

## 平成 19 年度研究助成報告（兼、終了報告）

研究題名	ジェット変動を制御した高効率除去ノズルの開発と粒子混入による除去効果促進
研究期間	平成 17 年 4 月 01 日～平成 20 年 3 月 31 日
研究機関・所属 研究者名	岡山大学 大学院自然科学研究科 教授 後藤 邦彰

### 1. 平成 19 年度研究成果の概要

本年度は、実用化を念頭に、実装置と同様ジェットを走査できる実験装置を作成した。予備実験を行ったところ、後述するように、走査速度により大幅な除去効率の低下が見られた。高効率な除去のためには、この走査による除去効率の低下を把握し、その予測法を確立する必要があると考え、当初の予定にはなかったジェット走査の影響を詳細に検討した。さらに、前述のノズルの違いについて、実用上問題となる、除去効率の面分布についても検討を行った。

その結果、走査速度の上昇に伴い、除去率は低下した。この結果を、除去対象面を固定した状態での除去率経時変化と比較すると、両者はほぼ一致する。よって、走査速度の上昇に伴う除去率の低下の主な原因は、ジェットが付着微粒子の除去に有効に作用する時間の減少である。このことは、固定位置での除去率の経時変化を求めておけば、走査時の除去率が推定できることを示す。一方、走査時の除去率を向上するためには、固定位置での除去において、気流噴射直後に除去率が急激に増加するノズル、言い換えると、ジェット作用時間が短くても高除去率が得られるノズルを開発する必要があることを示す。

また、ノズル幅方向に除去率の分布があり、ノズル外部形状によって分布の形状が異なることがわかった。それぞれのノズルでの壁面圧力を測定して除去結果と比較すると両者の傾向はほぼ一致していることから、ノズル幅方向の除去率分布の原因はノズル形状に固有のジェット三次元分布にある。このことから、ジェットノズルの設計の際には、ジェットの三次元分布を考慮した上で行うことが重要であると考えられる。

### 2. 助成期間内での研究成果の概要

#### 1. はじめに

平成 17 年より 19 年までの 3 年間、「ジェット変動を制御した高効率除去ノズルの開発と粒子混入による除去効果促進」をテーマとして、粉体工学情報センターから研究助成をいただいた。本テーマは、筆者らがこれまで検討してきた、高速気流（＝エアジェット）を粒子が付着した固体表面に噴射して付着粒子を除去するエアジェットによる乾式除去法<sup>1,2)</sup>を基礎として、ノズルの改良および操作法の改良による除去効果の高効率化を目的としている。

助成 1 年目の研究では、低周波振動（＝パルスジェット）から高周波振動まで発生可能な除去ノズルの開発を目的とした。この新規ノズルを開発するに当たり、まず、ノズルの基本的な

設計条件を確立することを目的として、従来の研究<sup>1,2)</sup>と同様な2次元スリット状ノズルを作成し、その基本的な除去特性を検討した。ここでは、これまで着目されていない、ノズル内部の流路形状、ならびに、ノズルの外部形状に着目し、それらが異なる5種類のノズルを用いて、除去実験を行った。また、それらのノズルを用いて、比較的発生が簡単なパルスジェットによる除去実験を行った。このパルスジェットによる除去促進効果の検討結果が、次節の「2. パルスジェットによる除去促進」に示す内容である。その後、高周波振動気流を発生するノズル構造について検討を行ったが、実用面を考え、磨耗粉の発生する稼動部がないことを条件とすると、適切な構造のノズルが開発できず、異なる手法での高効率化が必要であるとの結論に至った。

次に実用化を念頭に、実装置と同様ジェットを走査できる実験装置を作成した。予備実験を行ったところ、後述するように、走査速度により大幅な除去効率の低下が見られた。高効率な除去のためには、この走査による除去効率の低下を把握し、その予測法を確立する必要があると考え、当初の予定にはなかったジェット走査の影響を詳細に検討した。さらに、前述のノズルの違いについて、実用上問題となる、除去効率の面分布についても検討を行った。この成果は「3. 除去対象面走査が除去効果に及ぼす影響」に示す。

## 2. パルスジェットによる除去促進

### 2.1 実験装置および方法

除去装置の概略図を Fig.1 に示す。圧縮空気をジェットノズルから除去対象に噴射し、除去の様子を高速度ビデオカメラで撮影した。ジェットの噴射条件として、ノズル内圧力 $\Delta P$ を測定した。本実験では、圧力範囲を $\Delta P=0.015\sim 0.37\text{MPa}$ とした。また、電磁弁にファンクションジェネレータにより周期的に電流を流し、繰り返し開閉させることで、周波数 $0.04\sim 70\text{Hz}$ のパルスが発生させた。

ジェットの噴射角度は既往の研究を参考に $45\text{deg}$ とし、ノズル出口から幾何学的衝突点(ノズル中心を通る直線と除去対象面との交点)までの距離を $7\text{mm}$ とした。撮影は気流の幾何学的衝突点を

中心とする、 $1\times 1\text{mm}^2$ の範囲について行い、画像処理により粒子数の経時変化を測定した。

除去対象として、スライドガラスに粒子径 $D_p=2.25, 3.25, 4.25, 4.7\mu\text{m}$ の単分散液晶スペーサをそれぞれ $1\text{mm}^2$ あたり $150\sim 250$ 個ほどの個数濃度で散布し、 $100$ 時間以上乾燥させた

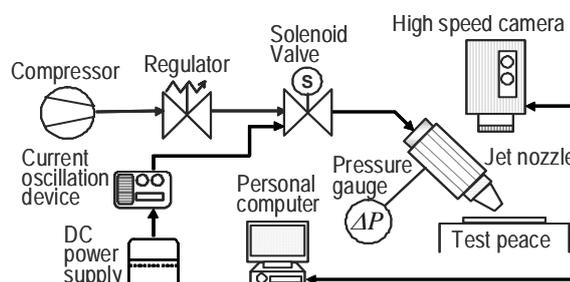


Fig.1 Schematic diagram of

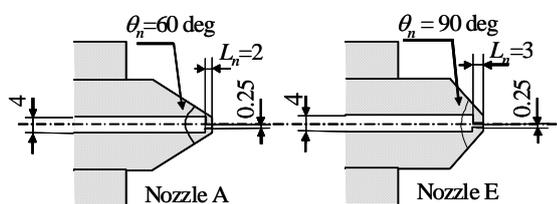


Fig.2 Air jet nozzle

ものを使用した。ジェットノズルは、外部形状または内部形状が異なる 5 種を用意した。ノズルA~Cはノズル内部の流路形状は同一とし、ノズル先端角度 $\theta_n$  (先端部の 2 つの斜辺がなす角) をそれぞれ 60, 90, 120degとした。一方, Nozzle Dおよび Nozzle B, Eは先端角度 $\theta_n$ をすべて 90degで一定とし、ノズル内部形状である噴出口オリフィス厚さ $L_n$ はそれぞれ 1, 2, 3mmとした。なお、噴出口は $0.25 \times 10\text{mm}^2$ の二次元スリット状で統一した。一例として Nozzle AおよびEの形状をFig.2に示す。

## 2.2 除去率の定義

除去前の測定範囲内の粒子数を $N_{ini}$ 、除去開始から $t$ 秒後の粒子数を $N(t)$ とし、 $t$ 秒後の除去率 $\eta(t)$ を次のように定義した。

$$\eta(t) = \frac{N_{ini} - N(t)}{N_{ini}} \quad (1)$$

$\eta(t)$ はジェットを噴射し続けると、それ以上除去が起こらない状態となる。この最大除去率達成時を飽和状態と呼び、その時の除去率を飽和除去率 $\eta_{sat}$ とする。

## 2.3 ノズル内圧力の影響

ジェット噴射時のノズル内圧力の除去効率向上効果への影響を検討するため、周波数を 5Hz で一定とし、種々のノズル内圧力で除去実験を行った。結果の一例を Fig.3 に示す。例に挙げた圧力範囲においては、同じ除去率を得るのに必要なノズル内圧力は、連続的なジェットよりもパルスジェットを用いたほうが低くて済むことがわかる。ここでパルスによる除去率の向上の度合いを定量化するため、Fig.3 に示すように、同じ除去率となるノズル内圧力より、向上指標値を次のように定義した。

$$\Delta P_{ad} = \Delta P_{normal} - \Delta P_{pulse} \quad (2)$$

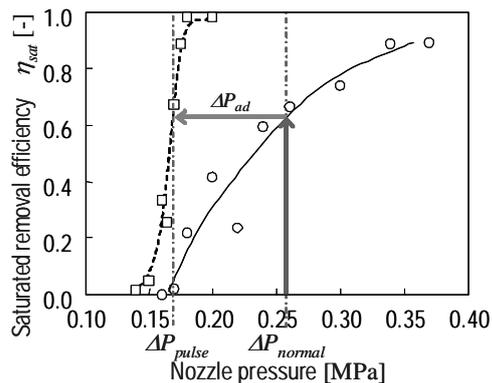


Fig.3 Saturated removal efficiency as a nozzle

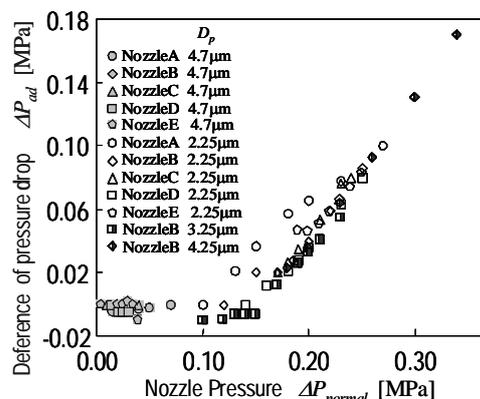


Fig.4 Effect of nozzle pressure

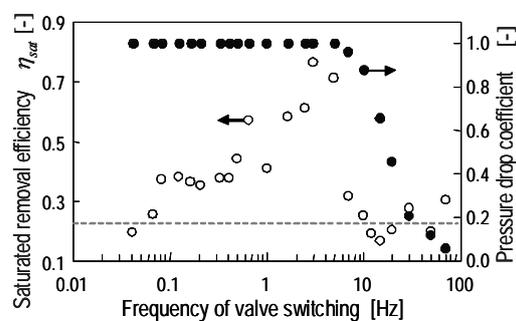


Fig.5  $\eta_{sat}$  and pressure drop as a

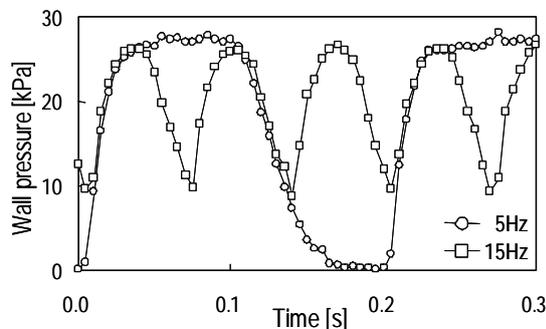


Fig.6 Oscillation of wall pressure

Fig.4に $\Delta P_{normal}$ に対して $\Delta P_{ad}$ をプロットしたグラフを示す。図からわかるように、パルスによる除去率向上はノズル形状、除去対象粒子径に依らず、 $\Delta P$ が0.10MPa以上でのみ現れる。熱力学の関係式より、ノズルの臨界圧を計算したところ、臨界圧力は0.09MPaであることがわかった。よって、ノズルが臨界ノズルとなった時のみ、パルスによる除去効果向上が起きると考えられる。

## 2.4 周波数の影響

次にNozzle Bを用いて、ノズル内圧力を0.18MPaで一定として、 $D_p=3.25\mu\text{m}$ の粒子に対してパルス周波数を変えて行った実験結果をFig.5に示す。グラフ内の破線は連続的にジェットを噴射した場合の飽和除去率である。パルスジェットでの除去率は、始め周波数が増えるに従って大きくなっているが、周波数が7Hzから急激に小さくなり、ジェットを連続的に噴射した場合と変わらなくなる。すなわち、周波数5Hzが最適周波数であることがわかる。除去率が周波数と共に増加したのは、飽和状態に至るまでのパルスの噴射回数が増加するためと思われる。一方、7Hz以上での急激な減少は除去対象面上での気流に関係すると考え、幾何学的衝突点の表面圧力の経時変化を測定した。測定結果の例を、Fig.6に示す。気流圧力は時間に対して、立ち上がり、定常状態、減衰、定常状態を繰り返すが、周波数が高くなると減衰時に圧力が0に到達する前に、再度立ち上がる。ここで、壁面圧力の最大値と、減衰する圧力(=最大圧力-最小圧力)の比を圧力減衰率とし、周波数に対してプロットした(Fig.5)。圧力減衰率の低下、すなわち、減衰時に圧力が0に達しなくなる周波数と、除去効率が減少を始める周波数はほぼ一致する。よって、除去効果向上のためには、独立したパルスが必要であると考えられる。

## 2.5 まとめ

パルスエアによる除去効果の向上は、ノズル内圧力が臨界圧力以上で、かつ、除去対象面上での気流壁面圧力変動が独立、すなわち、不連続なパルスとして除去対象面に衝突する場合に現れる。パルスが独立していれば、除去効果は周波数に対して単調に増加する。

## 3. 除去対象面走査が除去効果に及ぼす影響

### 3.1 実験装置および方法

実験装置の概略図をFig.7に示す。基本的な構成はFig.1と同じであるが、本実験では、ノズルを固定し、除去対象面を電動アクチュエーター上に設置し、アクチュエーターをPCで制御することにより走査速度0.1~600 mm/sの範囲で除去面を走査させた。ノズルは、先端角度が異なる3種類の二次元スリット状Nozzle A, B, Cを用いた。

ジェットの噴射角度は45deg、ノズル出口から幾何学的衝突点(ノズル中心を通る直線と除去対象面との交点)までの距離は7 mmに固定し、ノズル内圧力 $\Delta P$ を0.04~0.16 MPaの範囲で変化させて実験を行った。

試料粒子には、前述の試料粒子のうち粒子径3.25  $\mu\text{m}$ の単分散液晶スペーサを用い、スライドガラス上に1 mm<sup>2</sup>あたり250±50 個の個数濃度で散布し、デシケーター内で100時間以上乾燥させた後、除去実験に用いた。

### 3.2 除去率の定義

先の実験では、除去位置を固定していたので、除去率の経時変化を求め、最大除去率を飽和除去率 $\eta_{sat}$ として検討を行った。本検討では、除去位置が移動するため、経時変化を測定することは困難であるので、除去前後の除去対象面をカメラで撮影し、画像処理により求めた除去前および除去後の粒子個数 $N_{bef}$ 、 $N_{aft}$ から除去率 $\eta$ を算出した。なお、除去率 $\eta$ は次の式で定義した。

$$\eta = \frac{N_{bef} - N_{aft}}{N_{bef}} \quad (3)$$

### 3.3 走査速度による除去率の変化

Nozzle B を使い、走査速度を変化させたときの結果を Fig.8 に示す。走査速度の上昇に伴い、除去率は低下した。この除去率の低下原因の1つとして、ジェット幅が有限であることから、除去面走査速度の増加によるジェット作用時間の減少が考えられる。そこで、ジェット噴射時に除去対象面にかかる圧力（壁面圧力）の測定により面上でのジェット幅を求め、ジェット内での粒子の滞留時間を算出し、走査速度ゼロ、すなわち、除去対象面を固定した場合の除去率経時変化と比較した。その結果、Fig.9 に示すように、両者はほぼ一致した。よって、走査速度上昇による除去率の低下は、ジェットが粒子に作用する時間が短くなったことが主な原因と考えられる。

### 3.4 除去率の面分布測定結果

Fig.10 に、ジェット幅方向の除去率分布を示す。Nozzle A ではジェット中央部で除去率は低く、両端で除去率は高くなる。一方、Nozzle B では、除去率は中央と両端でピークを持つ。これらの傾向は、図中に示した壁面圧力測定結果とほぼ一致する。よって、ジェット幅方向の除去率分布は、ノズル形状に依存するジェット流速の幅方向分布が原因と考えられる。

### 3.5 まとめ

走査速度を変化させて実験を行ったところ、走査速度の上昇に伴い、除去率は低下した。この結果を、除去対象面を固定した状態での除去率経時変化と比較すると、両者はほぼ一致する。

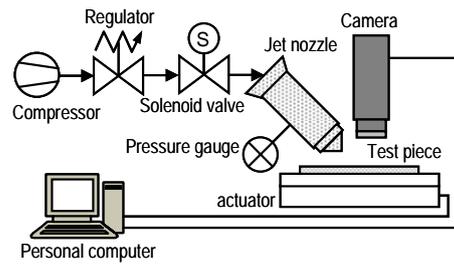


Fig.7 Experimental apparatus

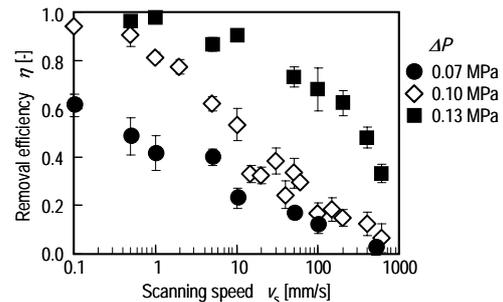


Fig.8 Effect of scanning speed

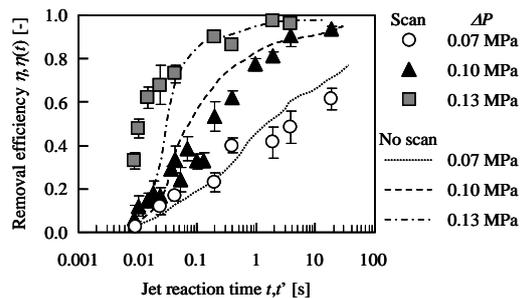


Fig.9 Removal efficiency as a function of time

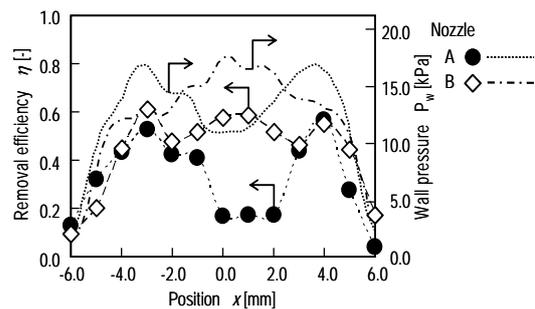


Fig.10 Removal efficiency distribution

よって、走査速度の上昇に伴う除去率の低下の主な原因は、ジェットが付着微粒子の除去に有効に作用する時間の減少である。このことは、固定位置での除去率の経時変化を求めておけば、走査時の除去率が推定できることを示す。一方、走査時の除去率を向上するためには、固定位置での除去において、気流噴射直後に除去率が急激に増加するノズル、言い換えると、ジェット作用時間が短くても高除去率が得られるノズルを開発する必要があることを示す。

また、ノズル幅方向に除去率の分布があり、ノズル外部形状によって分布の形状が異なることがわかった。それぞれのノズルでの壁面圧力を測定して除去結果と比較すると両者の傾向はほぼ一致していることから、ノズル幅方向の除去率分布の原因はノズル形状に固有のジェット三次元分布にある。このことから、ジェットノズルの設計の際には、ジェットの三次元分布を考慮した上で行うことが重要であると考えられる。

#### 4. おわりに

本助成をいただき、3年間、種々の検討を行ってきたが、未だ高効率化の決定的な要因を見つけないに至っていない。これは、気流による除去の基礎現象となる粒子の飛散現象が未だ解明されていないためである。除去効率の大幅な向上のためには、飛散現象の解明も視野に入れた、気流特性と飛散挙動の検討が必要であると考えている。

筆者は、平成2年から9年の間「高速気流による表面付着微粒子の除去」をテーマとして基礎的な検討を行っていたが、平成9年以降一時中断していた。中断していた本研究を、理想的な実験装置を用いて再開できたのは、本助成のおかげである。末筆ながら、助成をいただいた粉体工学情報センターに感謝する。本助成により再開させていただけた本研究であるので、助成期間終了後も、さらに発展させていく予定である。

#### References

- 1) Masuda, H., K. Gotoh, H. Fukada and Y. Banba : "The Removal of Particles from Flat Surfaces Using a High-speed Air Jet", *Advanced Powder Technology*, **5**, 205-217 (1994)
- 2) Gotoh, K., S. Takebe, H. Masuda and Y. Banba : "The Effect of Humidity on the Removal of Fine Particles on a Solid Surface Using a High-Speed Air-jet", *KONA*, **13**, 191-203 (1995)

#### 3. 助成期間内での研究発表

学術論文： 岡崎峰也, 吉田幹生, 押谷潤, 後藤邦彰：“高速気流による表面付着微粒子の除去に対するパルスエアの効果”，粉体工学会誌 (in print)

口頭発表：

- ・ 岡崎峰也, 押谷潤, 後藤邦彰：“高速気流による表面付着微粒子の除去—除去効率に対するノズル形状の影響—”，2006年度春期研究発表会講演論文集, p.p.35-36, 京都 (2006.5)
- ・ 岡崎峰也, 吉田幹生, 押谷潤, 後藤邦彰：“パルスエアジェットの付着粒子除去効果に対する実験的考察”，2007年度秋期研究発表会講演論文集, p.p.17-18, 大阪 (2007.10)
- ・ 楠村玲子, 岡崎峰也, 吉田幹生, 押谷潤, 後藤邦彰：“エアージェットによる微粒子除去効果に対する除去対象面走査およびノズル形状の影響”，第10回化学工学会学生会発表会大阪大会, p. 119, 大阪 (2008.3)