二次元矩形ノズルからの固気二相噴流とマイクロブラスト加工*

杉本 真樹^{*1}, 社河内 敏彦^{*1}
早川 浩平^{*2}, 伊澤 守康^{*3}Gas-Particle Two-Phase Jet Flow from Slot Nozzle and
Micro-Blasting ProcessMasaki SUGIMOTO, Toshihiko SHAKOUCHI^{*4},
Kohei HAYAKAWA and Moriyasu IZAWA^{*4} Graduate School of Engineering, Mie University,
1577 Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

Recently micro-blasting process has been widely used to process brittle material, and at that time a conventional circular nozzle was commonly used. But, the cutting performance of the circular nozzle does not process a large area well so the use of a slot nozzle is considered. In this study, in order to improve the cutting performance of the micro-blasting nozzle, a new slot nozzle with a large aspect ratio is proposed and the flow characteristics and cutting performance are examined precisely by experimental and numerical analysis. Main results show that (1) setting the circular vane in the slot nozzle perpendicular to the stream can diffuse particle flow uniformly at the nozzle exit and then particle velocity distribution becomes uniform, (2) expanding the nozzle outlet at an angle, uniform air and particle velocity distributions at the nozzle exit can be obtained, (3) in spite of setting obstacles in the nozzle, a fine cutting efficiency is obtained compared to the conventional micro-blasting circular nozzle.

Key Words: Multi-Phase Flow, Jet, Nozzle, Flow Control, Micro-Blasting

1. 緒 論

発展が著しい半導体や電気・電子産業を支える孔加工, 溝加工などの加工技術として, 近年, 高精度, 高効率の微細加工技術が強く求められている。微細加工技術にはウェット・ドライエッチング, レーザ, 放電, 超音波, ドリル加工などさまざまな手法があるが, 数十 μm オーダの微粉粒子を含む固気二相衝突噴流を使ったマイクロブラスト加工 [高速の固気二相噴流を加工材料, 被削材(ワーク)面に衝突させその際, 微粉粒子の衝突によって加工面を微小破壊, 加工する加工法で, 寸法精度は高精度のマスキングによって保障される。以後, micro-blasting process, 簡単のため MBP とも呼ぶ] は, 特に脆性材料に対する微細加工技術として高生産性, 低コストなどのためその使用が増大している⁽¹⁾。

従来, MBP 用ノズルとして円形ノズルが用いられてきたが, ワークを広範囲に加工するためには何回も

のスキヤンを必要とし生産性が劣る。また, 複数本の円形ノズルを配置し生産性を向上させる手段もとられるが, 装置コストの上昇, および装置の複雑化によるメンテナンス性の悪化などが問題となる。

近年, ワークを広範囲に効率よく加工する方法として二次元形状の矩形断面ノズルの使用が考えられている⁽²⁾。しかしながら, ノズル幅の全領域にわたり精度の高い一様な加工深さを得ることは困難であり, 実用的に満足する結果が得られていない。

本研究では, MBP においてワークの大きな面積を高精度に効率よく加工するために幅の広い噴射口を有する二次元形状の矩形断面ノズルを新たに提案し, ノズルからの高速空気噴流の流動特性, 微粉粒子の挙動とワークの加工特性を実験的, 数値解析的に検討した。その結果, ノズル幅の全域にわたり精度の高い加工深さを得るノズルを実現した。

2. 実験装置および方法

2.1 供試ノズル 図1に供試ノズルと座標系を示す。図1(a)には, 一般に使用されているディフューザの形状を参考に設計⁽³⁾した二次元形状の矩形出口断面を有する供試基本ノズルを示す。ある一定の質量比の微粉粒子を含んだ固気二相流が, 直径 32 mm

* 原稿受付 2005年2月21日。

^{*1} 正員, 三重大学大学院工学研究科(〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577)。^{*2} 三重大学大学院工学研究科。^{*3} 新東ブレーター(株)(〒481-8678 愛知県西春日井郡西春日宇福寺福明51)。

E-mail: shako@mach.mie-u.ac.jp

Fig. 1 Details of new rectangular nozzle

の円管から一辺が 32 mm の正方形入口断面を有する供試ノズルへ流入し、幅 (y) 方向へ 100 mm の大きさに広げられる (広がり角度, $\alpha=38^\circ$)。そこからノズル出口まで 60 mm の長さを、幅 100 mm で一定とした。なお、ノズルの高さ (z) 方向はノズル入口からノズル出口上流 10 mm まで直線的に 1 mm まで狭め、そこから 10 mm の長さの平行部を設けた (以後、第 1 ノズルと呼ぶ)。なお、ノズル上流部に、流れおよび粒子の分散を一樣にすることを目的にペーンを設けたものを用意した。ペーンの形状はディフューザで一般に用いられている平板形状 (厚さ 2 mm, 長さ 50 mm) と円柱形状 (直径 5 mm) のものを用いた [図 1(b), (c)]。

また、図 1(d), (e) には、ノズル出口での流れをさらに一樣にすることを目的に考案したノズルを示す。それぞれ、広がり角度を第 1 ノズルと同じ角度 α で一定としノズル出口幅を 140 mm としたノズル (第 2 ノズル)、および途中から広がり角度をさらに大きくしノズル出口幅を 160 mm にしたノズル (第 3 ノズル) である。

図 1(f) に、使用した記号の一部、および座標系を示す。座標系は、ノズル出口中心を原点 o とし、下流方向を x 、幅方向を y 、高さ方向を z とし、 x 方向速度を u 、出口での最大流速を u_o 、中心線上の気体、および粒子速度をそれぞれ u_c , $u_{p,c}$ とする。 p_o , p_∞ はそれぞれ空気供給圧力および周囲圧力である。

Fig. 2 Conventional nozzle

また、加工特性を比較するために、図 2 に示す従来から MBP に広く用いられている円形状の噴出口を有する MBP 用ノズルも用いた。図 2(a), (b) はそれぞれ、吸引方式で粒子を供給するノズルおよび粒子を加圧下で圧送するノズルである。

2.2 実験装置 ブロウおよびコンプレッサによって加圧された空気は、インバータ、バルブを使って流量を調節され、ノズルから静止大気中に噴出される。噴流温度 T_a は、ノズル上流のパイプの管内壁に設置した熱電対によって測定した。また、ノズル内および管内の圧力は、内壁に設置した内径 0.8 mm の静圧孔を使って測定した。

Table 1 Test condition

Item	Data
Particle (abrasive)	JIS-GC#600 (Ave. dia. 25 μ m) Specific gravity : 3170kgm ³
Loading ratio, LR	0.06 ~ 0.38
Impinging distance, H	15mm ($H/h=15$)
Supplied pressure, (p_0-p_∞)	0.025 ~ 0.200MPa
Workpiece transfer speed	3mm/sec
Workpiece material	Soda lime glass (Na ₂ CaO5SiO ₂)

Fig. 3 Computational domain

噴流の速度分布 u の測定は、直径 0.8 mm のピトー総圧管を使って測定した。その際、圧縮性の影響を考慮した。なお、第 2, 3 ノズルでは速度が y 方向成分を有するため、その向きは短いタフト、糸を使って測定した。

マイクロブラスト加工 (MBP) 実験では、まず、被削材としてガラス板を主流方向に対してノズル・平板間距離 $H/h=15$ で垂直に設置した。次いで、ノズル上流で粉体がスクリー式定量供給装置により供給量平均値に対して $\pm 5\%$ 以下の精度である一定量が供給され、ノズル出口でほぼ均一な濃度の固気二相流となって噴出し、被削材に衝突する。その際、ノズルは固定され、被削材が z 方向に一定速度 3 mm/s で移動される。加工深さは MBP で得られた被削材加工部の加工断面を触針式表面粗さ計 (東京精密, SURFCOM 1400 D) で測定して求めた。なお、加工深さ精度 $\xi [\%]$ は加工平坦部長さ l_i にわたる加工深さの平均値 $\bar{d}$ に対する加工深さばらつきの割合を示し式 (1) で求めた。

$$\xi = \pm \left(\frac{d_{\max} - d_{\min}}{2\bar{d}} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $d_{\max}$ および $d_{\min}$ はそれぞれ l_i における最大加工深さ、最小加工深さである。

被削材の除去重量は精密電子天秤 (A & D, GR-200) を用いて、粒子直径はレーザ回折型粒度分布測定器 (堀場, LA-300) を使って測定した。なお、本文中の粒子直径は平均粒子直径を示す。

粒子の挙動、速度の測定には、CCD カメラからの画

像データを PIV 装置 (TSI, 2D PIV System) を用いて処理することから求めた。流れ場の可視化用光源として Nd-Pb YAG レーザ (照射強度: 15 mJ/cm²) を用いた。広角レンズによってシート状に広げられたレーザ光は、時間間隔 3.0 μ s で照射され、流れ場の (200 $\times$ 260 mm) の領域を CCD カメラで撮影し、粒子の速度ベクトルの解析は (1.0 $\times$ 1.0 mm) の格子に区切って行った。なお、解析は各条件で 50 回 (100 フレーム) 行い、各セルのベクトル平均値を実験値として用いた。また、固気二相噴流中の粒子分布を観察するために噴流にレーザを照射し、CCD カメラで粒子画像を撮影した。

2.3 実験条件 表 1 に、供試粒子特性および実験条件を示す。空気単相流の速度分布などの測定実験では、ノズル上流での空気供給ゲージ圧を (p_0-p_∞) = 0.025 MPa ($u_0=200$ m/s) とし、MBP 実験では (p_0-p_∞) = 0.100 MPa ($u_0=360$ m/s) として噴射加工実験を、また加工効率測定実験では (p_0-p_∞) = 0.050 ~ 0.200 MPa と変化させて行った。供試粒子は市販の炭化ケイ素研摩材で、ノズル出口での粒子の速度ベクトルの測定では混合比を $LR=0.06$ = 一定とし、MBP 実験では $LR=0.10$ = 一定、加工効率評価に際しては粒子供給量を 1000 g/min で一定とした ($LR=0.15 \sim 0.38$)。

3. 数値解析

本研究ではノズルの設計に際し、各種パラメータの影響を考慮する際の参考にするため、質量保存則および運動量保存則から構成される連続式とナビエ・ストークス方程式を数値的に解くための汎用流体解析ソフト (Fluid Technology, CFD 2000) を使い、ノズル内およびノズルからの噴流の流動特性を数値的に解析し実験結果と比較・検討した。なお、乱流解析は乱流運動エネルギー k と乱流散逸率 ϵ に対する輸送方程式を解く標準乱流 $k-\epsilon$ モデルとした。

図 3 に、計算領域および座標系を示す。計算領域はノズル中心断面 (二次元, $x-z$ 面, $y=0$) について 500 $\times$ 200 mm の領域を、150 $\times$ 100 の不等間隔格子で分割し、境界条件はノズル入口に (p_0-p_∞) = 0.025 MPa = 一定の圧力流入条件を、ノズル出口境界で大気圧とする圧力流出条件を与えた。

粒子の速度分布の計算は単一球形粒子が粒子間および壁面との衝突なしに流下するとした。なお、粒子と流れとの間の干渉も無視した (one way method)。

4. 実験結果および考察

4・1 第1ノズルの加工性能 図4に、第1ノズルの加工断面形状を示す。加工断面はノズル幅中心 $y/h=0$ を極大とする比較的対称性のよい凹面形状となった。また、図5、6にそれぞれ、第1ノズルの空気自由流の速度分布、および粒子分布と粒子の速度ベクトルを示す。いずれも中心線に対して対称な分布形であったので、 y 方向に半分の領域のみを示した。

空気噴流の速度分布 u/u_0 はノズル幅方向端部でいくぶん速度が大きい鞍形分布となる。また、一点鎖線で示す平坦な速度分布の噴流幅は噴流端部が周囲流体とのせん断力によって減衰するため、下流にいくにしたがい減少する。

粒子濃度はノズル幅中心部 $y/h=0$ で最も大きく、ノズル幅方向端部にいくにしたがって減少し、 $y/h \leq -35$ では粒子を確認できない程度に希薄になる。これは粒子の慣性力が大きいと粒子が y 方向にあまり拡散せず流下することによる。また、粒子の速度は、ノズル中心 $y/h=0$ を最小としてノズル端にいくにしたがって大きくなる凸形状を示し、下流では粒子は中心方向へ向かうことがわかる。なお、中心部では粒子数密度が大きいため、粒子間干渉、衝突により粒子速度が低下すると考えられる。

これらの結果から、ノズル幅 ($\pm y$) 方向への気体速度分布の不均一性や粒子数密度の差異、その差異による粒子間干渉、衝突の差異が原因として生じる粒子速度の差異が、加工精度を支配していると考えられる。したがって、加工精度を向上させるには、 $\pm y$ 方向への粒子濃度分布を均一化および気体速度分布の均一化が肝要である。

4・2 粒子濃度分布の均一化 $\pm y$ 方向へ粒子を分散させ粒子濃度分布を均一化するために、図1(b)、(c)にそれぞれ示した平板および円柱形状ベーンを使用した。なお、各種ベーンの挿入によって単相空気噴流の流動特性(平均、および変動速度分布)にほとんど変化はなかった。

図7(a)、(b)にそれぞれ、平板および円柱形状ベーンを挿入したときの粒子の速度ベクトル、濃度分布を示す。平板形状ベーンの場合、粒子濃度は y 方向へ広がるが、ベーン下流では粒子濃度が希薄になる。また、粒子の速度分布はその粒子濃度の不均一性に伴う粒子間干渉の差異から、粒子が希薄な領域は粒子速度が大きく、粒子が濃厚な領域は粒子速度が小さくなるように粒子濃度分布にならって凹凸(大小)が顕著に生じる。

Fig. 4 Cutting cross section by MBP (1st nozzle)

Fig. 5 Velocity distribution of air free jet (1st nozzle)

Fig. 6 Particle concentration and velocity vector of free jet (1st nozzle)

円柱形状ベーンの場合の粒子濃度は、ノズル両端部の比較的濃度の高い部分を除いて均一な分布形となっている。粒子速度分布も粒子間干渉の均一化にしたがって、平坦性、均一性の高い分布形となる。

図8(a)、(b)にそれぞれ平板および円柱形状ベーンの場合のMBPによる加工断面形状 ($z=0$) を示す。各加工断面形状は粒子濃度分布にならって、粒子が希薄な部分は浅く、粒子が濃厚な部分は深い凹凸形状となるのがわかる。平板形状ベーンの場合、 $-40 \leq y/h \leq 40$ で加工精度は $\xi = \pm 60\%$ となるが、円柱形状ベーンでは $-40 \leq y/h \leq 40$ で $\xi = \pm 7.5\%$ となり、円柱形状ベーンのほうが粒子を拡散、均一化させるのに優れていることがわかる。

次に、各ノズルのMBP加工量と運動動力との関係について述べる。なお、運動動力 W はノズル部の流動損失 ($p_0 - p_\infty$) と流量との積として求めた。

図9にその結果を示すが、円柱形状ベーンが最も大きい加工量を得ることができ、例えば運動動力 $W=5$

Fig. 7 Particle concentration and velocity vector of gas-solid free jet (1st nozzle with plate or circular vane)

Fig. 8 Cutting cross section for each vane (1st nozzle)

Fig. 9 Cutting efficiency for each vane (1st nozzle)

kW の場合に基準となるペーンを有しないノズルに対して平板形状ペーンではその差異はほとんど見られないが、円柱形状ペーンについては約 30% の効率向上が見られる。これは、粒子濃度を拡散、均一化させることによって固気二相噴流内での粒子間干渉が低減さ

Fig. 10 Velocity distribution, u/u_0 (x - y plane, $z=0$)

れ、また加工面へ衝突した後の粒子および加工除去された粒子の加工面からの排出がスムーズに行われることが原因と考えられる。

したがって、粒子濃度を拡散、均一化させると加工精度を向上させるだけでなく、MBP の効率も向上させることができる。

4.3 気体速度分布の均一化と加工性能 ノズル内に円柱を挿入した第 1 ノズルをもとに作成した出口を広げたノズル [図 1(d), (e)] の、速度分布の均一化と MBP 加工特性との関係を検討する。

4.3.1 速度分布, x - y 面 ($z=0$) 図 10 に、各ノズルの場合の空気自由噴流の速度分布 (x - y 面, $z=0$) の実験結果を示す。ノズル出口では、いずれのノズルの場合もノズル幅全体にわたって一様な速度分布をもつが、下流にいくにしたがって各ノズルで差異が見られる。

第 1 ノズルは、先述したように、一般的に矩形噴流の特徴として知られている鞍形の速度分布形状を示すため、速度が均一で平坦な部分は少ない。

第 2 ノズルは、ノズル入口から出口まで一定の角度で広げられているため、速度分布は鞍形を示さず、広い範囲でほぼ一様になる。また、ノズル出口速度に y 方向速度成分をもち、第 1 ノズルに対して速度分布のノズル端部での減衰が緩やかになる。

第 3 ノズルは、第 2 ノズルに比べノズル出口で角度がさらに広げられるため、気体が壁面付着していると考えられる。そのため、ノズル端部近傍で速度が減衰したあと、外縁で再び極大値が現れる。しかしながら、速度分布は高い平坦性を有しその幅は最も大きい。

これらの結果から、実際に衝突噴流として適用するには、ノズル出口近傍 ($0 \leq x/h \leq 15$) では第 2 ノズルを、さらに下流 ($30 \leq x/h$) においては第 3 ノズルを用いると、より広い範囲で一様な速度分布を有する噴流が得られる。

次に、各ノズルの流動特性をさらに詳細に明らかに

 Fig. 11 Velocity distribution, u/u_0 (x - z plane, $y=0$)

 Fig. 12 Velocity distribution, u/u_0 (x - z plane, $y=0$) (3rd nozzle)

するため空気自由噴流の x - z 面 ($y=0$) の速度分布などを示す。

4・3・2 速度分布, x - z 面 ($y=0$) 図 11 に, ノズル中心軸面 (x - z 面, $y=0$) の速度分布を示す。分布形は x 軸に対して対称であったので, z 方向に半分の領域のみを示した。いずれのノズルの場合も速度分布形はほぼ一致し, ノズル出口で矩形形状の速度分布が下流に向かって中心線流速を減衰させながら z 方向に緩やかに広がる。なお, 図 11 中の曲線は数値解析結果であるが, ノズル出口近傍を除いて実験結果とよく一致する。

図 12 に, 一例として第 3 ノズルの速度分布を, 中心線流速 u_c と噴流の半値幅 $\delta_{z0.5}$ で無次元化した結果を示す。 $x/h > 15$ の発達領域での速度分布は噴流外縁部を除きほぼ相似形となる。なお, 図 12 中の実線は二次元自由噴流に対する Tollmien の速度分布理論曲線⁽⁴⁾を示すが, 噴流外縁部を除き発達領域での速度分布をほぼよく表す。

このように, 噴流は $\pm z$ 方向 ($y=0$) へほぼ二次元自由噴流の速度分布をもって流下する。

4・3・3 噴流幅 図 13(a) に, 幅 (y) 方向の噴流幅 δ_y を半値幅 $\delta_{y0.5}$ とともに示す。なお, 噴流幅 δ_y は $u=0.1u_c$ の位置を噴流外端として求めた。

 (a) $\delta_y/w, \delta_{y0.5}/w$, (x - y plane, $z=0$)

 (b) $\delta_z/h, \delta_{z0.5}/h$, (x - z plane, $y=0$)

Fig. 13 Spread of jet

第 1 ノズルでは, その形状のため噴流が y 方向にあまり広がらないが, 第 2, 第 3 ノズルではノズルが出口近傍でも広がっているため δ_y はかなり大きい。

第 2 ノズルでは第 3 ノズルに比べ上流部での広がりが大きい。また, その結果, そこでの運動量の減衰も大きいため下流での広がりが小さくなる。なお, 第 1 ノズルの半値幅は $\delta_{y0.5}/w < 1$ で, 下流にいくほど小さくなる。すなわち, 速度分布の平坦な分布の範囲が他のノズルに比べ小さいのがわかる。

図 13(b) に, 高さ (z) 方向の噴流幅 δ_z を半値幅 $\delta_{z0.5}$ とともに示す。いずれの場合も噴流は下流に向かって直線的に広がり, それらの関係は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 \delta_z/h &= 0.3(x/h) + 1.0 & (x/h \leq 30) \\
 &= 0.4(x/h) - 2.0 & (x/h \geq 30) \dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{z0.5}/h &= 0.16(x/h) + 0.85 & (x/h \leq 30) \\
 &= 0.22(x/h) - 0.58 & (x/h \geq 30) \dots (3)
 \end{aligned}$$

4・3・4 粒子の挙動 図 14 に, 第 2, 第 3 ノズルの場合の粒子濃度分布と粒子速度ベクトルを示す。ノズル内部に円柱形状ベーンが挿入されているため, 両ノズルともに粒子濃度はノズル幅全域にわたってほぼ均一である。図 7(b) に示したように, ノズル端部で粒子濃度の高い領域がノズル端部を広げることによって拡散し均一な粒子濃度分布が達成されたものと考え

Fig. 14 Particle concentration and velocity vector of particle laden free jet

られる。

粒子速度ベクトルの大きさは、第1ノズルの場合と同じように粒子分布の均一化によりほぼ均一な分布を示したが、その方向が第1ノズルが内側への向きをもつのにに対し、第2、第3ノズルではともに外側への向きをもつ。

4・3・5 固気二相自由噴流の流動特性 図15に、第3ノズルの場合の粒子と気体の x 方向速度分布(x - y 面, $z=0$)を示す。気体の速度分布は、固気二相噴流の場合と同一流量での空気単相流の結果である。粒子の y 方向への広がり気体のそれとほぼ同様で、 y 方向に広く均一な速度分布を有している。

図16(a)に、実験および数値計算によって得られたノズル中心軸上の気体と粒子の速度分布 u_c , $u_{p,c}$ を示す。

u_c はノズル出口に向かって等エントロピー的に膨張、急加速され、ノズルから噴出された後は後述するように二次元噴流の速度分布と一致して減衰する。なお、数値解析結果は実験結果をよく表す。一方、粒子は気体と比較して比重が大きいため、 $u_{p,c}$ はノズル直後では気体速度の20%程度しか加速されておらず、その後は相対的に大きな速度を有する気体からの抵抗を受けて加速が継続され、 $x/h=40$ で最大となり、以後気体速度の減衰に従って緩やかに減衰する。なお、図

Fig. 15 Particle velocity distribution of 3rd nozzle

(a) Velocity distribution

(b) Velocity distribution, logarithmic plot

Fig. 16 Centerline air and particle velocity distributions of 3rd nozzle

15中の破線は $u_{p,c}$ の計算結果であるが、ノズル出口で実験値の約2倍となり大きく異なる。これは、先に述べたように計算における種々の仮定、例えば、単一球形状粒子が粒子間および壁面と衝突なしに流下するなどの結果と考えられる。

図16(b)は、図16(a)のノズル出口近傍以降を両対数グラフ上に再プロットした結果である。 u_c/u_0 は下流に向かって、ポテンシャルコア領域($0 \leq x/h \leq 5$)、遷移領域($5 \leq x/h \leq 9$)から発達領域($9 \leq x/h$)へと緩やかに減衰し、発達領域では

Fig. 17 Cutting cross section of 2nd and 3rd nozzles

Fig. 18 MBP efficiency

$$u_c/u_0 \propto (x/h)^{-0.5} \dots \dots \dots (4)$$

となり、二次元自由噴流の結果⁽⁵⁾と一致する。 u_{pc}/u_0 は、ほぼ一定の緩やかな傾きで加速される加速領域 ($0 \leq x/h \leq 30$)、遷移減速領域 ($30 \leq x/h \leq 70$)、および減衰領域 ($x/h \geq 70$) とに分けることができる。減衰領域の減衰率は、気体のそれとほぼ同様である。

計算結果は、実験結果と同様の分布形となり、緩やかに加速して極大値をとり、その後減少する。

4・3・6 加工性能 図 17 に、第 2、第 3 ノズルの場合の加工断面形状を示す。ノズル出口幅が大きくなるとともに図 8(b) に示した両端部の加工過剰形状が低減され、平坦な加工形状を示す。第 3 ノズルでは、 $-70 \leq y/h \leq 70$ の範囲で加工精度 $\xi = \pm 8.9\%$ という高精度な値を示した。粒子分散とそれを要因とする粒子速度の幅方向均一化および気体速度の均一化により、広範囲で高精度な加工が実現した。

4・3・7 加工効率 図 18 に、従来形ノズル(図 2)と本研究で新たに提案した第 3 ノズルの運転動力と加工量との関係を示す。

第 3 ノズルは従来形ノズルと比較し所定の運転動力下で最も加工量が大きく、図 2(b) のノズルと比べ例えば運転動力 $W=10$ kW の場合で約 15% の加工効率向上が見られる。

MBP では被削材に衝突し除去加工を行った後の粒子が排出されることも加工効率向上の重要な一要素である。すなわち、粒子が被削材に衝突した後その排出

が滞る場合には、停滞した粒子の上に粒子が衝突することになり、除去加工は行われにくくなる。従来形の加圧ノズルの流動抵抗は小さいが、粒子群が 1 箇所に集中しその排出が非効率的であるのに対し、第 3 ノズルでは衝突スポットが狭いため、衝突粒子の排出がより容易に行われるものと考えられる。その結果、第 3 ノズルの加工効率がよくなると考えられる。

5. 結 論

本研究では、マイクロプラスト加工でワークの大きな面積を高精度に効率よく加工するために、幅の広い噴射口を有する二次元形状の矩形断面ノズルを新たに提案し、ノズルからの高速空気噴流の流動特性、微粉粒子の挙動とワークの加工特性を実験的、数値解析的に検討した。得られた主な結果を以下に要約する。

(1) ノズル内に円柱形状ベーンを用いると粒子の濃度分布、速度分布が均一となり、MBP において加工精度が向上し、また被削材への衝突後の粒子間干渉の低減、MBP 時の粒子排出が促進され、加工効率が向上する。

(2) 気体噴流の速度分布は第 1 ノズルで鞍形を示し、均一性は得られないが、ノズル角度を広げた第 2、第 3 ノズルでは広い範囲で平坦な分布となる。また、ノズル端部で粒子の拡散が促進され、結果として MBP で $-70 \leq y/h \leq 70$ の範囲で高加工精度 $\pm 8.9\%$ が得られる。

(3) 気体の流れはノズル出口で最大速度を示すが、粒子はその慣性力が大きいのでノズル出口の下流 $y/h=40$ で最大値を示す。また、ノズル出口での粒子速度は気体速度の約 20% にしか加速されない。

(4) 第 3 ノズルの加工効率は、従来形の MBP 加工ノズルと比べ粒子間干渉の低減と MBP 加工時の粒子の排出の促進により向上し、例えば運転動力 $W=10$ kW のとき約 15% 向上する。

本研究に協力いただいた、三重大学学生 岡崎元紀氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 平山正之・伊澤守康・北嶋弘一、マイクロプラスト工法、砥粒加工学会誌, 46-3 (2002), 111-115.
- (2) 濱宗宏・小川信夫、二次元旋回プラストノズルの研削性能、機講演(流体工学部門), (1999), 413-414.
- (3) Blevins, R. D., *Applied fluid dynamics handbook*, (1984), 153-155, Van nostrand reinhold company.
- (4) Tollmien, W., Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgaenge, *Z. Angew. Math. Mech.*, 6 (1926), 468-478.
- (5) Krothapalli, A., Baganoff, D. and Karamcheti, K., On the mixing of a rectangular jet, *J. Fluid Mech.*, 107 (1981), 201-220.