

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
大島商船高等専門学校 商船学科	教授	川原 秀夫

研究テーマ

発泡ポリスチレン粒子吹き込み混入による燃焼器における粒子挙動と燃焼特性

研究報告

1. 研究の背景と目的

プラスチック等の廃棄物の燃焼に関しては、火力発電用燃料として取り扱う研究が行われ、基本となる廃プラスチックの微粉碎技術、スラリー化技術および燃焼技術についての基礎的な研究が既に行われている。これらの研究では、粉末燃焼の方がスラリー燃焼方式に比べ技術的課題が少なく、実用に近いという報告がなされている。また高温の炉内において $300\mu\text{m}$ 程度の比較的粗い粒子が使用されており、粉体燃焼の主流である微粉体燃焼と比較して非常に良好な燃え切り特性が得られている。しかし炉内ではなく、バーナ単独で粒子を燃焼させることに関しては、報告例が少なく、不明な点が多い。そのため、幅広い分野でサーマル・リサイクルを行うためには、バーナ内における粒子燃焼特性について調査する必要がある。

本研究では、減容化された発泡ポリスチレン粒子を助燃料として用いたときのサーマル・リサイクルにおける有効性を明らかにするため、燃焼器内の熱分解による粒子挙動と燃焼特性について検討した。

2. 研究成果および考察

2.1 実験装置

図1は実験装置の系統図を示す。実験装置は、環状バーナ、環状火炎およびノズル火炎用予混合気供給系、廃ポリスチレン粉末供給系および各種計測装置から構成される。図に示すように環状火炎用空気供給源としてブロアーを採用し、その風量はスライダックによって変換することができる。環状火炎用空気流量はレギュレータによって調整され、層流形空気流量計とデジタル圧力計（以後、DPゲージ）によって指示された差圧計を基に算出される。ノズル火炎用空気に関しては、供給源としてブロアーとコンプレッサーを用いた。

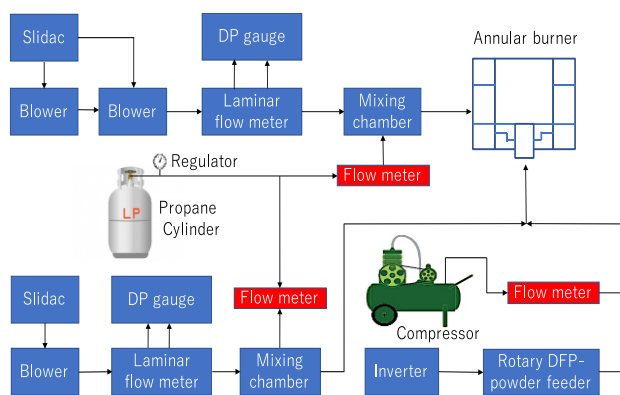


Fig. 1 Diagram of experimental equipment

なお、ブロアーの風量はスライダックによって回転数制御し、レギュレータによって調節され、層流形空気流量計とDPゲージによって指示された差圧値から算出される。一方、コンプレッサーによって供給された空気流量は、空気用フロート形面積流量計によって調節される。なお、コンプレッサーによって供給された空気は、廃ポリスチレン粉末搬送用空気として廃ポリスチレン粉末を搬送し、ノズル管内でブロアーによって供給された空気およびノズル火炎用燃料と混合される。よって本実験では、ノズル火炎用空気流量をブロアーとコンプレッサーによって供給された空気量の和として定義した。環状火炎およびノズル火炎用燃料には、市販の家庭用LPG（プロパン純度：96.4%，低位発熱量（25℃，1atm）：46.35MJ/kg）を用いた。環状火炎用燃料流量はマスフローコントローラで、ノズル火炎用燃料流量はプロパン用フロート形面積流量計で調節される。図2は高温酸化性領域を形成させるために用いた環状バーナの詳細図を示す。バーナ形状は円筒形（内径：50mm，高さ：90mm）であり、ノズル火炎用円管ノズル（内径：17.3mm）および環状火炎用スリットノズル（暑さ：2mm，高さ：30mm）から構成されている。図に示すように円管ノズル出口をバーナ底から3分の1の位置に一致させ、その上部にスリットノズルを180°間隔で2箇所設けた。環状火炎は、この2つのスリットノズルから接線方向に噴出する予混合気によって形成される。図3は質量メディアン直径 $dm=89.7\mu\text{m}$ および $145\mu\text{m}$ の廃ポリスチ

レン粉末のヒストグラムを示す。低位発熱量は40.2MJ/kg、密度は $1.04 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ である。この図から30~400 μm と広い範囲に分散していることがわかる。

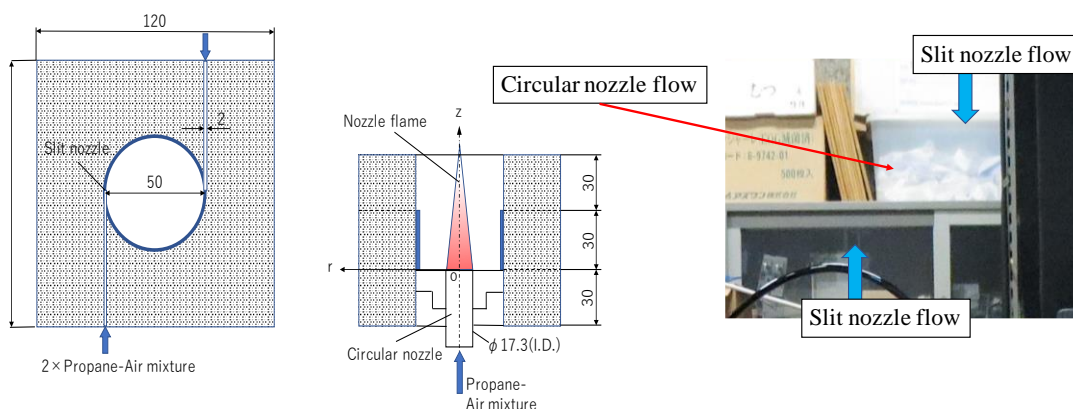


Fig. 2 Combustor (annular burner)

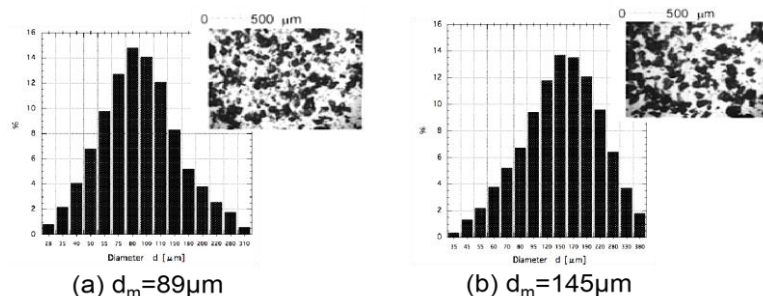


Fig. 3 Histogram of reduced polystyrene foam powder

2. 2 実験結果

まず、廃ポリスチレン粉末を供給しない状態で実験を行い、環状火炎当量比を $\phi_s=1.0$ に固定し、ノズル当量比を $\phi_n=0, 0.4, 0.8, 1.0, 1.2$ および1.6と変化させたときの燃焼特性を調査し、廃ポリスチレン粉末燃焼を行うのに最適な高温酸化性領域の検討を行った。

図4はノズル火炎当量比 ϕ_n を変化させたときの火炎の直接写真を示す。図は、それぞれ $\phi_n=0.4, 0.8, 1.0$ および $\phi_n=1.2$ の場合であり、火炎を側面から撮影したものである。ノズル火炎に関して、プロパンの下限可燃限界当量比以下の $\phi_n=0.4$ の場合には明確なノズル火炎は形成されないが、 $\phi_n=0.8, 1.2$ の場合は、中心軸周りにノズル火炎の発光が確認でき、 $\phi_n=1.0$ でバーナ内部での発光が最も強くなる。また ϕ_n の増加に伴い青炎の発光領域が下流方向に長くなっていることがわかる。特に $\phi_n=1.2$ 以上の過濃条件では、バーナ下流部に過剰燃料の乱流拡散燃焼領域が観察される。以上の火炎観察から、 ϕ_n の増加に伴いバーナ出口下流部の高温領域が広がる一方で、中心軸付近の酸素濃度は低下すると考えられる。

図5にノズル当量比 ϕ_n を変化させた場合の中心軸を含む断面における時間平均温度分布、および酸素濃度分布を示す。図には、それぞれ $\phi_n=0.4, 0.8, 1.0, 1.2$ の場合である。左側に温度分布を、右側に酸素濃度分布を示す。なお、両分布の比較を容易にするために温度分布を反転して示した。図5の温度分布によれば、ノズル火炎の影響により中心軸付近で最高温

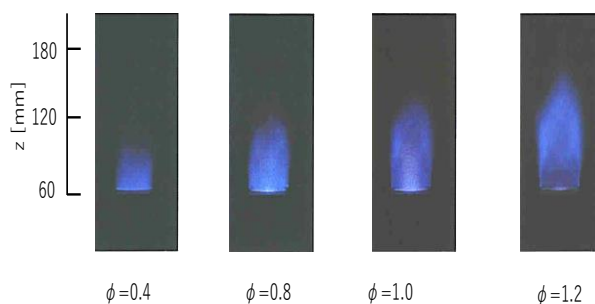


Fig. 4 Direct photograph of the flame by changing the equivalence ratio

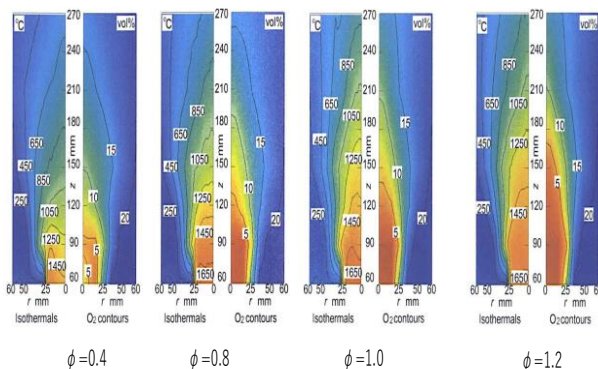


Fig. 5 Time-averaged temperature distribution (left side) and oxygen concentration distribution (right side) by changing equivalence ratio

度となり、中心軸から遠ざかるにつれて温度が徐々に低下することがわかる。また、 $\phi_n=0.4\sim 1.0$ の範囲までは、 ϕ_n の増加に伴い全体的に高温領域が広がる。 $\phi_n=1.6$ の過濃条件になると、バーナ出口付近の火炎温度が低下するが、過剰プロパンの拡散燃焼に起因してバーナ下流部の高温領域が $\phi_n=1.0$ の場合より広がる。このことから、温度条件だけを考えると $\phi_n=1.0$ 付近が最適な条件であると考えられる。同様に図5の右側に示す断面酸素濃度分布を見ると、中心軸付近で低く、中心軸から半径方向に遠ざかるにつれて大気中の酸素濃度である21%の値に漸近する。また、 ϕ_n の増加に伴い、低酸素濃度領域が下流および半径方向に広がることわかる。ここで図5において、温度が 1050°C 以上で酸素濃度が10%未満の領域を半楕円と見なし、その長径（軸方向長さに対応）を L_c 、短径（半径方向長さに対応）を R_c と定義する。これらの値を図7から読み取ると、 $\phi_n=0.4$ では $(L_c, R_c) = (120\text{mm}, 25\text{mm})$ であるのに対して $\phi_n=1.2$ では $(L_c, R_c) = (180\text{mm}, 33\text{mm})$ となり、ノズル火炎当量比の増加に伴い、半楕円領域も増加することが伺える。以上のことから、 $\phi_n=0.4\sim 1.6$ の範囲では、

- I. 火炎領域における温度と酸素濃度が互いに相反関係にあること
- II. 等温線と酸素濃度線の分布形状がよく類似していること
- III. 1050°C の等温線が10%の酸素濃度線とよく対応していること

などのいくつかの対応関係が明らかとなった。

そこでこれらの対応関係に基づいて、以下の実験的考察では 1050°C 以上の温度と10%以下の酸素濃度を高温酸化性領域の目安とし、発泡ポリスチレン粉末の燃焼挙動を観察する。

はじめに、それぞれ質量メディアン直径 $d_m=89.7$ および $145\mu\text{m}$ の場合における廃ポリスチレン粉末燃焼時の火炎の直接写真を図6および図7に示す。図の左側から順に廃ポリスチレン粉末供給量は $m_p=4.0, 8.0, 12\text{g/min}$ である。火炎の色彩を見ると、図6および図7共に図4で示した高温酸化性領域に対応した部分で非常に強い輝炎部が観察されており、良好な燃焼が行われていると考えられる。次に図6から、 $d_m=89.7\mu\text{m}$ の場合の廃ポリスチレン粉末の軌跡を見ると、高温酸化性領域を通過した下流部において廃ポリスチレン粉末の軌跡はほとんど観察されず良好な熱分解・ガス化特性が得られていることがわかる。それに対して、図7に示した $d_m=145\mu\text{m}$ の場合には、下流部において多数の筋状の粒子軌跡が確認される。これに関しては、粉末中の $200\mu\text{m}$ 程度の粗大な廃ポリスチレン粒子が熱分解・ガス化しつくさないまま低温の大気中へ飛散するためであると考えられる。

以上から、高温酸化性領域を通過する廃ポリスチレン粉末は熱分解に伴うガス化・燃焼を伴って非常に強く発光し、廃ポリスチレンのガス化による激しい拡散燃焼が進行していると推察される。

3. 将来展望

本研究では、環状火炎バーナを用いて高温酸化性領域を形成し、その領域に発泡ポリスチレン粉末を供給したときの燃焼特性を調査した結果、発泡ポリスチレン粉末燃焼の火炎挙動観察により、高温酸化性領域を通過する微細な粒子は容易に発泡ポリスチレン粉末の熱分解によるガス化により気相燃焼することを確認した。しかし、発泡ポリスチレン粉末燃焼による酸素濃度分布の変化から火炎中の固形残留粒子の定量化については不明であるため、今後は酸素濃度分布と固形残留粒子の相関関係について調査を行う予定である。

4. 研究発表

- ▶ 川原秀夫, 発泡ポリスチレン粒子吹き込み混入による燃焼器内の粒子挙動と燃焼特性, 第89回(2019年) マリンエンジニアリング学術講演会(函館) 2019年10月3日

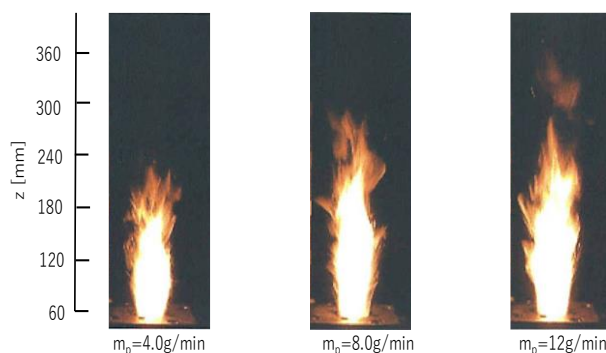


Fig.6 Direct photograph of flames during combustion of expanded polystyrene powder with mass median diameter $d_m=89.7\mu\text{m}$

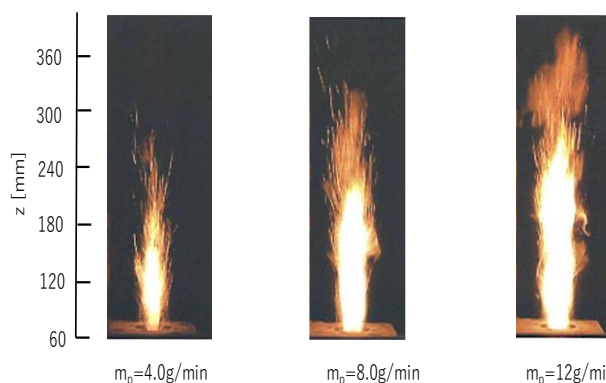


Fig.7 Direct photograph of flames during combustion of expanded polystyrene powder with mass median diameter $d_m=145\mu\text{m}$