

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560195

研究課題名(和文) 超小型燃焼器のための分子拡散特性に着目した微小火炎燃焼促進法に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Combustion Enhancement Methods of Micro-scale Laminar Flames for Ultra-micro combustors taking Molecular diffusivity into consideration

研究代表者

中原 真也 (NAKAHARA MASAYA)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20315112

研究成果の概要(和文)：本研究では、混合気を構成する燃料と希釈ガスの分子拡散特性が微小火炎の燃焼速度特性に与える影響、およびその燃焼速度を促進する手法を検討した。その結果、層流燃焼速度を揃えた燃料-酸素-希釈ガス混合気において、希薄混合気では、燃料にメタンやプロパンに比べ分子拡散に優れた水素を用いると、希釈ガスには窒素やアルゴンに比べ分子拡散速度が小さな二酸化炭素を用いると、火炎半径 5mm 以下の微小火炎の領域では、燃焼速度が向上する傾向を示すことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study investigated qualitatively the influence of molecular diffusivities of fuel and dilution gas as composing mixtures on burning velocity characteristics of micro-scale spherical laminar flames in the range of flame radius $r_f < 5$ mm, in order to examine combustion enhancement methods of micro-scale flames. It was clarified in lean mixtures having the same laminar burning velocity that as for fuel hydrogen with the larger molecular diffusivity as compared with methane and propane, and as for dilution gas carbon dioxide with the smaller molecular diffusivity as compared with nitrogen and argon had the tendency to improve its burning velocity of micro-scale flames.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：燃焼工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：予混合燃焼、微小火炎、燃焼速度、火炎サイズ、火炎伸長

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、予混合乱流燃焼に関する従来の概念を大きく変更する分子拡散特性に起因する選択拡散効果の重要性を初めて明らかにした。予混合乱流燃焼を支配するのは未燃混合気側に凸な火炎部分であること、選択拡散効果により乱流燃焼時の局所燃焼速度は層流燃焼速度から変化することも研究代表者によりすでに明らかにされている。

一方、研究代表者は、一般的なサイズの球状伝ば層流火炎でも、マークスタインを初めとし広く議論されてきているように、火炎が外向きに伝ばするにともない変化する火炎半径および伸長に起因し燃焼速度が変化することを確認している。さらに、これら乱流および層流での現象は、非理論混合気で顕著になることも明らかにしている。

ここで、外向きに伝ばする微小な火炎の形状は、火炎があたかも乱れを受け湾曲し微細化した乱流火炎面のうち未燃混合気側に凸な部分のみから構成される形状と一致する。したがって、微小な火炎は層流場であっても、火炎面が有する小さな曲率半径により、反応物の分子拡散と火炎伸長の二つの効果を強く受けることになる。そして、両効果のバランスにより燃焼速度が決定される。すなわち、微小サイズで高伸長を受ける火炎でも、分子拡散速度の大きな水素を燃料とすると、希薄なほど火炎素面の燃焼速度を増大させることが期待できる。

そこで、これまで見落とされていたこの非理混合気での火炎のサイズ(火炎半径)や伸長、さらには反応物の分子拡散速度の重要性に着目することにより、微小な球状伝ば火炎の燃焼特性を解明し、その燃焼促進法を開発することの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究は、乱流燃焼場でのその重要性を明らかにした反応物の分子拡散特性に着目し、微小な球状伝ば層流火炎の燃焼特性が一般的なサイズの火炎の燃焼特性の延長線上で議論できるのか否かについて解明し、より優れた超小型燃焼器の開発に必要な微小火炎の燃焼促進法を提案することを目的とする。

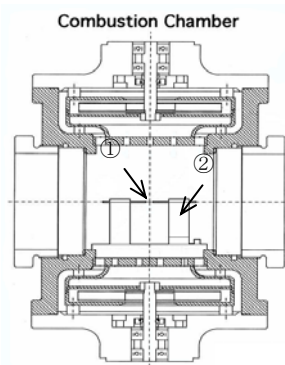
ここでは、主にいわゆる層流燃焼速度を揃えた当量比の異なる特別な燃料-酸素-希釈ガス混合気を用いて、半径が5 mm以下の微小火炎から一般的なサイズまでの外向きに伝ばする球状層流火炎の基礎燃焼特性を

明らかにする。具体的には、当量比や燃料および希釈ガスの種類、層流燃焼速度 S_{L0} 、そして燃焼器サイズが、火炎サイズ・伸長と燃焼速度の関係に与える影響を定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、一般的なサイズの火炎(以後、マクロ火炎と称す)のいわゆる層流燃焼速度 S_{L0} を揃えた燃料-酸素-希釈ガス混合気を使用した。混合気を構成する分子の拡散特性が微小火炎の燃焼速度特性に与える影響を詳細に検討するため、①燃料には、酸素より分子拡散速度が大きな水素およびメタンを、拡散速度が小さなプロパンの三種類を対象とした。②また希釈ガスには、酸素とほぼ拡散速度が等しい一般的な窒素に加え、拡散速度が同等のアルゴン(Ar)、拡散速度が遅い二酸化炭素(CO₂)の三種類を対象とした。③当量比の影響を検討するために、 S_{L0} は基本的には希釈量を調整することにより25 cm/sに揃え、当量比 ϕ は希薄および過濃な広い範囲を対象とした。また、化学反応特性時間(η_0/S_{L0})の影響を検討するために、水素混合気において S_{L0} を15と35 cm/sに揃えた混合気も対象とした。ここで、 η_0 は予熱層厚さを示す。なお、希釈ガスをヘリウムにした場合も検討したが、本実験範囲で微小な火炎を形成する混合気を作成できなかった。

微小火炎の実験には、図1に示す定容燃焼器を使用した。内径が約100 mmの球形に近い定容燃焼器で、向かい合う側面4面に直径85 mmの観測窓、他の上下2面には直径90 mmの多孔板を有する。多孔板後方の遠心ファンを回転させることで、分圧法により注入した各ガスを混合できる。燃焼実験は、常温常圧下、静止混合気中で、コンデンサを用いた容量放電式によりほぼ燃焼室中央で火花



① : Ignition Plug ②:Stand
図1 定容燃焼器概要(微小火炎用)

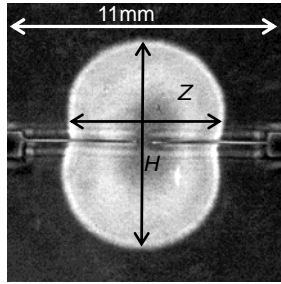


図2 火炎半径の算出法 (シュリーレン写真)

点火させた。

微小火炎の観測には、連続シュリーレン写真撮影法を使用した。撮影は、ダークポイントおよび焦点距離 800 mm のレンズを用い、高速ビデオカメラ(448×448 画素, 8bit, 10,000 fps)で行った。得られた画像データは PC に送り、エッジ処理等を行った後、火炎面検出、火炎半径、および火炎伝ば速度から燃焼速度の算出を行った。なお 1 画素の大きさは実像上で約 0.026 mm である。

微小火炎の実験時には図1のように点火用電極支持台を燃焼器内へ設置した。点火用電極は検討した結果、電極直径Dは0.1 mmおよび間隙Wは0.5と1.0 mm (材質: SUS)とし、コンデンサ容量から算出した点火エネルギーEiは1.6~102 mJと可変可能とした。なお、燃料の種類やφ等により各混合気のEiは本実験装置での最小点火エネルギー近傍の値であり、点火エネルギーが火炎核の形成に極力影響を与えない条件を選定した。なお、燃焼実験は、各条件で5回以上行った。

本研究では、図2に示す火炎上端から下端までの長さHと、上方火炎核の横方向の長径Zから算出できる $[(Z+H)/4]$ を r_f と定義した。次に、外向きに伝ばする球状層流火炎の平均燃焼速度 S_{Li} を次式により算出した。

$$S_{Li} = [(\rho_b / \rho_u) \cdot dr_f / dt] \quad (1)$$

ここで、 ρ_b および ρ_u は既燃ガスおよび未燃混合気の密度、 dt は画像取り込み時間間隔(=0.1 ms)である。

本研究では、撮影範囲により、 r_f が 1~5 mm 程度を微小火炎と、概ね 7 mm 以上をマクロ火炎とし、それぞれ観測・解析対象とした。

ここで、微小火炎と比較・検討を行うために実施したマクロ火炎の観測では、先述した燃焼器を使用し、Dは1.2 mm、Wは4 mm (材質: SUS)で、Eiは1.8 Jとした。なお、撮影速度は1000 fps、解像度は0.11mm/pixelで行った。

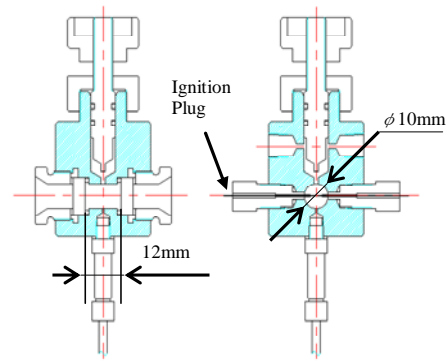


図3 定容燃焼器概要(直径10mm)

さらに、超小型燃焼器内の燃焼現象を把握するため、さらには燃焼器サイズが微小火炎の燃焼特性に与える影響を明らかにするために、図3に示す内径10 mmで奥行12 mmの円筒状の燃焼器を製作し、上述の火炎の観測や燃焼速度特性等の計測を行った。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を次に示す。

(1)燃料に起因する分子拡散の影響

まず燃料-酸素-希釈ガス混合気において燃料の分子拡散特性が微小火炎に与える影響を検討した。図4に、水素、メタンおよびプロパンを燃料とした、当量比φの異なる層流燃焼速度 S_{L0} を25cm/sに揃えた混合気で得られた燃焼速度 S_{Li} と火炎半径 r_f の関係を

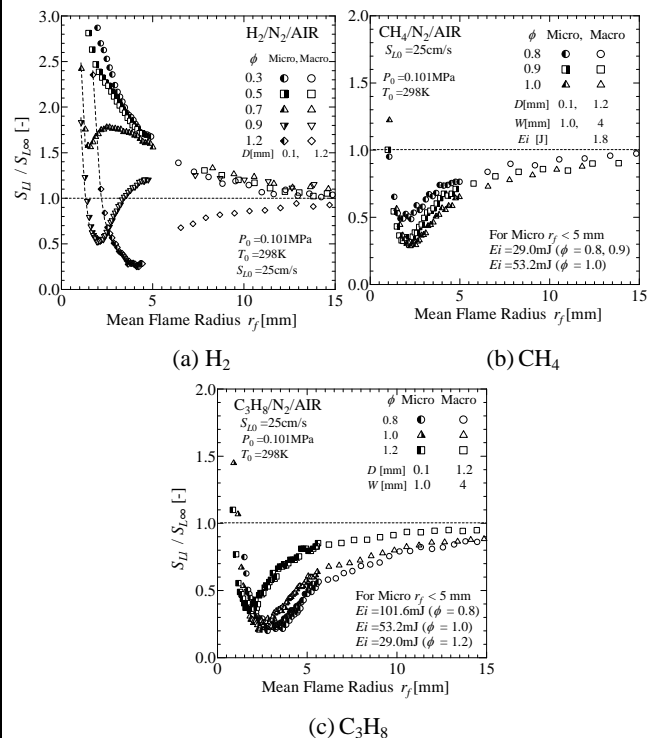


図4 火炎半径 r_f と燃焼速度 S_{Li} の関係(燃料の影響)

示す。なお、 $S_{L\infty}$ はマクロ火炎を対象に算出した火炎伸長を有しない時の S_{Ll} の値である。また、図4中の白抜き記号は、火炎半径が概ね7mm以上のマクロ火炎での結果を示したものである。なお、図4中、 r_f が概ね2mmより小さい領域で、点火エネルギーの影響による過度の伝ば速度上昇に伴う $S_{Ll}/S_{L\infty}$ の急激な低下が観察される。以下の議論では、この点火による影響を受けた領域を除く。

図4からわかるように、酸素より拡散速度が早い水素やメタンを燃料とした場合は、同一 r_f での $S_{Ll}/S_{L\infty}$ は当量比 ϕ が小さいほど増大する傾向にあること。一方、酸素より拡散速度が遅いプロパンを燃料とした場合には、 $S_{Ll}/S_{L\infty}$ は ϕ が大きいほど増大するという逆の傾向にあることを明らかにできた。

一方、分子拡散速度に優れた水素は、 ϕ が小さいほど、5mm以下の微小火炎での燃焼速度が増大することを明らかにできた。

さらに、本実験範囲では、水素混合気の ϕ が0.7と0.9を除き、5mm以下の微小な火炎の燃焼速度特性は、一般的なサイズの火炎の燃焼特性の延長線上で議論できることがわかった。言い換えれば、水素混合気の ϕ が0.7と0.9の微小火炎のように、マクロ火炎の延長線上では議論できない混合気条件が存在することを明らかにできた。

以上の成果より、微小な火炎の燃焼速度を改善するには、水素の希薄混合気が優れていることがわかった。

(2) 化学反応特性時間の影響

水素混合気において揃える S_{L0} を25cm/sに加えて15と35cm/sの場合を対象とし、化学反応特性時間が微小火炎の燃焼特性に与える影響を検討した。図5に、水素混合気に対する $S_{L\infty}/S_{Ll}$ と火炎表面積変化に起因した火炎伸長度を表すKarlovitz数 Ka との関係を示す。

まず図5(a)からわかるように、 S_{L0} の差異、すなわち化学反応特性時間の差異に因らず、 ϕ が0.3と0.5の場合には、伸長度の増加に伴い線形的に燃焼速度が増大し、逆に ϕ が1.2の過濃混合気では、線形的に減少すること明らかにできた。

一方、図5(b)に示すように、 ϕ が図5(a)の混合気の中に位置する0.7と0.9は、まず興味深い現象として、ある火炎伸長度までは燃焼速度が増大するが、それ以上火炎伸長度を大きくすると燃焼速度が低下するという変曲点が存在することを明らかにできた。これは、分子拡散特性に優れた水素が火炎面に拡散し、希薄混合気では燃料が不足していることから燃焼特性を改善するものの、火炎伸長が大きくなると伸長による温度低下効果が増大するために燃焼速度が減少するものと推察できる。さらに、興味深いのは、化学反

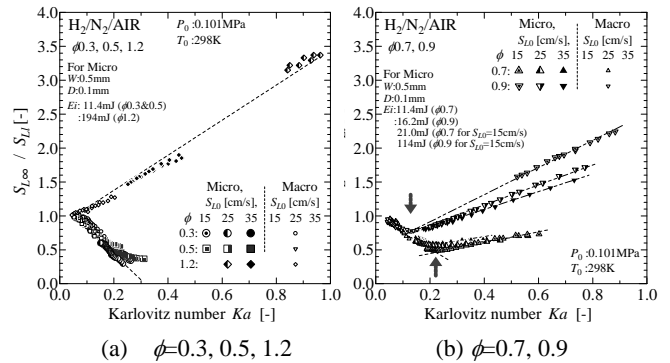


図5 火炎伸長度 Ka と S_{Ll} の関係に与える S_{L0} の影響

応特性時間の差異に因らず、 ϕ が0.7と0.9での各変曲点の火炎伸長度が変化しないことを明らかにできた。

以上の成果から、微小火炎の燃焼速度特性は、基本的には燃料の種類および当量比に依存することが推測でき、 S_{L0} が異なる混合気でもその燃焼特性を推測できることがわかった。

さらに本成果は、図5(b)で観察された特異点を明らかにすることにより、燃焼器サイズに対応した適用できる、または燃焼を促進できる混合気条件を決定することが可能になることが期待できる。

(3) 希積ガスに起因する分子拡散の影響

次に、燃料-酸素-希積ガス混合気において希積ガスの分子拡散特性が微小火炎に与える影響を検討した。図6に、窒素に加えアルゴンと二酸化炭素を希積ガスとした、当量比 ϕ が0.5と0.9の層流燃焼速度を25cm/sに揃えた水素混合気で得られた燃焼速度 S_{Ll} と火炎半径 r_f の関係を示す。

図6からわかるように、 ϕ が0.5では、概ね希積ガスの差異によらず、同一 r_f での $S_{Ll}/S_{L\infty}$ は同等の値を示すことが明らかになった。一方、 ϕ が量論比に近い0.9になると、希積ガスに依存し、同一 r_f での $S_{Ll}/S_{L\infty}$ は、拡散特性に近いアルゴンと窒素は概ね同等の値を示す

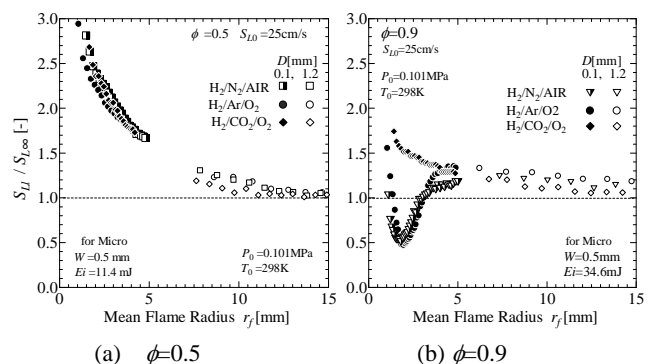


図6 火炎半径 r_f と燃焼速度 S_{Ll} の関係(希積ガスの影響)

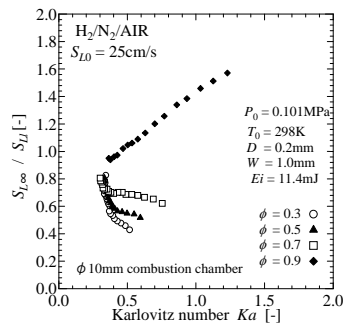


図7 Kaと S_{L1} の関係(直径10mm定容燃焼器)

し、 r_f が小さいほど燃焼速度が低下し、マクロ火炎の燃焼速度特性の延長線上では議論できないこと。一方、二酸化炭素は、アルゴンや窒素と大きく異なり、 r_f が小さいほど燃焼速度が増大し、概ねマクロ火炎の延長線上で議論できることを明らかにできた。

以上の成果から、希釈ガスには、燃料の場合とは異なり、分子拡散速度が酸素より遅いものを用いた混合気の方が、燃焼特性を改善できる可能性があることがわかった。

(4)燃焼器サイズの影響

より超小型燃焼器に近い状態での微小火炎の燃焼特性を把握するために、直径10mmの円筒状の定容燃焼器システムを製作し、燃焼実験を行った。図7に、 S_{L0} を25cm/sに揃えた ϕ が0.3~0.9の水素混合気で得られた $S_{L\infty}/S_{L1}$ とKarlovitz数Kaとの関係を示す。

図7からわかるように、図5の火炎サイズに比べて十分大きな定容燃焼器内での結果と比較すると、定性的には同等の燃焼速度特性を示すことが明らかにできた。

今後、燃焼速度に対する燃焼器内圧力や壁への熱損失等の影響を検討する必要があるが、上述の図1の燃焼器で得られた成果は、超小型燃焼器においても重要な指針となることがわかった。

(5)今後の展望

本研究のような外向きに伝ばする微小な層流火炎の燃焼速度特性を分子拡散特性に着目し実験的に詳細に検討した研究は、国内外には見あたらない。

本研究成果は、微小火炎の燃焼モデルやシミュレーション技術の構築への利用が期待される。さらに、本成果は、超小型燃焼器のサイズに対応した最適な混合気条件の指針を示すものであり、日本独自の超小型燃焼器技術の開発へ応用が期待できる。

今後は、微小火炎の汎用燃焼速度モデルの構築のために、さらに詳細に分子拡散特性やルイス数の影響を明らかにし、燃焼メカニズムを明らかにしてゆく。

さらに、本研究は、複雑な乱流燃焼場に存

在する火炎片の燃焼メカニズムの解明やそのモデル化に発展させてゆく。

また本研究は、微小火炎の燃焼促進効果を主眼に実施したが、観点を換えれば水素社会構築には欠かせない水素火災や爆発を抑制する技術にも応用できるものでもある。したがって、本研究は、水素のみならず天然ガス等の安全利用技術として発展することが期待できると考えている。

以上のように、本助成で得られた成果を有効に活用し、さらに研究を発展させて行く。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- (1) 中原真也、他4名、炭化水素微小球状伝ば層流火炎の基礎燃焼速度特性に関する実験的検討、日本機械学会論文集 B 編、査読有、77巻774号、2011、pp. 376~385.
- (2) 中原真也、他3名、水素微小球状伝ば層流火炎の燃焼速度特性に及ぼす化学反応特性時間の影響、日本機械学会論文集 B 編、査読有、77巻773号、2011、pp. 168~176.

[学会発表] (計10件)

- (1) 高木浩平、大西義明、中原真也、阿部文明、徳永賢一、村上幸一、プロパン予混合微小層流火炎の燃焼速度特性に関する実験的研究、日本機械学会 中国四国支部第49期総会・講演会、2011年3月5日、岡山.
- (2) 横嶋和宏、明神泰史、谷 敬弥、中原真也、阿部文明、村上幸一、狭隘空間内での水素予混合火炎の伝ば特性に関する実験的研究、日本機械学会 中国四国支部第49期総会・講演会、2011年3月5日、岡山.
- (3) 中原真也、他4名、水素-酸素-アルゴン予混合乱流火炎の局所火炎伝ば特性に関する実験的研究、第48回燃焼シンポジウム、2010年12月2日、福岡.
- (4) 中原真也、他4名、プロパン予混合微小球状伝ば層流火炎の燃焼速度特性に関する実験的研究、中国四国支部・九州支部合同企画 徳島講演会、2010年10月16日、徳島.
- (5) 中原真也、他4名、炭化水素混合気の微小球状伝ば層流火炎の燃焼速度特性に関する研究、第15回動力・エネルギー技術シンポジウム、2010年6月21日、東京.
- (6) 中原真也、他3名、水素微小球状伝ば層流火炎の基礎燃焼速度特性に関する実験的研究、平成22年度第1回中四国熱科学・工学研究会、2010年5月8日、岡

- 山.
- (7) 大西義明、谷口裕樹、高木浩平、中原真也、村上幸一、微小閉空間内での水素予混合火炎の燃焼特性に関する実験的研究、日本機械学会中国四国学生会第 40 回学生員卒業研究発表講演会、2010 年 3 月 4 日、広島.
 - (8) 中原真也、水素－酸素－希釈ガス予混合乱流火炎の局所火炎伝ば特性に関する実験的研究、第 47 回燃焼シンポジウム、2009 年 12 月 2 日、札幌.
 - (9) 中原真也、他 3 名、メタン予混合微小球状伝ば層流火炎の燃焼速度特性に関する研究、熱工学コンファレンス 2009、2009 年 11 月 7 日、山口.
 - (10) 中原真也、他 2 名、水素－プロパン予混合乱流火炎の局所火炎伝ば特性に関する実験的研究、第 46 回燃焼シンポジウム、2008 年 12 月 5 日、京都.

6. 研究組織

(1)研究代表者

中原 真也 (NAKAHARA MASAYA)
愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：20315112

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし