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

Effect of Pulsed Air Jet on the Air Jet Removal of Adhered Single Particles

岡崎 峰也, 吉田 幹生, 押谷 潤, 後藤 邦彰

Mineya Okazaki, Mikio Yoshida, Jun Oshitani, Kuniaki Gotoh

Received 11 January 2008 ; Accepted 5 March 2008

Removal of single particles adhered on a flat plate by a pulsed air jet has been investigated experimentally. In this study, we aimed at elucidating the factors that affect the improvement of the removal by pulsed air jet.

Experimental results showed that the improvement of removal by pulsed air appears only when the nozzle pressure is higher than the critical pressure at which the air jet velocity through the nozzle reaches the sonic velocity. When the nozzle pressure is set at above the critical pressure, the improvement has the maximum at a certain pulse frequency (i.e., there exists an optimum frequency). Measurement of the air pressure on the flat plate surface revealed that the air pressure never falls to zero at a frequency higher than the optimum frequency. On the other hand, it was found in the frequency range lower than the optimum frequency that the improvement of the removal increases with a decrease in the interval time of the pulse. Thus, the optimum frequency is the frequency that has the shortest interval time for reaching each pulsed air jet to the surface as an independent air jet.

Keywords : Surface cleaning, Particle removal, Pulsed air jet, Impinging jet

1. 緒 言

微粒子の付着による表面汚染を原因とする品質の低下は、医療産業や食品産業など、多くの産業において大きな問題となっている。例えば、製品の小型化が著しい半導体デバイスの製造工程においては、クリーンルームを用いても工程中で発生する粉塵による汚染は避けられないため、高精度な表面洗浄技術が求められている。現在は薬品や溶媒を用いた湿式洗浄法が主流であるが、乾燥工程での再汚染や廃液の処理など、多くの問題を抱えている。

この問題に対し、我々は、薬品や溶媒を必要としない乾式洗浄法の中でも、洗浄対象に対して非接触で高い汎用性を期待できる、エアジェットを用いた乾式洗浄法に着目し研究を行ってきた¹⁻³⁾。これまでの研究で、除去時の湿度を調節することで付着粒子の付着力を下げ、除去率を向上させることが可能であることを

明らかにした。しかし、粒径の小さな粒子(1 μ m近傍)では、気流から受ける分離力が小さいため、付着力を下げるだけでは十分に除去することができない²⁾。したがって、気流が粒子に与える分離力を向上させる必要がある。

高速のエアジェットは、付着粒子の除去以外にも、板状物質からの熱移動や物質移動促進方法として用いられている⁴⁻⁶⁾。これらエアジェットによる熱・物質移動促進では、パルスエアジェットを用いた移動促進が報告されており⁶⁾、微粒子の除去に対して有効である可能性が高い。

パルスエアジェットの微粒子除去効果については、これまでにいくつかの検討がされている^{1, 7, 8)}。Ziskindは、気流を定常的に噴射する場合に比べて除去率が向上すると報告している⁷⁾。また、並木らは、平滑なウエハ表面に付着した粒子の除去現象について検討を行い、1パルス目の除去率と最終的に除去できない粒子の割合に着目することで、パルス噴射回数を用いて除去率の推定が可能であることを示した⁸⁾。一方で、増田らは、気流を噴射している時間が等しければ、パルスエアジェットの除去率と連続ジェットの除

岡山大学大学院 自然科学研究科 物質生命工学専攻
(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1) TEL 086-251-8084
Division of Chemistry and Biochemistry, Graduate School
of Science and Technology, Okayama University
(3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

去率はほぼ等しいことを報告している。このパルスジェットの効果の違いは、ノズル形状やジェット操作条件範囲の違いが原因であると考えられる⁹⁾が、現在までのところこれらについて詳細な検討は行われていない。

そこで本研究では、パルスエアジェットを用いた微粒子除去について、形状の異なるノズルを用いて、噴射時のノズル内圧力やパルス周波数など、代表的な噴射条件が除去率に与える影響について実験的に検討し、パルスの効果発現条件とパルスによる除去率向上に影響する因子を明らかにすることを目的とした。

2. 実験

2.1 実験装置および方法

除去実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。コンプレッサーからの乾燥エアをジェットノズルから除去対象面に噴射し、除去時の様子を高速ビデオカメラ（株式会社フォトン、FASTCAM-PCI R2）で撮影した。ジェットの噴射条件として、ノズル内圧力 ΔP を圧力ゲージ（株式会社キーエンス、AP-43）を用いて測定した。パルスジェットは電磁弁を開閉させることで発生させた。Fig. 2 に、パルスジェットと一定時間連続的に噴射するジェット（以下ノーマルジェットと

Fig. 2 Nozzle pressure change with time

Fig. 3 Air jet nozzles

称する) 噴射時のノズル内圧力の経時変化を示す。図のようにパルスジェットもノーマルジェットも、電磁弁開放直後の圧力変化は類似しており、本圧力測定器の測定条件内では、急激な圧力変化に伴う最高圧力のオーバーシュートは観測されなかった。

本実験では単分散液晶スパーサー（標準偏差 0.15 以下）を除去対象粒子とした。粒子径は、増田ら¹⁾の報告を参考に、ノーマルジェットでは除去に高いノズル内圧力が必要になると予想される $D_p = 2.25, 3.25, 4.25, 4.7 \mu\text{m}$ とした。試料粒子は乾式液晶スパーサー散布装置（日清エンジニアリング株式会社、DISPA- μR ）を用いて 1mm^2 あたり 200 ± 100 個の個数濃度でスライドガラスに散布した。なお、散布時の湿度の影響を除くために、低湿度下に 100 時間以上静置した後、除去試験を行った²⁾。

ジェットの噴射角度は、増田らの研究¹⁾を参考に 45deg とした。また、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 7mm で一定とした。本研究では、増田らの検討結果¹⁾を基に、安定して高除去率の得られる幾何学的衝突点に着目し、測定範囲は幾何学的気流衝突点を中心とした $1 \times 1\text{mm}^2$ とし、画像処理により粒子数の経時変化を測定した。

ジェットノズルは、Fig. 3 に示す外部形状または内部形状が異なる 5 種類のノズルを用意した。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 θ_n （先端部の二つの斜辺がなす角）がそれぞれ

Table 1 Experimental conditions for investigation on nozzle pressure

Surface material		Glass	
Particle diameter	D_p	2.25, 3.25, 4.25, 4.7	(μm)
Nozzle pressure	ΔP	0.015~0.37	(MPa)
Frequency of pulse	f	5	(Hz)
Substantial duration time of jet	t_s	60	(s)

Fig. 4 Time dependence of removal efficiency

60, 90, 120degとした。一方, Nozzle Dおよび Nozzle B, Eは先端角度 θ_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 をそれぞれ1, 2, 3mmとした。ただし噴出口はすべてのノズルで, $0.25 \times 10\text{mm}^2$ の2次元スリット状に統一した。

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。

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

Fig. 4に示すように, $\eta(t)$ はジェットを噴射し続けると, 一定値(=最高除去率)に漸近する。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 η_{sat} とする。本実験では, 除去率の経時変化を複数回測定した結果から, ノーマルジェット, パルスジェットともに, 実質的な噴射時間(=ノーマルジェットでは噴射持続時間, パルスジェットでは気流噴射時間の総和)が60秒以上であれば, 除去は飽和状態に達することを確認しており, 噴射時間60秒での除去率を飽和除去率 η_{sat} とした。

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への影響

Fig. 5 Saturated removal efficiency of normal and pulse jet as a function of nozzle pressure

を検討するため, **Table 1**に示すように周波数を5Hzで一定とし, ノズル内圧力をパラメーターとして, ノーマルジェットとパルスジェットの飽和除去率を比較した。結果の一例を**Fig. 5**に示す。図に示したように, パルスジェットを用いると飽和除去率が向上する場合($D_p=2.25\mu\text{m}$, $3.25\mu\text{m}$)もあれば, パルスジェ

Fig. 6 Index of removal efficiency improvement by pulsed jet as a function of nozzle pressure

ットを用いても結果が変わらない場合 ($D_p = 4.7 \mu\text{m}$) も見られた。また、パルスジェットにより飽和除去率が向上した場合でも、その向上の度合いは条件により異なる。そこで、その向上の度合いを評価するため、同じ飽和除去率となるノーマル、パルスジェットのノズル内圧力の差を向上指標値 I として、次のように定義した。

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

この向上指標値 I は、パルスジェットを用いて節約できるノズル内圧力の大きさを表した値である。

Fig. 6 に、ノズル A～E を用いて種々の条件で除去実験を行ったすべての結果から求めた向上指標値 I を、ノーマルジェットでのノズル内圧力 ΔP_{normal} に対してプロットした結果を示す。図中に $I < 0$ となっているデータがあるが、これは Fig. 5 でも見られる除去実験結果のばらつきに起因する誤差と考えられる。図から分かるように、パルスによる除去率向上はノズル形状、除去対象粒子径によらず、ノズル内圧力が 0.10 MPa 以上でのみ現れる。一般にノズル出口付近の流速が音速になった状態は臨界ノズルと呼ばれており、流体の比熱比から臨界ノズルに遷移する圧力、すなわち臨界圧力 P_c を Eq. (3) を用いて計算することができる。

$$\frac{P^*}{P_c} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (3)$$

P^* : 大気圧

k : 比熱比

空気の比熱比 k は 1.4 であることから、本実験系では臨界圧力 P_c は 0.09 MPa であることが分かった。し

Fig. 7 Effect of nozzle shape on removal efficiency

たがって、ノズルが臨界ノズルとなった時にのみ、パルスによる除去効果向上が起きると考えられる。

Fig. 6 でパルスの効果が見られる臨界圧力以上の向上指標値 I に着目すると、ノズル形状により向上指標値が若干異なることが分かる。このノズルによる違いを確認するために、Fig. 7 に、本研究で用いた各ノズルについて、臨界圧力以上で除去される粒子径 $2.25 \mu\text{m}$ の実験結果から求めた、除去率 50% となるノズル内圧力 $\Delta P_{50\text{normal}}$, $\Delta P_{50\text{pulse}}$ を示す。ノーマルジェットではノズル形状により除去率 50% となる圧力は異なるが、パルスジェットではほぼ同じ圧力となっている。したがって、臨界圧力以上の条件において I の値がノズルによって異なるのは、ノーマルジェットでの飽和除去率がノズル形状によって異なることが原因であると考えられる。なお、粒子径 $2.25 \mu\text{m}$ ではパルスジェットの除去率はノズル形状に依存しないが、他の粒子径では確認できておらず、パルスジェットでの除去効率に与える粒子径の影響については、さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

2.4 パルス周波数の影響

前述のように、パルス効果はノズル内圧力が臨界圧力以上で発現することが明らかとなった。そこで、次にパルス効果に影響する因子の特定を目的として、パルス周波数の影響を検討した。このため、Fig. 6 の結果から、Nozzle B で臨界近傍のパルスの効果がほとんど無い条件から、パルスの効果が顕著となる圧力範囲で、除去できる粒子として粒子径 $3.25 \mu\text{m}$ を用い、臨界圧力以上のノズル内圧力でパルス周波数をパラメーターとして除去実験を行った。Table 2 に示した本実験では、すべての条件において実質的な噴射時

Table 2 Experimental conditions for investigation on pulse frequency

Surface material		Glass	
Particle diameter	D_p	3.25	(μm)
Nozzle pressure	ΔP	0.18	(MPa)
Frequency of pulse	f	0.04~70	(Hz)
Substantial duration time of jet	t_s	60	(s)

Fig. 8 Saturated removal efficiency as a function of pulse frequency

間は等しい。なお、本実験条件でも、除去終了時に除去率が飽和となっていることを確認した。得られた実験結果を **Fig. 8** に示す。グラフ中の破線はノーマルジェットを用いた場合の飽和除去率を表す。比較的周波数が低い条件では、飽和除去率は周波数の増加と共に単調に増加するが、5Hzを超えるとパルスの効果はなくなり、ノーマルジェットと同じ飽和除去率となる。この周波数による除去率の変化は、除去対象面付近での気流の挙動に起因するものではないかと考え、気流衝突点での壁面圧力を測定した。

壁面圧力は、直径 0.7mm の穴を開けた測定板に、裏側から圧力センサ（株式会社キーエンス、AP-44）を取り付け、そこにジェットを噴射し、測定した。**Fig. 9** に結果の一例を示す。壁面圧力はいずれの周波数でも、立ち上がりで減衰を繰り返すが、周波数が高くなってくると、パルスとパルスの間で圧力が 0 まで完全に減衰しなくなる。このことは、低周波数では独立したジェットの繰り返し噴射であるのに対し、高周波数では圧力変動の大きい連続したジェットとなっていることを表す。そこで、パルスが独立したジェットとして除去対象面に衝突しているかどうかを評価するために、圧力減衰率 D を次のように定義した。

Fig. 9 Wall pressure change with time

$$D = P_{\text{down}} / P_{\text{max}} \quad (4)$$

定義より、パルスとパルスの間で壁面圧力が 0 になる、すなわちパルスが独立であれば圧力減衰率は 1 となる。圧力減衰率を周波数に対してプロットした結果を **Fig. 10** に示す。図を見ると、パルス周波数が 5Hz 付近までは圧力減衰率が 1、すなわち独立したパルスとして除去対象面に到達するが、これを超える領域では、パルスは独立ではなく、連続的なパルスとして除去対象面に衝突していることが分かる。この圧力減衰率が 1 より減少をはじめる周波数が、パルスによる除

Fig. 10 Pressure drop ratio and saturated removal efficiency as a function of pulse frequency

Table 3 Experimental conditions for investigation on duration or interval of jet

with duration of jet			with jet interval		
Duration of jet	0.1~12 (s)		Duration of jet	0.1 (s)	
Jet interval	0.1 (s)		Jet interval	0.1~12 (s)	
Nozzle pressure	0.18 (MPa)		Nozzle pressure	0.18 (MPa)	
Number of pulse	600 (-)		Number of pulse	600 (-)

Fig. 11 Removal efficiency change with number of pulse

去率向上が得られなくなる周波数と一致することから、除去率向上効果を得るためには、ジェットが独立したパルスとして除去対象面に衝突している必要があると考えられる。

2.5 パルス波形の影響

前述したように、ある周波数以上でパルスジェットを用いても飽和除去率の向上が見られなかったのは、パルスが独立でなくなることが原因であることが分かった。そこで次に、パルスが独立である条件下だけに着目し、周波数の増加に伴う飽和除去率の単調増加原因を検討した。

前述 (Fig. 8) の実験では、パルスジェットで気流を噴射している時間の総和を一定としたので、パルス周波数の増加に伴い噴射回数が増加する。よって、飽和除去率の単調増加はパルス噴射回数の増加に関連があると考えられる。しかし、噴射開始からの時間 t と周波数から計算される、時間 t までに噴射されたパルスの回数 n に対して、周波数 5Hz と 1Hz での除去率 $\eta(n)$ をプロットすると (Fig. 11)、同じ噴射回数でも周波数 5Hz の方が除去率は高いことが分かる。

この他、周波数の影響として、パルス 1 回あたりでの気流噴射時間の違いも考えられる。しかし、除去率の経時変化 (Fig. 4) から分かるように、気流噴射時間が長いと除去率は上昇するのに対し、パルス 1 回あ

Fig. 12 Effect of duration or interval of pulsed jet on saturated removal efficiency

たりでの気流噴射時間の短い高周波数の方が同じ噴射回数での除去率は高いため、パルス 1 回あたりでの気流噴射時間では実験結果を説明できない。そこで、周波数が高くなると、パルス波形が変化し、噴射 1 回ごとのジェットでの除去効果が向上していると考えた。

本実験系では、周波数の増減はバルブの開閉時間間隔により制御しているので、周波数の増加はバルブの開 (ジェット噴射) 時間、閉 (休止) 時間の短縮に相当する。そこで、パルス波形の影響を検討するために、ジェット噴射、休止時間、それぞれが除去効果に与える影響を検討した。実験では、本実験系での最適な周波数である 5Hz を基準とし、Table 3 に示したように、ジェット噴射時間、休止時間のどちらか一方を 5Hz の場合と同じ長さである 0.1 秒に固定し、もう一方を 0.1~12 秒まで変化させて除去実験を行った (Fig. 12)。なお、本実験では、パルス噴射回数を、基準とした 5Hz で気流噴射時間の総和が 60 秒となるパルス噴射回数である、600 回で一定とした。実験の結果、休止時間を一定としてジェット噴射時間だけを変化させても飽和除去率は変化しないのに対し、ジェッ

ト噴射時間を一定として休止時間を長くすると飽和除去率は低下し、ノーマルジェットでの飽和除去率に近づくことが分かった。ここで、休止時間の増加はパルス周波数の低下を意味する。よって、周波数の増加に伴い飽和除去率が増加したのは、休止時間が短くなったことが原因と考えられる。

前述のように、周波数がある値以上に大きくなる、すなわち、休止時間が短くなりすぎると、除去対象表面上では連続的なジェットとなり、パルスの効果はなくなる。このことから、パルスジェットでは噴射初期の粒子除去効果が大きいと考えられる。連続ジェットにならない範囲で休止時間が短くなった場合には、休止時間が短いほど除去率が向上するので、パルスジェットの噴射初期の気流に前のジェットが影響するなどのパルスジェット間の相互作用により、気流特性が変化したことが考えられる。しかし、前述の壁面圧力の測定では圧力の立ち上がりに明確な違いは観察されておらず、パルスジェット間の相互作用および除去効果を決定する気流特性は現在のところ不明である。なお、パルスによる除去効果の向上が、前のパルスが粒子をわずかに移動させることで、粒子の付着力が低下し、それが回復する前に次のパルスが衝突することに起因するとの報告もあり¹⁰⁾、パルスジェットによる除

去のメカニズムについては、気流特性だけでなく粒子付着状態も含めて、統括的に検討する必要があると考えられる。

3. 結 言

パルスエアジェットを用いた付着粒子除去について、形状の異なるノズルを用いて噴射時のノズル内圧力やパルス周波数など、代表的な噴射条件が除去率に与える影響について実験的に検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) パルスエアジェットによる飽和除去率の向上は臨界ノズルであり、かつ独立したパルスとして除去対象面に衝突したときにのみ起こる。
 - 2) パルスが独立であれば、ジェットの休止時間が短いほど飽和除去率は高くなる。
 - 3) ジェットの休止時間が短いほど、除去効果は高くなるが、短くなりすぎると除去対象面では独立でなくなるため、パルス周波数には最適値が存在する。
- [謝辞] 本実験は平成17年度粉体工学情報センターの研究助成および日清エンジニアリング株式会社の支援を受けて実施しました。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

D : pressure drop ratio	(-)	$P_{\max}$: maximum of wall pressure	(kPa)
D_p : particle diameter	(μm)	ΔP : nozzle pressure	(MPa)
f : frequency of pulsed jet	(Hz)	$\Delta P_{50\text{normal}}$: nozzle pressure for attaining 50 % removal on normal jet	(MPa)
I : index of removal improvement by pulsed jet	(MPa)	$\Delta P_{50\text{pulse}}$: nozzle pressure for attaining 50 % removal on pulsed jet	(MPa)
k : ratio of specific heat	(-)	ΔP_{normal} : nozzle pressure on normal jet	(MPa)
L_n : thickness of orifice of jet outlet	(mm)	ΔP_{pulse} : nozzle pressure on pulsed jet	(MPa)
N_{ini} : initial number of particles	(-)	t : jet duration time	(s)
$N(t)$: number of particles after t seconds	(-)	$\eta(t)$: instantaneous removal efficiency	(-)
P^* : atmosphere pressure	(MPa)	η_{sat} : saturated removal efficiency	(-)
P_c : critical pressure	(MPa)	θ_n : angle of nozzle tip	(deg)
P_{drop} : drop of wall pressure	(kPa)		

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 Technol.*, **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) Gotoh, K., K. Karube, H. Masuda and Y. Banba : "High Efficiency Removal of Fine Particles Deposited on a Solid Surface", *Advanced powder Technol.*, **7**, 219-232 (1996)
- 4) Viskanta, R. : "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **6**, 111-134 (1993)
- 5) Jambunathan, K., E. Lai, M. A. Moss and B. L. Button : "A review of heat transfer data for single circular jet impingement", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **13**, 106-115 (1992)
- 6) Azevedo, L. F. A., B. W. Webb and M. Queiroz : "Pulsed

- Air Jet Impingement Heat Transfer", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **8**, 206-213 (1994)
- 7) Ziskind, G., L. P. Yarin, S. Peles and C. Gutfinger : "Experimental Investigation of Particle Removal from Surfaces by Pulsed Air Jets", *Aerosol Sci. and Technol.*, **36**, 652-659 (2002)
 - 8) Namiki, N., Y. Otani and H. Emi : "Removal of fine particles from various surfaces by consecutive pulse air jets-Prediction of particle removal efficiency with resuspension parameter", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **24**, 86-92 (1998)
 - 9) Gotoh, K. : "Developments in Surface Contamination and Cleaning Fundamentals and Applied Aspects, Ed. R. Kohli and K. L. Mittal, 17 Cleaning using a High-speed Air Jet", pp.889-918, William Andrew Inc. (2007)
 - 10) Otani, Y., H. Emi and T. Morizane : "Removal of Fine Particles from Wafer Surface by Pulse Air Jet", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **19**, 114-119 (1993)