

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 15日現在

機関番号：52301  
研究種目：若手研究（B）  
研究期間：2010～2011  
課題番号：22760156  
研究課題名（和文） 過熱水蒸気雰囲気におけるプラスチック粉体燃焼の安定化機構の解明  
研究課題名（英文） A study of stabilization mechanism of plastic dusts in high-temperature oxidizer diluted with superheated steam  
研究代表者  
花井 宏尚（HANA 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

研究成果の概要（和文）：過熱した水蒸気と酸素からなる高温の酸化剤を用いてプラスチック粉体火炎の安定燃焼範囲が拡大することを確認した。また、常温では自立火炎の形成が困難である大きな粉体や難燃性プラスチック粉体において燃焼範囲に著しい拡大がみられた。小さな粉体や高温の酸化剤温度を用いた実験では、プラスチック粉体を燃焼させた際に生じる揮発からの発光が減少した。これは、高温酸化剤によりプラスチック粉体のガス化が促進され予混合火炎が形成されているためである。このため、燃焼ガス中の未燃物質の量が著しく減少していることが確認された。

研究成果の概要（英文）：We observed that the stable combustion region for flammable plastic dusts was extended by using a high-temperature oxidizer diluted with superheated steam. Especially, for larger dusts and flame retardant plastic-dusts, a remarkable extension of the combustion region appeared in the high-temperature oxidizer. In the cases for fine dusts or in higher temperature of oxidizers, the light from luminous flame, which can be usually observed in the plastic-dust combustion, is decreased, and the unburned plastic in the burned gases decreases markedly.

## 交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 2,000,000 | 600,000 | 2,600,000 |
| 2011年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

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：プラスチック，粉体，対向流火炎，過熱水蒸気，消炎限界，ふく射

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 石油を原料とするプラスチックは、燃焼で得られる熱量が大きく、適切に燃焼させれば優秀な燃料となることが期待される。しか

し、プラスチックは、固体であるため燃焼機構が複雑で火炎を安定させることが難しい。このためバーナー燃料として用いると、不完全燃焼の発生や、燃焼性状の差異による炉内

温度の不均質などにより有害物質の排出が増加する。

(2) プラスチックの燃焼による有効利用では、ストーカー式燃焼炉や流動床型燃焼炉がしばしば用いられる。しかし、これら大型燃焼設備は熱回収率が悪くサーマルリサイクルとしての効果は薄い。

(3) そこで、プラスチックを数 mm から数  $\mu\text{m}$  に微細化し燃料として使用する吹込み式バーナーが注目されている。吹き込み式バーナーは、小型化が容易で燃焼効率も高い。また、燃焼負荷の制御が容易である。しかし、バーナーを小型化すると、滞留時間不足により不完全燃焼が発生し、また壁面への熱損失の増大により火炎の安定化が困難となる。その結果、粒子状物質の排出や、 $\text{NO}_x$ 、ダイオキシン類の生成が増加する。本課題として、いかに火炎温度を保ち、かつ安定化に燃焼を継続させるかが大きなポイントとなる。このような理由から、現在のところプラスチックを燃料とする吹込み式バーナーの実用化はなされていない。本研究では高温の酸化剤を用い火炎の安定を図る。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は、微細化されたプラスチック粉体の火炎が、過熱水蒸気により希釈された酸化剤により安定化される機構の解明を目的とする。

(2) 火炎のモデルをできるだけ単純化し、かつ酸化剤組成や温度等のパラメーターの変更を比較的容易に行うことのできる対向流バーナー法を用いた。内径 10 mm の二対のノズルバーナーを上下方向に对称に設置し実験を行う。上側のバーナーからは、数十  $\mu\text{m}$  に粉砕したプラスチック粉体を搬送気体とともに供給し、下側バーナーからは、高温に過熱した水蒸気 (200°C程度~1000°Cの温度範囲) で希釈した酸化剤 (酸素濃度は条件により変化) を供給する。火炎は、バーナー中間のよどみ点近傍に円盤状に形成される。

(3) 伸長率および燃料濃度、酸化剤温度に対する消炎限界の計測や火炎構造の観察を行う。また、直接観察による火炎近傍でのプラスチック粉体の気化の様子や火炎の構造 (予混合火炎か、粉体周囲に形成される拡散火炎か)、そしてすすの生成等を観察する。火炎前縁における粉体の気化および火炎通過後の粉体の燃え尽きの様子は、PIV法を用いてより詳細に捉える。また、火炎近傍におけるプラスチック粉体の挙動および粉体濃度の変化は、PDPA (位相ドップラー粒子分析計) を用いて明らかにする。

(4) 過熱蒸気温度を上昇させると、粉体の気化が促進し予混合火炎が形成される。個々の粉体粒子を取り巻く拡散火炎が支配的な条件においても、温度上昇は、火炎の予混合化を促進し、その遷移域では、予混合火炎と拡散火炎が混在する特徴的な火炎が見られるであろう。

(5) 本研究では、燃料種や粉体サイズ、火炎の伸長率、過熱蒸気温度、および酸化剤中の酸素濃度をパラメーターに、消炎限界と火炎構造の変化を系統的に調べ、バーナー開発に必要な基礎データを提供することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 粉体用対向流バーナーの概略を図1に示す。バーナー間にはポテンシャルフローが形成され、供給気体の流量もしくはバーナー間隔を変化させることで火炎に与える伸長率が変化する。上部バーナーから常温の窒素ガスもしくは空気で搬送された粉体流を供給し、下部バーナーから過熱した水蒸気を酸素と混合した高温酸化剤を供給した。

(2) 使用したプラスチック種は、年間廃棄量を考慮し、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE)、ポリスチレン (PS)、ポリメタクリル酸メチル (PMMA)、ポリエチレンテフタレート (PET) の5種とし、5  $\mu\text{m}$  ~500  $\mu\text{m}$  に粉砕したものを用いた。粉体供給のばらつきは、火炎における燃料濃度を大きく変動させるため火炎挙動が不安定となる。そこで本実験では、微量フィーダーを用いて

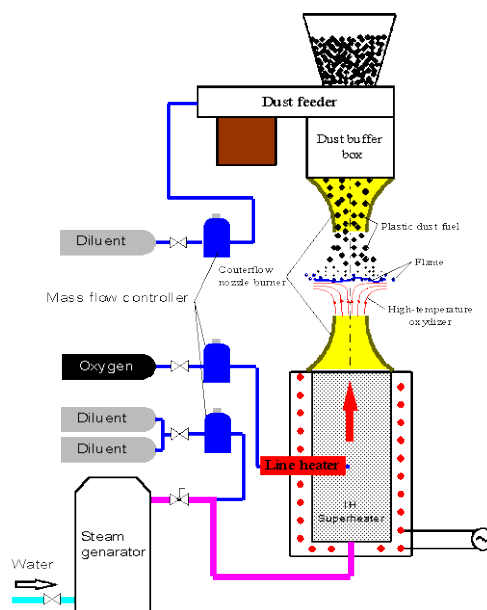


図1 プラスチック粉体と過熱水蒸気を酸化剤とする対向流バーナー

定量の粉体を流れに供給するとともに、バーナー上流に粉体濃度の均一化を図るためのバッファボックスを設置し、供給の安定化を図った。

(3) 酸化剤は以下の通り供給される。ポンプにより供給された蒸留水は、IH式ボイラー(3kW)において蒸発され、IH式ヒーター(10 kW)により過熱される。本装置の最高過熱蒸気温度は1000°Cである。蒸気は実験条件により、窒素や二酸化炭素など他の不活性ガスで希釈して用いた。酸素は、ラインヒーターを用いて400°Cに加熱した後、過熱ヒーター途中で過熱水蒸気に混合される。酸素濃度は、大気と同じ酸素組成となるように21%とした。バーナーに供給する蒸気流量を精度よく得るため、ボイラーを0.1 gの精度で計測可能な天秤に乗せ、水重量を常に監視し制御した。

(4) 火炎の観察では、位相ドップラ式レーザー粒子分析計(PDPA)を用いて、伸長率を変化させた時の粉体と搬送気体の追従性を確認し、また可視画像流速計(PIV)を用いて、火炎前後における粉体の気化の様子を詳細に観察する。

(5) 火炎の安定性は、流れの伸長率および粉体濃度を変化させた時の火炎の消炎限界を計測し評価する。また、過熱蒸気温度を1000°Cまでの範囲で上昇させ、火炎構造の変化を観察するとともに消炎限界の計測を行う。同時に、酸素濃度を徐々に低下させ同様にデータを取得する。

(6) 火炎の伸長率 $\varepsilon$ は、見かけの速度こう配として定義される。本実験においては、燃料側に固体であるプラスチックを用いるため、厳密には局所的な運動量のアンバランスが生じてしまうが、酸化剤に高温気体を用い、かつ火炎からのふく射のフィードバックにより燃料プラスチックのガス化促進が期待されるため、燃料側密度は、プラスチック粉体と搬送気体の平均とした。これにより、火炎が酸化剤側にできる場合を正炎、燃料側にできる場合を負炎とすると、本実験における火炎の伸長率は、

$$\text{正炎: } \varepsilon = \frac{u_o + u_f \sqrt{\rho_f / \rho_o}}{L}$$
$$\text{負炎: } \varepsilon = \frac{u_f + u_o \sqrt{\rho_o / \rho_f}}{L}$$

ただし、Lはバーナー間距離である。

#### 4. 研究成果

(1) 粉体火炎の性質および火炎構造は、粉体種やサイズだけでなく、粉体の粒度分布や粉体種の混在により大きく変化する。粉体の粒度分布が大きい場合、もしくは気化し易いプラスチックとし難いプラスチックが混ざっている場合には、より小さな粉体や気化しやすいプラスチックが予混合火炎を形成するが、一方、残った大きな粉体や気化し難いプラスチックが、酸素濃度の低い高温場にさらされることになり、COの発生やすすの生成を促進する。そのため、流れや酸化剤組成をコントロールし有害排出ガスを抑制する必要がある。

(2) まず初めに、常温の空気を用いてプラスチック粉体火炎の形成を確認した。5 $\mu\text{m}$ から50 $\mu\text{m}$ の粉体では、いずれのプラスチック種においても滑らかな平面火炎を形成した。しかし、500 $\mu\text{m}$ の粉体では、いずれの粉体も安定な火炎を形成することができなかった。これは、粒径が大きくなると粉体の気化に要する時間が長くなり、火炎を形成するのに必要な可燃ガスの供給が追い付かないためである。

(3) 小さな粉体の火炎を詳細に観察すると、ポリプロピレンおよびポリメタクリル酸メチルでは何ら問題がなかったが、ポリエチレンでは未燃物が多く見られた。これは、ポリエチレンは柔く、供給した粉体の分散が上手くいっていなかったためと思われる。また、ポリスチレンでは、時折黒い煙のようなものが火炎中に見られた。いずれのプラスチックにおいても常温の酸化剤では揮発からの発光が強く見られたが、5 $\mu\text{m}$ の粉体ではブルーフレームすなわち予混合火炎の形成が確認できた。一方で、常温の酸化剤では難燃性材料であるポリエチレンテフタレート(PET)粉体の火炎を、いずれの流れの伸長率においても安定に形成されることができなかった。

(4) 空気に代わり過熱水蒸気に酸素を混合した高温酸化剤を用いて火炎形成を行った。酸素濃度は21 vol.%とした。過熱水蒸気温度は、最大1000°Cであるが、管路途中での低温の酸素の供給やバーナーへの熱損失により750°C以上では安定な酸化剤を得ることができなかった。よどみ面近傍の流れは、PIVを用いて等方性、対称性を確認した。過熱水蒸気を用いた場合、バーナー間に安定な火炎がよどみ面近傍に形成されることが確認できた。火炎からは常温の酸化剤と同様に輝炎からの発光が見られたが、酸化剤温度の上昇とともにそれは弱くなった。特に小さな粉体では、不輝炎である平面状の予混合火炎を明

確に観察することができた。ただし、以前として難燃材料であるPETでは安定した火炎を形成することが困難であったが、小さな粉体サイズ(5 μm)、低伸長率(200 1/s以下)、高温酸化剤においてのみ火炎の形成が確認できた。

(5) 過去に行ったメタンを高温空気で安定化させる実験では、常温酸化剤の場合に比べ酸化剤温度を500°Cに過熱すると、消炎限界伸長率は、5倍以上増大することが確認されている。5 μmのPMMA粉体は、良好な燃焼性を示し、メタンに比べわずかに狭い希薄側燃焼範囲を持つことがわかっている。PMMAの場合も同様に高温の酸化剤を用いると消炎限界の伸長率は増加した。しかし、PMMAの場合、酸化剤を高温にする効果は気体燃料に比べ小さい。これは、粉体が火炎を形成するには、事前の粉体の気化が不可欠であり、酸化剤温度の増加により消炎限界伸長率が増加し、それにより火炎前縁におけるガス濃度が低下し、消炎限界が気体燃料より低下したものと考えられる。

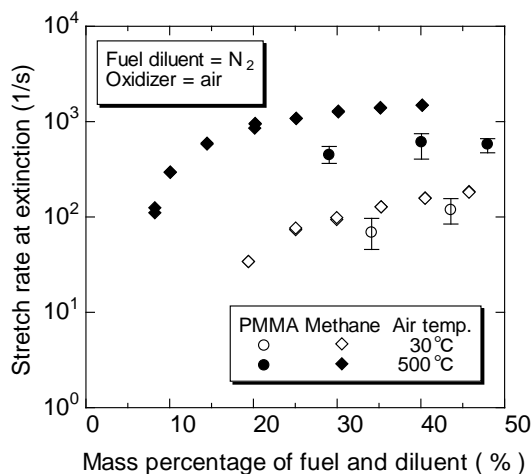


図2 高温空気をを用いた場合の対向流火炎の消炎限界の変化

(6) 酸化剤温度をさらに上昇させると、PMMA粉体の消炎限界伸長率は、常温の場合に比べ750°Cにおいて一桁以上上昇することが分かった。これは、主に気体温度の上昇によるものであるが、低温域では、画像の観察から粉体の気化が促進されていることが確認され、その影響も消炎限界拡大に寄与していることがわかった。

(7) 酸化剤の希釈気体を過熱水蒸気にした結果、5 μmのPMMA粉体の消炎限界伸長率は、高温空気に比べて低下した。これは、水蒸気は窒素よりも大きな熱容量を持ち、酸

化剤側の希釈気体が窒素から水蒸気に代わることにより火炎温度が低下し、消炎限界が減少するためである。一方で、酸化剤側に多量の水蒸気が含まれることにより、ふく射性ガスである水蒸気からのふく射による放熱が、燃料側のPMMA粉体の気化を促進する効果が表れることが期待されるが、本実験ではデータのばらつきが大きく、熱容量増加による消炎限界の低下と、ふく射吸収による消炎限界増大の効果を切り分けることができていない。酸化剤温度の上昇による消炎限界の改善は、他のプラスチック粉体においても同様に見られた。特に常温の酸化剤では火炎の形成が困難であった5 μmのPET粉体において、高温空気温度500°C以上で火炎の形成を確認することができた。

(8) 高温空気をを用いた5 μmのPMMA実験において、酸化剤中の酸素濃度を低下させると火炎は急速に不安定になり、酸化剤温度が常温では酸素濃度18%でいずれの火炎伸長率においても消炎に至り、500°Cの酸化剤温度では酸素濃度10%で消炎限界が表れた。このように、粉体火炎における酸化剤中の酸素濃度は重要な因子であり、燃焼範囲に大きな影響を持つことが分かった。過熱水蒸気を用いた場合、より大きな酸素濃度で火炎は不安定になり、消炎限界はより狭くなってしまった。また粉体の搬送気体を窒素から空気に変更した実験では、いずれの燃料濃度、酸化剤温度において消炎限界伸長率に大きな差が見られなかった。

(9) 粉体種による消炎限界は、5 μmの粉体に対しPMMA、PE、PPの順で狭くなった。自身に酸素を含むPMMAはPEやPPよりも燃焼熱が小さいためPE、PPの方が消炎限界伸長率が大きくなるべきであるが、本実験では、PMMAが最も良好な燃焼性を示した。また、PEは粉体サイズが5 μm、20 μm、40 μmで消炎限界伸長率は大きく異なることがなかった。これは、PEは他のプラスチックに比べ柔軟で、粉体化した時に凝縮しやすいため、粉体の分散が問題となった可能性がある。

(10) 粉体燃焼における振動火炎伝播に関する解析や、高温酸化剤を用いた対向流拡散火炎に関する消炎限界に対する数値シミュレーションの経験をもとに、簡略なふく射モデルを含む一次元の伸長火炎に対する消炎限界数値シミュレーションを行ったが、実験結果とは結果に大きな差が生じた。これは、粉体の気化モデルの最適化、粉体からのふく射放出および吸収モデルの不適合、三次元化の必要性など多くの問題により計算結果は全くの一致を示さなかった。今後、上記モデル

の最適化やガスからのふく射を考慮した数値解析が必要であろう。

#### 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，ガス爆発に誘起された粉じん爆発による脆弱部破壊挙動，第49回燃焼シンポジウム，2011年12月，慶應義塾大学日吉キャンパス

②花井 宏尚，脆弱部を持つ密閉空間におけるガス爆発に関する研究，第48回燃焼シンポジウム，2010年12月，福岡ガーデンパレス

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.gunma-ct.ac.jp/gakka/09.htm#01>

#### 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：