

令和 4 年 4 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02080

研究課題名(和文) 予混合火炎を用いた粒子状物質生成機構の解明とそのモデル化

研究課題名(英文) Analysis and modeling of particulate matter formation using premixed flame

研究代表者

北川 敏明 (Kitagawa, Toshiaki)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40214788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：ルイス数が1より小さく不安定性を有するイソオクタン-空気均質過濃予混合火炎のカusp部においては、負の火炎伸長率による熱-拡散効果によって、火炎温度が低下していた。そして、その火炎温度の低下によりアセチレンの質量分率が大きくなることにより、酸素不足により生成されたすす核の表面積が大きくなり、その表面成長によりさらにすすの体積分率が大きくなっていった。このことから、負の火炎伸長率による熱-拡散効果にともなう、すすの体積分率が大きくなっていることを明らかとなった。さらに、このすす生成に及ぼす負の火炎伸長率による熱-拡散効果の影響は、燃料濃度が大きくルイス数が小さいほど大きいことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

噴霧燃焼などの濃淡な燃料濃度を有する複雑な燃焼場から排出される粒子状物質(Particulate Matter, PM)であるすすの生成過程を、均質予混合気を用いてその燃料濃度を変化させながら調べ、非均質性とそれ以外の因子との分離に成功した。さらに、すす生成には火炎に作用する火炎伸長に起因する熱-拡散効果が大きな影響を及ぼすことを明らかにした。PMの燃焼機器からの排出低減に資する重要な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：At cusp regions of unstable cellular rich iso-octane/air flame whose Lewis number is less than unity, flame temperature was found to be reduced due to the thermo-diffusive effects induced by the negative flame stretch rate. Increase in acetylene concentration due to the decreased flame temperature promoted the surface growth of soot particles which were formed due to the deficient oxygen. This promoted surface growth accelerated the surface growth of soot particles and increase in the soot volume further. Increase in the soot volume was found to be caused by the thermo-diffusive effects induced by the negative flame stretch rate. The influence of the thermo-diffusive effects induced by the negative flame stretch rate on the soot formation was larger for the richer flame with smaller Lewis number.

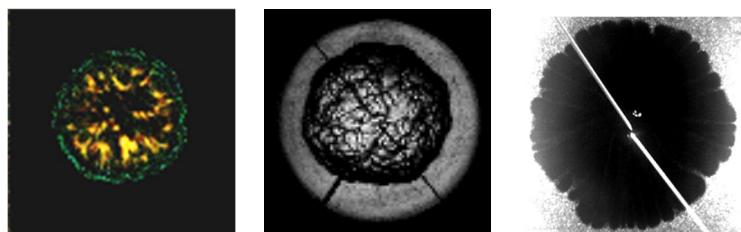
研究分野：反応性ガス力学

キーワード：燃焼 すす 予混合火炎 火炎伸長

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

燃焼によるすす生成に関する従来の研究は、すすを多く生成する噴霧燃焼など、濃淡を有する複雑な燃焼場自体を対象としている。一方、研究代表者はこれまでの研究から、レイス数が小さく火炎の不安定性が強く現れるイソオクタン-空気均質過濃予混合層流火炎では、図1に示すように生成した高温のすすの固体放射によるものと考えられる輝炎が黄色に発光している様子が確認され、図2に示すようにこの不安定性により生じる火炎のカスプ部においてすすが多く生成されていることを明らかにしていた。火炎の不安定性は熱-拡散効果が著しい場合に現れるため、すす生成にこの熱-拡散効果が大きな影響を及ぼすものと考えたが、このような観点からすすの生成について調べた研究は他になかった。そこで、熱-拡散効果とすすの生成の関係という新たな観点から、すすの生成機構を明らかにすることとした。



直接光写真 シュリーレン写真 レーザー断層写真  
図1 層流火炎の観察



図2 火炎カスプ部のすす

### 2. 研究の目的

噴霧燃焼などの濃淡を有する燃焼場の非均質性と熱-拡散効果の現象を分解し、すす生成特性を明らかにすることを目的とした。均質予混合気を用いた球状伝播予混合火炎の実験と数値シミュレーションにより、熱-拡散効果については、伝播するにつれて火炎伸長率が変化する球状伝播予混合火炎の火炎伸長率および熱-拡散効果とすす生成との関係を明らかにすることとした。また、燃焼場の非均質性については、混合気の燃料濃度によるすす生成特性の変化を調べ、非均質性とすす生成との関係を明らかにすることとした。

### 3. 研究の方法

実験では、図3に示す定容燃焼容器内を球状に伝播するオクタン-空気予混合火炎とこの火炎により生成される粒子状物質を、直接写真撮影、シュリーレン写真撮影およびレーザー断層写真撮影により観察した。燃焼室は内径265mmの三つの円筒の直交相貫体形状で、容積は35,000cm<sup>3</sup>である。混合気の当量比は、1.4、1.6およびすす生成の臨界燃料濃度付近である1.8とした。

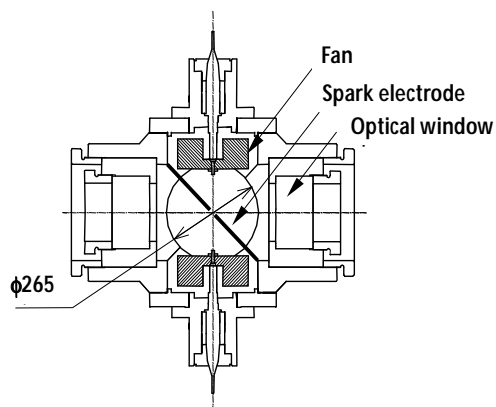


図3 定容燃焼実験装置

数値シミュレーションにおいては、イソオクタンの詳細反応機構に DRGEP(Directed Relation Graph with Error Propagation)手法により簡略化を施した素反応数 885 の簡略反応機構を用い、反応流れについての質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則、化学種質量保存則を解き、球状伝播火炎の数値計算を行った。

すす生成については、核生成、凝集、表面成長、酸化のモデルを組み込んだすすの数密度  $N$ 、質量密度  $M$  について、下に示す輸送方程式を解いた。

$$\frac{\partial \rho \psi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \psi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_\psi \frac{\partial \psi}{\partial x_j} \right) + \gamma \frac{\mu}{T} \psi \frac{\partial T}{\partial x_j} + S_\psi \quad (1)$$

ここで  $N, M$  で表し、 $D$  はすすの拡散係数である。

#### 4. 研究成果

実験ではイソオクタン-空気均質過濃予混合層流火炎により生成される粒子状物質を、エアロゾルスpektロメーターおよびレーザーエアロゾル粒径分析器によりサンプリング、分級し解析した。そして、当量比 1.4, 1.6 の場合に比べて、すす生成の臨界当量比付近である当量比 1.8 において非常に多くのすす粒子が生成されることが明らかになった。

数値シミュレーションでは、まず、図 4 の温度分布に示すように、火炎の不安定性によりセル状遷移する火炎を再現することができた。

そして、図 5 のすすの体積分率の分布に示すように、すべての当量比において、すすは火炎面の背面に分布しており、カスプ部ですすの体積分率が高くなっていることが明らかとなった。

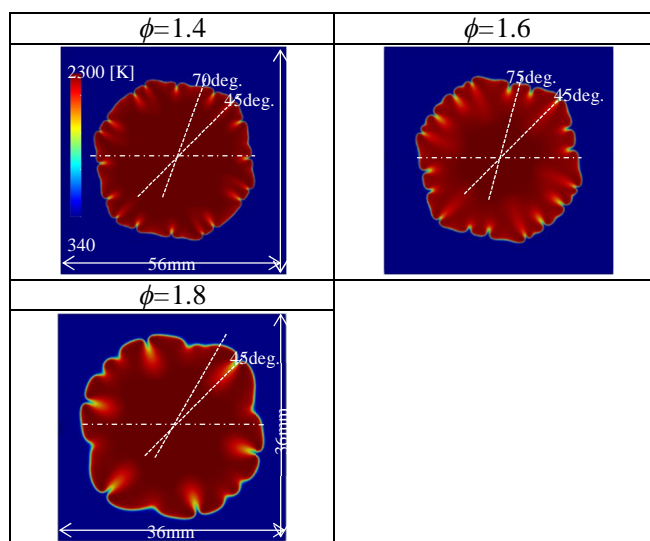


図 4 セル状火炎と温度分布

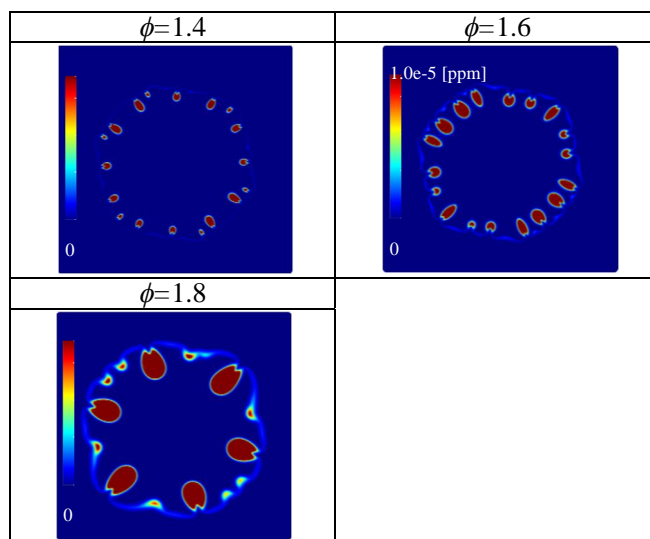


図 5 すすの体積分率

このすすの分布の傾向は、火炎背面で高温のすすの固体輻射によると思われる輝炎が観察された実験結果と一致する。当量比が大きくなるにつれて、すすは既燃側に大きく広がっており、また、体積分率の最大値は当量比 1.8 において最も大きくなっていた。これも、エアロゾルスペクトロメーターおよびレーザーエアロゾル粒径分析器を用いた実験結果と一致する。

ここで、火炎面に沿う周上での火炎中心からの火炎までの距離と温度分布を調べると、図 6 に示すように凸部では正の火炎伸長率、一方、凹のカスプ部では負の伸長率となっていた。

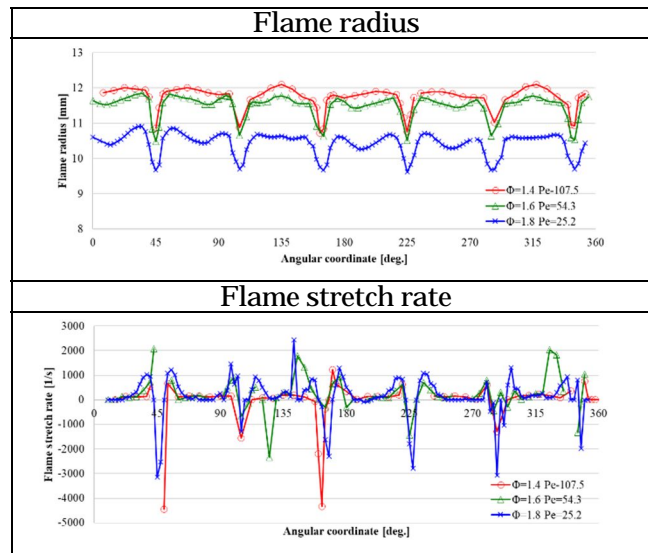


図 6 火炎伸長率

さらに、火炎凸部、カスプ部での温度分布を調べると、図 7 に示すようにカスプ部では凸部に比べ温度が低くなっていた。また、当量比が大きくとルイス数が小さくなるにつれて温度低下が著しいことが明らかとなった。

一般的に、ルイス数が 1 より小さい場合には、負の火炎伸長率によって温度は低下する。したがって、この図 7 に示すカスプ部での温度変化は熱-拡散効果によるものと考えられる。

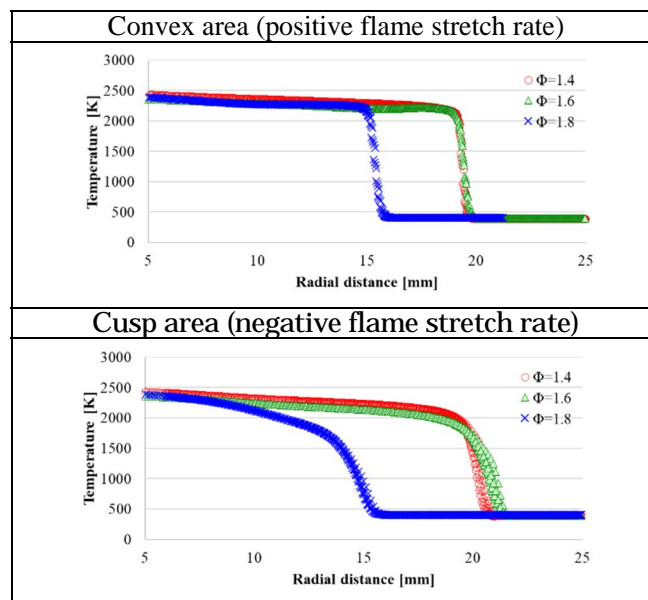


図 7 火炎凸部、カスプ部での温度分布

以上のことから、図 5 のすすの体積分率の分布に示すように、カスプ部ですすの体積分率が高くなっているのは、ルイス数が 1 より火炎に熱-拡散効果が作用して、火炎伸長率が負の値となるカスプ部の火炎温度が低下したことによるものと考えられる。

そこで、この火炎伸長に起因する熱-拡散効果と温度変化と、すす生成の関係を調べた。図 8 に、火炎のカスプ部におけるすすの体積分率、核発生、凝集、表面成長、酸化過程によるすすの体積分率の変化率、 $C_2H_2$  の質量分率を示す。気相中の  $C_2H_2$  は結合することで PAH となるため核生成に影響し、また、すす表面のラジカルサイトに結合するため表面成長に影響する。

これより、すすの体積分率には、表面成長によるものが核生成によるものより大きく影響していることが明らかとなった。表面成長は、すすのラジカルサイトへの  $C_2H_2$  の結合によって生じるため、 $C_2H_2$  の質量分率に加えて、生成されたすすの表面積にも影響を受ける。

また、当量比が大きくなるにつれて、すすの核生成、表面成長によるすすの体積分率の変化率、また、 $C_2H_2$  の質量分率が大きくなることが明らかとなった。

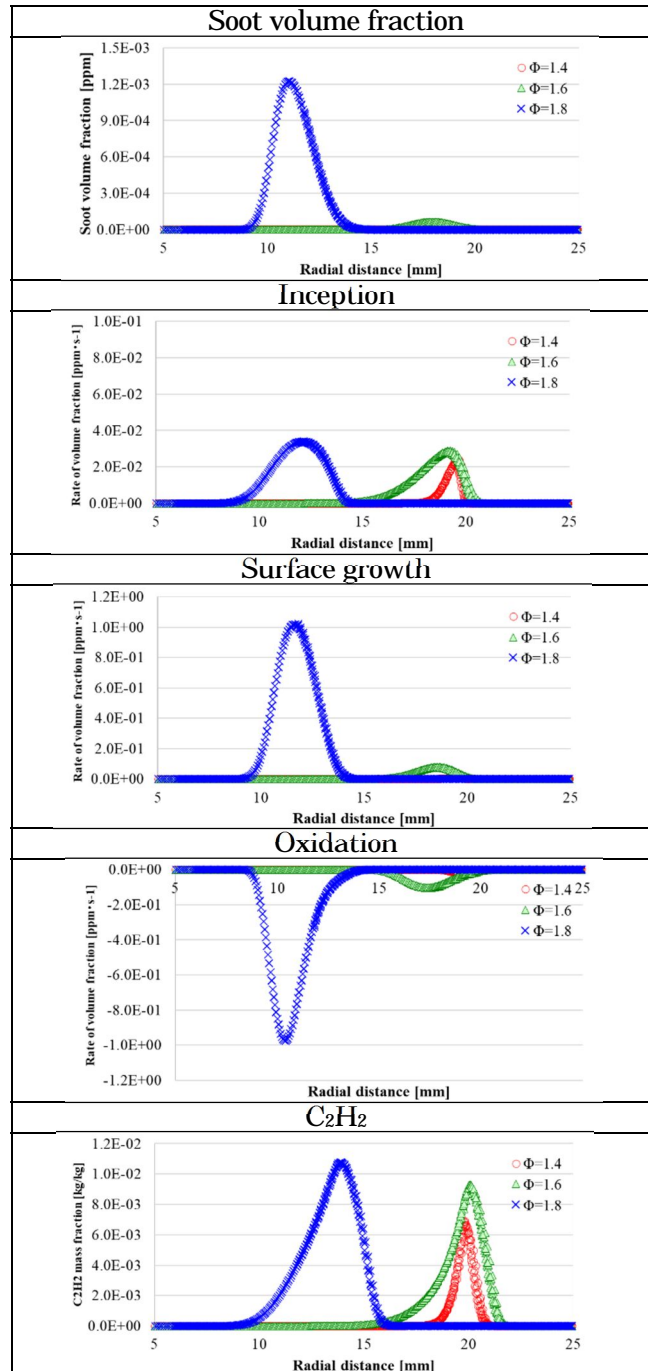


図 8 核発生，凝集，表面成長，酸化過程によるすすの体積分率の変化率と  $C_2H_2$  の質量分率

ルイス数が 1 より小さく不安定性を有するイソオクタン-空気均質過濃予混合火炎のカスプ部においては、負の火炎伸長率による熱-拡散効果によって、火炎温度が低下していた。そして、その火炎温度の低下によりアセチレンの質量分率が大きくなることにより、酸素不足により生成されたすす核の表面積が大きくなり、その表面成長によりさらにすすの体積分率が大きくなっていった。このことから、負の火炎伸長率による熱-拡散効果にともなって、すすの体積分率が大きくなっていることを明らかとなった。

さらに、このすす生成に及ぼす負の火炎伸長率による熱-拡散効果の影響は、燃料濃度が大きくルイス数が小さいほど大きいことが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ikeda Takashi, Tsuruda Yoshihiro, Watanabe Hiroaki, Kurose Ryoichi, Kitagawa Toshiaki	4. 巻 305
2. 論文標題 Numerical study on soot formation in outwardly propagating, iso-octane, rich, cellular flames	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 121520 ~ 121520
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fuel.2021.121520	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 池田 孝, 渡邊 裕章, 黒瀬 良一, 北川 敏明
2. 発表標題 イソオクタン球状伝播過濃不安定火炎におけるすす生成
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田 孝, 渡邊 裕章, 黒瀬 良一, 北川 敏明
2. 発表標題 イソオクタン伝播過濃不安定火炎のすす生成に及ぼす当量比の影響
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口 祐治, 池田 孝, 久保田 悠介, 柿原 尚弘, 渡邊 裕章, 北川 敏明
2. 発表標題 イソオクタン球状伝播不安定火炎におけるすす生成
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第75期総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Ikeda, Hiroaki Watanabe, Ryoichi Kurose, Toshiaki Kitagawa
2. 発表標題 Effect of equivalence ratio on soot formation at cusp area in a premixed cellular flame
3. 学会等名 The 10th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	渡邊 裕章 (Watanabe Hiroaki)  (60371598)	九州大学・総合理工学研究院・教授  (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------