

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13889

研究課題名(和文) 予混合火炎における粒子状物質生成機構の解明と生成量低減

研究課題名(英文) Study on Mechanism of Particulate Matter Formation and its Reduction

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：層流および乱流球状伝播予混合火炎により生成される粒子状物質の生成機構とその低減方法を調べた。

実験による火炎の直接光写真および断層写真撮影から、熱-拡散効果を受け火炎温度が著しく低下している領域ですすが生成されるが、乱れが強い方がその領域は小さいことを明らかにした。また、すすの電子顕微鏡観察から、要素粒子が鎖状となっている構造が確認された。熱-拡散効果を緩和することによりすす生成を抑制できる可能性があるという知見を得た。さらに、数値シミュレーションにより、すすの分布、質量分率、粒径分布、さらには、すす生成過程における核生成、凝集、表面成長、酸化反応の寄与を求め、すす生成挙動を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Mechanism of particulate matter formation from the premixed laminar and turbulent flames was investigated by the experiments and the numerical simulation. Direct and tomograph images showed that soot was generated within the region where the flame temperature might be low due to the thermo-diffusive effects. Such a soot region was reduced by intense turbulence of mixture flow. Chain structure of soot that consists of element particles was observed by an electron microscope. Mass fraction and size distributions of soot were obtained by numerical simulation. Nucleus formation, aggregation, growth in surface and oxidization processes were made clear.

研究分野：反応性ガス力学

キーワード：燃焼 粒子状物質 すす生成機構 予混合火炎 電子顕微鏡 数値シミュレーション すす生成モデル  
熱-拡散効果

### 1. 研究開始当初の背景

現在、ガソリンエンジンの直噴化が進み、均質予混合燃焼を行うガソリンエンジンにおいても粒子状物質の排出が問題となっている。ガソリン直噴エンジンにおいて、粒子状物質は混合気中の不均質過濃領域における燃焼や混合気中の未蒸発液滴および燃焼室壁面の燃料液膜の燃焼などにより生成されているものと考えられる。今後、混合気の希薄化を目的とし成層燃焼を行う場合においても、過濃領域が形成されると粒子状物質が排出される可能性があるものと考えられる。粒子状物質の排出低減には、燃料噴射技術の高度化とともに、粒子状物質の生成機構の更なる理解が必要である。

また、実用上、燃焼は乱流場で行われるため、火炎は乱れによる火炎伸長を受けている。火炎伸長を受ける火炎は熱拡散効果の影響により火炎温度や燃焼速度が変化する。火炎温度の変化や燃焼速度の変化による火炎内での滞留時間の変化は、すすの生成に影響を及ぼすものと考えられることから、乱流場における燃焼により生成されるすすについて検討を行う場合には、すす生成に及ぼす熱拡散効果の影響についても調べる必要があるものと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、不均質および成層混合気燃焼時の混合気中の各濃度領域において生成される粒子状物質について検討することを目的とする。従来の粒子状物質生成に関する研究の多くは、基礎的な研究であってもエンジン燃焼そのものを模した燃料噴流の燃焼によるすす生成を対象としている。しかしながらこの手法では、不均質燃料濃度場のどの位置からどのようにすすが生成されるかなどの詳細な検討は困難である。そこでここでは、均質混合気を用い当量比が明らかな場合に燃焼により生成される粒子状物質について、実験および数値シミュレーションにより調べた。これにより、粒子状物質生成機構を明らかにするとともに、すす生成量低減手法について検討した。

### 3. 研究の方法

実験では、図1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、すす生成の臨界燃料濃度付近である 1.8 とした。層流および乱流火炎を対象とし、乱流火炎の場合の混合気の乱れ強さ  $u'$  は 0.41 および 0.82m/s とした。また、燃焼室内に挿入した電子顕微鏡用グリッドに粒子状物質を捕集し、透過型電子顕微鏡を用いて観察した。

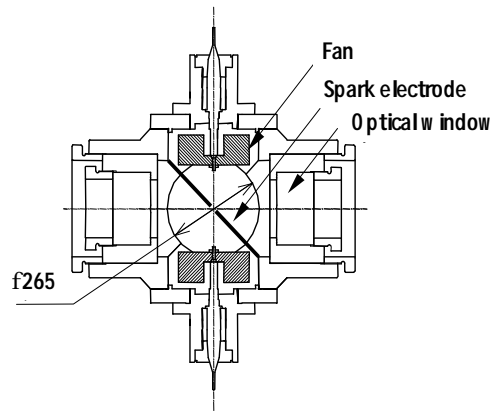


図1 定容燃焼容器

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、核発生、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。

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

ここで  $N, M$  で表し、 $D$  はすすの拡散係数である。

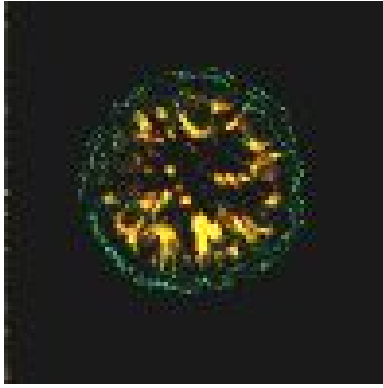
### 4. 研究成果

図2に、層流火炎の場合の高速度カメラにより撮影した火炎の直接光写真シュリーレン写真およびレーザー断層写真を示す。シュリーレン写真をみると、火炎面にしわが形成されている。この当量比 1.8 のイソオクタン混合気は Lewis 数が 0.96 と 1 よりも小さいため、熱拡散効果による不安定性により火炎面にはしわが形成されており、火炎の伝播とともに火炎はセル状となる。

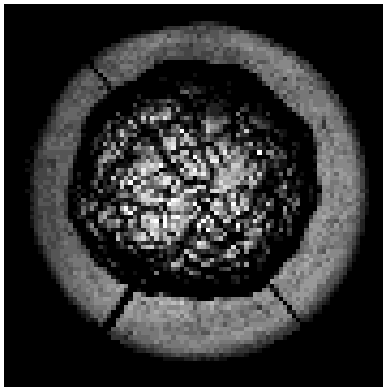
レーザー断層写真では、明るい部分が未燃部で暗い部分が既燃部である。火炎面と考えられる未燃部と既燃部の境界にカスプが形成されている。

また、火炎面のカスプの先端から既燃部内に長く伸びるすじ状の像が観察された。カスプ先端部のような負の曲率を有する部分では、熱拡散効果により火炎の燃焼速度および温度は低下する。

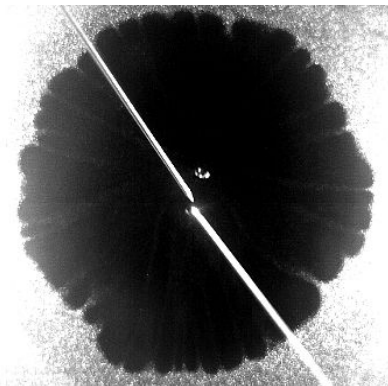
このことから、カスプ先端部から既燃部内に長く伸びるすじ状の像は、カスプ先端部で火炎が熱拡散効果を受け消炎もしくは火炎温度が著しく低下するため反応があまり進まず、そのため未燃混合気が火炎の伝播に伴



直接光写真



シュリーレン写真



レーザー断層写真  
図2 層流火炎の観察

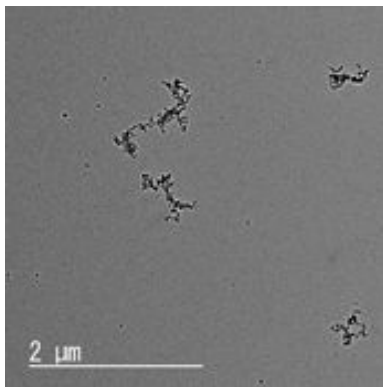
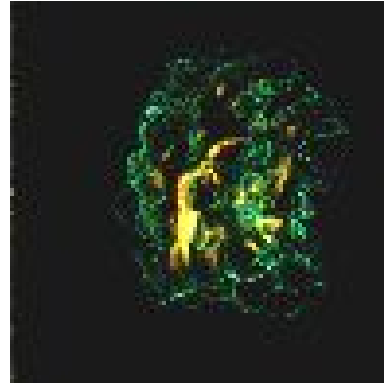
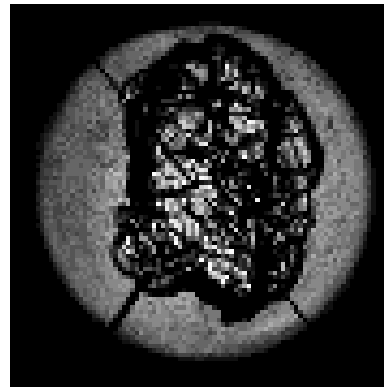


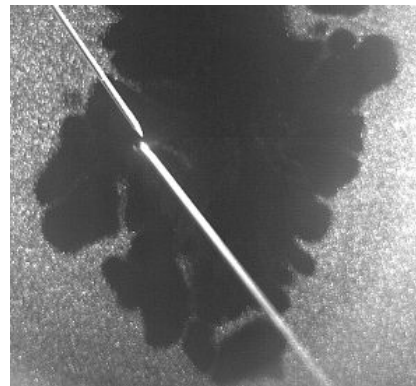
図3 層流火炎による粒子状物質



直接光写真



シュリーレン写真



レーザー断層写真  
図4 乱流火炎の観察( $u'=0.41\text{m/s}$ )

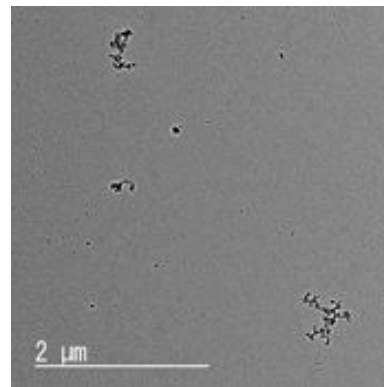
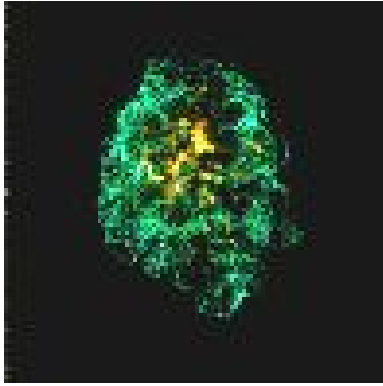
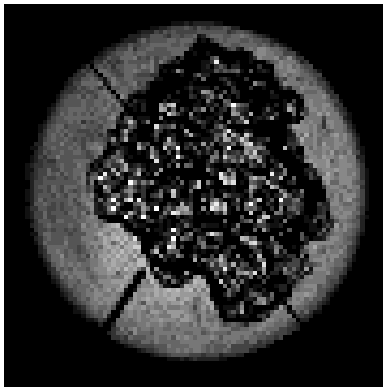


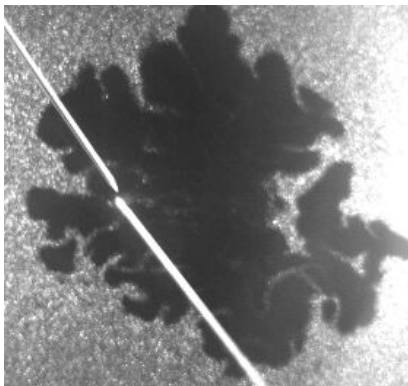
図5 乱流火炎による粒子状物質( $u'=0.41\text{m/s}$ )



直接光写真



シュリーレン写真



レーザー断層写真

図6 乱流火炎の観察( $u'=0.82\text{m/s}$ )

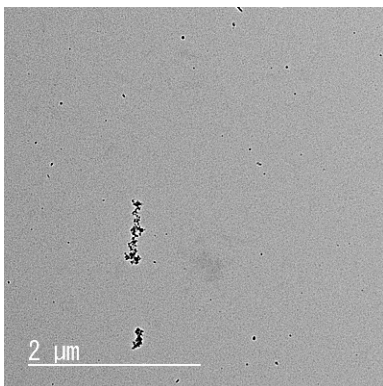


図7 乱流火炎による粒子状物質( $u'=0.82\text{m/s}$ )

い既燃部に取り残されているものと考えられる。また、このような領域では粒子状物質のひとつであるすすが生成されていることも考えられる。このすじ状の像は、すすからのレーザーの散乱光によるものであると考えられる。

また、火炎面のカスプの先端から既燃部に長く伸びるすじ状の像が観察された。カスプ先端部のような負の曲率を有する部分では、熱-拡散効果により火炎の燃焼速度および温度は低下する。

このことから、カスプ先端部から既燃部に長く伸びるすじ状の像は、カスプ先端部で火炎が熱-拡散効果を受け消炎もしくは火炎温度が著しく低下するため反応があまり進まず、そのため未燃混合気が火炎の伝播に伴い既燃部に取り残されているものと考えられる。また、このような領域では粒子状物質のひとつであるすすが生成されていることも考えられる。このすじ状の像は、すすからのレーザーの散乱光によるものも含まれているものと考えられる。

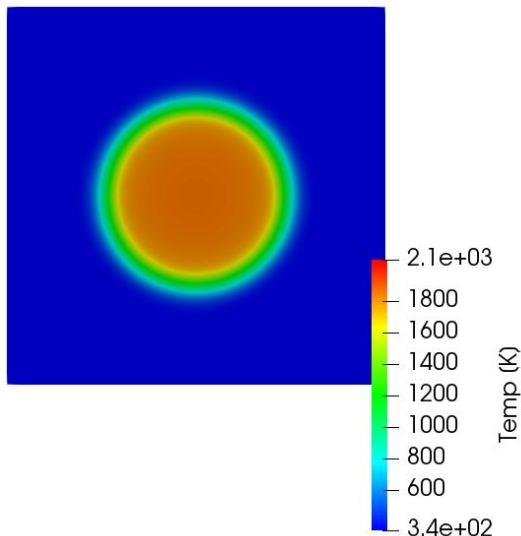
直接光写真においては、火炎面背後の既燃部において黄赤色の発光が観察される。この黄赤色の発光は、すじ状に現れ、火炎の伝播とともに発光強度が増し、発光する領域も広がる。この黄赤色の発光がすすなどの粒子状物質の輻射によるものであるとすると、レーザー断層写真において観察された火炎面のカスプ先端から既燃部に長く伸びるすじ状の像に対応するものと考えられる。

層流火炎の場合の捕集された粒子状物質の電子顕微鏡像である図3に示すように、粒子状物質は小さな要素粒子が鎖状となって凝集し形成されており、大きい粒子状物質は多くの要素粒子により形成されているようにみえる。

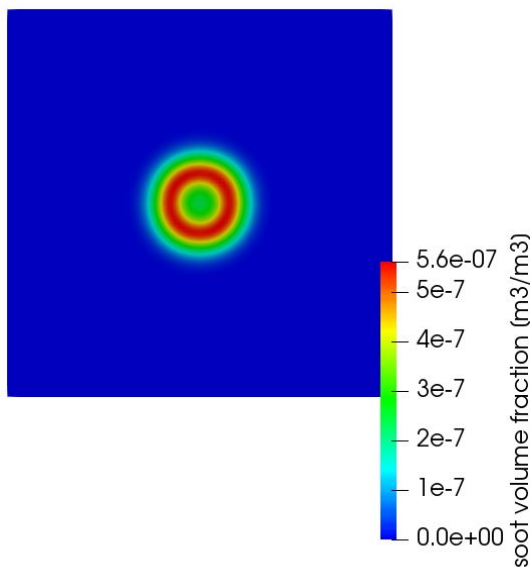
このように層流火炎の直接光写真および断層写真撮影から、熱-拡散効果を受け火炎温度が著しく低下している領域ですすが生成されることが明らかとなった。

乱流火炎において同様の観察を行うと、図4から7に示すように、乱れが強い方が火炎面背後の既燃部における黄赤色の発光領域は小さいことが明らかとなった。また、すすの電子顕微鏡観察からは要素粒子が鎖状となっている構造が確認されたが、乱れ強さが強い方が二次粒子の大きさが小さくなる傾向が見受けられた。これらのことから、熱-拡散効果を緩和することによりすす生成を抑制できる可能性があるという知見を得た。

つぎに、すす生成モデルを組み込んだ予混合層流火炎伝播の数値シミュレーションにより得られた温度とすすの質量分率の分布を、図8に示す。これらから、火炎背後の既燃域においてすすが多く分布するという実験と同様の結果が得られた。また、図9に示すすす質量密度の生成速度から、表面成長が大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。



温度分布



すすの質量分率

図8 層流火炎の数値シミュレーション

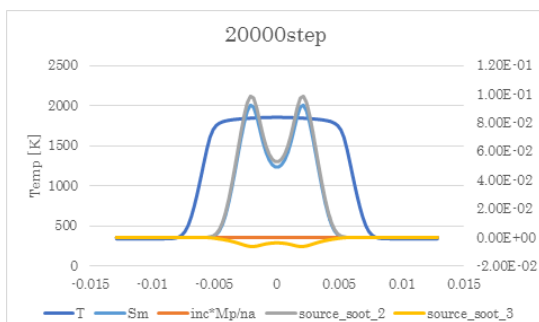


図9 すす質量密度の生成速度

以上のことから、過濃燃料濃度の火炎背後の既燃領域においてすすが多く存在すること、すす生成には熱-拡散効果による火炎温度低下が影響しているものと考えられることが明らかとなった。そして、混合気の乱れ強さが強い場合にはすすが存在する領域が小さいとともに、すす粒子が小さくなる傾向が認められることから、熱-拡散効果を緩和することによりすす生成を抑制できる可能性があるという知見を得た。

さらに、すす生成モデルを組み込んだ予混合層流火炎伝播の数値シミュレーションから、核発生、凝集、表面成長、酸化を考慮することにより、火炎背後の既燃域においてすすが多く分布するという実験と同様の結果が得られ、すす生成の各要因の寄与を明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

宮田晃明, 藤崎泰弘, 永野幸秀, 北川敏明, 透過型電子顕微鏡によるイソオクタン-空気予混合火炎により生成される粒子状物質の観察, 日本エネルギー学会第24回大会, 2015.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~rgd/index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北川 敏明 (KITAGAWA, Toshiaki)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 40214788

### (2) 研究分担者

渡邊 裕章 (WATANABE, Hiroaki)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 60371598

永野 幸秀 (NAGANO, Yukihide)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 20567060