

平成 24 年度研究助成報告（兼、終了報告）

研究題名	プラズマを導入したサイクロンによる 粒子の選択的処理プロセスの開発
研究期間	平成 23 年 4 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日
研究機関・所属 研究者名	東京工業大学・大学院理工学研究科化学工学専攻 関口 秀俊

1. 平成 24 年度研究成果の概要

この研究では、サイクロン分離器とグライディングアーク放電を組み合わせた反応器を作成し、これを利用して粒子の選択的処理を行う粉体プロセッシングについて研究を行った。モデル粒子として平均径 $5\mu\text{m}$ のポリプロピレン粒子をアルゴンガスと共に反応器内に供給し、放電の領域を通過することでプラズマによる粒子の処理を試みた。その結果、プラズマ処理により反応器外部に排出される粒径の小さい粒子のうち、数%の粒子が球状化した。電圧または流量を増加させることで、この球状化した粒子の割合が増加した。サイクロン内の数値流体解析、高速度カメラでの放電の観察、粒子の溶融時間の推測から、球状化は、粒径に応じて粒子のサイクロン内での経路が変化し、放電と同じ経路を辿った粒子が処理されるためと考えられ、このことから、この反応器による粒子の粒径に対する選択的処理の可能性が示唆された。

2. 助成期間内での研究成果の概要

1. はじめに

粉体は、ナノテクノロジーから食品に至る様々な分野で利用されている。粉体は当然のことながら粒径分布を有するため、粒径に選択性を持つ粒子処理プロセスの構築はプロセスの効率化につながる。粒子の粒径選択性を生み出す代表的な装置はサイクロンであり、古くから利用されている。一方、近年、エレクトロニクスの進歩により、様々な特徴をもつプラズマを大気圧下でも生成できるようになり、材料の表面改質や殺菌など幅広い分野で研究が展開されている。そこで、この研究ではサイクロン内にプラズマを生成させ、これを利用して粒子の粒径に対する選択的処理を試みるものである。このプロセッシングに期待される特徴として、(1)プラズマ中に存在する活性種がサイクロン内で局所的反応場を構築すること、(2)プラズマガスの種類により決定される雰囲気での粒子プロセスが可能なること、(3)粒径の選択性を有すること、が上げられる。

プラズマの発生にはグライディングアーク放電を利用した。グライディングアーク放電とは、拡大する電極間に放電を起こし、電極間に導入したガス流により放電

位置を移動させていく放電である。放電位置により性質の異なるプラズマと変化し、これを利用したプロセスの開発が多方面で行われている。ここでは、サイクロン内に存在するガス流に着目し、この放電をサイクロン内に発生させた。そして、ポリマー粒子を導入して、粒径に対する選択的処理の効果を調べた。

2. 実験

実験装置の概略を Fig.1 に示す。サイクロンは設計変更が容易で自作できるように、銅製円筒の内部に、テーパ処理した銅製円柱を組み込んだ構造とした。内部円柱は高圧電極を兼ね、接地された円筒との間にグライディングアーク放電を発生させた。放電の電源は、交流電源 (50Hz) をトランスにて 150 倍に昇圧させたものである。処理するポリマー粒子には平均径 $5\mu\text{m}$ のポリプロピレン粒子 (PPW-5、セイシン企業) を用いた。この粒子は粉碎法で作製されているため、表面が凸凹した形状となっている。粒子はアルゴンガスに同伴されて接線方向から反応器に導入され、回転しながら電極間に発生したグライディングアーク放電プラズマにより処理される。アルゴンガスの流量(8, 12 L/min)や印加電圧(1 次電圧:32, 53V)を変えて実験を行い、放電の様子の変化を高速度カメラにより観察すると共に、処理前後の濡れ性や粒子形状の変化を調べた。

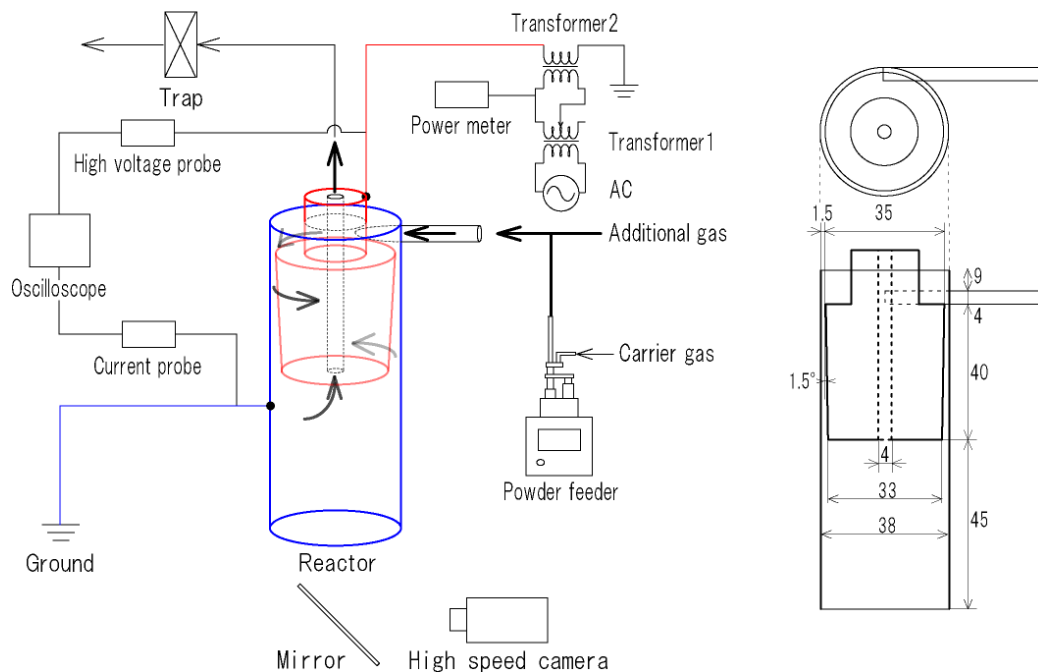


Fig.1 実験装置図：グライディングアーク放電導入型サイクロン

3. 結果および考察

Fig.2 に、高速度カメラで撮影したサイクロン内の放電の様子を示す。円柱と円筒との間でグライディングアーク放電が発生し、回転しながらサイクロン内を下降し

ていくことが確認された。放電のサイクルは電源周波数に対応しており、放電が再開する場所は定位置ではなく、不規則であった。放電の移動速度は、ガス流量を増加させると増え、放電電圧を上げると減少した。前者についてはガスと共に放電が移動するため、後者については放電が安定化するためと考えられた。また、放電の大きさは約 3mm x 0.5mm 程度と推測された。

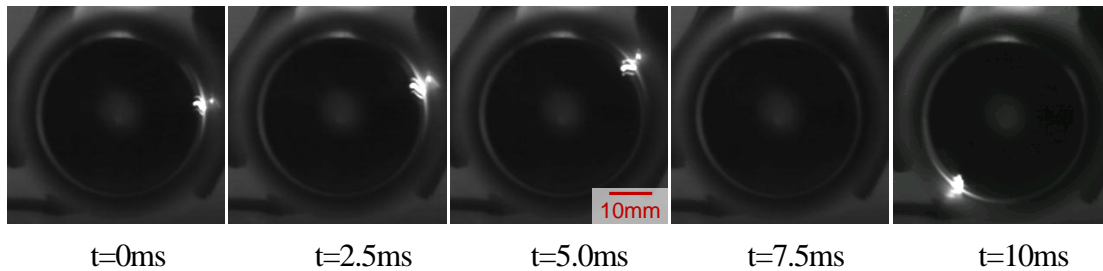


Fig.2 グライディングアーク放電の様子

粒子を導入するとサイクロン内で回収される粒子と上部からガスと共に出て行く粒子とに分けられた。それらの粒子の分布を Fig.3 に示す。プラズマの有無にかかわらず平均径は、それぞれ約 5 μ m と 4 μ m であり、若干ではあるが、このサイクロンの分離効果が確認されるとともに、プラズマは分離に大きな影響を与えないことが示唆された。処理前後の粒子の親水性を調べたところ、アルゴンガスでは変化が見られなかったが、Fig.4 に示すように空気を粒子の導入ガスに用いたところ、回収された粒子にわずかながら差が見られた。ただ、後述する球状化の効果では、回収されない粒子に処理の効果がみられており、この親水化の効果については、測定方法も含めて、慎重な議論が必要と考えている。

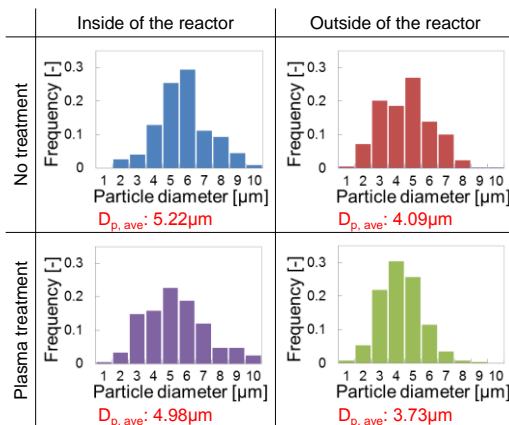


Fig.3 処理後の粒子分布：
 (上) 放電無し、(下) 放電有り
 (左) サイクロンで回収された粒子、
 (右) サイクロンから排出された粒子

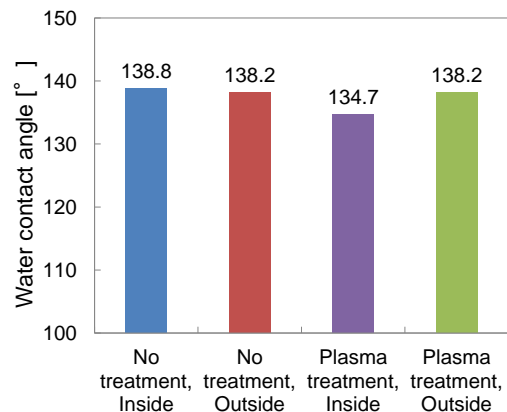


Fig.4 処理前後の親水性変化
 (粒子導入に空気を利用)

Fig.5 は粒子の電子顕微鏡 (SEM) 写真である。図からわかるように、サイクロン上部から排出される粒子の一部が処理により球状化していたが、サイクロン内で捕集された粒子は球状化しなかった。そこで、この球状化に着目し、条件ごとに SEM により観察された粒子数百個に対して、(1)式で円形度を算出し、(2)式により球状化率を算出した。

$$\text{円形度} = \frac{\pi d_{p, \text{Max}}^2}{4A_p} \quad (1)$$

(d_p : 粒径 A_p : 粒子の投影面積 $d_{p, \text{Max}}$: 粒子の最大径)

球状率 [%]

$$= \frac{\sum \text{円形度} \leq 1.12 \text{ の粒子の投影面積 } [\mu\text{m}^2]}{\sum \text{反応器外部で捕集された粒子の投影面積 } [\mu\text{m}^2]} \quad (2)$$

結果を Fig.6 に示す。電圧または流量を増加させることで、球状化した粒子の割合が増加することがわかる。ただし、どの条件においても処理された粒子は数%程度であった。

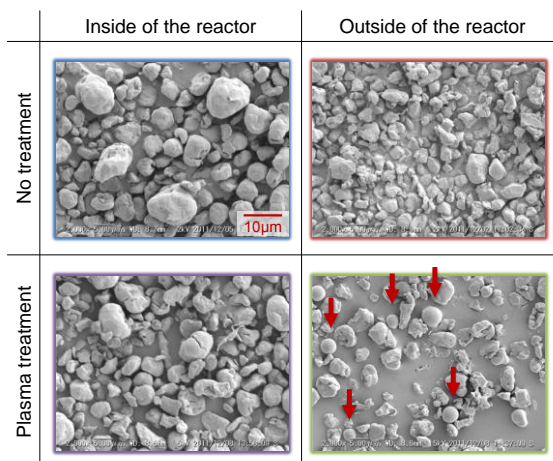


Fig.5 処理後の粒子の SEM 写真：
 (上) 放電無し、(下) 放電有り
 (左) サイクロンで回収された粒子、
 (右) サイクロンから排出された粒子

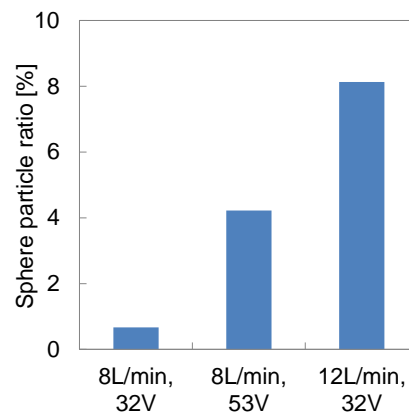


Fig.6 各条件における球状化率
 (上段) アルゴン流量
 (下段) 1次電圧

粒子が球状化した過程も含め、グライディングアーク放電を導入したサイクロン反応器を解析するため、3次元の流体計算が可能な商用ソフトである COMSOL Multiphysics 4.2a を利用して、サイクロン内のガスの流れを解析した。計算領域や計算条件、および結果の一例 (流線) を Fig.7 に示す。計算結果から、旋回流部分での線速度は、高速度カメラから求められた放電の移動速度と大きな違いはなく、放電はガス流と共に移動すると考えられた。また、放電可能部分でのガスの滞留時間

は約 70m/s 程度と見積もられた。一方、粒子が外部から熱をもらい融解するまでの時間はサブミリ秒オーダーであり、放電の持続時間やこれらの各時間オーダーを考慮すると、一つの放電に対して、その放電体積の約 15 倍の周囲のガスに同伴される粒子が、この放電からの熱を受けて球状化すると考えると実験結果が説明できた。言い換えると、サイクロンにより粒径に応じて粒子の経路が変化し、放電と同じ経路を辿った粒子が処理されることで、サイクロン内外で粒子の球状化に選択性が現れたと考えられた。

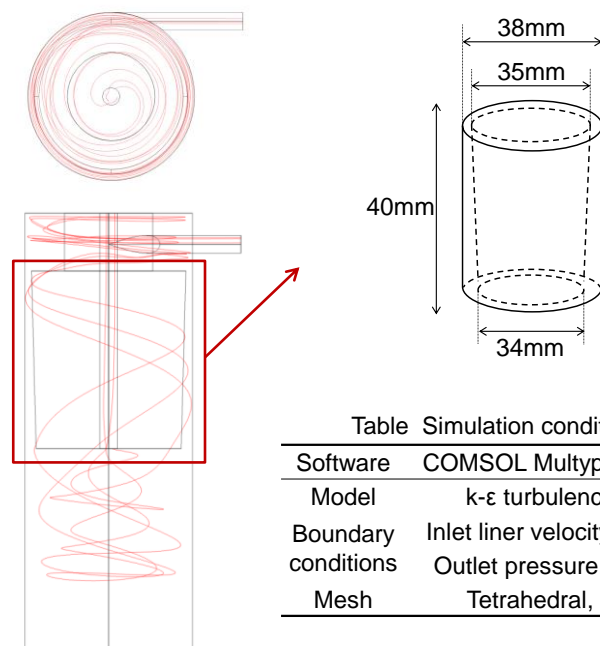


Fig.8 サイクロン内流れの解析条件と結果

4. まとめ

グライディングアーク放電プラズマを導入したサイクロンを用いて、ポリマー粒子の処理実験を行った。その結果、わずかではあったが粒状化に関して回収される粒子と排出される粒子に差異が見られ、提案した装置による粒径に対する選択的処理の可能性が示唆された。

3. 研究発表

1. 関口 秀俊, 小玉 聡, 宮崎 和亮, “グライディングアーク放電を導入したサイクロンによる粒子の処理”, 化学工学会第 78 回年会研究発表講演要旨集, G301 (2013.3.19 大阪)
2. 関口 秀俊, “プラズマを導入したサイクロンによる粒子処理プロセスの開発”, 粉体工学会 2013 年度春季研究発表会講演論文集 (予定) (2013.5 東京)