論文・報告

ブラストでの穴加工における 噴射方式が及ぼすアスペクト比への影響

Influence of Aspect Ratio on Jet Types in Hole Processing by Blasting

平塚 陽一郎*	西嶋 仁*	水野 宏紀*
Yoichiro Hiratsuka	Hitoshi Nishijima	Hiroki Mizuno

Microblast is a process of micromachining brittle materials using photolithography and fine polishing in which the flow rate of abrasive is controlled, and is used for drilling of electronic substrates. There are two jet methods used in microblast process: suction type blasting and direct pressure type blasting. In this study, we investigated the influence on the shape processing of the substrate material by the difference of the micro blasting process method. As a result, it was found that the aspect ratio of direct pressure blasting was higher than that of suction blasting, resulting in differences in jet velocity and straightness as measured by the PIV.

KEY WORDS: Abrasive, Micro blast, Suction type blasting, Direct pressure type blasting, Aspect ratio

1. はじめに

昨今、スマートフォンの普及や自動車の電動化 に伴う需要の拡大により電子部品市場の成長は著 しい。その中でもプリント基板やMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)基板への穴加工、 溝加工などといった形状加工が大きな需要として 見込まれる。基板材料に対する形状加工方法とし ては、レーザやマイクロドリル、マイクロブラス ト工法などがある¹⁾。

当社の保有技術であるマイクロブラスト工法 は、数十µmオーダーの研磨材などの微粒子を 含んだ噴流を被加工材に衝突させて加工を行う 加工技術であり、加工は微粒子が衝突した際の 微小な脆性破壊の集積で進行する。非加工部分 にフォトリソグラフィーを用いたマスキング処 理を施すことによって加工部を数十µmオー ダーに規制することができ、噴射するノズルの 走査ならびに研磨材の流量を制御することで、 微細かつ高精度な形状加工を可能にしている。 またマスキング処理を施した面全体に対して形 状加工を行うので、一度に多くのスルーホール・ ザグリなどの形状パターンを同時に加工するこ とが可能である。一方、マイクロドリルやレー ザでは1箇所ずつ加工を施すため、穴や形状パ ターンの数に比例し、加工時間は長くなること から、マイクロブラスト工法は高い生産性を重 要視されるお客様に広く採用されてきた。

しかし、近年ではスマートフォンからウエアラ ブル端末へとモバイル機器の小型化、軽量化が進 展するのに伴い、電子部品などを搭載・実装する 基板への形状加工においては微細化・高精度化へ の要求が高まっている。現状のマイクロブラスト 工法では形状加工の微細化に対応するため、より 粒子径の小さい研磨材で形状加工を行う必要があ るが、加工エネルギが小さくなるため加工速度が 遅くなる、アスペクト比が低くなるなど、他技術 との差別化が困難となる。

そこで今回、マイクロブラスト工法においても 加工の高速化や微細化を可能とした、直圧式ブラ スト技術を検討した。

本報では実際に基板材料へ直圧・吸引の両方式 による形状加工を行い、アスペクト比の違いを噴 射方式とその構造の違いを交えて報告する。

2. 噴射方式の概要

マイクロブラスト工法は噴射方式の違いに よって、『吸引式』と『直圧式』に分類される。 それぞれの噴射方式の概要を説明する。

^{*}サーフェステックカンパニー 開発グループ プロセス開発チーム

2.1 吸引式

吸引式ブラストの概略図をFig.1に示す。吸引 式ブラスト装置の噴射方式はエジェクタ現象を利 用しており、吸引式ブラストノズル内のエア ジェットノズルからノズルチップに向け圧縮エア が噴射され流速が増加した際に、エアジェットノ ズル周辺の空気が吸引されて吸引式ブラストノズ ル内の圧力が低下し負圧となる。研磨材タンク内 の研磨材は、定量供給装置により単位時間あたり 一定量が供給され、ブラストホースを通じて吸引 式ブラストノズル内で発生した負圧により吸引さ れ、ノズルチップ先端から静止大気圧中に噴射さ れる。各構成要素を大気圧下で使用するため、構 造が簡易にできることから広く用いられている。



Fig. 1 Schematic diagram of Suction type blasting.

2.2 直圧式

直圧式ブラストの概略図をFig.2に示す。直圧 式ブラスト装置の噴射方式は直圧タンク内の研磨 材を圧送して直圧式ブラストノズルから噴射す る。直圧弁で密閉された直圧タンク内の研磨材は、 定量供給装置により単位時間あたり一定量が高圧 の圧送エアへ導かれ、ブラストホース内を固気二 相混相流として直圧式ブラストノズルまで移動 し、ノズルチップ先端から静止大気圧中に噴射さ れる。研磨材を高圧エアで直接圧送・噴射してい るので一般的に吸引式と比較し加工能力は高くな るが、直圧タンクからブラストノズルまでの圧力 バランスの制御や、各所の耐圧のためのシール構 造など、機械的に複雑となる。



Fig. 2 Schematic diagram of direct pressure type blasting.

3. 実験方法

両噴射方式における基板への形状加工の違い を確認するため、本報では穴加工の比較を行った。 本項では、実験方法について詳しく述べる。

3.1 吸引式の実験装置

吸引式の実験には新東工業製吸引式マイクロ ブラスト加工装置(型式:MB-1)を使用した。 Fig.3に実験装置の概略を示す。



Fig. 3 Schematic diagram of suction type experimental apparatus.

コンプレッサからレギュレータによって圧力 を調整された高圧エアと定量供給装置から一定量 供給された研磨材は、吸引式ブラストノズル内部 で混合加速され固気二相噴流としてノズルから静 止大気圧中に噴出され、噴流の主流方向に対して 直角に配置された基板に衝突し、それを加工する。 加工テーブルは、基板全面を均一に噴射するため 図の矢印で示すように一定速度、一定ピッチで走 査するようプログラムされている。加工を行った 後の研磨材はサイクロンにより分級され、破砕や 摩耗などで細かくなった研磨材は集塵機へ回収さ れる。今回の実験では研磨材の損耗の影響を省く ため、常に新品の研磨材を用いた。

3.2 直圧式の実験装置

直圧式の実験には新東工業製直圧式マイクロ ブラスト加工装置(型式:ELP-1)を使用した。 Fig.4に直圧式の実験装置の概略を示す。



Fig. 4 Schematic diagram of direct pressure type experimental apparatus.

コンプレッサによって加圧された高圧エアは 研磨材供給エアと研磨材圧送エアに分岐し、それ ぞれレギュレータによって圧力を調整される。研 磨材供給エアは直圧弁にて密閉された研磨材タン クを加圧し、研磨材はタンク下部に位置した定量 供給装置から一定量が供給される。供給された研 磨材は圧送エアにて固気二相混相流としてブラス トホースを介して直圧式ブラストノズルに運ばれ ノズルから高圧の固気二相噴流として静止大気圧 中に噴出され、噴流の主流方向に対して直角に配 置された基板に衝突し、それを加工する。基板全 面に噴射された研磨材が衝突するよう基板が乗っ たテーブルが1軸方向に一定速度で移動し、かつ ノズルがテーブル移動方向と交差する様に一定速 度で往復移動する。研磨材の回収は、前方法と同 様に循環させずに常に新しい研磨材を使用した。

3.3 実験条件

穴加工の比較は吸引式、直圧式各々の装置を用 いTable 1に示す条件で行った。実験条件は各々 の噴射方式において、過去の実験条件を元に適切 な条件を設定した。

Table 1 Test conditions

Micro blasting Condition		Suction type	Direct pressure type	
	Machine Type		MB-1	ELP-1
Machine	Nozzle diameter		Air nozzle : φ4mm Nozzle tip : φ8mm	ϕ 6mm
	Air pressure		0.35MPa	0.25MPa
	Distance from nozzle to substrate		100mm	80mm
	Nozzle angle		90°	90°
	Abrasive flow rate		80g/min	20g/min
	Scanning	Nozzle speed	-	133mm/sec
		Work table speed	50mm/sec	0.33mm/sec
		Work table pitch	5mm	-
		One pass time	25.8sec	231 sec
		Schematic diagram	nozzle	nozzle <o> substrate</o>
Substrate	Material		soda-lime glass	
	size		□ 76mm×t3mm	
Mask	Material		UV curing resin	
	Thickness		88µm	
	pattern		hole $100\mu m$ $100\mu m$ $100\mu m$ $100\mu m$ $100\mu m$ $100\mu m$ $100\mu m$	
			space between holes : 100μ m	
Abrasive	Туре		GC#1200/#600/#400	
	Material		Silicon nitride	
	Shape		angular	
	Median diameter		$\begin{array}{l} {\rm GC\#1200:5\sim27\mu}\\ {\rm GC\#600:13\sim53\mu}\\ {\rm GC\#400:20\sim75\mu} \end{array}$	um Ave.9.9µm um Ave.21.1µm um Ave.30.9µm

各噴射方式自体の比較を行うため、被加工材と なる基板、マスク材、マスクパターンは同一条件 とした。対象材料は厚さ3mmのソーダガラスを 用いた。加工面には全面に厚さ88 µmのマスク が貼り付けられており、マスクには φ 100 µmの 孔が無数に空けられている。研磨材には炭化ケイ 素(GC)を使用した。

ノズルからの噴射が被加工材全面を1回通過 した状態を1パスと定義し、各方式1パス加工す るのにかかる時間を測定した。アスペクト比の推 移を観察するため任意のパス毎にて加工穴径及び 加工穴深さを測定した。測定にはレーザ顕微鏡を 用いて加工穴径、加工穴深さの測定を行い、穴深 さ/穴径=アスペクト比の推移を評価した。

研磨材粒度による違いも確認するため、研磨材 粒度は最も微細な加工が可能な#1200以外に #600、#400の粗めの研磨材2種類を加え3水準 で行った。

4. 実験結果

吸引式及び直圧式のアスペクト比の推移につ いての実験結果を示す。

4.1 加工時間とアスペクト比の関係

GC#1200における加工時間とアスペクト比の 関係をFig.5に示す。加工時間の増加とともに、 両方式ともアスペクト比は高くなる。また、吸引 式よりも直圧式の方がアスペクト比の上昇が速い 結果となり、最終アスペクト比も直圧式の方が高 くなった。



Fig. 5 Correlation between processing times and aspect ratio in GC#1200.

4.2 研磨材粒度とアスペクト比の関係

研磨材粒度を変更した際のアスペクト比の推 移をfig. 6、fig. 7に示す。図からわかるように、 #1200では直圧式の方は吸引式よりアスペクト 比が速く上昇しているのに対し、#600では直圧 式は上昇速度が同等か、やや速く最終アスペクト 比も高くなっている。#400では直圧式、吸引式 ともに上昇速度が同等となった。また最終アスペ クト比も吸引式の方が高い結果となった。



Fig. 6 Correlation between processing times and aspect ratio in GC#600.



Fig. 7 Correlation between processing times and aspect ratio in GC#400.

以上のことから、#1200、#600 程度の研磨材 粒径において直圧式は吸引式と比較しアスペクト 比上昇速度が速く、アスペクト比が高い加工が行 えることがわかる。しかし、直圧式は粒度が粗く なるとアスペクト比上昇速度が低下し吸引式と同 等となり、最終アスペクト比が吸引式よりも低く、 加工効率が悪くなった。

5. 考察

前述の実験結果におけるアスペクト比の推移 の違いについてその原因を検討する。

5.1 加工メカニズムの検討

マイクロブラスト工法は流体力学、材料力学、 材料加工学などの様々な分野が複雑に混在してい るため、その一連のメカニズムを解明することは 困難である。そのため、先行研究では粒子1つあ たりの重量除去量をWiederhornが線形的回帰 データ分析を用いて数式化している²⁾。その加工 モデルに用いられるパラメータとしては、『研磨材 の速度』『研磨材の直径』『研磨材の密度』、『被削 材の強度』『被削材粒子の硬度』に依存するとされ ている³⁾。今回の実験においては『研磨材の速度』 以外は両方式で同じ条件で実験を行っている。

そのため、次項では、研磨材の噴射速度の違い を明確にするため各方式でのノズルから噴射され た研磨材の速度を測定した結果について考察する。

5.2 噴射された研磨材粒子速度の測定方法

噴射された研磨材粒子の速度測定には、粒子画 像流速測定法:Particle Image Velocimetry(以 下、PIV)を用いて行った。

5.2.1 PIVの測定原理

PIVはレーザシートを照射し可視化した流体に 追従する粒子を高速度カメラで撮影し、フレーム 間の微小時間Δtにおける粒子の変位ベクトルΔx を画像処理により求めるものである。Fig. 8 に測 定装置の模式図を示す。



Fig. 8 Schematic diagram of PIV.

今回の測定では、PIVシステムを用いてノズル の先端より噴射される研磨材粒子の速度測定を 行った。ノズルの中心軸線を含む平面に一致する ようにレーザシートを照射することで、ノズルか ら噴射される研磨材粒子の二次元の速度ベクトル を取得する。

5.2.2 実験条件におけるPIV速度測定結果

PIVを用いてそれぞれの噴射方式における #1200での研磨材の粒子速度を測定した。結果 をFig. 9に示す。この画像より吸引式はノズル先 端から拡散する様に噴射され、直圧式は拡散せず 直下に噴射されていることがわかる。また噴射速 度は、吸引式は150m/s程度であるのに対し、直 圧式では250m/s以上もの最高速度が出ているこ とがわかった。



Fig. 9 Difference of injection velocity in GC#1200.

5.2.3 PIV 速度測定結果に対する推測

PIV速度測定の結果から研磨材粒子#1200 では 吸引式に比べ直圧式の方は噴射速度が速く、噴射 は直進性が高いことがわかった。これは噴射方式 とその構造が起因していると推測する。

吸引式はエジェクタ現象を利用し、吸引負圧に より研磨材をノズル内へ誘引する。その際、ブラ ストホース内を通る研磨材はノズルへ引き込ま れ、吸引式ブラストノズル内部からノズルチップ を通る際に加速される。そのためエアジェットノ ズルから出るエアの速度に噴射材粒子が追従しき らない状態でノズルチップから噴射されるため、 噴射速度が遅くなったと考える。またノズルチッ プから出た際の静止大気との空気抵抗により、エ アに追従する形で噴射パターンの拡がりとともに 研磨材粒子も広がってしまうことから、研磨材粒 子の速度ベクトルも直進成分が少なく、斜め方向 のベクトルが多くなったと考える。更に、本構造 では圧縮エアの圧力エネルギが速度エネルギに単 純に変換される訳ではなく、負圧により研磨材を 誘引する際のエネルギにも圧力エネルギが用いら れるため、速度エネルギとしてはロスが生じるこ とも大きな要因だと推測できる。

一方で直圧式は、圧縮エア内で固気二相混相流 として一定の距離をノズルチップまで流れるた め、圧縮エアの流速によって研磨材粒子が終端速 度まで達し、ノズルチップから静止大気中へ放出 された後も圧縮エアの噴流の拡がりに追従するこ となく、加速された研磨材粒子の慣性力が支配的 となり粒子の速度ベクトルは直進成分が殆どと なったと考える。両方式の概略図をFig. 10 に示す。





総じて言えば、噴射加工は研磨材粒子の重量と 速度による運動エネルギによるものであることか ら、研磨材粒子の噴射速度が速く、直進性の高い 直圧式が吸引式と比べ深さ方向への加工能力が高 いことは至極当然の結果であり、4.1項で示した アスペクト比についても、吸引式の方が低いのは 穴径を拡げる方向へ吸引式の研磨材粒子の速度ベ クトルの方向が影響していると考える。

ただし、研磨材粒子の干渉などを加味したマク ロな加工メカニズムについては本報では明らかに できなかったため、今後の課題である。

6. 結言

本報では、ガラスへの穴加工及びアスペクト比 の違いとその原因に注目し実験を行った。その結 果明らかになった直圧式ブラストの特徴を以下に 示す。

- #1200 程度の微粒子ではアスペクト比が高く 速く加工することが可能である。
- (2) #400 程度以下の粗目の粒子径ではアスペク ト比は吸引式がやや高く、加工速度は同等程 度である。
- (3) #1200 での研磨材粒子の噴射速度は吸引式ブ ラストの1.66 倍以上の高速である。
- (4) 研磨材粒子が拡散せず直進する。

7. おわりに

本報ではマイクロブラスト工法における噴射 方式の違いによる基板材料に対するアスペクト比 への影響について、各噴射方式の基本的な構造及 び加工速度の違いに対する研磨材の噴射速度と噴 射パターンに着目し報告した。今後は被加工材の 硬さの違いによる影響はもちろん、加工形状の寸 法や研磨粒子の流量を変えた際の比較、更には加 工バラツキやチッピング・クラックといった品質 面でも比較を行い、より付加価値の高い形状加工 をお客様に提案していく。

参考文献

- 高木清:よくわかるプリント配線板のできる まで-第2版-(2007)88
- Wiederhorn, S.M. and Hockey, B.J. :Effect of material parameters on the erosion resistance of brittle materials, Journal of Materials Science, 18 (1983) 766-780
- 杉本真樹:矩形ノズルからの固気二相噴流の 流動解析とマイクロブラスト加工に関する研 究(2007)20
- 4) 社河内敏彦: 噴流工学 基礎と応用 (2004)3
- 5) 伊澤守康:乾式ブラスト加工による高精度微 細加工に関する実用化研究(2003)
- 6) 杉本真樹, 社河内敏彦, 伊澤守康:マイクロブ ラスト加工における固気二相噴流の挙動と加 工特性(2007)