

平成 21年 5月27日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560188

研究課題名（和文） マイクロバブルを利用した液体燃料の予混合燃焼

研究課題名（英文） Premixed Combustion of Liquid Fuel by Supply of Air in Micro-bubbles

研究代表者

北野 三千雄（KITANO MICHIO）

岩手大学・工学部・教授

研究者番号： 30005467

研究成果の概要： 液体燃料（灯油）の入った容器にマイクロバブル発生器を取付け、液内部から液面に向け空気を微細気泡の形で供給する、蒸発・混合器が不要な液体燃料用予混合燃焼器を製作し、これの特性を調べた。液面上部の気泡層近くに置かれた保炎板上には、条件により5タイプの火炎が観察されたが、この中の保炎板が均質に赤熱する場合については、保炎板からの熱放射が強く、また排気のNOx特性も良好なことから、熱放射バーナとして有望であることが示された。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：マイクロバブル，液体燃料，予混合燃焼

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化による異常気象、海面上昇、砂漠化、あるいは酸性雨による森林破壊など地球環境は年々厳しい状況に追い込まれている。それらの原因となるCO<sub>2</sub>や大気汚染物質のほとんどは自動車、工業用炉などの燃焼器から排出されており、化石燃料の枯渇化問題（エネルギー問題）と相まって、クリーンかつ高効率の燃焼器の開発が急務となっている。とくに液体燃料の利用率は高く、液体燃料用燃焼器の燃費率向上、排気浄化などの性能改善がもたらすインパクトは極めて大きい。

燃焼形態には拡散火炎型と予混合火炎型とがあり、それぞれ一長一短を持っているが、完全燃焼の面からすれば後者の方が有利である。したがって、如何に燃料と空気の混合促進を図るかが高効率燃焼器の設計において重要なポイントである。液体燃料を考えると、先ず燃料の蒸発があり、次いで混合があるから、噴霧燃焼のように燃料を微粒化し気液境界面積の増大を図ることは混合促進には極めて有効な方法である。噴霧燃焼では空气中に燃料を分散させるが、気液境界面積の増大は、逆の燃料中に空気を細かな気泡として分散させることでも実現できる。

このような新しい発想に基づく燃焼方式の有効性を確かめるため、本研究が開始された。

## 2. 研究の目的

液面燃焼は噴霧燃焼とともに液体燃料の代表的燃焼方式の一つであるが、燃焼器の構造が非常に簡単になるという利点を有する反面、燃料と空気の境界面積が極めて小さいため、両者の混合を十分に行わせることが難しく、容易に不完全燃焼を生ずる。そこで本研究では、燃料中に微細空気泡を吹込むことにより気液境界面積の増大を図り、混合促進・予混合化による大幅な燃焼特性の改善を試みる。

微細気泡として、近年、水中での気体吸収効率が高く、魚介類や植物に対して高い生物活性作用を持つとして注目されている直径10～数十 $\mu\text{m}$ の気泡（マイクロバブル）を用いる。マイクロバブルは気泡同士の合体が起こりにくく、また液体中への溶解効果もあるため、液面全域にわたって液体内部から均一に空気を供給することが可能となり、火災安定や排気の面で良好な特性を有する液面燃焼が期待できる。

研究対象とするのは、マイクロバブル供給装置により微細空気泡を液体燃料中に吹込んだときの、液面近傍に置かれた保炎板（兼熱循環器）上に安定化される準一次元的な予混合火炎である。空気供給量を変えることによりボイド率を変え、これらと火災安定性、温度分布、大気汚染物質（ $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、すす、など）の排出特性などとの関係を調べ、マイクロバブルを利用する本方式の、液体燃料の液面燃焼における燃焼特性改善への有効性を検証し、実用燃焼器への応用の可能性と問題点を明らかにする。

## 3. 研究の方法

使用したバーナの概略を Fig.1. に示す。バーナの主要部は、燃料（灯油）をプールするための燃料容器、容器内の液温度を一定に保つための保温水管、気泡状態を観察するための耐熱ガラス管とその上端に置かれた発泡セラミック製保炎板（直径40mm、厚さ10mm）、および燃料容器下部に取付けられたマイクロバブル発生装置から構成されている。当初、バブル発生用空気だけの燃焼を試みたが、空気量がかかなり不足することが分かったので、これを補うため、中央に配置した外径10mmの管から空気を供給した。なお、空気管上端には蓋付きの焼結金属円筒（公称ろ過径 $70\mu\text{m}$ 、外径10mm、内径6mm、高さ20mm）を取付け、供給空気が均一に半径方向にしみ出すようにした。空気管先端と保炎板下面との距離は自由に調節できるが、本実験では15mmとしている。

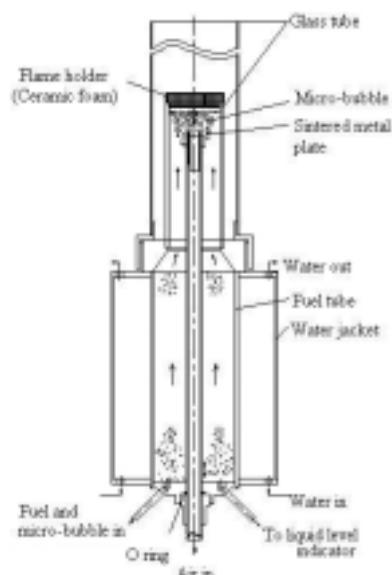


Fig.1 Experimental burner.

燃料供給にはシリンジを利用した。プランジャーをラック・ピニオン機構を介してステップモータにより往復駆動させ、その回転方向を反転させることで燃料の吸引あるいは吐出を行わせる。これを二系統用意し、コック切り替えにより、一方が吸引のとき、もう一方を吐出とすることで、連続的に燃料を供給した。燃料容器内の液面を連通管により外部でモニターし、ここに取付けた液面検出器からの信号によりステップモータを回転させ、液面が一定となるように燃料供給量を制御した。

保炎板設置については、火災安定の目的に加えて、以前の研究により、灯油などの低揮発性燃料に対しては火炎の熱を積極的に上流にフィードバックさせ燃料の蒸発を促進する必要があることが示されたことを踏まえたもので、多孔性、耐熱性の面で性質の良好な発泡セラミック製のものを使用した。

実験は全て室温、大気圧下、液温20で行った。

## 4. 研究成果

### (1) 気泡発生状況

空気管からの空気供給量  $Q_a$  が0のときの発生状況を Fig.2 に示す。液中では数十 $\mu\text{m}$ 程度の細かい気泡が合体することなく上昇し、液面上には1mm以下の気泡が積み重なったきめの細かな気泡層が形成された。

### (2) 非燃焼時の燃料蒸発量

$Q_a=0$  のマイクロバブル生成用空気流量だけの場合の蒸発量を測定したところ、当量比 $=13.8$ の非常に過濃な混合気形成となった。燃焼時には蒸発量が増え、さらにが増大することから、3.で述べたような空気管をバーナの中央に設置し不足する空気を補うこととした。



Fig.2 Micro-bubbles in the liquid fuel.

### (3) 燃焼時の燃料蒸発量

保炎板が多少濡れる程度に燃料を供給しておき、パイロット火炎により着火させる。保炎板上の火炎が定常になった状態で蒸発量を測定した。結果を Fig.3 に示す。流量  $Q_a$  の増大とともに燃料蒸気流束  $M_f$  [ $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ] は増大するが、これを当量比 との関係で示すと、Fig.4 のようになり、 $Q_a$  の増大とともに は減少し、より希薄側に移ってゆく。

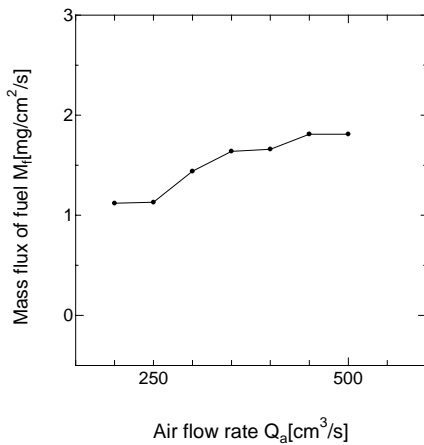


Fig.3 Effects of air flow rate on mass flux of evaporated fuel.

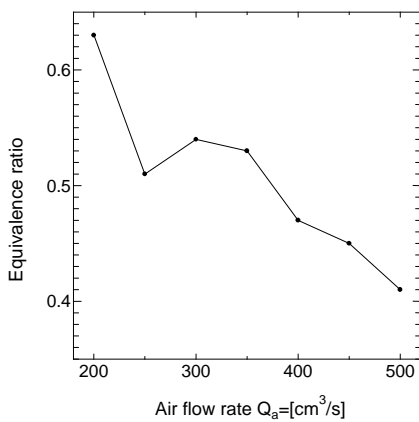


Fig.4 Effects of air flow rate on equivalence ratio of evaporated fuel and air mixture.

### (4) 燃焼状態の分類

$Q_a$  を  $100 \sim 400$  [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ] の範囲とし、それぞれの  $Q_a$  について液面の高さを調整（液面を下げると薄い混合気を形成）することで  $0.1$  ずつ変化させた時の燃焼状態を観察したところ、Fig.5 に示すような5つのパターンに分類された。

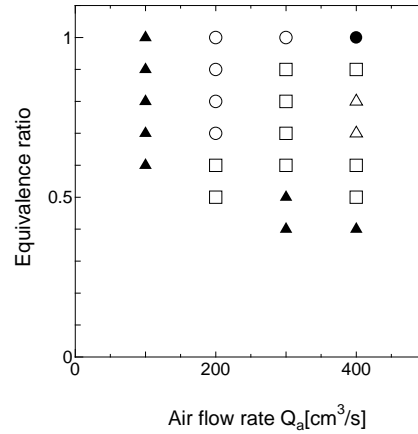


Fig.5 Classification of the combustion states

印はほぼ均一に赤熱燃焼をする場合であり、本研究において最も変動が少なく安定に燃焼している状態 (Fig.6) であるが、この状態となる  $Q_a$  および の範囲は狭い。また、を所定の値に調節する際、特に  $=0.9 \sim 1.0$  においては過濃側に移行し易く極めて調整しにくいことが分かった。これは、量論に近い混合気では燃焼速度が速いため火炎が保炎板内に進入し、したがって蒸発が促進され混合気を過濃にさせる傾向にあるためと考えられる。



Fig.6 State of nearly uniform red-hot combustion.

印は局所的に赤熱燃焼する場合である。赤熱している所では火炎が保炎板に付着しているのに対し、それ以外の所では青炎が浮き上がる形で形成されている。空气管先端に蓋付き焼結金属円筒を取付け保炎板への空気供給を一様になるよう工夫しているものの十分には機能していないためと思われる。

印は拡散火炎を伴って保炎板が赤熱燃焼をする場合である。保炎板は全面にわたり赤熱するが、保炎板外周部および局部的に過濃な部分から筋状の輝炎ができる状態である。ときおりその輝炎先端からすすの排出が見られた。燃焼自体は安定しているものの実用の観点からは好ましい状態ではない。

印は変動を伴う拡散火炎により燃焼する場合であり、赤熱部分は縮小・拡大または移動を繰り返して安定しない。 $Q_a = 100[\text{cm}^3/\text{s}]$ の空気流量が少ない領域、あるいは  $0.5$  の希薄な領域で現れたことから、燃料供給が十分には確保できず、可燃性混合気の形成が場所的にも時間的にも安定しにくかったことが原因と考えられる。また、装置の構造上、マイクロバブル発生装置を燃料容器の底部に斜めに設置せざるを得なかったため、微細気泡が弱いらせん運動をしながら上昇しており、このことも影響した可能性がある。

印では保炎板の外周付近に幾筋かの拡散火炎が形成され、それらの多くからすすが排出される。また、保炎板は全く赤熱しない。

#### (5) 火炎温度測定

中心軸上の軸方向温度分布を、素線径  $100 \mu\text{m}$  の R 型熱電対により測定した Fig.7 に、 $Q_a=200[\text{cm}^3/\text{s}]$ 一定としを Fig.5 の 印で示される安定燃焼範囲内で変化させた時の分布を示す。軸方向距離  $Z$  が  $10\text{mm}$  以下では、 $=1.0$  における温度は  $=0.7 \sim 0.9$  より若干低い。これは  $=1.0$  では燃焼速度が速く火炎が保炎板に張付くように形成されることから、放射による熱損失が大きいと考えられる。 $Z = 50\text{mm}$  の下流では、の増大とともに温度分布は高くなっている。Fig.8 に  $=1.0$  とし  $Q_a$  を  $200, 300[\text{cm}^3/\text{s}]$  と変えたときの分布を示す。 $Q_a$  の増加に対して火炎温度も上昇しているが、これは単位時間当りの燃焼量が増えるためである。

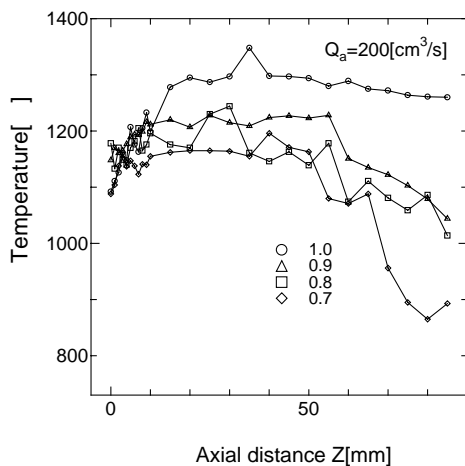


Fig.7 Effects of equivalence ratio on temperature distribution

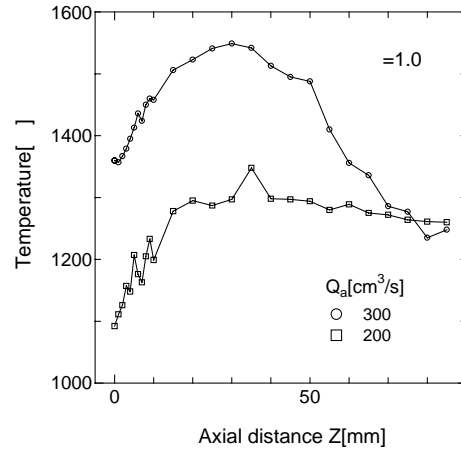


Fig.8 Effects of air flow rate on temperature distribution

#### (6) 燃焼排ガス分析

燃焼状態を調べるために燃焼ガスの分析を  $\text{NO}_x (\text{NO} + \text{NO}_2)$  について行った。分析には CLD 型  $\text{NO}_x$  計を用いた。燃焼排ガスに外気が流入するのを防止するために燃焼管の端に絞り (直径  $20\text{mm}$ ) を置き、ここから燃焼ガスを採取した。 $Q_a=200, 300[\text{cm}^3/\text{s}]$  に対する  $\text{NO}_x$  濃度の当量比依存を Fig.9 に示す。 $200[\text{cm}^3/\text{s}]$  では  $=0.9$  が高くなるほど  $\text{NO}_x$  濃度は上昇しており、Fig.7 の  $=0.9$  が高くなるほど下流での燃焼ガス温度が高いことと良い対応を示している。一方、 $300[\text{cm}^3/\text{s}]$  では、少し希薄側の  $=0.9$  付近で最大となりような変化を示しており、 $\text{NO}_x$  生成には温度とともに酸素濃度も強く影響していることが分かる。測定しているのは Fig.5 の中の 印や 印で示される比較的燃焼状態の良い条件下でのものであるが  $\text{NO}_x$  濃度は最大でも  $60\text{ppm}$  以下であり、排出レベルとしては一般の燃焼器に課されている基準より低い。

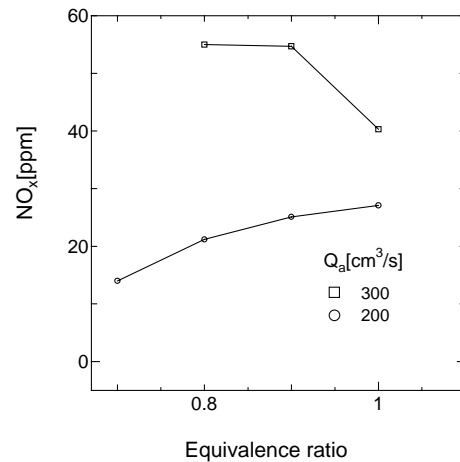


Fig.9 Dependence of  $\text{NO}_x$  emission on equivalence ratio

なお、 $\text{CO}$  濃度に関しては現有するガス分

析器が不調のため詳細な測定が行えなかったが、検知管式の簡便な分析によると、上記と同じ印や印の燃焼状態に対してはCO/CO<sub>2</sub>は最大0.003程度であり、JISによる室内環境保全のための規定である0.002以下の条件に近いレベルに抑えられていた。

#### 今後の展望

気泡発生に公称る過径20 $\mu$ mの焼結金属板を用いた以前の研究と比べると、今回のマイクロバブル発生器での気泡径は約20分の1程度とかなり小さく、また液面上気泡層での気泡の合体も少なくきめの細かな気泡層を作ることができたが、燃焼に必要な空気量を確保できなかった。保炎板直径を細くすることで保炎板に供給される空気流束を増やし（希薄側に振らせ）、これによる燃焼改善も試みたが、燃焼面積が減少することによる熱損失割合の増加で逆に安定な燃焼が得られにくくなった。結果として補助的な空気供給系を必要とした。これらがネックとなって保炎板上に利用可能な燃焼状態を実現できる条件が狭い範囲に限定された。Fig.5の印で示される均一な赤熱燃焼の場合には、保炎板から相当強い熱放射があり、また排気特性も評価できるレベルにあるので、マイクロバブル発生器の複数使用あるいは気泡径を多少犠牲にしても空気供給量を大幅に増やせる別タイプの発生器の使用などにより燃焼安定領域の拡大を図れば、液体燃料用熱放射バーナとしての実用化に期待がもてる。

#### 5. 主な発表論文等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

北野 三千雄 (KITANO MICHIO)  
岩手大学・工学部・教授  
研究者番号:30005467

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし