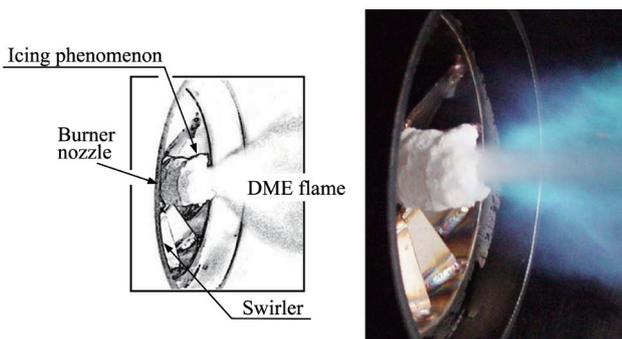


Fig.4 Icing phenomenon in DME spray combustion

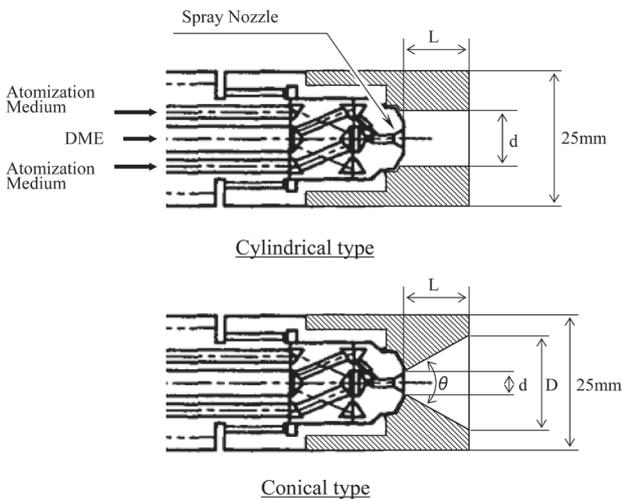


Fig.5 Shape of the shrouds

ラウド外径はバーナ鞘と同径とし、スワラ付近で燃焼空気の流路を狭めることを避けるとともに、バーナ鞘の着脱に支障がないよう考慮した。なお、円錐タイプのシュラウドは、空隙部の開き角 θ と長さ L で開口部の径 D およびシュラウド外径が決まる。一定の角度 θ で開口径 D を拡大するには、シュラウド長さを延ばす必要があるが、今回はシュラウド外径をバーナと同径に制約したことから、長さ L は 20 mm に固定した。

それぞれのシュラウドで燃焼試験を行った結果、円筒タイプの①～⑬はいずれもシュラウド内面に DME 噴霧が衝突して液だれを起こしやすく、安定燃焼は困難だった。一

Table 1 Dimensions of the experimental shroud

Cylindrical type					Conical type			
d (mm)		L(mm)				θ (°)	L(mm) d(mm)	
		20	30	40	50		20	5
5	①	④	/	/	30	⑭		
	②	⑤	⑧	45				
	③	⑥	⑨				⑩	60
	⑦	⑩	⑫	⑮				
	⑫	⑬						

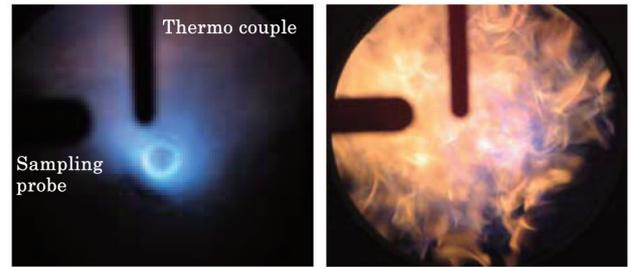


Fig.6 DME flame without shroud (left) and with shroud (right)

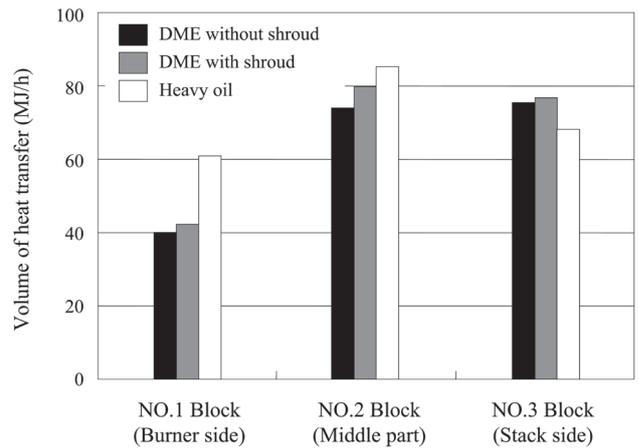


Fig.7 Volume of heat transfer in each block of combustion furnace

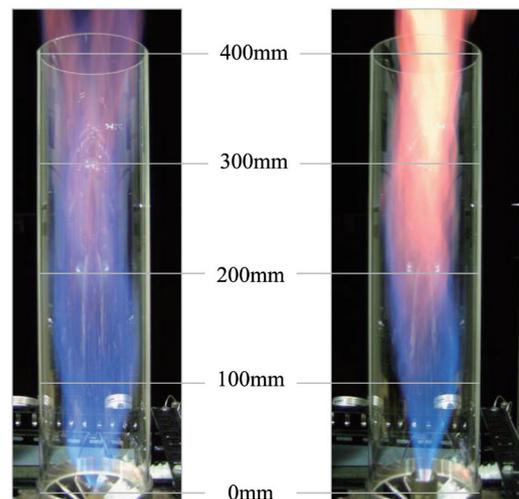


Fig.8 DME flame of small burner without shroud (left) and with shroud (right)

方円錐タイプでは、開き角 30°(⑭) で液だれが発生したものの、45°(⑮) および 60°(⑯) では正常な燃焼が可能であり、特に⑮ではアイシング発生時と同様に高い輝度の火炎が観察されたことから、以降の燃焼試験は頂角 45°の円錐タイプで実施した。

図 6 はシュラウドの有無による DME 火炎の違いを、バーナ正面から撮影したものである。双方とも燃焼負荷は 420 MJ/h で、排ガス中の酸素濃度が 6% となるよう、空気供給量を調整している。なお、写真中の棒状の影は排ガス用プローブと火炎温度計である。シュラウド非装着時の火炎が薄い青色で、極めて輝度が低いのに対して、シュラウドを装着すると火炎が黄色に変化し、輝度が向上する。シュラウドの装着による輝炎化は火炎の後半部で顕著である一方、バーナ近傍の火炎色は非装着時とほとんど変わらず、青炎を保つ。

図 7 に、通常の DME 燃焼時およびシュラウド装着時、重油燃焼時の燃焼炉各冷却ブロックの集熱量を示す。図 1

に記載したように、最も上流のバーナ寄りが NO.1 ブロック、下流のスタック側が NO.3 ブロックで、燃焼条件は DME、重油とも図 6 と同一である。シュラウドの装着により、いずれのブロックでも集熱量が向上しており、輝炎化による輻射伝熱量の増加を示唆している。

また、重油は DME より火炎輝度が高く、特に NO.1 ブロックでの集熱量は DME を大きく上回っている。一方、最下流の NO.3 ブロックにおける集熱量は DME より低いが、これは、この燃焼炉において同じ燃焼負荷の燃料を供給した場合、重油は DME より火炎長が短い傾向があり、火炎が NO.3 ブロックに到達していないことによる。

3. 輝炎化の原理についての考察

3.1. 火炎内の粒子測定

次に、シュラウド装着による燃焼の変化を考察するため、火炎内の微粒子の測定を試みた。輝炎化の際、火炎内にはすす粒子が発生していると考えられることから、火炎内のガスを直接サンプリングし、自動車排ガス超微粒子測定装置(ワイコフ科学製, MD-1A)を用いて、燃焼ガスに含まれる粒子状物質の濃度分布を測定することで、通常の DME 火炎との差異を検証した。

測定に際しては、燃焼炉でのサンプリングが困難だったため、小型の実験用バーナを用いた。燃料ノズルは 60°ホローコーン型 0.75GPH (Delavan 社製) を用い、0.8 MPa に加圧した DME を液体のまま上向きに噴霧させた。また、バーナ周囲に供給される燃焼空気の平均流速は 2.5 m/s とし、燃焼炉と同じくバーナ直近のスワローで旋回をかけて保炎した。シュラウドは、燃料の衝突を避けるため、開き角が噴霧角と等しい 60°円錐型を用いた。微粒子はプローブ管を直接火炎に挿入してサンプリングし、希釈器(東京ダイレック製, MD19-2E)により希釈して、超微粒子測定装置に導入した。当装置は電界中における粒子の電気移動度と粒子径の関係から微小粒子の径分布が計測可能である。プローブ管は火炎軸方向に移動させ、100 mm~700 mm の高さで複数点サンプリングを実施した。

図 8 はシュラウドの有無による火炎の発光の変化を示したもので、バーナノズル孔からの概略高さを付記した。左の通常燃焼時は、火炎高さにかかわらずほぼ青炎が保たれているが、シュラウドを装着した右図では、高さ 200 mm 付近から輝度が増し始め、300 mm 以上では明るい輝炎となっている。本図は撮影のため火炎を耐熱ガラス筒で覆っているが、測定時は長さ 800 mm のステンレス筒に置き換え、筒に開けたサンプリング孔からプローブを挿入した。

図 9 に、バーナからの高さ 150 mm, 200 mm, 300 mm, 500 mm で測定された粒径分布を、シュラウド装着・非装着時それぞれについて示す。グラフの縦軸は粒子の個数濃度を表している。なお、100 mm および 700 mm の高さでは、シュラウドの有無に関わらず、粒子の存在はほとんど確認することができなかった。

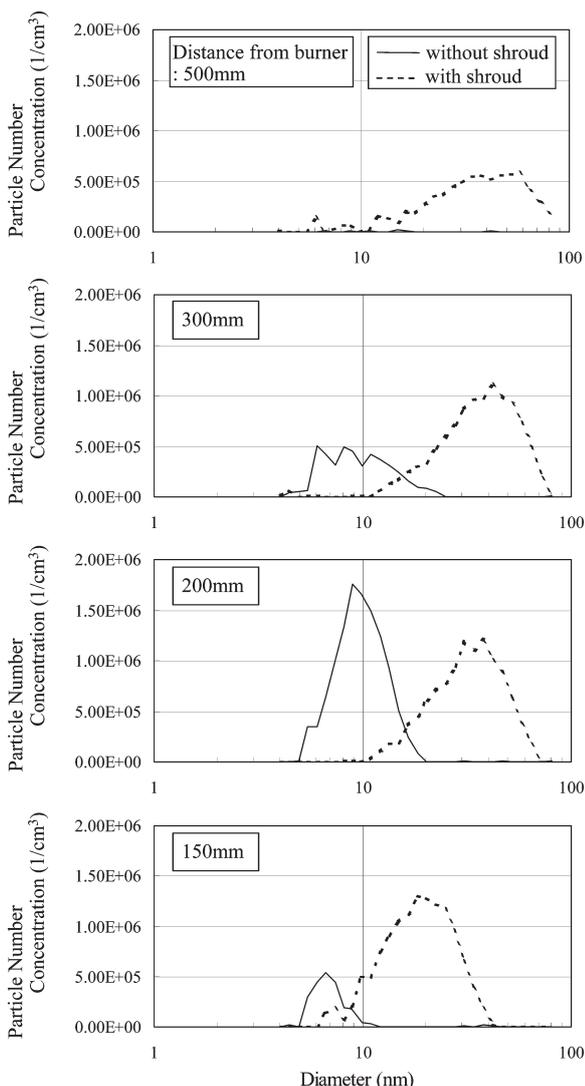


Fig.9 Nanoparticle distributions in DME flames

両ケースの粒子濃度分布を比較すると、まず、ピークの現れる粒子径に明らかな差異が認められる。シュラウドを装着しない場合、バーナから150 mmの高さで6~7 nmにピークが現れ、バーナから離れるにしたがって10 nm付近に強いピークを持つ粒子個数濃度分布となる。一方、シュラウド装着時は、同じ測定位置でのピーク粒径が非装着時より3~4倍大きく、バーナから離れるにつれて、粒径が大きくなる傾向が見られる。

また、高さごとの個数分布に注目すると、シュラウド非装着時は高さ200 mm~250 mmに多数の粒子が現れた後、300 mmでは大きく減少し、500 mmではほぼ消滅している。一方、シュラウド装着時は高さ150 mmから300 mmまで、より広い範囲で同程度の個数分布が見られ、500 mmに至っても、ピーク時の半数程度の粒子が存在する。粒子の存在範囲は、図8で輝炎が表れている位置とほぼ一致することから、当該範囲で30~70 nm径のすす粒子が生成し、これが発光源となっていると解することができる。一方、シュラウド非装着時は、その数分の1の径の粒子が大半であり、ほとんどがすすに成長する前に燃焼して急速に個数が減少するものと考えられる。

3.2. シュラウドの噴霧への影響

前項より、輝炎内部にはすす粒子が存在していることが確認された。すなわち、シュラウドの装着により、噴霧の燃焼過程になんらかの変化が生じ、すす生成が促されているものと考えられる。そこで、噴射直後の燃料粒子の挙動に着目し、シュラウドの有無によるDME噴霧の粒子速度および粒径の違いを検証した。

測定には前項と同じ小型の実験用バーナを用い、位相ドップラ式レーザ粒子分析計(TSI/Aerometrics社製RSA2000-P、以下PDPAと略す)により、バーナ軸上の高さ40 mmから100 mmの間で、噴霧の粒子速度および粒径を調べた。なお、バーナノズルより30 mm以内の粒速・粒径は、PDPAのレーザ光がシュラウドと干渉してしまう

ため、測定は不可であった。

図10は、ノズル孔からの高さ毎のバーナ軸方向の粒子速度を、シュラウド非装着および装着時について示したものである。測定条件は噴霧圧力0.8 MPa、燃焼空気流速は2.5 m/sで一定とした。各位置での粒子速度は、測定された粒子の速度と出現頻度から加重平均して求め、鉛直上向きを正としている(向きについては、以降の図も同じ)。シュラウドを装着しない場合、粒子速度はバーナから離れるにつれてほぼ一定の割合で低下するのに対し、シュラウド装着時は高さ40~60 mmの間で大きく減速し、その後の低下はゆるやかである。また、高さ50 mmまではシュラウド装着時の粒子速度が非装着時を上回るのに対し、それ以降は逆転する。同じ計測を、燃焼空気流速1.2 m/s、3.6 m/s、5 m/sでも行ったが、シュラウドの有無による粒子速度の変化は同様の傾向を示した。また、ザウター平均粒径は計測高さおよびシュラウドの有無によって若干変化するものの、総じて12~15 μm 程度で大きな差異は認められなかった。

同じ噴霧条件であるにもかかわらず、粒子速度に差異が現れるのは、バーナ近傍の流れ場が、シュラウドによって変化するためと考えられる。燃焼空気はスワラにより旋回を与えられ、バーナ下流に図11に示すような縦方向の循環流を生ずる。シュラウドが無い状態では、DMEは噴霧された直後に循環流と接触し、上流方向への流れの影響を受けて、バーナ直近から噴霧速度が漸減する。一方、シュラウドを装着すると、循環流がノズル孔近傍に至らず、シュラウド出口付近に循環流の入り込まない領域ができることから、特に噴射直後の粒子速度の低下が起きにくくなるものと思われる。図12は、高さ40 mmでの粒子速度分布を、燃焼空気の有無で比較したもののだが、シュラウドがない状態では、燃焼空気導入による循環流で、分布が明らかに低速側にシフトしているのに対し、シュラウド装着時は燃焼空気の有無にかかわらず、ほぼ同じ分布が保たれている。すなわち、シュラウドの装着により、この位置で循環流による逆流が抑制されていることがわかる。またシュラウド

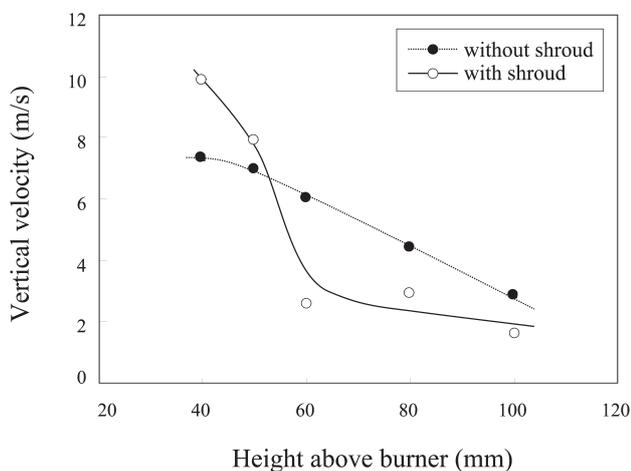


Fig.10 Mean velocity of DME particles above burner

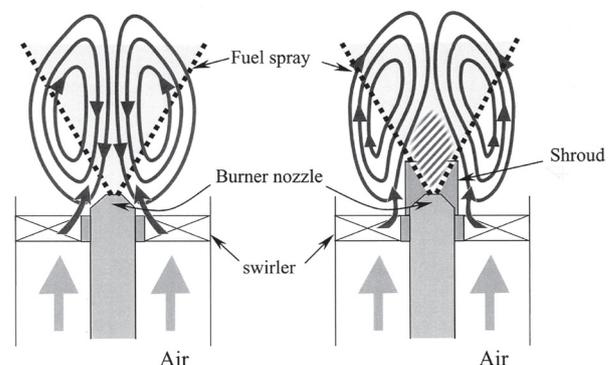


Fig.11 Conceptual flow diagrams around burner (Left: without shroud, Right: with shroud)

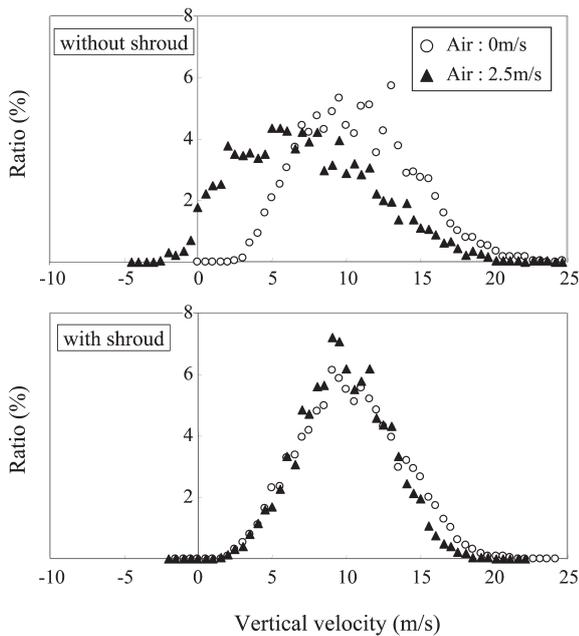


Fig.12 Velocity distribution of DME particles at 40mm above burner

は噴霧される燃料の流れに伴って上流からバーナ基部付近に入る空気も遮断することから、火炎基部には図 11 右の斜線で示すような、燃料と周囲空気の混合が抑制された領域が形成されると考えられる。

一方、シュラウド装着時に高さ 60 mm 以上で粒子速度が急速に低下する原因は明確ではないものの、シュラウドの装着によって、高さ 60～100 mm の領域では DME 粒子が循環流からより強い干渉を受ける流れ場へと、構造変化が生じているものと推測される。

以上の結果はバーナ軸上の粒子速度を測定したもので、一定の開き角で噴射される DME 粒子すべての挙動を示したのではないが、シュラウドは、火炎基部周辺の流れに一定の変化を与えているものと考えられる。

3.3. 輝炎化原理の考察

ここでは、火炎基部での混合抑制とすす生成の関係について考察する。

筆者らはこれまでに、高温空気燃焼下で DME 火炎からすすが生成することを確認している[8]. 高温空気燃焼では、一般の燃料でも火炎の輝度が増加することが知られているが、この原因として、周囲からの入熱の増加によるすす生成の促進とともに、燃焼ガスの浮力低下に起因する空気との混合不足が考えられる。すなわち、燃焼雰囲気が高温になることで、火炎と周囲の空気の密度差が縮小し、燃焼ガスの浮力が低下することにより、火炎への空気の入り込みが減少している可能性がある。そこで、密度差を変化させる代わりに、可変重力装置を用いて重力だけを減少させ、浮力を低下させる実験を行った。その結果、他の条件が同一であるにもかかわらず、すす量が増加し、火炎の輝度が

増す現象が観察された[11]. 火炎中のすす濃度の増加傾向は、空気を高温化して同等の浮力変化を与えた際のすす増加と類似の傾向を示していることから、高温空気燃焼におけるすす濃度増加のかなりの割合は浮力低下により引き起こされていることが示された。浮力が低下すると、周囲の空気との速度差による火炎内への空気の巻き込みが減少し、燃料が高い当量比のまま高温場に晒されることから、すす生成が促進されたものと考えられる。

シュラウドは、火炎基部の流れ場を変化させることで、これに相当する混合抑制効果をもたらす、すす生成を促しているものと推測される。前項で示したように、シュラウドがない場合、バーナから噴射された燃料は直後に循環流に巻き込まれ、比較的早い段階で循環流との混合が進行する。一方シュラウドを装着すると、噴射直後の DME は周囲の流れから遮断されつつ減圧沸騰するため、バーナ近傍に燃料過濃領域が生じる。その後、燃料噴霧は循環流と混合されるが、シュラウド非装着時より下流での混合となる分、より長時間、低酸素雰囲気のまま周囲から熱を受け続けることになる。この結果、高温空気燃焼時と同様のすす生成条件が火炎内に与えられたものと考えられる。

実際にどのような酸素濃度および温度下ですすが生じているかを確認するのは困難であり、まだ十分な知見は得られていないが、これまでの実験結果は、火炎基部での混合抑制とすす生成に強い相関があることを示唆している。シュラウドは、火炎基部での混合抑制を簡易に実現する手段として有効であることから、一般的な既存ボイラへの DME 導入時の揮炎化の手段として有力であると思われる。

4. 実機への適用

以上の結果を踏まえ、実際の重油ボイラを DME に燃料転換した上で、シュラウドの効果を検証した。対象のボイラは炉筒煙管型で最大蒸気発生量 5 t/h、バーナ形式は試験燃焼炉と同じ中間混合型二流体式である。試験に際しては、専用の DME 供給設備を設置した。DME はダイアフラム型ポンプで加圧され、流量調整を経て重油バーナに送られる。設備の最高供給圧力は 3.0 MPa である。転換に際しては、従来の重油と同負荷の DME が燃焼できるよう、燃料供給配管やバーナノズル孔径などの設計にも配慮した。

供試ボイラは燃料を燃焼させる炉筒(火炉)部分と、排気熱を回収する煙管部分で構成される。構造上、炉筒では火炎からの輻射熱伝達が中心となり、煙管では対流伝達による集熱が行われることから、それぞれの部分の集熱比率を調べることで、火炎輝度の違いによる輻射伝熱量の変化をおおむね把握することができる。これを利用して、重油と DME の輻射伝熱量の違い、およびシュラウド装着による輻射伝熱向上効果について検証した。ボイラの構造上、炉筒および煙管部での蒸気発生量は個別に計測できないことから、炉筒および煙管それぞれの出口に温度計を設置し、排ガス性状およびガス温度からそれぞれの出口でのガスエ

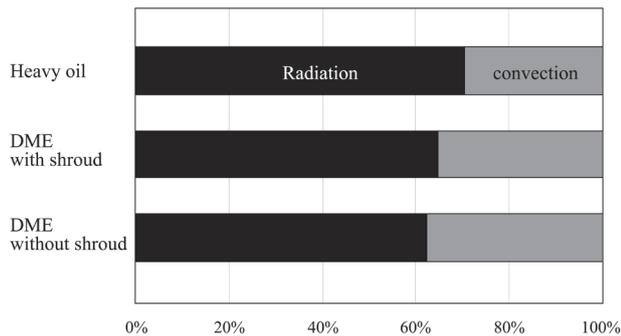


Fig.13 Heat transfer ratio of radiation and convection with actual boiler

ントルピーを算出，投入熱量との差異を計算することで，集熱量および集熱比を把握した。

図13は，重油とDME燃焼においてボイラ全体の集熱量を100%とした時の，輻射伝熱部(炉筒)および対流伝熱部(煙管)の集熱比率を示したものである。いずれも燃焼負荷は 5.2×10^3 MJ/hであり，排気中の酸素濃度が9%となるよう，空気供給量を調整している。なお，供試ボイラは十分な対流伝熱面積を持つため，燃料種や火炎輝度に関わらず，ボイラ全体の集熱率は87~88%でほぼ等しく，集熱量は同等であった。

図に示す通り，シュラウドを装着しない通常のDME燃焼時は，重油より約8%輻射伝熱比率が下がっており，火炎輝度の低下が影響していると考えられる。一方シュラウド装着時の輻射伝熱比率は，重油には及ばないものの，約2%改善しており，輝度向上の効果が示されている。

排ガス性状に関しては，シュラウドの装着によりNO_x濃度が低下する一方，CO濃度は上昇する傾向が見られた。これは，輝炎化に伴って一部に燃焼反応が十分に進まない領域ができるためと推測される。実用上はCO濃度の低減が必要となるが，これについては，輝炎発生後に完全燃焼させてCO排出を抑制する二次燃焼等で対応が可能と考えられる。

なお，本試験ではDME輝炎燃焼でのべ500時間のボイラ運転を実施したが，蒸気発生量に変化はなく，通常の運転が可能であった。また，運転後にボイラを開放し，内部及びバーナノズルを点検したところ，すすの付着や損傷等は全く認められなかった。

5. 結言

本研究では，バーナノズルの先端に覆い(シュラウド)を取り付けるという簡便な方法により，これまで先例のなかったDME火炎の輝炎化を試みるとともに，シュラウドがDME噴霧および燃焼に及ぼす影響について考察した。本研究を通じて得られた知見はおおむね以下の通りである。

(1) 噴霧燃焼におけるDMEの火炎色は通常うすい青色で，重油に比べて極めて輝度が低いが，バーナ先端に円錐

状の凹部を持つシュラウドを取り付け，その底部から燃料を噴霧させると，DME火炎が輝炎化する。

- (2) 輝炎はバーナ端部からやや離れた下流側で観察される。輝炎燃焼時は火炎内に粒子径30~70nmのすすが発生しているが，不輝炎ではその数分の1の径の粒子がほとんどであり，すす生成前に燃焼により消滅する。
- (3) シュラウドの装着により，バーナ近傍に周囲流れの影響を受けない領域が形成される。これにより，バーナ基部でDMEと空気との混合が抑制されることが，DMEからのすす生成を促し，輝炎化に結びつくものと考えられる。
- (4) シュラウドによる輝炎燃焼を実際の重油ボイラに適用した結果，輻射伝熱率の向上が確認されたことから，シュラウドはボイラの輻射伝熱部における集熱量増加に一定の効果があるものと判断される。

謝辞

本研究は経済産業省資源エネルギー庁の補助のもとに実施された。ここに特記して謝意を表す。

References

1. Koizumi, H., Kobayashi, N., Narukawa, K., *Proc. Annual Meeting of Gas Turbine Society of Japan* (in Japanese) 31: 129-134 (2003).
2. Fujimura, K., Ichinose, T., Takashima, R., Kobayashi, Y., Kuroishi, T., Tsukino, T., *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review* (in Japanese) 41-5: 276-279 (2004).
3. Hirano, M., Tatsuno, K., *Journal of Japan Burner Research Association* (in Japanese) 91: 26-35 (1999).
4. Nakamachi, I., Kodama, T., *Industrial Heating* (in Japanese) 20-1: 17-25 (1983)
5. Wu, J., Song, K. H., Litzinger, T., Lee, S., Y., Santoro, R., Linevsky, M., *Combustion Science and Technology* 178-4: 837-863 (2006)
6. Kitamura, T., Ito, T., Senda, J., Fujimoto, H., *Trans. of JSAE* (in Japanese) 34-1: 33-38 (2003)
7. Ogawa, H., Miyamoto, N., Yagi, M., *SAE Technical Paper*, 2003-01-3190: 1-8 (2003)
8. Kobayashi, M., Sagawa, S., Fujita, O., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 73-727: 680-686 (2007)
9. Kobayashi, M., Iguchi, A., Maeda, K., Hirayama, K., Asotani, T., *Proc. 4th Asian DME conf.*: 511-512 (2007)
10. Kawakami, T., Okajima S., *Proc. Annual Conf. of the Hokuriku Shin'etsu Branch JSME* (in Japanese) 31: 172-174 (1994)
11. Jeon, B., Morioka, Y., Ito, H., Fujita, O., *Proc. of the Japanese Symposium on Combustion* (in Japanese), 44:374-375 (2006)