

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：52301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560245

研究課題名(和文) ナノプラスチック粉体燃焼における火炎構造の解明

研究課題名(英文) A study of flame structure for nano-size plastic dust

研究代表者

花井 宏尚 (HANAI, HIRONAO)

群馬工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：30312664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)： ナノサイズのプラスチック粉体の燃焼特性を明らかにした。密閉容器法を用いて希薄側可燃限界および燃焼速度の計測を行い、バーナー法を用いて火炎構造の解明を試みた。ナノサイズの粉体の希薄側可燃限界は、気化ガスの可燃限界におおよそ近くなった。微小重力環境でのみ観察されているふく射伝熱に起因する振動的な火炎伝播は、ナノ粉体において観察されなかった。燃焼速度は、ふく射による熱の損失および気化に要する熱のため、気化されたガスの値よりも小さな値を示した。ナノ粉体の火炎構造は、マイクロオーダーの火炎構造と大きく異なることはなかった。火炎後方における燃え残り粒子からの不輝炎が特徴である。

研究成果の概要(英文)： Combustion characteristics of plastic dusts with nanometer diameter were clarified experimentally. The lean flammability limit and the burning velocity of the dusts were measured by using a cylindrical combustion chamber. The flame structure of the dusts was observed by using a nozzle burner for plastic dusts. The flame behavior for the fine dusts becomes closer that for gaseous fuels. The lean flammability limit of the ultrafine dusts corresponded to that of the gasified plastic dusts approximately. The oscillating flame propagation that was caused by radiation heat transfer, which was observed only under microgravity environment, did not appear for the ultrafine dust flame. The burning velocity for the dusts became smaller value due to the heat loss by radiation heat and heat of gasification. The flame structure for the ultrafine dusts was similar to that for the fine dusts. It showed the brilliant light from luminous flame in the burnt gas.

研究分野： 燃焼学

キーワード： 粉体燃焼 ナノ 可燃限界 火炎構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 粉体は、粉体のサイズや気化のしやすさにより、火炎前縁に予混合火炎を形成する火炎伝播形態と個々の微粒子周囲に形成された拡散火炎の燃え広がりにより火炎が移動する伝播形態に大きく分けることができる。微小な固体微粒子は、体積当たりの表面積が大きく熱の吸収が良いため、予熱帯における粉体の完全ガス化が期待でき、火炎伝播形態は前者となることが予想される。

(2) 粉体の燃焼は、気体の燃焼と比較して大きな熱放射が行われるため、火炎から放出された熱放射を未燃の粉体が吸収し、再び火炎への熱エネルギーとしてフィードバックさせている。この熱放射の再吸収を起因とする振動現象が、これまで微小重力環境においてのみ観察されており、ナノ粉体を用いることで、この振動現象の通常重力環境での解明が期待される。

(3) マイクロサイズ以下に微細化された超微細粉体は、貯蔵や搬送において固体燃料の特性を維持しつつ、気体燃料と同等の燃焼効率および排出ガス特性を達成することが可能となるであろう。

2. 研究の目的

本研究では、予熱帯において完全ガス化が可能なナノオーダー (0.1 から 1 マイクロメートル) のプラスチック粉体に対する燃焼実験を行う。

(1) 密閉容器法を用いて可燃限界を測定し、可燃限界の粒径依存や気体と粉体の可燃限界の決定機構の違いを調べる。また、粉体の沈降の影響を受けない微小重力実験においてのみ観察されている粉体火炎の振動伝播現象の実験的解明を試みる。

(2) 粉体用ノズルバーナーを用いてナノ粉体の燃焼速度計測を行う。粉体火炎では、火炎後方における後燃え粒子からの熱放射が大きくこれが燃焼速度に大きくかかわる。ナノ微粒子では、明確な不輝炎が火炎前縁で形成され、後方での輝炎発光が減少することが予測されるため、熱放射強度と燃焼速度の関係を明らかにする。また、火炎の直接観察により予混合火炎の形成を確認し、PDPA 計測を用いて火炎前縁における粉体の気化の要素を明らかにする。

(3) これらから、ナノ粉体を小型バーナーの主燃料として使用する際の運転条件等を提供する。火炎を安定化させるためのバーナ形状の提案およびナノ粉体を効率よく燃焼させるための運転条件、および有害排出ガスを減少させるための燃焼形態等に関する基礎データの提供を行う。

3. 研究の方法

これまでのマイクロオーダーの粉体を用いた燃焼実験の各種データと比較するため、粉体は、真球状のポリメタクリル酸メチル (PMMA) を使用する。粉体サイズは、火炎構造の変化が期待される 30  $\mu\text{m}$  以下のサイズを用いて実験を進める。特に、ガス化が容易で火炎前縁において完全ガス化が期待されるナノ粉体は、0.1  $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$ 、0.8  $\mu\text{m}$  の 3 種類を準備する。

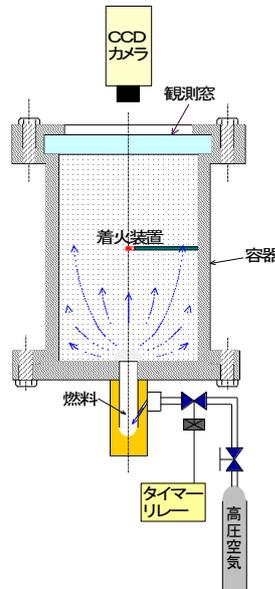


図1 実験装置概略図

(1) 密閉容器法を用いた燃焼特性値の計測

直径 200 mm、長さ 250 mm の円筒形状耐圧容器を用いて球状火炎伝播実験を行う。実験の概略図を図 1 に示す。容器内への粉体の均一な分散には、高速空気流および衝突流を用いて実現する。粉体噴射口には、小さな孔を多数有した半球キャップを設置し、容器内全方位に粉体を均一に噴射する。

着火は、粉体燃焼実験において、信頼性の高いニクロム加熱着火を用いる。この時、粉体分散から着火温度までのニクロム線加熱時間を 100 ms 以内となるようニクロム線抵抗値を設定する。空間に浮遊する粉体濃度は、粉体サイズ毎に精密天秤を用いて浮遊濃度を計測する。着火時における粉体噴射用高速流の影響を極力排除するため、LDV 計測により最適着火時間を決定する。

密閉容器内での火炎伝播による圧力変化を動ひずみ計に接続された圧力センサーで取得し、火炎直径の時間変化及び火炎形状の観察を高速ビデオカメラにより取得する。容器内の圧力履歴および火炎の移動速度から燃焼速度を推算し、マイクロ粉体と比較することで火炎構造やガス化機構の燃焼速度への影響を確認する。容器内に供給する粉体濃度を変化させることで燃焼限界濃度を明らかにする。従来、粉体の濃度希薄側燃焼限界は、粉体のガス加速度の影響や燃料沈降による実験エラーなどの要因により、粉体サイズの増大とともに狭くなるとされていたが、粉体の浮遊が容易でガス化の早いナノ粉体ではサイズ依存がなくなることが期待される。

火炎の観察では、火炎背後からの輝炎の存在に着目し、ガス化促進による輝炎量の減少及

び不輝炎の増加を確認する。また燃焼直後の容器内の燃え残りを確認し、ナノオーダー粉体のガス化促進効果を明らかにする。

## (2) 粉体火炎バーナー法を用いた火炎構造の解明

密閉容器を用いた実験では、時間とともに火炎が移動し、また火炎の曲率および容器内の圧力が変化する非定常火炎であるため、火炎面の観察や火炎近傍での粒子の挙動把握に対する実験には適さない。そこで粉体用層流火炎バーナーを用い、プラスチック粉体火炎の詳細な観察を行う。

図2に実験で用いたバーナーの概略図を示す。

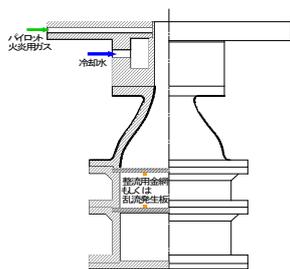


図2

粉体用層流火炎バーナー

パイロットバーナースリットがバーナー出口に設けられている。バーナー最下部から搬送空気とともに粉体-空気予混合気が供給され、バーナー内部に設置された2枚の整流用のステンレスメッシュにより流れが均一化されたのちバーナー出口へと向かう。粉体火炎およびパイロット火炎によるバーナーリップの加熱を防ぐため、バーナー出口周囲には水冷ジャケットが設置してある。パイロット火炎用の燃料は水素を用いた。粉体の安定かつ定量の粉体供給には、本研究室で開発した粉体供給装置を用いた。

排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度の計測は、バーナー出口に内径100 mm、長さ500 mmのステンレス製円筒容器を被せ、バーナー出口から上部に200 mmの位置の計測孔より燃焼ガスをサンプリングし、3分間の平均値としてNO<sub>x</sub>濃度を測定した。

## 4. 研究成果

### (1) 密閉容器を用いた可燃限界の測定

ナノ粉体では、ストークス抵抗を受ける際の終端速度が十分小さいため、可燃限界や燃焼速度計測時における、容器内への粉体の分散から着火までの時間の影響を受けにくい。10 μmの粉体では沈降速度が0.5 cm/s程度であるのに対し1.0 μmでは0.01 cm/sとほぼ無視できるくらい小さい。本実験でも、10 μmの粉体では、容器内分散から着火までの時間を0.7 sから1.7 sへと1.0 s遅らせると得られる圧力履歴が異なってしまったのに対

し、1.0 μm以下の粉体では、2 sの着火時間差では得られる圧力履歴に大きな差は見られなかった。目視でも1.0 μm以下の粉体では、10秒以上粉体が浮遊していることを確認できた。このようにナノ粉体は沈降の影響を受けにくいと、数値解析結果との比較においてよい一致を得やすいと言える。ただし着火後の自然対流の影響は受けるため、燃焼速度等の計測においては重力の影響は考慮されなければならない。

図3に、本実験で得られた可燃限界測定結果を示す。

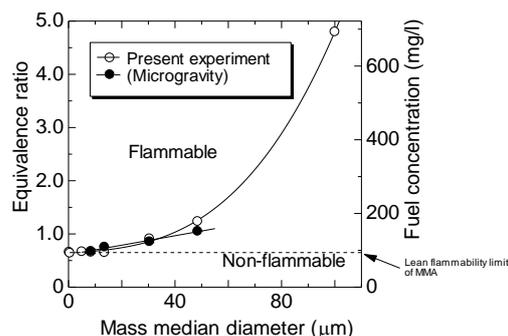


図3 PMMA粉体の可燃限界と粉体サイズの関係

マイクロサイズの粉体では、粉体が大きくなると希薄側可燃限界濃度が高くなるのが分かっていたが、ナノサイズの粉体では、ほぼ一定の値となることがわかった。これは、ナノサイズ粉体では、粉体ガス化時間が火炎伝播時間に対し十分に短いため、限界濃度に影響を及ぼさないためである。また30 μm以上の粉体では微小重力の結果に対して大きな誤差を生じているが、これは粒子沈降による実験エラーであると考えられる。

### (2) 火炎の様子の変化

粉体火炎では、火炎前縁に予混合火炎が形成されても、個々の粉体を取り囲む拡散火炎の燃え広がりにより火炎が伝播しても、火炎後方から強い揮炎の発行が見られた。これは、粉体が、予熱帯において完全に気化することがなく火炎を通過した気化できなかった粉体が火炎後方において酸素不足状態で燃焼するためであると考えられる。画像を比較するとより大きな粒径を持つ粉体の方がより強い揮炎を見せる。噴霧の場合、10 μm以下の粒径になると火炎前縁で液滴は完全に蒸発し、火炎を通過した後方で輝く火炎の存在は見られないとされている。しかし、粉体では、10 μm以下の粉体においても依然として揮炎からの発光は存在し、本研究で初めて実験を行うことができたナノ粉体でさえもこれが消えることはなかった。プラスチックと噴霧では、気化過程に大きな違いがあり、一般的に液体燃料に比べ単位質量あたりに大きな気化熱を必要とするプラスチック粉体 (PMMAで548 J/g、デカンで276 J/g) の特徴であ

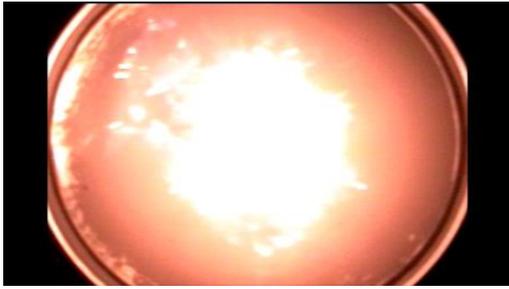


図4 密閉容器内を球状に伝播する粉体火炎の画像 (粉体サイズ 5.0  $\mu\text{m}$ )

ると言える. 図4に, 粉体粒径 5  $\mu\text{m}$ , 粉体濃度 15 mg/L における, 粉体火炎後方から強い揮炎が見られる様子を示す. 粉体濃度が, 高いほど後方での後燃え粒子が増加するため揮炎からの発光も増加する.

### (3) 燃焼速度の計測

粉体の燃焼速度は, おおよそ粉体の気化媒体の予混合気の燃焼速度に概ね近くなることがわかっている. しかし, 火炎の伝播プロセスに予熱-気化-混合-着火を含む粉体の場合, 粉体濃度が高い場合や粉体サイズが大きな場合にはこれに従わないことが知られている. 図5からわかるように, 希薄領域でかつ粉体サイズが小さな場合にのみ気体の予混合気の燃焼速度に近くなっていることがわかる. ただしメタンの燃焼速度値は, 濃度を当量比換算した場合の近似曲線である.

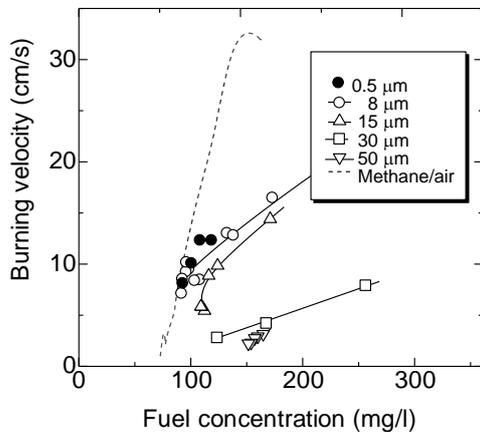


図5 粉体火炎の燃焼速度と粉体濃度の関係

ナノ粉体を用いた場合も概ね気体の燃焼速度に近い値を示している. しかし, 依然としてナノ粉体においても前述したように予熱帯において完全なガス化がなされていないことおよび気化熱および大きなふく射熱により熱の損失があることを考えると, ガス燃料よりも小さな燃焼速度を示した. より気化がしやすく, より微細な粉体を用いれば粉体の燃焼速度と燃料濃度の関係も気体予混合気のそれに近くなるであろう.

### (4) バーナー火炎によるナノ粉体火炎構造

移動火炎では, 火炎の観察が難しく, 詳しく火炎構造を知ることは困難である. そこで, 粉体用層流火炎バーナーを用いて火炎の観察を行った. 粉体の火炎は着火が安定せずパイロット火炎を使用しないと吹き飛んでしまう. 本研究ではパイロット火炎用燃料として水素を使用した. 図6に本研究で得られた火炎の様子を示す.

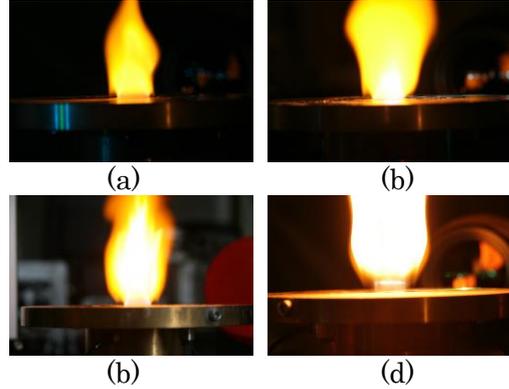


図6 バーナーにおける粉体火炎の比較

(a) 0.8  $\mu\text{m}$ , (b) 5.0  $\mu\text{m}$ ,  
(c) 15.0  $\mu\text{m}$ , (d) 50.0  $\mu\text{m}$

ナノ粉体では, 予熱帯における完全気化がなされ不揮炎後方における揮炎の消滅が期待されたが, 依然として揮炎の形成が見られた. しかしながらその形状は粉体サイズの減少とともに小さくなっている. ナノ粉体の火炎では, 予め気化できる粉体量が多いため比較的是っきりとした予混合火炎が観察できた. しかし, 50  $\mu\text{m}$  では明確な予混合火炎が観察できず, 粉体への着火位置もバーナー出口から離れ, また火炎全体の高さも大きくなった. これより, ナノ粉体はバーナー燃料として, 安定な火炎を提供し, 火炎高さの減少は炉の小型化を実現できる.

### (5) 振動火炎伝播

粉体の燃焼において微小重力環境では, 強いふく射に起因する振動的な火炎伝播の観察が報告されている. これはふく射による予熱と着火の時間遅れの差によるもので, 粉体固有のものである. 一方, 通常重力下での実験では観察されていない. 通常重力下では粉体を浮遊させるため乱れを利用するためであり, 対流が振動を抑えている. しかし, ナノ粉体はほとんど沈降を生じないため, 粉体噴射の強い空気流れを十分静止させた後, 着火を行うことができるため振動現象の観察が期待されたが, 明確な振動現象は観察することができなかった.

### (6) 粉体の凝集と付着について

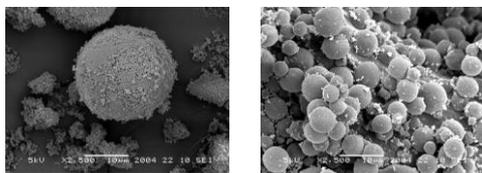
本研究で使用した 1.0  $\mu\text{m}$  以下の粉体では, しばしば実験結果に大きなばらつきが見ら

れた。これは、粉体の凝集によるもので、凝集することにより、見かけ上大きな粒子として振る舞う。図7に凝集の見られた0.5 μmの粉体のSEM画像を示す。多数の小さな粉体が集まり大きな塊として存在していることがわかる。同様な現象は0.1 μmおよび0.8 μmの粉体でも見られた。5.0 μmの粉体では観察されていない。

本研究では、1.0 μm以下の粉体に対しては、実験直前に本研究のために開発したプラスチック粉体用ジェットミルを使用し、粉体の凝集を解消させた。

また、定容器実験およびバーナー実験共にナノ粉体使用時には、粉体の装置壁への付着が確認されている。定容器を用いた可燃限界の計測実験において粉体浮遊量の正確な把握は必然であり、本研究では次の通り補正を行った。まず、定容器底面にあらかじめ重量を計量した薄い紙を設置する。粉体を容器内に噴射し、着火させずに10分間放置する。その後、底面の紙を回収し積もった粉体とともに計量した後、その差を取ることで燃焼場に存在した粉体の実量とした。

バーナー実験では以下の通り補正を行った。粉体は、バーナー流路および整流網に多く付着する。PDPAにてバーナー出口の粉体濃度を計測したところおおよそ数分程度で濃度の変化が少なくなることがわかった。そのため、本研究ではバーナー実験では、粉体をあらかじめ10分以上バーナーに供給した後、各種計測を開始することとした。



(a) (b)

図7 ナノ粉体に生じる凝集のSEM画像(2500倍)

- (a)凝集した0.5 μmPMMA粉体  
(b)凝集の見られない5.0 μmPMMA粉体

## 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 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

① 花井宏尚, 村田拓海, 田代航太,  
プラスチック粉体の混合が火花点火機関の性能と排ガ斯特性に及ぼす影響  
第52回燃焼シンポジウム(岡山), 2014

② 花井宏尚, 望月光太  
小規模ガス爆発による粉じん爆発の着火お

よび爆発挙動  
第51回燃焼シンポジウム(東京), 2013

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕  
○出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

花井 宏尚 (HANAI, Hironao)  
群馬工業高等専門学校・機械工学科・准教授  
研究者番号: 30312664

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: