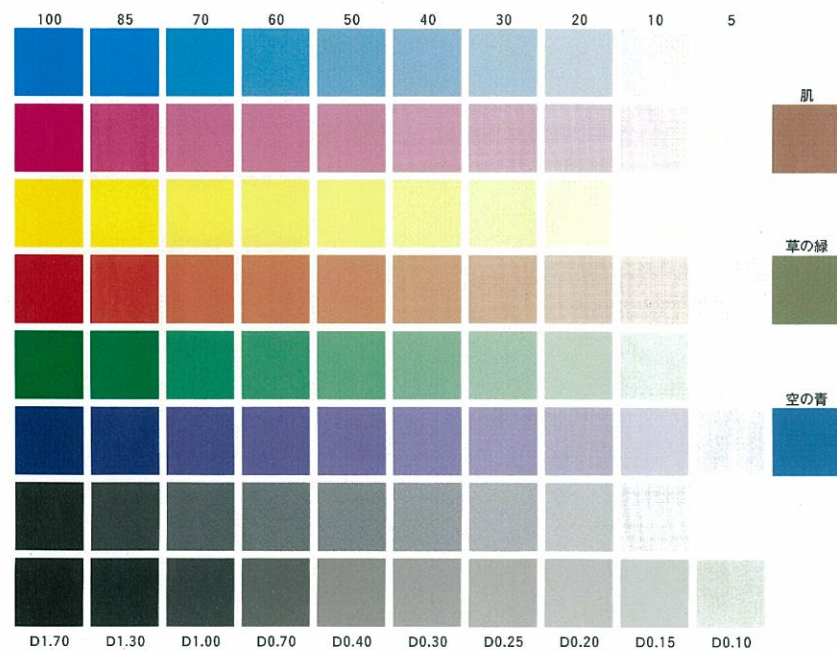


We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



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

平成15年3月

伊澤 守康

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と工業的意義	1
1.2 本研究の構成と概要	5
参考文献	7
第2章 微粉噴射材の損耗特性	8
2.1 緒言	8
2.2 実験方法および実験条件	9
2.2.1 微粉噴射材	9
2.2.2 実験方法	10
2.2.3 実験条件	12
2.3 噴射材の材質が加工特性に及ぼす影響	14
2.3.1 噴射材の平均粒子径への影響	14
2.3.2 加工量への影響	18
2.3.3 工作物の表面粗さへの影響	20
2.4 噴射材の比重が加工特性に及ぼす影響	22
2.4.1 噴射材の平均粒子径への影響	22
2.4.2 加工量への影響	26
2.4.3 工作物の表面粗さへの影響	27
2.5 噴射材の粒子径が加工特性に及ぼす影響	30
2.5.1 噴射材の平均粒子径への影響	30
2.5.2 加工量への影響	34
2.5.3 工作物の表面粗さへの影響	35
2.6 噴射材の噴射量が加工特性に及ぼす影響	39
2.6.1 噴射材の平均粒子径への影響	39
2.6.2 加工量への影響	42
2.6.3 工作物の表面粗さへの影響	44
2.7 工作物の材質が加工特性に及ぼす影響	48
2.7.1 噴射材の平均粒子径への影響	48
2.7.2 加工量への影響	52
2.7.3 工作物の表面粗さへの影響	53
2.8 結言	56
参考文献	57

第3章 微粉噴射材の定量噴射	58
3.1 緒言	58
3.2 噴射材の定量供給装置	58
3.3 振動フィーダー型噴射材定量供給装置	60
3.4 結言	63
参考文献	63
第4章 高精度マスキング技術	64
4.1 緒言	64
4.2 微細加工に使用されるマスキング方法	64
4.3 フォトリソグラフィによるマスキング技術	65
4.4 マスキング材の損耗特性	68
4.4.1 露光量と耐ブラスト性の評価	68
4.4.2 マスキング材の摩耗進行状態の観察	70
4.4.3 マスキング材の耐ブラスト性に与えるベークの 影響調査	71
4.4.4 噴射圧力変化によるマスキング材の耐ブラスト性	74
4.4.5 パターニングの高精細化	76
4.5 結言	78
参考文献	78
第5章 マスクレス微細加工	79
5.1 緒言	79
5.2 実験方法	79
5.3 実験結果および考察	80
5.3.1 間欠噴射が加工能率、加工精度に及ぼす影響	80
5.3.2 ノズルの長さが加工能率に及ぼす影響	85
5.4 結言	90
参考文献	90
第6章 微細加工装置の開発と工業的応用	91
6.1 緒言	91
6.2 微細加工装置の概要	91
6.2.1 MICROBLASTER MB1	91
6.2.2 MICROBLASTER MB2	92
6.3 微粉噴射材の循環システム	94

6.3.1 MB1の循環システム	94
6.3.2 MB2の循環システム	97
6.4 加工特性	
6.4.1 噴射加工における硬脆材料の加工特性	98
6.4.2 マスク加工における加工特性	100
6.4.3 マスクレス加工における加工特性	103
6.5 微細加工の工業的応用	108
6.5.1 半導体用部材への応用	108
6.5.2 電子部品への応用	113
6.5.3 フラットパネルディスプレイへの応用	115
6.6 結言	116
参考文献	117
第7章 総括	118
謝辞	122
本研究に関する学術論文および学術講演会発表	123

第1章 序論

1.1 本研究の背景と工業的意義

近年、マイクロマシンパーツ、半導体センサ等の開発が盛んになり、シリコン、ガラス、セラミックス、金属およびこれらの複合材料などを微細加工する需要が高まってきている。これらの硬脆材料は、高硬度、高脆性、高融点のものが多いため、従来のエッチング加工や電解加工等の電気化学的な加工技術では、加工能率や廃液処理において問題点が多く、レーザー加工、イオンスパッタリング加工、放電加工等の熱的な加工技術においても同様に加工能率、加工精度、加工変質層の発生など不十分な点が多く、さらには設備や設置面積の大型化、イニシャルコストやランニングコストが非常に高いという問題点も山積している。また、超音波加工、研削加工、研磨加工等の機械的な加工技術においても加工能率や加工精度等に対して不満足の場合が多く、またチップングの発生といった問題点も挙げられている。さらに、これら加工技術においては多量の加工液を使用する場合が多く、近年の地球環境問題の観点からその廃液処理が問題となっている。

このような状況下にあつて、加工液を一切使用しないドライな加工であること、生産性が高いこと、加工熱による加工変質層を生じにくいことなどの理由から、近年乾式のブラスト加工法が硬脆材料の微細加工に適用されるようになってきている。例えば、ガラス材の微細加工を行う際に、従来の加工方法では加工熱のために加工部表層にマイクロクラックが残留したり、チップングの発生や疲労強度の低下などを誘起したりすることが重大な問題であった。しかしながら、ブラスト加工法では加工熱の発生が少なく、しかも微細な脆性モード加工の集積として加工が進展するため、チップングやクラックなどの発生が極めて抑制され、このような硬脆材料の加工には好適な方法であると認識されはじめている。

しかしながら、従来のブラスト加工法は一般に鋳物の砂落とし、製鋼、鍛造品などのスケール除去、バリ取り、さびや塗装面の研掃、ショットピーニングなどの比較的ラフな一次的加工として広く利用されており、しかも、それらの作業は粉塵の作業環境中で行われるという3Kの既成概念があるため、生産技術者にとっては敬遠されがちな加工技術であった。しかし、ショットピーニングにおいて、その処理条件と残留応力の評価が徐々に定量化されるに及んで、少しずつ加工技術として見直され始めている。しかしながら、寸法精度を保証する加工技術という観点からは全くとらえられておらず、基礎的な研究もなされぬまま近年のエレクトロニクス部品の微細加工へ応用されているのが現状

である。さらに、微細加工に応用するとなると、従来さほど大きな問題とされなかった加工量の時間的变化が製品の加工品位や加工能率に直接的に影響を及ぼすことになり、すでに実際に数多くの生産現場で利用が始まっているこのブラスト加工法による微細加工は、これらの事象については作業者の経験と勘に頼るところが多く、ブラスト加工の最大の特長である生産性の良さを生かされていただけないだけでなく、加工品の信頼性向上の妨げにもなっている。

乾式ブラスト加工法を微細加工技術として世の中に普及させるためには、微細加工に対する要素技術開発が必要であり、必要とされる要素に対しての基礎的な研究および開発が不可欠となる。国内のみならず世界的に見ても、これらに対する研究報告は極めてまれで、最近、東北大学の厨川がアブレイシブ・ジェット・マシニングに関する研究を報告し¹⁾、ソニーの三島らが微粒子噴射による微細加工につき報告した²⁾。またオランダのトゥエンテ大学の研究者らがマスキング材と加工性能に関する研究を発表³⁾⁴⁾して以後、著者らの報告を除き、ここ2～3年の間に数件の研究報告が成され始めたに過ぎない。

5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13)

本研究では、乾式ブラスト加工を微細加工技術として実用性の高い加工技術として普及させるため、その生命線であり、特に従来の乾式ブラストではあまり考慮されなかった加工精度の因子を取り上げた。微細加工の高精度化に向け、その加工精度に影響を与える要素として、最近の研究でも全く報告の無い、微粉噴射材の加工特性、損耗特性、噴射材の定量噴射技術、マスキング技術を取り上げ、その基礎的な面から研究および開発を進め実用化を促進しようと言うものである。その概要を図1に示した。

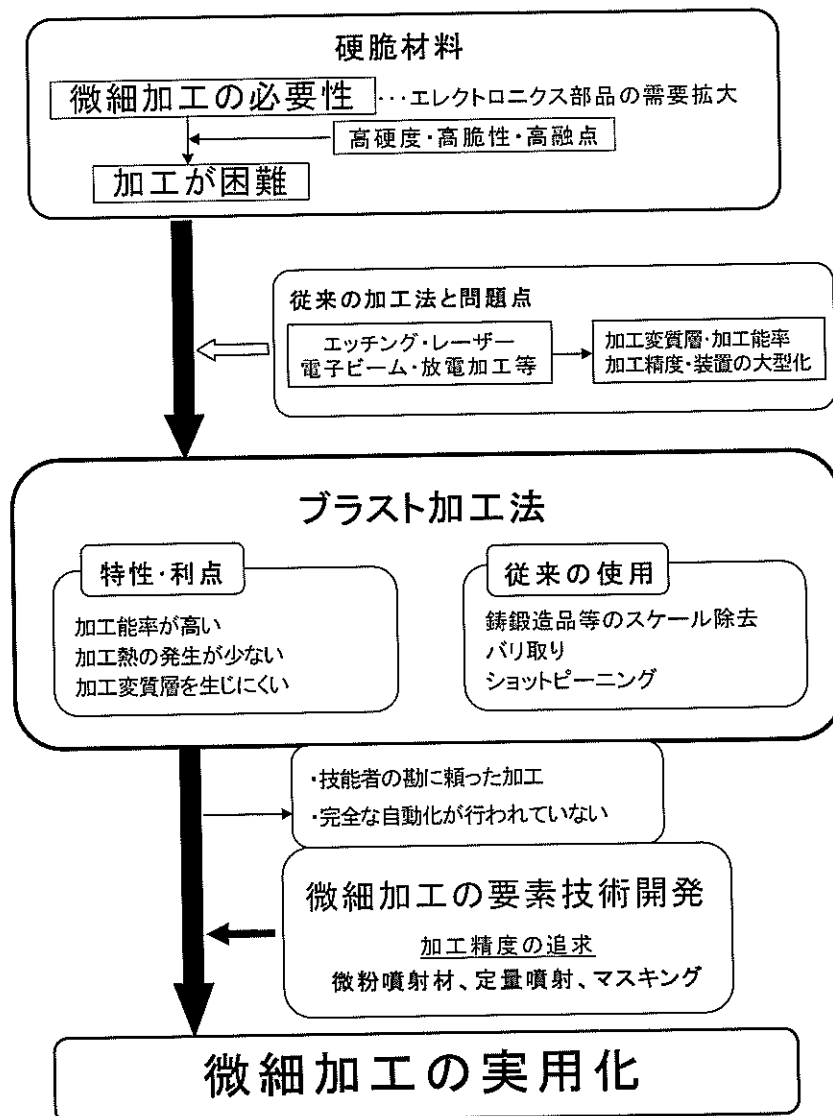


図1 ブラストによる微細加工の流れ

噴射加工は、圧縮空気等のキャリアーガスにより加速された数 μm から数十 μm の微細砥粒をノズルから噴出させ、硬脆材料に高速かつ高密度に衝突させることにより微細加工を行うものである。

例えばガラスの微細加工を行う場合、従来の加工方法では加工熱のため加工部表層にマイクロクラックが残留し、チッピングの発生や強度低下が起り問題となる。しかし噴射加工では、熱発生が少ない微細な脆性モード加工の集積として加工が進展するため、チッピング、クラック等の発生が極めて少なく、このような硬脆材料の加工に適しているといえる。

しかしながら、金属材料のような延性材料の加工では、特にアルミや銅のように軟質材料の塑性変形によるかえりの発生が問題となる場合もあり、金型の仕上げ、微細バリ取り、表面粗し、建材用ステンレス鋼板の模様付け等さほど寸法精度を要求されない用途に適用される場合が多い。

本研究では、噴射加工により微細加工を行うために2つの観点から要素技術¹⁾を分類し、特に加工精度に関する因子につき研究および開発を進め、その成果を微細加工技術および微細加工装置として世に送り出すため、特に基礎的な面から検討および考察を加えてある。その1つは、大きな面積のワークを能率良く、均一に加工することであり、加工精度を確保するために、加工深さをノズルに噴射材を定量的に供給することにより制御し、さらに加工寸法をマスキング技術により解決を図ろうと言うものである。また一方、微小ワークを対象に、局部を集中的に加工する狙いで、一筆書きの要領でマスキング無しの直接加工を指向し、ノズルを $300\mu\text{m}$ と極めて微小にすることにより、噴射パターンの微細化を試みた。表1に関連する要素技術を示す。

これらの研究および要素技術開発を通じて、噴射加工による微細加工技術として目指すところは、加工精度 $10\mu\text{m}$ 程度の生産性の高い加工技術であり、加工精度 $1\mu\text{m}$ 程度の研削、スパッタリング、エッチング加工の領域と $100\mu\text{m}$ 程度の切削、放電加工の領域を補う加工技術である。

ここでは、高精度微細加工の観点から、第2章に微粉噴射材につき、第3章に噴射材の定量噴射につき、第4章にマスキング技術につき、さらに第5章に微小径ノズルによる高精度化の試みであるマスキレス微細加工に述べてある。

これらの研究の成果がIT (Information Technology) 産業に関連する各種硬脆材料の生産性の高い微細加工技術として活用されれば幸いである。

表 1 噴射加工による微細加工の要素技術

狙い	大面積の均一加工	局部の集中加工
加工精度	微粉噴射材	←
	噴射材の定量供給	←
	マスキング	微小径ノズル
加工能率	ノズル	←
	N C 化	←
	噴射材の排出	←
	噴射条件	←
		高噴射圧力
付加要素	噴射材の回収系	←
	分離系	
	循環系	
	洗浄系	
	付着対策	
	環境	←
	加工量のモニタリング	←
	ワーク搬送、位置決め	←
	微粉噴射材	←

1.2 本研究の構成と概要

本研究論文は、6章より構成される。

第1章では、序論として研究の工業的意義と研究の狙いおよび研究の対象にした要素技術につき記述している。

第2章は、本研究の主テーマである噴射材を取り上げ、ガラス、セラミックスなどの硬脆材料に対する加工特性および噴射材の損耗特性につき基礎面からの検討を加えている。ブラスト加工による微細加工における噴射条件を確立するために、噴射材には硬脆材料の加工に対して一般的に使用されるGC砥粒およびWA砥粒を用い、工作物に一般的な硬脆材料であるガラス材およびセラ

ミックスを適用して、各噴射条件が噴射材の破砕プロセスおよび加工量、さらに工作物表面に及ぼす影響を実験的に解明した。

第3章では、微細加工を高精度で行うため、微粉噴射材の噴射量を制御し定量的に噴射するための供給装置の開発につき述べている。

第4章では、高精度加工をするため、加工寸法を規制する因子としてマスキング技術を取り上げ、実用化におけるマスキング材の損耗特性につき検討を加えている。

第5章では、マスキングに頼らず微細加工することを目標に、加工精度を支配する因子としてノズルを取り上げ、微粉噴射材をノズルから定量的に噴射し、一筆書きの要領で加工を行うマスクレス微細加工につき記述している。

第6章では、微細加工するための要素技術を盛り込んだ微細加工装置の開発につき述べ、第2章の研究成果を盛り込んだ実機で使用される場合の噴射材の循環システムにつき記述し実用面での確認をしている。さらに工業的に応用された微細加工の事例を、半導体業界、電子部品業界、フラットパネルディスプレイ業界に適用された事例につきその狙いと効果につき記述している。

最後に、第7章で総括をしている。

参考文献

- 1) 厨川常元: マイクロ・アブレイシブ・ジェット・マシニングによる硬脆材料の微細加工に関する研究, 平成7年度科学研究費補助金研究成果報告書
- 2) 三島彰生, 吉川隆, 土屋隆, 村松成治, 福谷亮人: 微粒子噴射による微細加工(第2報), 1992年度精密工学会春季講演大会論文集, (1992)935
- 3) H. Wensink, J. W. Berenschot, H. V. Jansen, M. C. Elwenspoek: High resolution powder blast micromachining, IEEE 13th International Conference on MEMS
- 4) H. Wensink, J. W. Berenschot, H. V. Jansen, M. C. Elwenspoek: Mask materials for powder blasting, J. Micromech. Microeng., 10(2000)175
- 5) P. J. Slikkerveer, P. C. P. Bouten, F. C. M. de Haas: High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting, Sensors and Actuators, 85(2000)296
- 6) R. Ohta, H. Totani, H. Kawai: Experimental Catheter-type Micromachine for repair in narrow complex areas, The 7th International Micromachine Symposium, (2001)
- 7) P. J. Slikkerveer, M. H. A. van Dongen, F. J. Touwslager: Erosion of elastomeric protective coatings, Wear 236(1999)189
- 8) P. J. Slikkerveer, F. H. in 't Veld: Model for patterned erosion, Wear 233-235(1999)377
- 9) M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki: Effect of workpiece properties on machining of ceramic materials, J. of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 5270(2002)1
- 10) 和久田, 山内, 神崎: アルミナセラミックスのアブレイシブジェット加工における材料除去挙動, 砥粒加工学会誌, 45, 5(2001)239
- 11) 和久田, 山内, 神崎: 窒化けい素セラミックスのアブレイシブジェット加工特性, 精密工学会誌, 67, 10(2001)1703
- 12) M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki: Surface finishing of alumina ceramics by means of abrasive jet machining, J. Am. Ceram. Soc., 85[5]1306(2002)
- 13) M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki: Influence of micromachining on strength degradation of silicon nitride, Proc. Instn. Mech. Engrs, 216PartB(2002)55
- 14) 伊澤: 噴射加工による半導体・電子材料の微細加工技術, 新東技報, 18(1998)29

第2章 微粉噴射材の損耗特性

2. 1 緒言

ブラスト加工法は一般に鋳鍛造品等のスケール除去, バリ取り, さびや塗装面の研掃, ショットピーニング等の比較的ラフな一次的加工として広く利用されており, しかも, それらの作業は粉塵の作業環境中で行われるという3Kの既成概念があるため, 生産技術者にとっては敬遠されがちな加工技術であった。そのような状況から, 高精度加工という観点からは全くとらえられておらず, 基礎的な研究もなされぬまま近年のエレクトロニクス部品の微細加工へ応用されているのが現状である。さらに, 微細加工においてはこれまでの利用法ではさほど大きな問題とされなかった加工量の経時変化が製品の加工品位や加工能率に直接的に影響を及ぼすことになり, すでに実際に数多くの生産現場で利用が始まっているこのブラスト加工法による微細加工は, これら事象については現場作業者の経験に頼るところが多く, 実際には安定した加工品位を維持するため加工終了の少し前で一度加工を中断し, 寸法などを計測し, その後残りの加工を加えるという作業方式を取らざるを得ず, ブラスト加工の特長の一つである生産性の良さを十分に活かしていない。

そのため, ブラスト加工による微細加工に対する基礎的研究を行い, 加工量の経時変化を予測・制御し, 加工量の安定化を図ることが必要となり, さらには安定した加工特性を維持するために噴射条件と微粉噴射材の経時変化の関係を定量化しておくことが必要になる。加工量の減少, すなわち総噴射量の減少の要因は, 噴射材の摩耗・損耗だけでなく, 噴射材の破砕による粒径分布の変化にも起因するものと予測され, これらの要因に対する把握もきわめて重要な事項である。さらに, これら噴射材の摩耗・損耗および破砕の形態はその噴射材ならびに工作物の材質にも依存するものと予測される。

そこで本章では, ブラスト加工による微細加工における噴射条件を確立するために, 噴射材には硬脆材料の加工に対して一般的に使用されるGC砥粒およびWA砥粒を用い, 工作物に一般的な硬脆材料であるガラス材およびセラミックスを適用して, 各噴射条件が噴射材の破砕プロセスおよび加工量, さらに工作物表面に及ぼす影響を実験的に解明した。

2. 2 実験方法および実験条件

2. 2. 1 微粉噴射材

微粉噴射材には硬脆材料の加工に対して広く用いられる、比較的硬度が高く鋭利な切れ刃を持つ GC 砥粒と、GC 砥粒より硬度は劣るが比較的靱性の高い WA 砥粒の 2 種類を使用した。試験に使用した微粉噴射材は、GC 砥粒が信濃電気精錬㈱製、WA 砥粒が三恵アルミナ㈱製を用いた。これらの基礎的な物性値¹⁾を表 2. 1 に示す。一般的には砥粒の物性値はあまり明らかにされていないので、ここでは等価と思われるセラミックスの物性値を示す。

表 2. 1 微粉噴射材の代表的物性値

物性値	WA (7 μ m)	GC (炭化珪素)
比重	3. 9 7	3. 2 1
ヤング率 GPa	3 8 0	4 4 0
ポアソン比	0. 2 3	0. 1 7
破壊靱性値 MPa \cdot m ^{1/2}	5 ~ 6	2 ~ 3
ビッカース硬さ GPa	1 7. 5	2 3. 0

2. 2. 2 実験方法

実験装置には、ブラスト加工機（新東ブレーター㈱製、MYBLAST MY-30C）を使用した。その模式図を図 2. 1、外観写真を図 2. 2 に示す。

図 2. 2 において、外部タンクに投入された噴射材は振動利用の定量供給装置によってその噴射量を制御され、圧縮空気がノズルを通過する際に発生する負圧によって吸引パイプを通してノズル先端部に搬送される。ノズル部の外観写真を図 2. 3 に示す。搬送された噴射材は圧縮空気によってさらに加速され、工作物に衝突してブラスト加工が行われる。工作物に衝突した後に飛散した噴射材および生成された切屑は、集塵機のファンによってブラスト加工機上部に位置するサイクロンに運ばれて分離され、一定値以上の粒子径を有する再利用可能な噴射材のみ内部タンクに集められる。回収された噴射材は、重量を測定した後外部タンクに再投入されてブラスト加工に使用される。本研究では、以上の一連の作業を噴射回数 1 回としている。

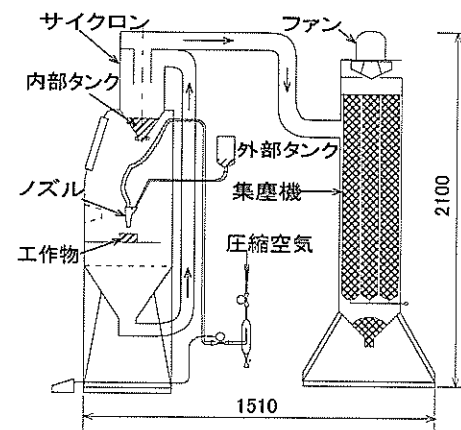


図 2. 1 ブラスト加工機の模式図

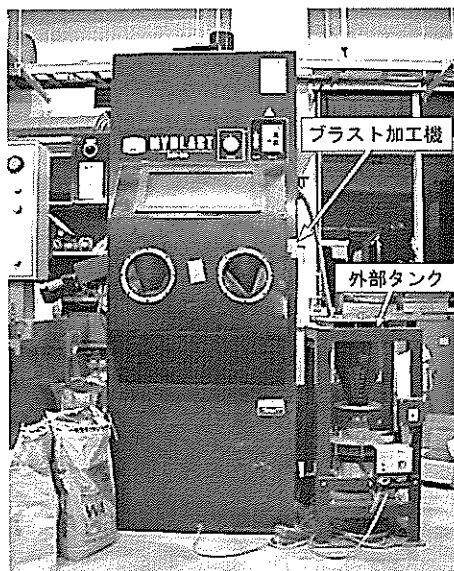


図 2.2 試験に使用したブラスト加工機の外観写真

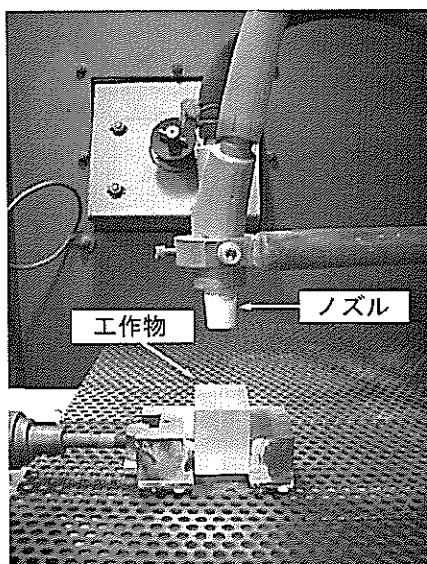


図 2.3 ノズル部の外観写真

2. 2. 3 実験条件

実験条件を表 2. 2 に示す. 工作物には, 一般的なガラス材であるソーダライムガラス ($\text{Na}_2\cdot\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2$) を用いた. 噴射材には, GC 砥粒および WA 砥粒ともに #220 (メジアン径 $67\mu\text{m}$) を基準として用い, GC 砥粒と WA 砥粒の比重差による衝突エネルギーの相違が加工特性に及ぼす影響を明らかにするために, GC#220 (メジアン径 $73\mu\text{m}$), WA#280 (メジアン径 $62\mu\text{m}$) の噴射材も合わせて使用した. その GC 砥粒と WA 砥粒の粒子径と重量の関係を表 2. 3 に示す. また, 噴射材の粒子径および噴射量を変化させ, それらがガラス材の加工特性に及ぼす影響を繰り返し噴射によって実験的に検討した. 噴射量の制御には, 振動によって噴射材を定量供給させる装置を用いた. さらに, 工作物材質が加工特性に及ぼす影響を検討するために, ソーダライムガラスのほかにアルミナセラミックス (Al_2O_3) も使用した.

また, 噴射回数 1 回毎に噴射材の回収率および加工量を噴射前後における噴射材と工作物の重量差を電子天秤で測定することによって算出した. さらに, 噴射回数 10 回毎に加工直後の噴射材のサンプリングを行い, それらの粒子径をレーザ回折式粒度分布測定装置 (堀場製作所製, LA-300) によって測定した. また, その噴射材の破碎状況および工作物の表面状態をマイクロスコブ (キーエンス製, VH-7000) によって確認し, 工作物の表面粗さを表面粗さ測定器 (ミットヨ製, Surf-test 701) によって測定した.

表 2. 2 実験条件

工作物材質	ソーダライムガラス ($\text{Na}_2\cdot\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2$)	
	アルミナセラミックス (99% Al_2O_3)	
工作物寸法	mm	縦 50×横 50×高さ 9, 15
噴射材	GC#220	
	WA#220, #280, #400, #600, #800	
初回噴射重量	kg	1. 00
噴射圧力	MPa	0. 25
噴射角度	deg.	90
噴射距離	mm	50. 0
ノズル径	mm	8. 0
噴射量	g/min	400, 200, 100

表 2. 3 供試砥粒の粒子径と 1 個当りの重量

メッシュ No.	GC(比重=3. 21)		WA(比重=3. 97)	
	メジアン径 (μm)	重量 ($\times 10^{-6}\text{ g}$)	メジアン径 (μm)	重量 ($\times 10^{-6}\text{ g}$)
#220	73	1. 23	67	1. 20
	67	0. 95	—	—
#280	—	—	62	0. 95

注. 1 メジアン径は測定値

注. 2 重量は計算値

2. 3 噴射材の材質が加工特性に及ぼす影響^{2) 7)}

噴射材の材質が加工特性に及ぼす影響を解明するために、工作物に一般的なガラス材であるソーダライムガラス ($\text{Na}_2\cdot\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2$) を用い、噴射材には硬脆材料の加工に対して広く適用される比較的硬度が高く、鋭利な切れ刃を持つ G C 砥粒および G C 砥粒より硬度は劣るが、比較的靱性の高い W A 砥粒の平均粒子径 $67\mu\text{m}$ (#220) を用いて実験的に検討を行った。

2. 3. 1 噴射材の平均粒子径への影響

図 2. 3. 1 は、噴射材の材質が噴射材回収率に及ぼす影響を噴射回数に対して示したものである。ここで、噴射材回収率とは $n-1$ 回目に投入した噴射材の重量と n 回目の噴射後に回収された噴射材重量の割合を表したものである。同図から、G C 砥粒および W A 砥粒ともに噴射材回収率がほぼ同等の 75% 前後まで減少していることがわかる。これは、加工後の噴射材が図 2. 1 に示したようにブラスト加工機上部に位置するサイクロンに運ばれ、一定値以上の粒子径を持つ噴射材が内部タンクに回収され易くなるために、破碎して粒子径の減少した噴射材は回収されずに集塵機に吸引されたことによるものと推察される。そこで、噴射回数による噴射材平均粒子径の推移を測定した結果を図 2. 3. 2 に示す。同図から、G C 砥粒の平均粒子径は W A 砥粒に比べて減少していることが認められる。これは、G C 砥粒の靱性が W A 砥粒と比較して低いことから、工作物に衝突した際にその粒子の破碎が進展し易くなり、結果として粒子径が減少したものと推察される。また、図 2. 3. 2 に示すように粒子径に差異はあるものの、図 2. 3. 1 において噴射材回収率がほぼ同等の値を示したことから、本研究において使用したブラスト加工機のサイクロンでは、少なくとも $40\mu\text{m}$ 以上の平均粒子径を持つ噴射材をほぼ同等に回収できる性能を有していると言える。

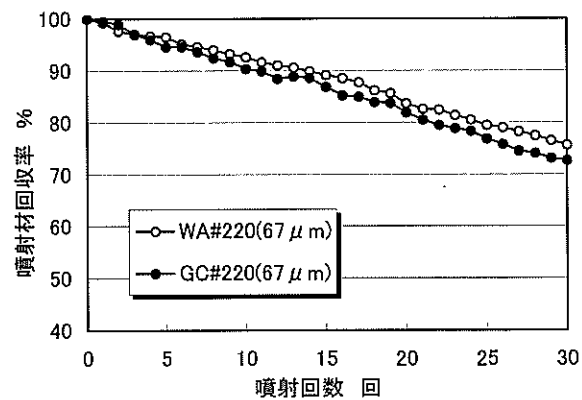


図 2.3.1 噴射材回収率の推移

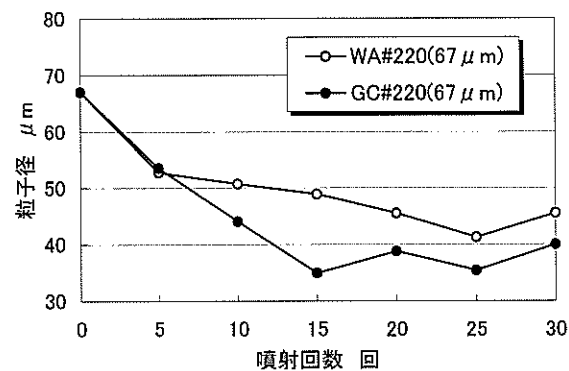
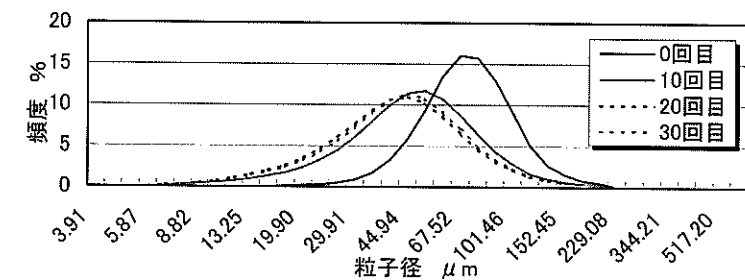
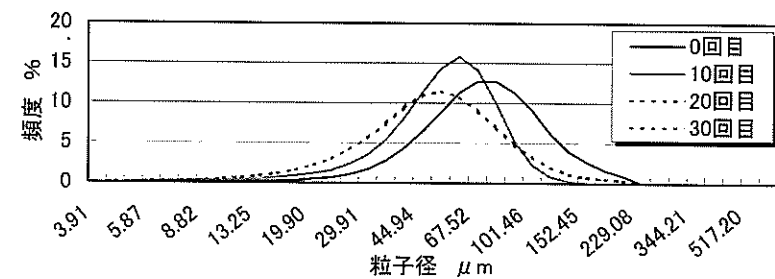


図 2.3.2 噴射材平均粒子径の推移

図 2.3.3 は、各噴射回数 (0, 10, 20, 30 回) における加工直後の 2 種類の噴射材粒子径の分布を示したものである。これらの図からも、GC 砥粒は WA 砥粒と比較して破碎の進展が早期から大きく現れ、その粒子径分布曲線も小径側へ移行していることが顕著に認められる。



(a) GC#220



(b) WA#220

図 2.3.3 噴射材粒子径の分布

噴射後に回収した2種類の噴射材を比較した外観写真を図2.3.4に示す。これらの図からも破碎によってWA砥粒に比べてGC砥粒の粒子径が減少していることが明らかである。

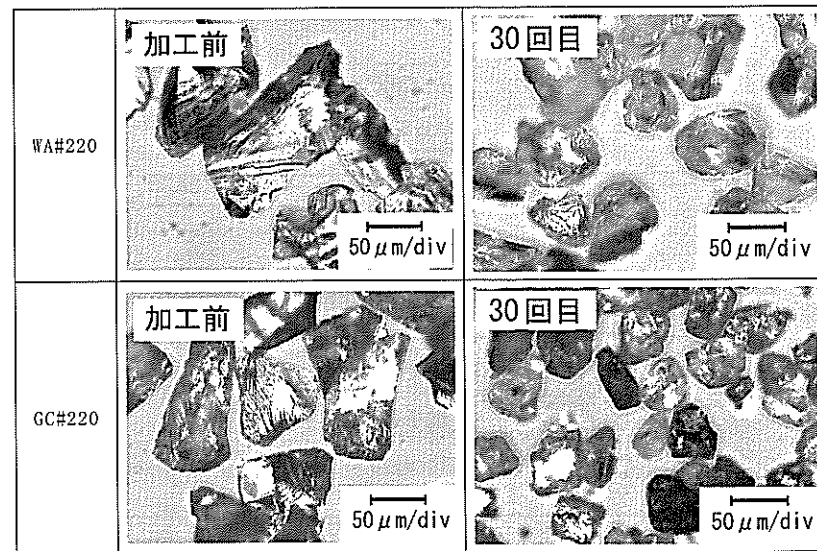


図2.3.4 噴射材の外観写真

2.3.2 加工量への影響

図2.3.5は、噴射回数の変化が加工量に及ぼす影響を噴射材の材質について示したものである。同図より、いずれの噴射材においても噴射回数の増加とともに加工量が減少していることがわかる。これは、図2.3.1に示したように噴射回数が増加すると噴射材回収率が低下し、1回当たりの加工に使用される噴射材重量の減少が一つの因子として挙げられる。そこで、単位噴射材重量当たりの加工量で表すことによって各噴射回数における噴射材重量を一定とし、もうひとつの因子である噴射材の材質による影響を明確にしたものが図2.3.6である。同図において、噴射回数の初期段階においてはGC砥粒の加工量はWA砥粒より大きな値を示していることがわかる。これは、WA砥粒に比較してGC砥粒が鋭利な切れ刃を有し、さらに硬度が高いことから工作物のソーダ石灰ガラスの破碎の進展が大きくなるため、加工量が増大したものと考えられる。しかしながら、噴射回数の増加とともにGC砥粒の加工量がWA砥粒よりも下回って逆転していることがわかる。これは、GC砥粒がWA砥粒より靱性に劣るために工作物に衝突した際に破碎し易くなり、図2.3.2にも示したように平均粒子径が減少することにより噴射材の衝突による加工エネルギーが減少したことによるものと推察される。以上のことより、加工量は噴射回数を重ねると噴射材の破碎によって粒子径が減少し、工作物に作用する衝突エネルギーが小さくなるために減少するものと考えられる。したがって、破碎を起し易いGC砥粒では加工量の減少割合が大きくなり、破碎を起しにくいWA砥粒を用いた加工では噴射回数が増加しても比較的安定した加工量を維持できることが明らかとなった。

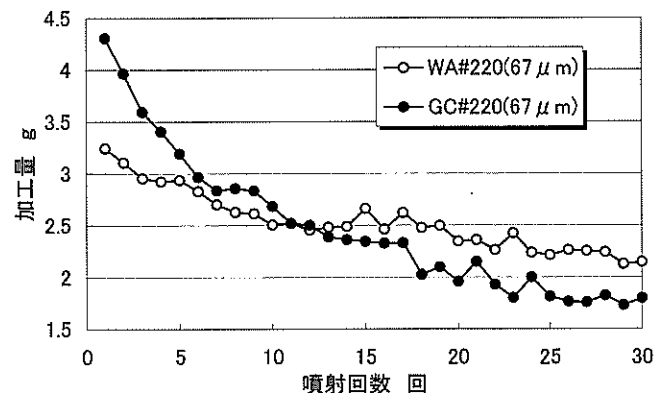


図 2.3.5 加工量の推移

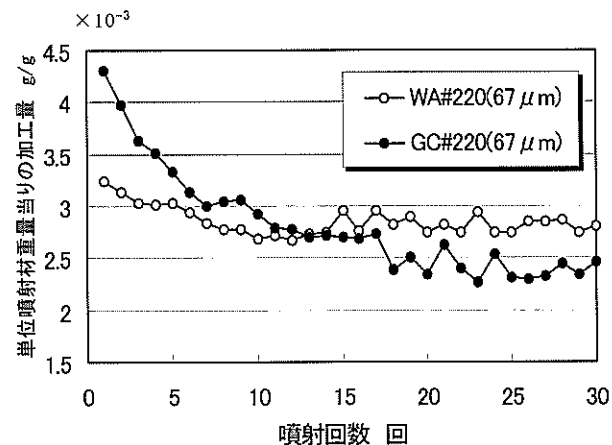


図 2.3.6 単位噴射材重量当りの加工量の推移

2.3.3 工作物の表面粗さへの影響

図 2.3.7 は噴射回数 10 までのデータを示したものである。同図より、図 2.3.2 において示したように GC 砥粒の平均粒子径が WA 砥粒と比較して小さいにもかかわらず、GC 砥粒の加工後の表面粗さが增大していることがわかる。これは、硬脆材料に対するブラスト加工が微細な脆性モード加工の集積であるために、GC 砥粒の硬さが高く、鋭利な切れ刃を持つという特性が工作物であるソーダライムガラスにクラックを発生させやすくなり、加工面の表面粗さを増大させたものと考えられる。

図 2.3.8 は加工面の断面写真および表面プロフィールを 2 種類の噴射材について比較したものである。同図においても、GC 砥粒の特性による影響が明確に現れており、加工表面の凹凸が非常に大きいことがわかる。以上のことより、加工面の表面粗さに対して、噴射材の材質が異なる場合、その平均粒子径だけでなく、その硬さや形状が大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

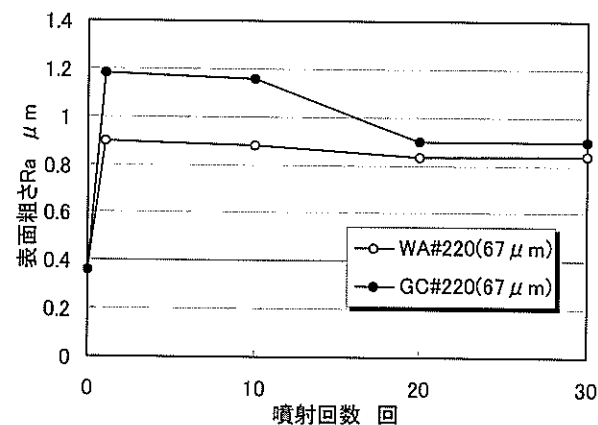


図 2.3.7 表面粗さの推移

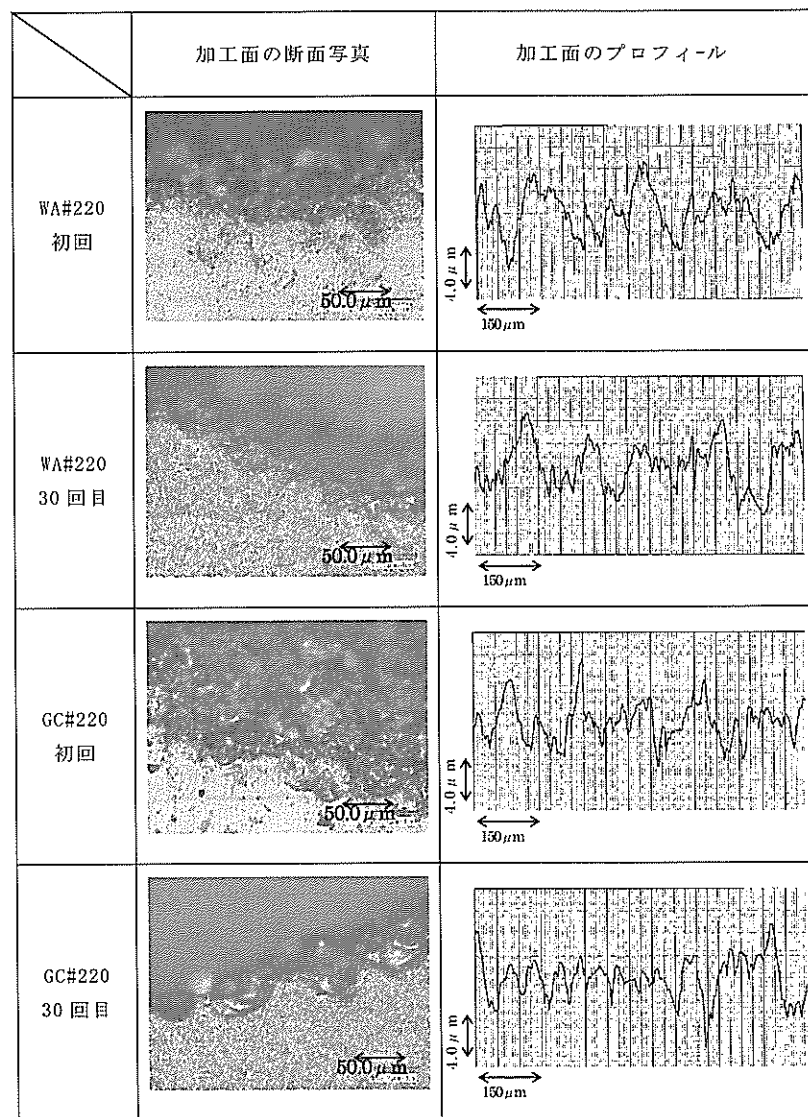


図 2.3.8 加工面の断面写真および表面プロフィール

2. 4 噴射材の比重が加工特性に及ぼす影響

前節において使用した 2 種類の噴射材は比重が異なるため、噴射材 1 粒子当りの重量に換算すると WA 砥粒の方が大きくなる。そのため、WA 砥粒の衝突エネルギーは GC 砥粒と比較して大きくなり、噴射材の材質が加工特性に及ぼす影響を明確には示していないと言える。そこで本節では、噴射材の粒子径を変えることによって、噴射材 1 粒子当りの重量をほぼ同等にし、噴射材の比重が直接加工特性に及ぼす影響を検討した。

2. 4. 1 噴射材の平均粒子径への影響

図 2.4.1 は、噴射材の比重が噴射回数の変化によって噴射材回収率に及ぼす影響を示したものである。同図より、WA 砥粒および GC 砥粒のいずれの粒子径においても、その比重による差異はほとんど認められない。

そこで、各噴射材に対して噴射回数 5 回毎に加工後の噴射材のサンプリングを行い、それらの粒子径を測定した。図 2.4.2 にそれらの平均粒子径の噴射回数による推移を示す。同図から、GC 砥粒については粒径の大きい、すなわち衝突エネルギーの大きい #220 (73 μm) が破碎を生じやすくなることより、噴射回数初期の段階において #220 (67 μm) とほぼ同等の粒子径になっていることが明らかである。また、WA 砥粒については、GC 砥粒に比べて韧性が高いため破碎の進展が遅く、ゆるやかに粒子径が減少していることがわかる。

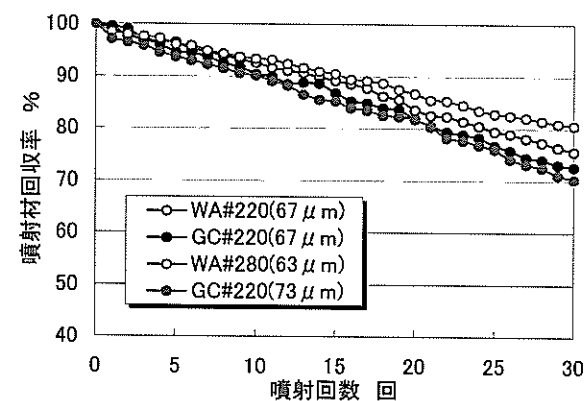


図 2.4.1 噴射材回収率の推移

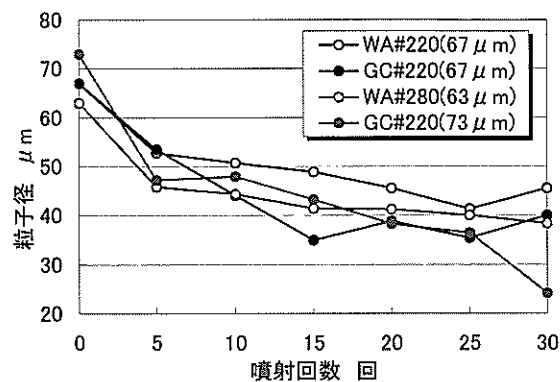
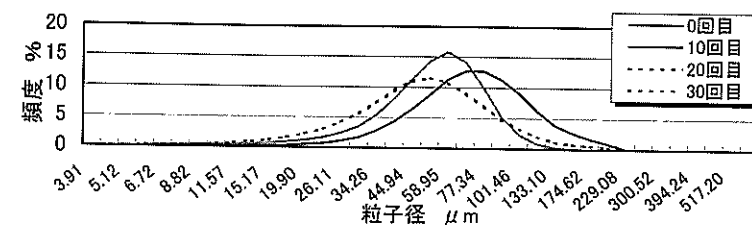
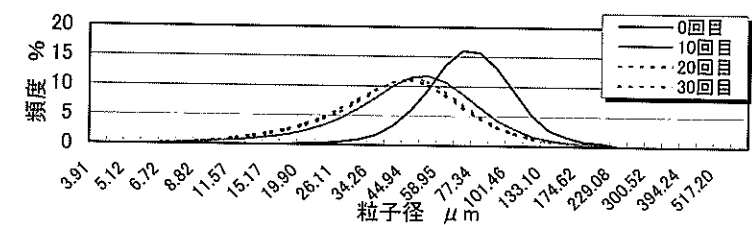


図 2.4.2 噴射材平均粒子径の推移

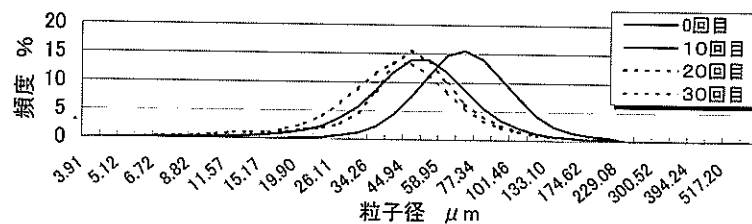
図 2.4.3 は、各噴射回数 (0, 10, 20, 30 回) における加工直後のそれぞれの噴射材平均粒子径の分布を、図 2.4.4 は加工前および 30 回加工後の噴射材の外観写真を示したものである。これらの図からも、GC 砥粒と WA 砥粒の比重による影響はほとんど認められない。



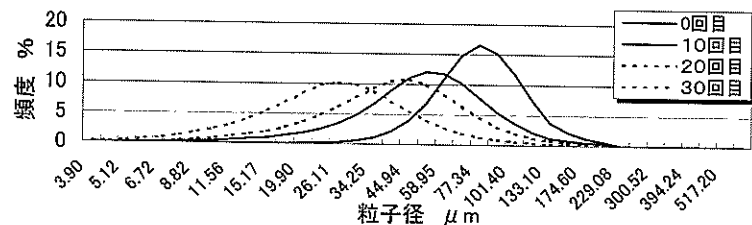
(a) WA#220 (67 μm)



(b) GC#220 (67 μm)



(c) WA#280 (63 μm)



(d) GC#220 (73 μm)

図 2.4.3 噴射材粒子径の分布

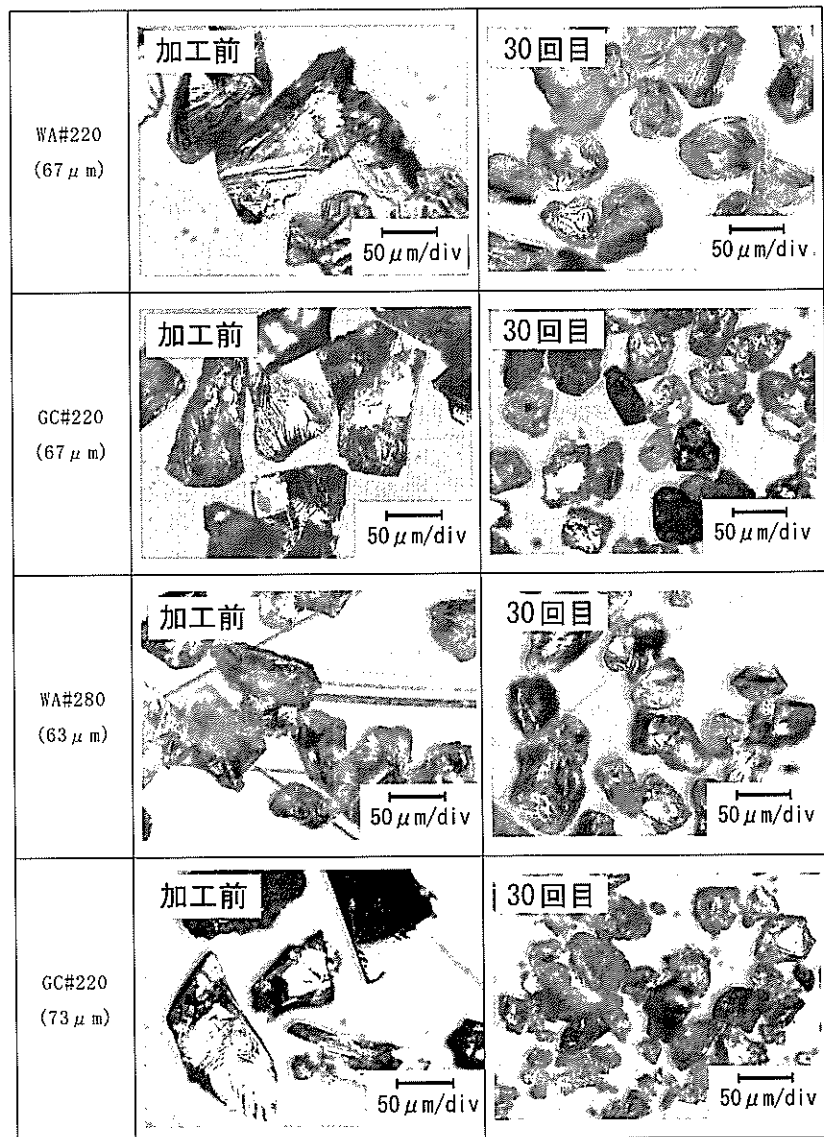


図 2.4.4 噴射材の外観写真

2.4.2 加工量への影響

図 2.4.5 は、噴射材の比重が加工量に及ぼす影響を噴射回数の推移に対して示したものである。同図からも、GC 砥粒とWA 砥粒の比重による影響はほとんど明確に現われておらず、いずれもその粒子径に依存していることが明らかである。

このことは、図 2.4.6 に示す単位噴射材重量当りの加工量の推移においても同様である。したがって、加工量に影響を及ぼす要因は、噴射材の比重による相違ではなく、噴射材の材質によってその硬さや形状が異なること、さらには破碎性が異なることによる噴射材平均粒子径の変化にあると言える。

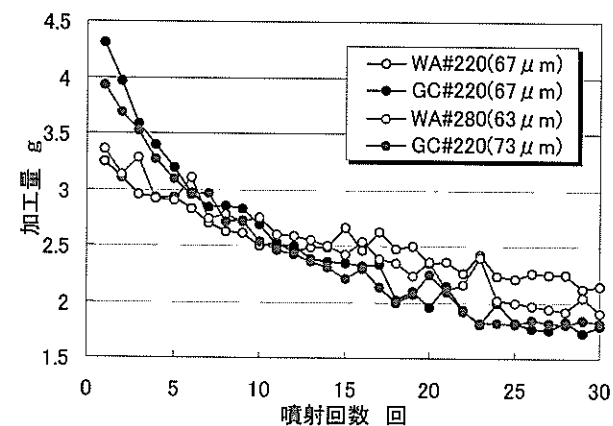


図 2.4.5 加工量の推移

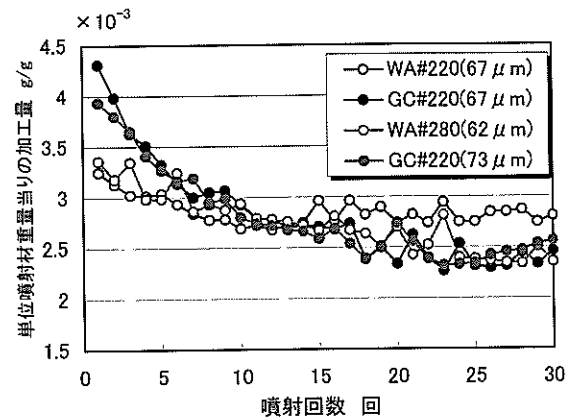


図 2.4.6 単位噴射材重量当りの加工量の推移

2.4.3 工作物の表面粗さへの影響

図 2.4.7 は、噴射回数によって噴射材の比重が加工面の表面粗さに及ぼす影響を、図 2.4.8 は加工面の断面写真および表面プロフィールをそれぞれ示したものである。

両図において、GC 砥粒と WA 砥粒の比重の差異による影響はほとんど現われておらず、それぞれの硬度や形状が大きく影響を及ぼすことがわかる。

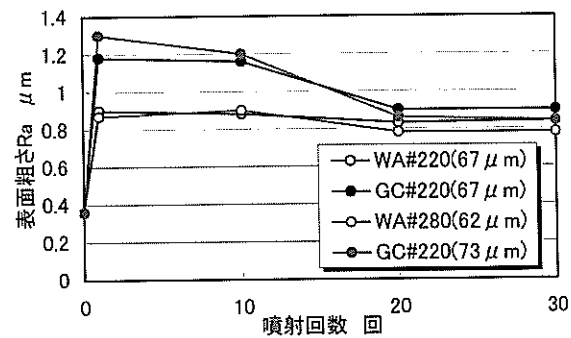


図 2.4.7 表面粗さの推移

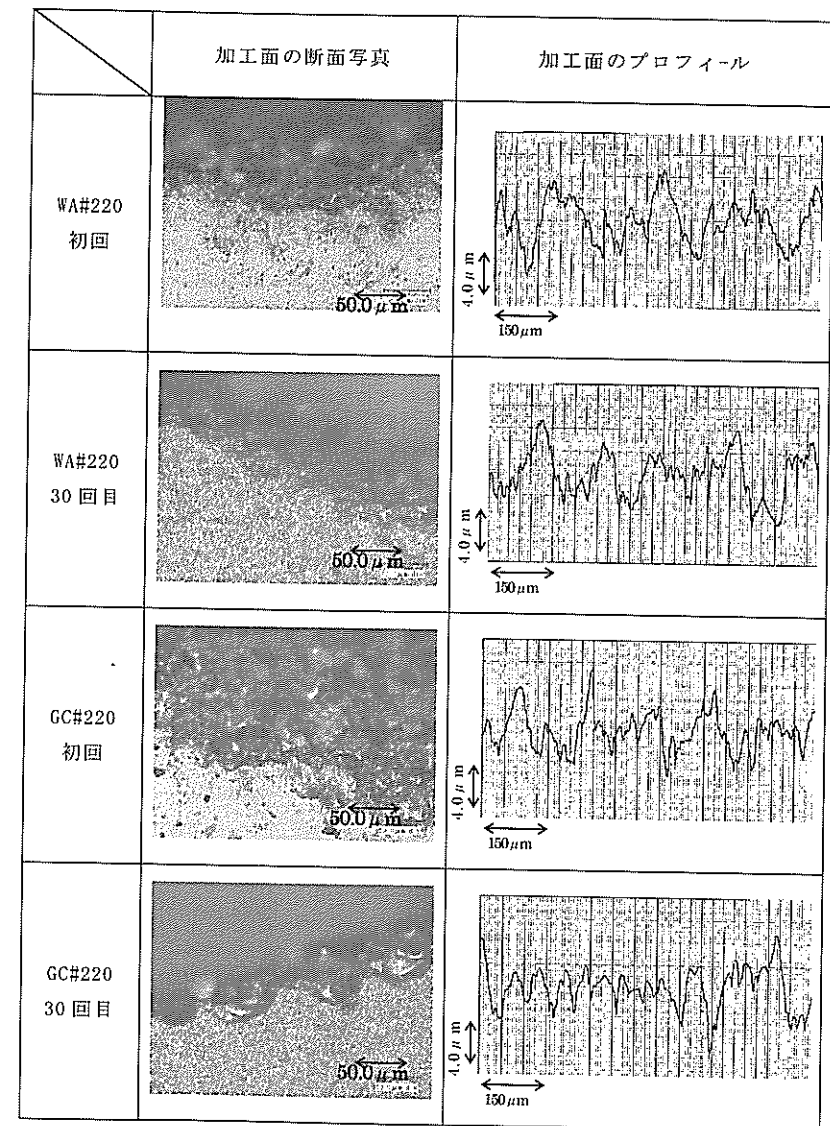


図 2.4.8-1 加工面の断面写真および表面プロフィール

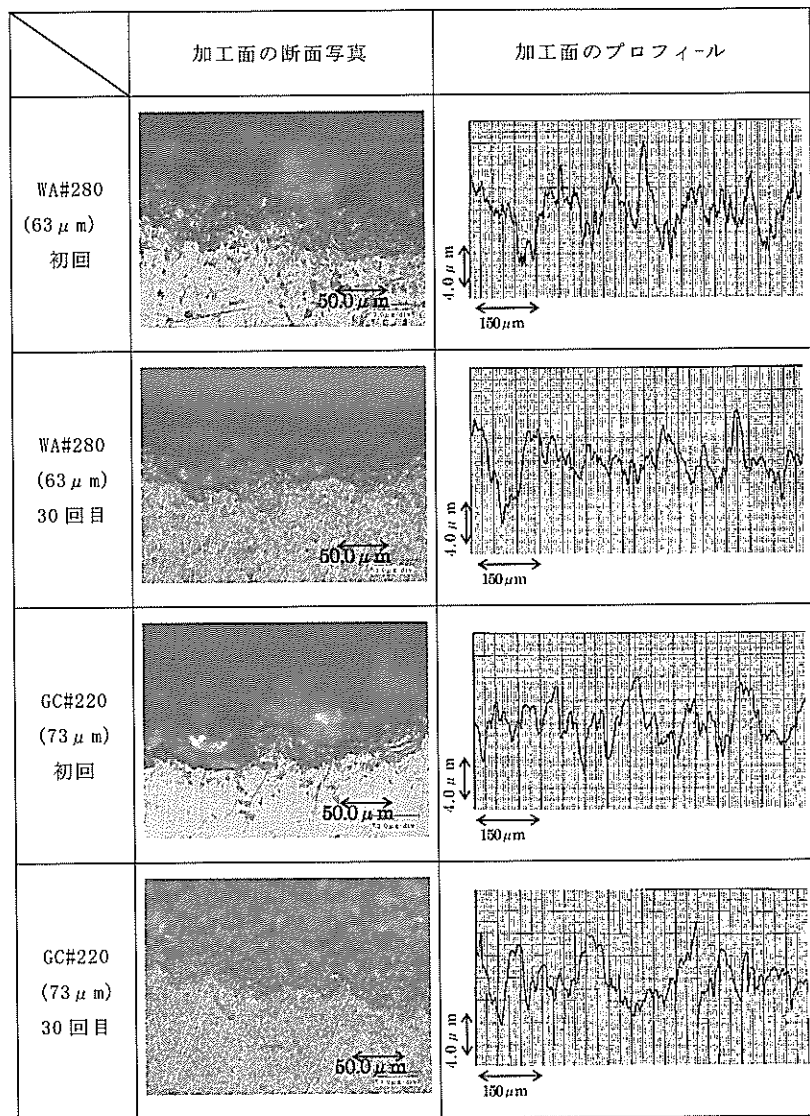


図 2.4.8-2 加工面の断面写真および表面プロフィール

2. 5 噴射材の粒子径が加工特性に及ぼす影響^{4) 5) 6)}

2. 3 節および 2. 4 節において、ガラス材に対して繰返し噴射する場合、加工量に急激な変化の現れる GC 砥粒を噴射材に使用するより、WA 砥粒を使用する方が安定した加工を行うことができることが明らかになった。そこで、本節では噴射材に WA 砥粒を採用し、その粒子径が加工特性に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 5. 1 噴射材平均粒子径への影響

図 2. 5. 1 は、噴射材の粒子径が噴射材回収率に及ぼす影響を噴射回数の変化に対して示したものである。同図より、いずれの噴射材の粒子径においても噴射回数の増加に伴って噴射材回収率が低下していることがわかる。これは、いずれの噴射材も工作物に衝突した際に破碎が進展し、それらの粒子径が減少して噴射材回収率が低下したことによるものである。

そこで、WA 砥粒の各粒子径の噴射材に対して噴射回数 5 回毎に加工後の噴射材のサンプリングを行い、それらの粒子径を測定した。図 2. 5. 2 に噴射回数による噴射材平均粒子径の推移を示す。これより、粒子径の大きい噴射材ほどその粒子径の減少割合が大きく、破碎が進行し易くなっていることがわかる。これは、粒子径が大きいために衝突エネルギーが大きくなり、その結果として破碎が進展したものと推察される。しかしながら、図 2. 5. 1 においては破碎の進展しにくい粒子径の小さい噴射材ほど、その回収率が低くなる現象を示しているが、これは前述したようにサイクロンの特性上から一定値以上の粒子径を持たない噴射材は内部タンクに回収されにくくなることに起因し、図 2. 5. 1 および図 2. 5. 2 からそのしきい値は 20 μ m あたりにあると言える。

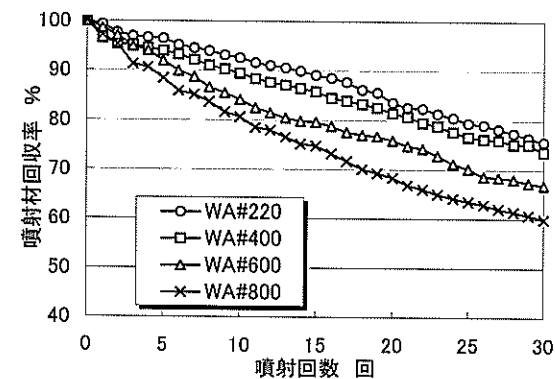


図 2. 5. 1 噴射材回収率の推移

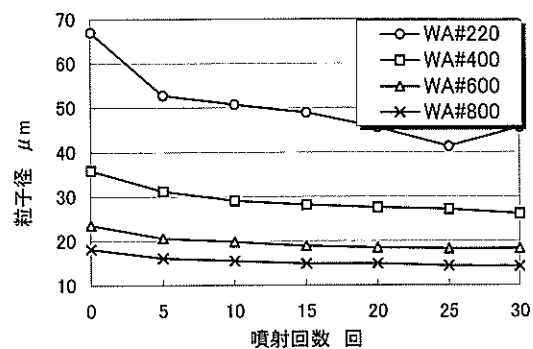
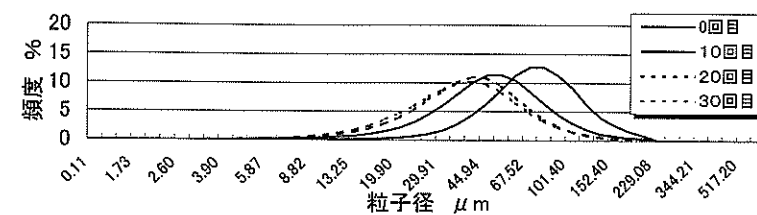


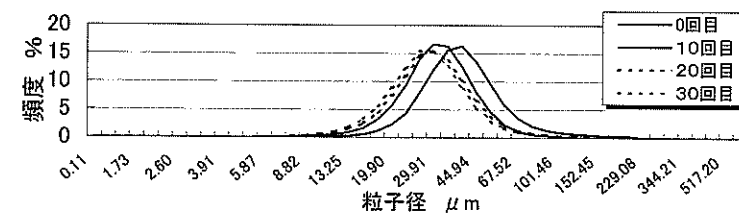
図 2.5.2 噴射材平均粒子径の推移

図 2.5.3 は、噴射回数 0, 10, 20, 30 回における噴射材の粒子径分布の変化をそれぞれ示したものである。この図からも、粒子径の大きい、すなわち衝突エネルギーの大きい噴射材ほど破碎が進展していることが明らかである。

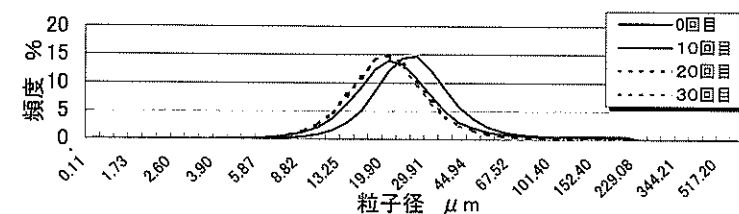
噴射後に回収した噴射材の外観写真を図 2.5.4 に示す。同図より、粒子径の大きい噴射材ほど破碎が進展し、粒子径の減少割合が大きくなっていることが確認できる。



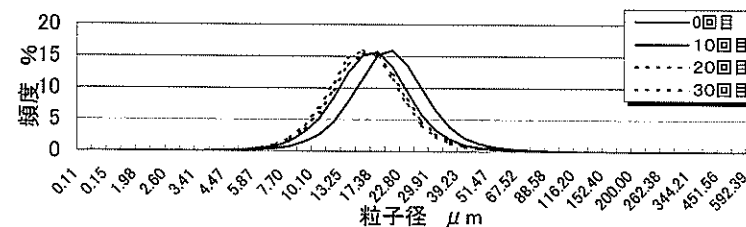
(a) WA#220



(b) WA#400



(c) WA#600



(d) WA#800

図 2.5.3 噴射材粒子径の分布

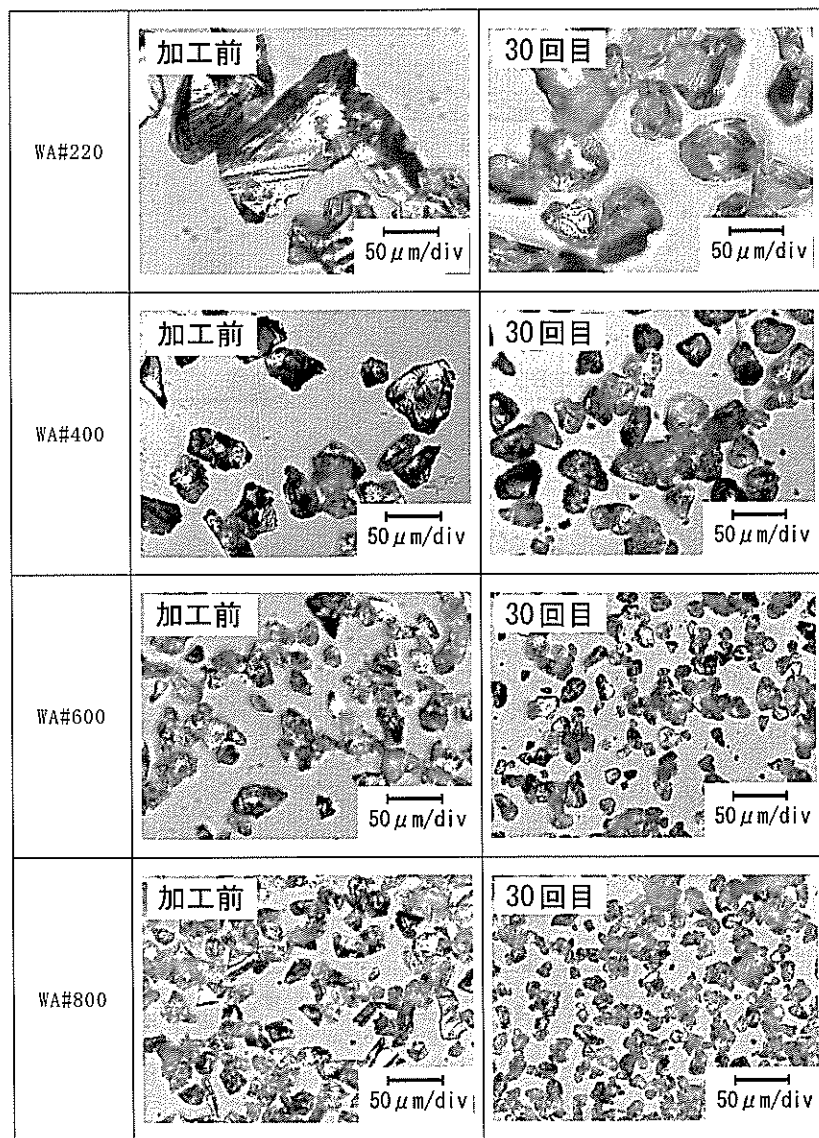


図 2.5.4 噴射材の外観写真

2.5.2 加工量への影響

図 2.5.5 は、噴射回数の変化が加工量に及ぼす影響を噴射材の粒子径について示したものである。同図より、いずれの噴射材においても噴射回数の増加とともに加工量が減少していることがわかる。これは、図 2.5.1 に示したように、それぞれの噴射材によって噴射回数が増加すると噴射材回収率が異なるため、噴射回数 1 回当りに噴射加工に使用される噴射材重量が異なることによるものと考えられる。

そこで、単位噴射材重量当りの加工量で表すことにより噴射材の粒子径の影響を明確にしたものが図 2.5.6 である。同図において、WA#220 の噴射材の加工量が最も大きく、WA#800 の噴射材の加工量が最も小さい値を示している。このことから、粒子径の大きい、すなわち衝突エネルギーの大きい噴射材ほど加工量が大きくなることが明白である。しかし、その反面破碎の進展が早く、加工量の減少割合も大きくなることがわかる。また、WA#800 の噴射材は粒子径が小さいために衝突エネルギーが小さく、加工量も小さくなる。しかし、噴射材の破碎の進展が遅いために、粒子径の変化が少なく、衝突エネルギーの変化もほとんどなく、安定した加工量が得られたものと思われる。したがって、加工量は、噴射材の破碎によって粒子径が小さくなることで工作物に作用する衝突エネルギーも小さくなり、その結果として減少するといえる。

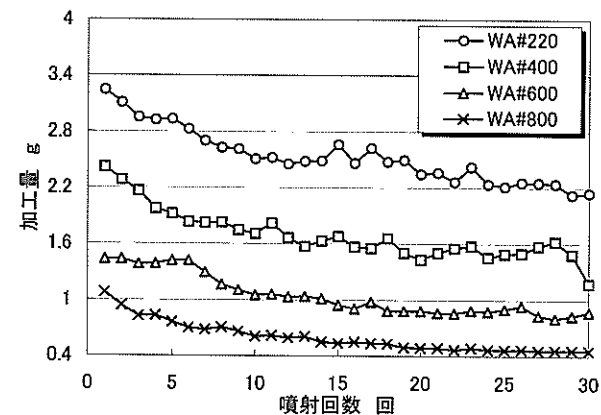


図 2.5.5 加工量の推移

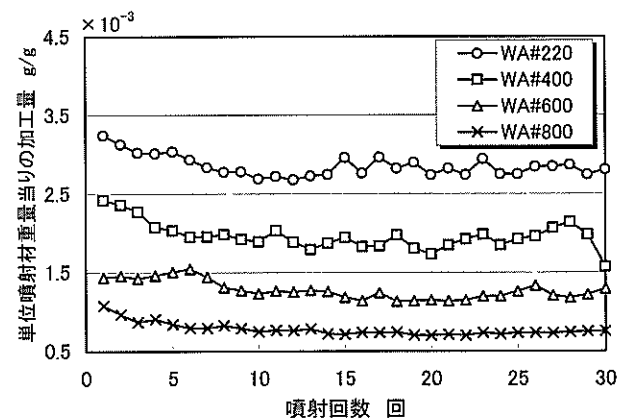


図 2.5.6 単位噴射材重量当りの加工量の推移

2.5.3 工作物表面粗さへの影響

図 2.5.7 は、噴射回数の変化によって噴射材の粒子径が加工表面の粗さに及ぼす影響を示したものである。同図より、平均粒子径の大きいものほど加工後の表面粗さが大きいことがわかる。これは、粒子径の大きい、すなわち衝突エネルギーの大きい噴射材ほど工作物に大きなクラックを発生させやすいことによるものと考えられる。図 2.5.8 に加工面の断面写真および表面プロフィールを示す。同図からも、噴射材の粒子径の影響が明確に現れており、噴射材の粒子径が大きいほど加工表面の凹凸が大きくなっていることがわかる。以上のことより、噴射材の材質が同一である場合、加工面の表面粗さはその粒子径の影響を直接受けることが明らかである。

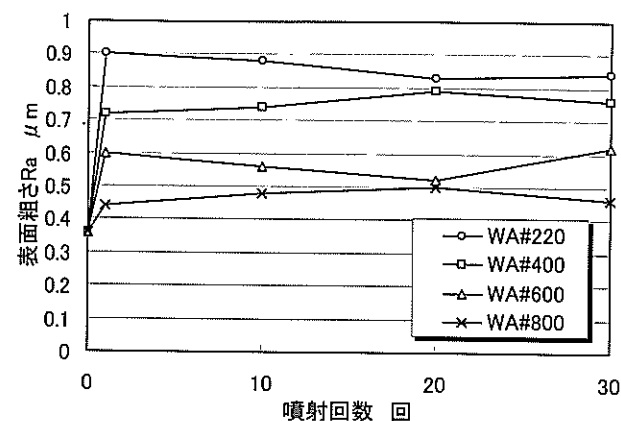


図 2.5.7 表面粗さの推移

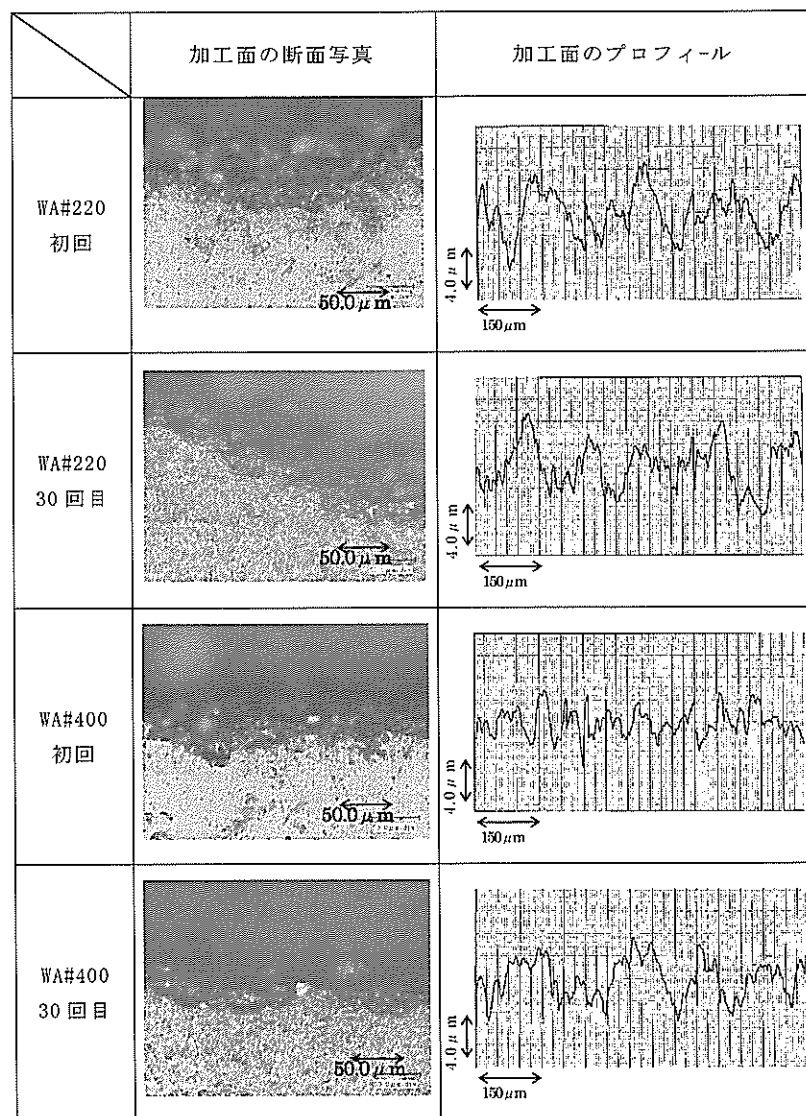


図 2.5.8-1 加工面の断面写真および表面プロフィール

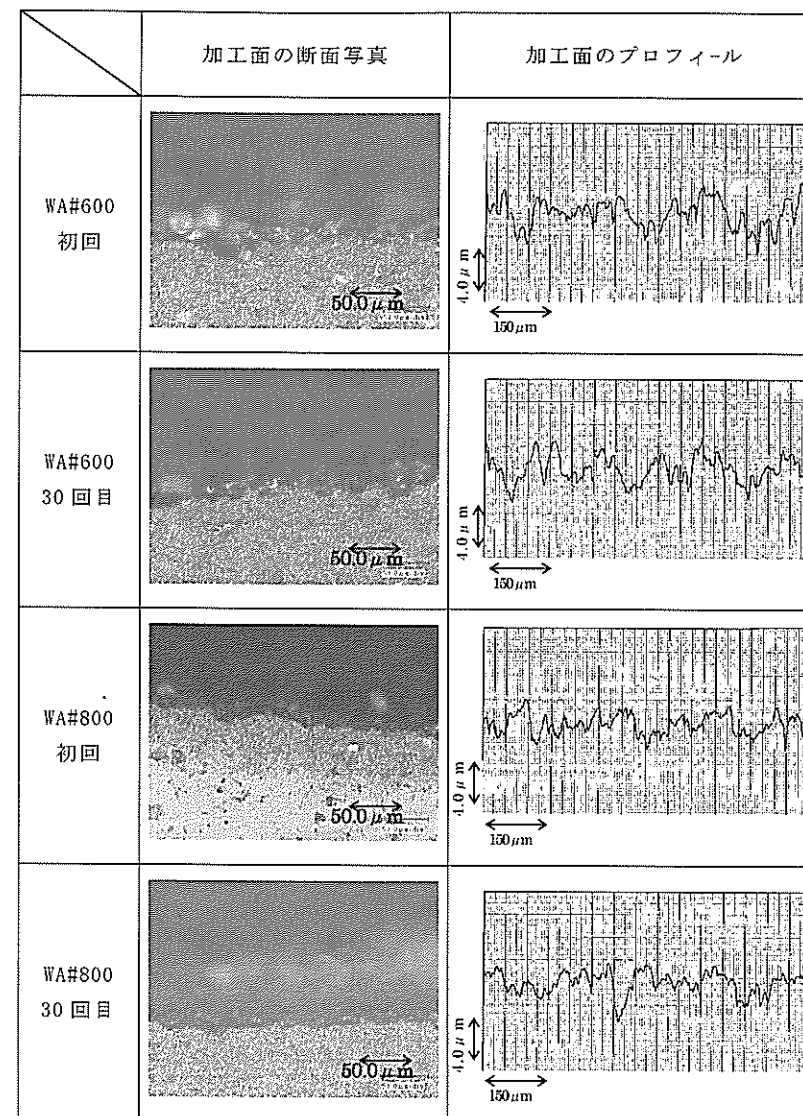


図 2.5.8-2 加工面の断面写真および表面プロフィール

2. 6 噴射材の噴射量が加工特性に及ぼす影響

噴射量の変化が加工特性に及ぼす影響を、噴射材に WA#220 を使用し、噴射量を 400g/min, 200g/min, 100g/min と変化させて実験的に検討を行った。

2. 6. 1 噴射材平均粒子径への影響

図 2. 6. 1 は、噴射回数の変化によって噴射材の噴射量が噴射材回収率に及ぼす影響を示したものである。同図より、いずれの噴射量においてもほとんど差異は認められない。そこで、噴射量 400g/min, 200g/min および 100g/min に対して、噴射回数 5 回毎に加工後の噴射材のサンプリングを行って測定した。それらの平均粒子径の推移を図 2. 6. 2 に示す。同図より、噴射量 100g/min において噴射材粒子径の顕著な減少が認められる。これは、噴射材と噴射される圧縮空気との混合比が低くなることで、噴射される粒子同士の干渉が抑制されその粒子の噴出速度が増大し、その結果として噴射材の工作物への衝突エネルギーが増大し、破砕が急速に進展したことによるものと推察される。また、噴射量 400g/min については、噴射量が多いことから噴射材同士の衝突による破砕が支配的となり、噴射材粒子径が減少したのと考えられる。

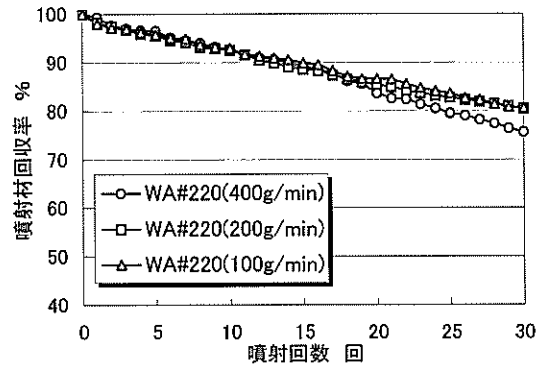


図 2. 6. 1 噴射材回収率の推移

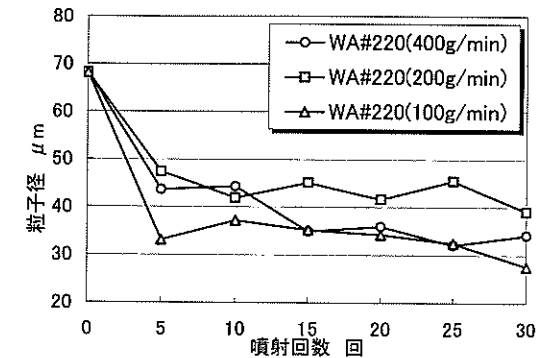
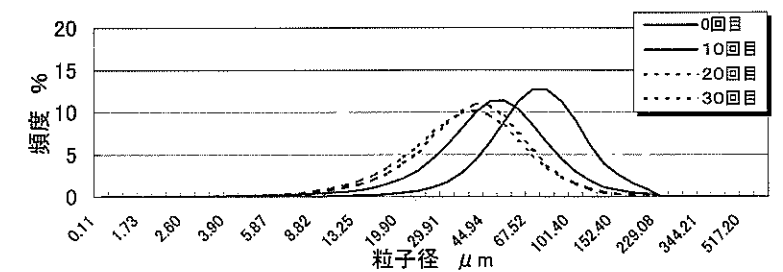


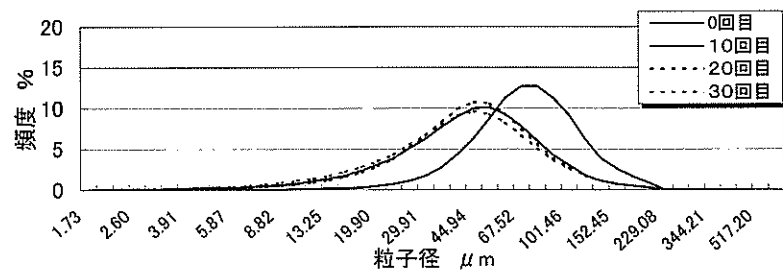
図 2. 6. 2 噴射材平均粒子径の推移

図 2. 6. 3 は、各噴射回数(0 回, 10 回, 20 回, 30 回)における噴射材の粒子径分布の変化を示したものである。同図において、噴射量 200g/min の噴射材粒子径は破砕があまり進展せず、噴射量 400g/min および 100g/min では破砕がかなり進展していることが明白である。

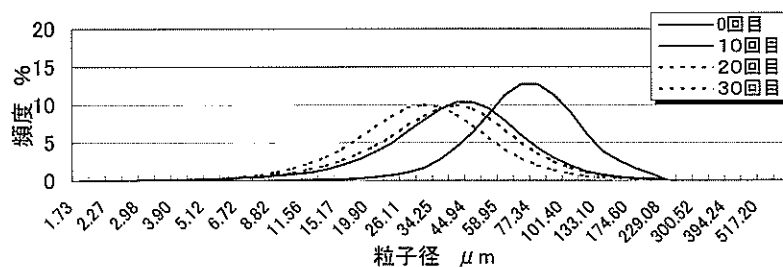
噴射後に回収した噴射材の外観写真を図 2. 6. 4 に示す。同図からも、噴射量 100g/min では噴射材の破砕がかなり進展していることが確認できる。



(a) WA#220 (400g/min)



(b) WA#220 (200g/min)



(c) WA#220 (100g/min)

図 2.6.3 噴射材粒子径の分布

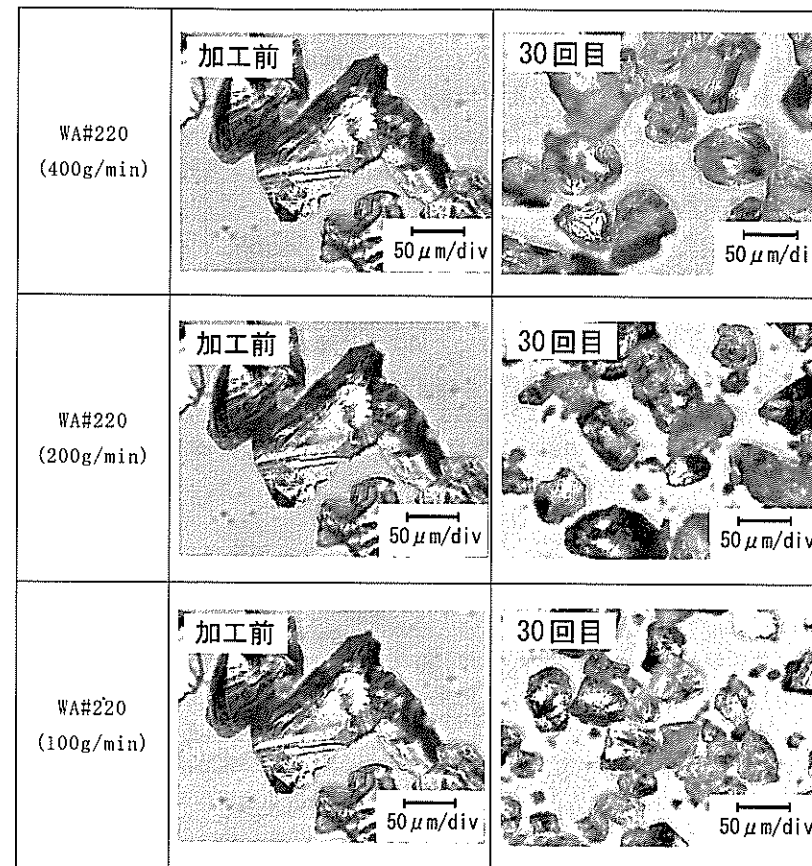


図 2.6.4 噴射材の外観写真

2.6.2 加工量への影響

図 2.6.5 は、噴射回数の変化が加工量に及ぼす影響を噴射量について示したものである。同図より、噴射量 400g/min における加工量が最も小さいことがわかる。これは、噴射量が多いことから噴射材同士の衝突が多くなり、工作物に噴射材が有効に作用しなかったことによるものと考えられる。一方、噴射量 200g/min および 100g/min においては、噴射量が少ないことから噴射材同士

の衝突が少なくなり、噴射材が工作物に有効に作用し、その結果として加工量が増大したものと考えられる。また、噴射量が少ない場合、前述したように噴射材と圧縮空気の混合比が低くなることから、噴射される粒子同士の干渉が抑制され、噴射材の工作物への衝突エネルギーが増大したことで加工量が増大したものと考えられる。しかしながら、それぞれの噴射量によって噴射回数が増加すると噴射材回収率が異なるため、噴射回数1回当りに噴射加工に使用される噴射材重量が異なる。

そこで、単位噴射材重量当りの加工量で表すことによりその影響を明確にしたものが図2.6.6である。同図においても、噴射量400g/minの加工量が最も小さく、噴射量100g/minの加工量が最も大きいことがわかる。

以上のことから、噴射量が少ないと加工量は増大するが、工作物への衝突によって噴射材の破砕が進展し易いことが言える。また、噴射量が多すぎる場合には、噴射材同士の干渉によって加工量が少なくなるだけでなく、噴射材同士の衝突によって噴射材の破砕が進展し易くなることが言える。

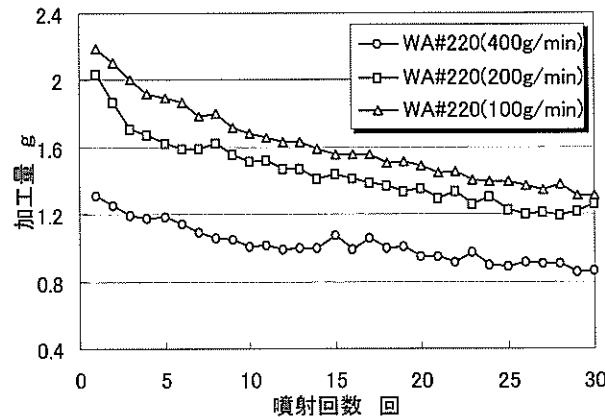


図2.6.5 加工量の推移

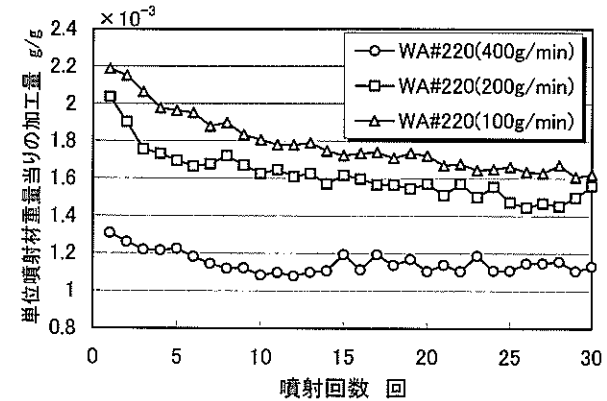


図2.6.6 単位噴射材重量当りの加工量の推移

2.6.3 工作物表面への影響

図2.6.7は、噴射回数の変化によって噴射量が加工表面の粗さに及ぼす影響を示したものである。同図より、噴射回数の初回においては噴射量100g/minの表面粗さが最も大きいことがわかる。これは、前述のように噴射材と圧縮空気の混合比が低くなることから、噴射される粒子同士の干渉が抑制され、噴射材の工作物への衝突エネルギーが増大したことで工作物にクラックを発生させ易くしたことによるものと考えられる。しかしながら、噴射回数を重ねるとこの影響より噴射材の粒子径の影響が大きく表れ、粒子径の減少した噴射量100g/minの表面粗さが最も良好である。また、図2.6.8に加工面の断面写真および表面プロフィールを示す。同図からもこのことが確認できる。以上より、噴射材の材質が同一の場合、加工面の表面粗さは噴射材の粒子径によって大きな差異がない。噴射回数初期では噴射量による影響を大きく受け、破砕によって粒子径の減少した噴射回数後半ではその粒子径の影響を受けることが明らかである。

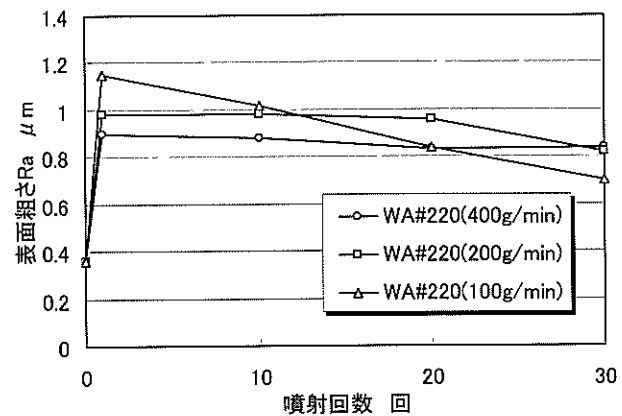


図 2.6.7 表面粗さの推移

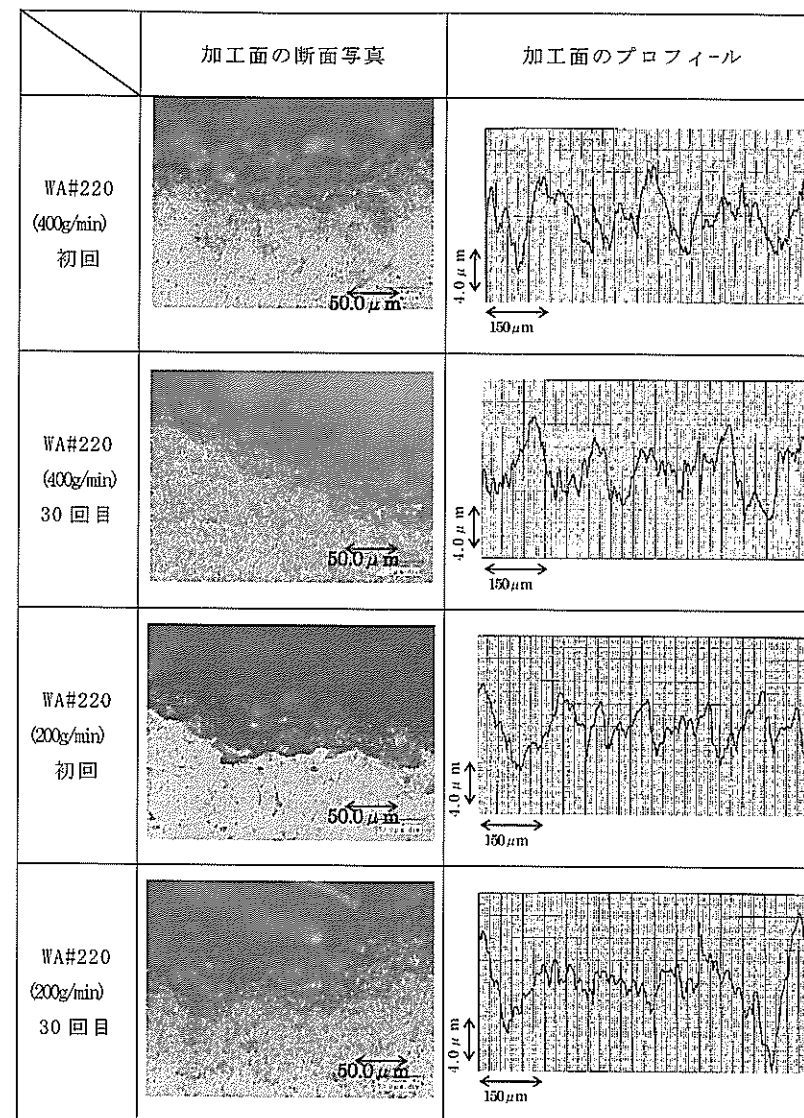


図 2.6.8-1 加工面の断面写真および表面プロフィール

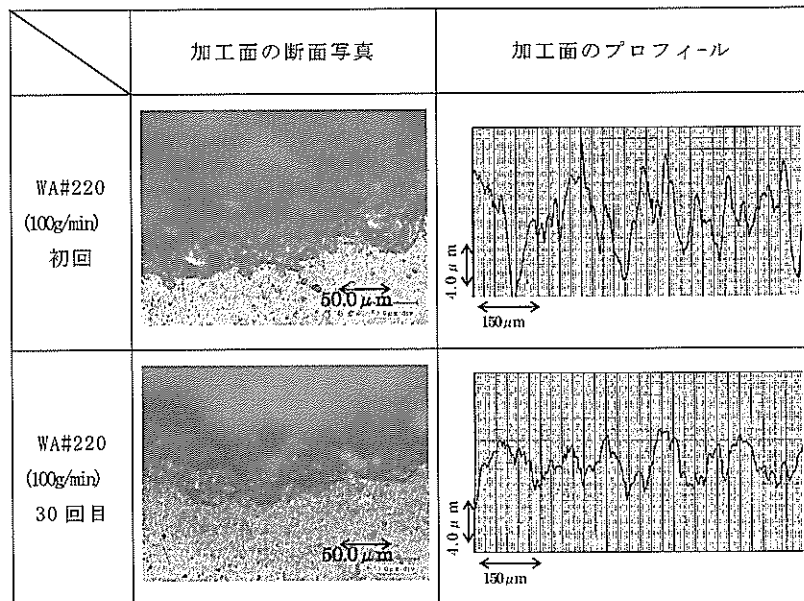


図 2. 6. 8-2 加工面の断面写真および表面プロフィール

2. 7 工作物の材質が加工特性に及ぼす影響^{3) 8)}

工作物材質が加工特性に及ぼす影響を検討するために、工作物にこれまで使用してきたソーダライムガラスのほかに新東Vセラックス備製アルミナセラミックス (99% Al_2O_3) を使用し、噴射材には GC 砥粒と WA 砥粒のともに #220 のものを使用して実験を行った。これらの基礎的な物性値⁹⁾を表 2. 4 に示す。

表 2. 4 工作物の代表的物性値

物性値	ソーダライムガラス	アルミナセラミックス (99% Al_2O_3)
比重	2. 4 9	3. 9 7
ヤング率 GPa	6 9	3 8 0
ポアソン比	0. 2 1	0. 2 3
ビッカース硬さ GPa	7. 1	1 7. 5

2. 7. 1 噴射材平均粒子径への影響

図 2. 7. 1 は、工作物の材質が噴射材回収率に及ぼす影響を噴射回数に対して示したものである。この図より、噴射材回収率にはほとんど差異は認められない。そこで、各噴射材の加工直後の平均粒子径を測定し、噴射回数による平均粒子径の推移の結果を図 2. 7. 2 に示す。同図から、いずれの工作物においても GC 砥粒の粒子径が WA 砥粒と比較して減少していることが明らかである。これは、すでに 2. 3. 1 節においても述べたように、GC 砥粒の靱性が WA 砥粒に比べて低いことから、工作物に衝突した際の破砕が進展し易くなり、その結果として平均粒子径が減少したことによるものと推察される。さらに、セラミックスはガラス材と比較して硬さが高いため、工作物との衝突によって噴射材の受ける衝撃力が大きくなり、噴射材が破砕し易くなったためにセラミックスにおける平均粒子径がガラス材よりも減少したものと考えられる。また、加工後の噴射材は前述のようにサイクロンに運ばれ粒子径約 $20 \mu m$ 以上の噴射材が内部タンクに回収され易くなるため、図 2. 5. 2 に示すように粒子径に大きな差異はあるものの、図 2. 7. 1 において噴射材回収率がほぼ同等の値を示したものと言える。

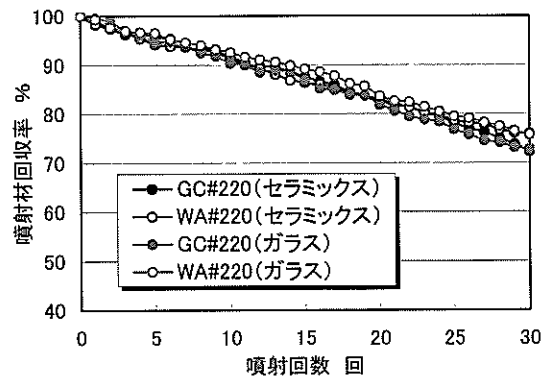


図 2.7.1 噴射材回収率の推移

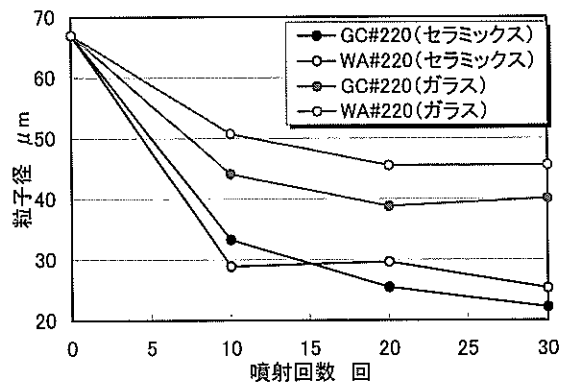
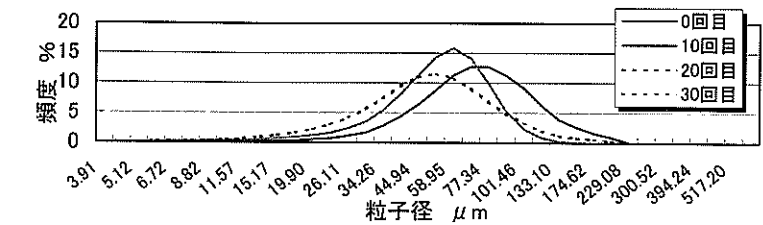
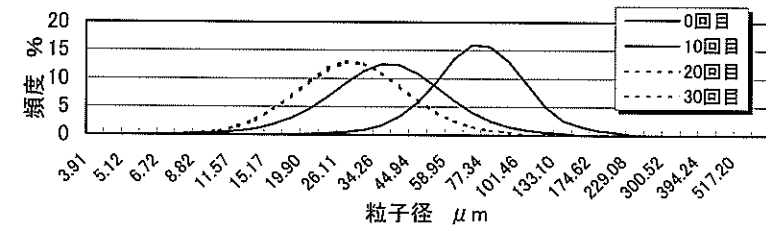


図 2.7.2 噴射材平均粒子径の推移

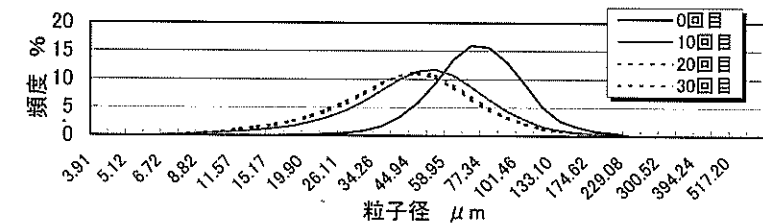
図 2.7.3 は、各噴射回数（0, 10, 20, 30 回）における加工直後のそれぞれの噴射材の粒子径分布を示したものである。これらの図からも、セラミックスに対する噴射材はガラス材と比較して破砕が早期から大きく現れており、粒子径の分布曲線も小径側へ移行していることが顕著に認められる。



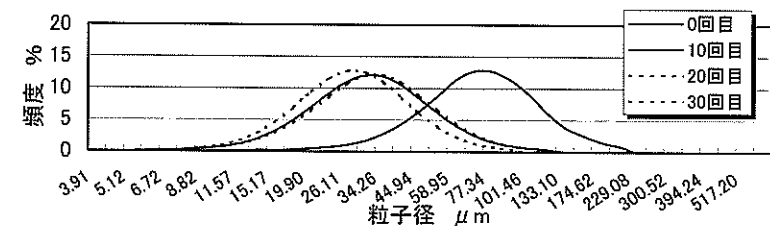
(a) WA#220 (ガラス)



(b) WA#220 (アルミナ)



(c) GC#220 (ガラス)



(d) GC#220 (アルミナ)

図 2.7.3 噴射材粒子径の分布

噴射後に回収した噴射材の外観写真を図2.7.4に示す。この図からも、工作物にセラミックスを用いた場合には破碎によって噴射材の粒子径が減少していることが確認できる。また、WA砥粒に比べてGC砥粒の粒子径が破碎によって減少していることも明らかである。



図2.7.4 噴射材の外観写真

2.7.2 加工量への影響

図2.7.5は、工作物の材質が加工量に及ぼす影響を噴射回数に対して示したものである。

同図より、アルミナはガラス材と比較して加工量が小さな値を示していることがわかる。このことは、アルミナの硬さがガラス材より高いことに起因するものと考えられる。しかしながら、加工量は図2.5.1に示したように噴射回数が増加するとそれぞれの噴射材における回収率が異なり、噴射加工1回当りの噴射重量が変化するため、単位噴射材重量当りの加工量で表すことにした。これを図2.7.6に示す。この図においても同様の傾向が見られ、アルミナはガラス材と比較して加工量が小さな値を示している。また、ガラス材の場合にはすでに2.5.1節において述べたように、噴射回数の初期段階においてGC砥粒の加工量はWA砥粒より大きな値を示し、噴射回数の増加とともにWA砥粒の加工量がGC砥粒よりも上回って逆転している。これに対して、アルミナの場合にこの逆転現象は確認されず、GC砥粒とWA砥粒の間に大きな加工量の差異が認められる。このことは、前述したようにアルミナはガラス材に比べて硬いため、GC砥粒の粒子径が若干減少しているものの、WA砥粒の靱性よりGC砥粒の有する鋭利な切れ刃と高い硬さによる影響が支配的因子として現れたものと考えられる。つまり、加工量は噴射材が工作物よりも十分高い硬さを有する場合には、噴射材の粒子径の影響が大きく現れ、噴射材が工作物と同等の硬さを有する場合には、噴射材の硬さの影響が大きく現れると言える。

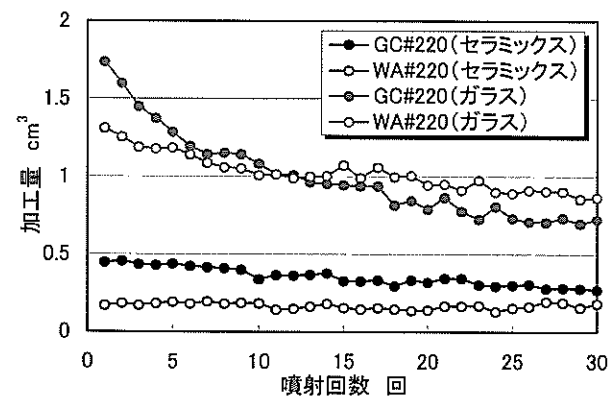


図2.7.5 加工量の推移

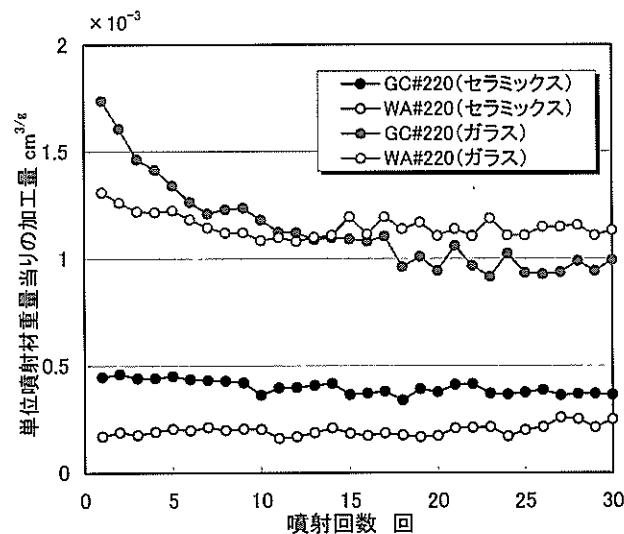


図 2.7.6 単位噴射材重量当りの加工量の推移

2.7.3 工作物表面粗さへの影響

図 2.7.7 は、噴射回数の変化によって工作物の材質が加工表面の粗さに及ぼす影響を示したものである。同図より、工作物にセラミックスを使用した場合、ガラス材と比較していずれの噴射材においても加工表面粗さが小さいことがわかる。これは、図 2.7.2 に示すように工作物にアルミナセラミックスを使用した場合の噴射材は破碎し易く、その平均粒子径がガラス材の場合の粒子径と比較して減少することに起因するものと考えられる。しかしながら、アルミナセラミックス材の加工において噴射材である WA 砥粒および GC 砥粒の平均粒子径にそれほど大きな差異がないにもかかわらず、GC 砥粒の加工後の表面粗さが小さいことが認められる。これは、アルミナセラミックスはガラス材と比較して構造的に不均一であるため材料中に空孔やクラック等が存在しており、WA 砥粒では加工能力が不十分であることからこの初期のクラックを除去しきれず、これに対し GC 砥粒はその鋭利な切れ刃と高い硬さによって十分に加工が行えるため加工面の表面粗さを減少させたものと考えられる。

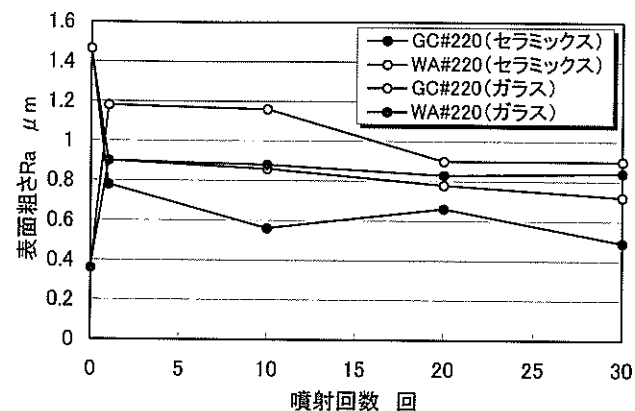


図 2.7.7 表面粗さの推移

図 2.7.8 には加工面の表面プロフィールを示す。なお、これまで加工面の断面写真による比較、検討も行ってきたが、アルミナセラミックスにおいては加工面の状態を維持しながら切断することが実験上困難であることから加工面の断面写真は撮影できなかった。同図からも、上述のようなクラックによる影響が明らかである。以上のことより、工作物の硬さが噴射材と同等の場合には、加工表面の粗さには噴射材の平均粒子径だけでなく、その硬さや形状も大きく影響を及ぼすことが言える。

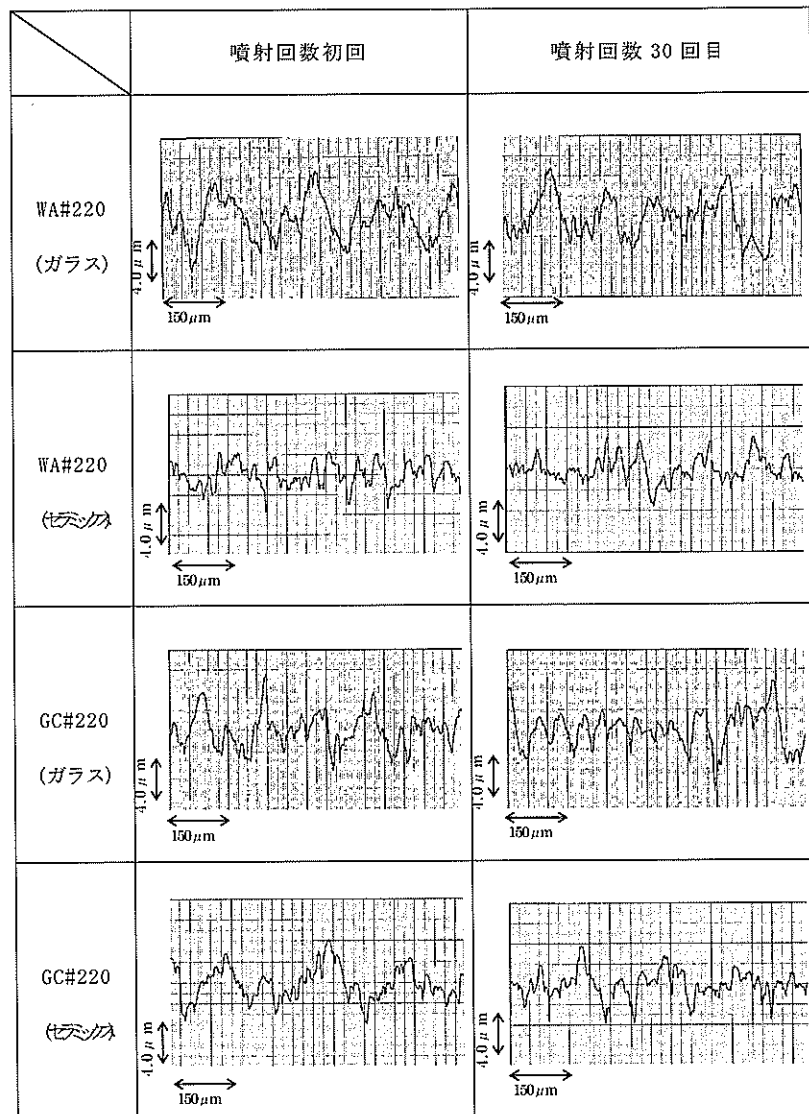


図 2. 7. 8 加工面の表面プロフィール

2. 8 結言

ブラスト加工による微細加工に対する基礎的研究を行い、加工量の経時変化を予測・制御し、加工量の安定化を図ることが必要となり、さらには安定した加工特性を維持するために噴射条件と微粉噴射材の経時変化の関係を定量化しておくことが必要になる。そこで本章では、微細加工を目的としたブラスト加工における噴射条件の確立を目指すために、噴射条件が加工特性に及ぼす影響について実験的に検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ガラス材のブラスト加工に対する噴射材において、破碎を起し易い G C 砥粒では加工量の減少割合が大きくなり、破碎を起しにくい靱性の高い W A 砥粒では噴射回数が増加しても比較的安定した加工量を維持することができる。
- (2) 噴射材の比重が加工特性に及ぼす影響はほとんどない。
- (3) 噴射材の粒子径が小さいと加工量は安定する。しかし、粒子径が大きくなると加工量は増大するが、噴射材の破碎の進展が活発になるために安定しなくなる。
- (4) 噴射量が少なくなると加工量は増大するが、噴射材の破碎が進展し易くなる。また、噴射量が多くなりすぎる場合には、噴射材同士の干渉によって加工量が少なくなるだけでなく、噴射材同士の衝突によって噴射材の破碎が進展し易くなる。
- (5) 工作物の硬さが高くなるほど噴射材は破碎し易く、平均粒子径の減少割合が大きくなる。
- (6) アルミナセラミックスにおいて、加工量は噴射材の硬さによる影響が大きく現れ、G C 砥粒の噴射材では効率の良い加工を行うことが可能である。
- (7) ガラス材において、加工表面の粗さは噴射材の材質が異なる場合にその平均粒子径だけでなく、硬度や形状が影響を及ぼす。また、噴射材の材質が同一の場合にはその粒子径の影響を直接受ける。
- (8) 工作物の硬度が噴射材と同等の場合には、加工表面の粗さには噴射材の平均粒子径だけでなく、その硬度や形状が大きな影響を及ぼす。

以上より、微細加工を目的としたブラスト加工における噴射条件と加工特性との関係が実験的に明らかとなった。

参考文献

- 1) 京セラ㈱ホームページ
- 2) 伊澤, 北嶋, 野中, 渡辺: ドライブラスト加工に関する研究 (第1報)
— 噴射条件が加工特性に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会誌, 44, 7(2000)334
- 3) 伊澤, 北嶋, 野中: ドライブラスト加工に関する研究 (第2報)
— 工作物材質が噴射材の破砕に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会誌, 45, 7(2001)36
- 4) 伊澤, 北嶋, 木村, 野中: 乾式ブラスト加工に関する基礎的研究 (第1報)
— 噴射条件が噴射材の損耗特性に及ぼす影響について —, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999)715
- 5) 北嶋, 野中, 伊澤: 乾式ブラスト加工に関する基礎的研究 (第2報)
— 噴射材が加工特性に及ぼす影響 —, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2000)238
- 6) 北嶋, 野中, 伊澤: 乾式ブラスト加工に関する基礎的研究 (第3報)
— 噴射エネルギーと加工特性の関係について —, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2001)32
- 7) 伊澤, 北嶋, 野中, 渡辺: ドライブラスト加工に関する研究 (第1報) — 噴射条件が加工特性に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (1999)
- 8) 伊澤, 北嶋, 野中: ドライブラスト加工に関する研究 (第2報) — 工作物材質が噴射材の破砕に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (2000)
- 9) ニューガラスハンドブック: ニューガラスフォーラム編
京セラ㈱ホームページ

第3章 微粉噴射材の定量噴射

3. 1 緒言

ブラスト加工による微細加工において, 加工精度を追求する最も重要な要素技術は噴射材の定量噴射技術である. 微粉噴射材を経時的に均一に噴射するためには, 噴射材を一定量連続的に供給する機構が必要であり, 従来のブラスト装置ではせいぜいノズルへの導入部の一部に寸法を規制したオリフィスを挿入し, 噴射材の流量を制限する程度のことを行なわれていた. しかしながら従来の方法では, 比較的流動性の良い粒子径の大きい球状の噴射材ではある程度の定量性が認められるものの, 流動性の悪い形状が不定形の噴射材の場合や噴射材の粒径が微細なものについてはブリッジングを起こし全く利用できないものであった.

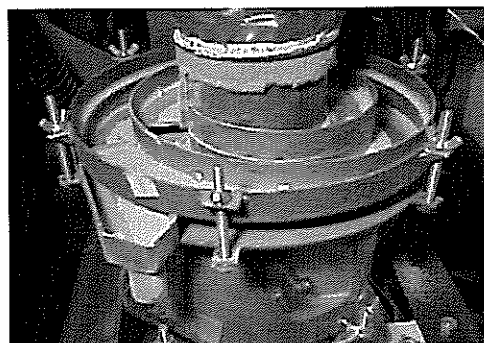
ブラストによる微細加工においては, 加工の対象となる材料は主としてガラス, シリコン, セラミックスなどの硬脆材料であり, また加工精度を追求するため加工単位を小さくする必要から, 微粉として市場性のある噴射材としてはアルミナや炭化ケイ素の微粒子に限定されてしまう.

本章では, 形状が不定形でかつ微粉であるアルミナや炭化ケイ素を対象に, 噴射ノズルへ意図的に噴射材を定量供給できる装置の開発を行なった結果につき報告する.

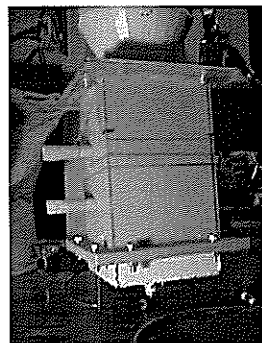
3. 2 噴射材の定量供給装置

加工精度からの要求 (加工の深さバラツキ $\pm 5\%$ 程度) および平均粒子径が数 μm から数十 μm の微粒子を扱う必要から, 供給精度の目標を噴射材供給量の $\pm 3\%$ 以内とし, 粉体機器などに用いられている実用性のある次の4種の方法を検討した. それらは, 流動層方式, 振動フィーダー方式, スクリューフィーダー方式およびテーブルフィーダー方式である.

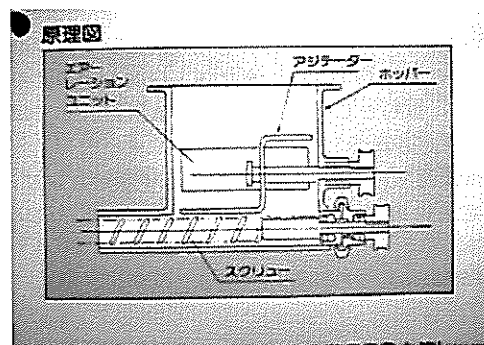
図3.1に実験に供したそれらの模式図または写真を示す. また表3.1に噴射材をGC#600を使用し, その噴射量を毎分200gに設定した場合の評価結果を示す. 流動層方式は流動化させた噴射材の固気混合層から吸い込み式の噴射ノズルから発生する負圧を利用し, 噴射材を供給する方式で微粒子の分散を促す意味では優れている. しかしながら流動化の状態の不安定性による供給量のバラツキが認められる. スクリューフィーダー方式およびテーブルフィーダー方式は, 明らかに共に噴射材の凝集が認められ実用的でないことがわかった. 振動フィーダー方式については噴射材の凝集も無く, また供給量のバラツキが最も小さく目標値に達した. ここでは, 噴射材が凝集しなかった振動フィ



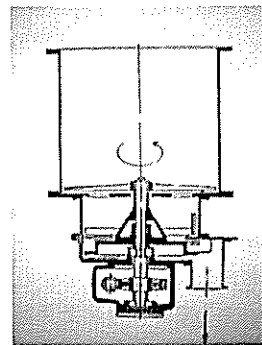
(a) 振動フィーダー方式



(b) 流動層方式



(c) スクリューフィーダー方式



(d) テーブルフィーダー方式

図 3.1 試験に供した各種定量供給装置

表 3.1 試験に供した各種定量供給装置の評価結果

	スクローフィーダー方式	テーブルフィーダー方式	振動フィーダー方式	流動層方式
供給状態	供給量のバラツキは少ないが噴射材が凝集してしまう	供給量のバラツキは少ないが噴射材が凝集してしまう	供給量のバラツキ ± 1.9 % 噴射材は凝集しない	供給量のバラツキ ± 4 % 噴射材は凝集しない
評価	×	×	○	○

ーダー方式および流動層方式を比較し、供給量のバラツキの経時変化を図 3.2 に示す。振動フィーダー方式の方が経時的により安定しているのがわかる。

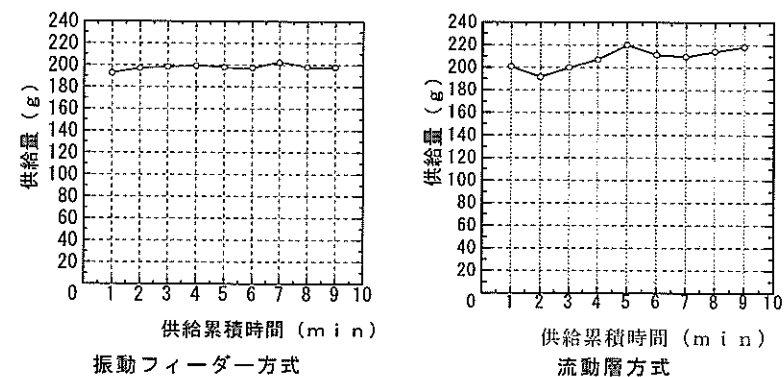


図 3.2 振動フィーダー方式、流動層方式における供給量のバラツキ比較

3.3 振動フィーダー型噴射材定量供給装置¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

振動フィーダー型噴射材定量供給装置は図 3.1 に示したように、上部ホッパーに貯蔵された噴射材を、振動を利用し調整可能なスリットより一定量切り出していく装置で日本および米国で特許を取得している。スリットより切り出された噴射材は、凝集を防止するため螺旋状のテーブル上を搬送され、テーブルの一部より落下させ、エアージェットにより生じる負圧を利用してノズルより噴射される。

ここでは、現状微粉噴射材の供給方式として最良の結果が得られた振動フィーダー方式による噴射材の定量供給装置を試作し、ガラスの加工試験を行なった結果につき述べる。

ガラス材料を平面的に加工する場合、噴射材の粒度毎に適正な噴射量が存在する。その最適噴射量を調査した結果につき、表 3.2 にその加工条件を、図 3.3 にその結果につき示す。粒度毎に加工量は極大値をとる。それは噴射材の加工物への衝突に際し、効率的に作用している粒子の割合を示すもので、極大値を越えると噴射材同士が緩衝し合い加工の効率が低下するためと思われる。また噴射材の粒子径が小さくなるにつれ、加工能率の極大値は噴射量の少ない側に移動する。これは同様に粒子径が小さくなるほど粒子数が増加し、噴射材同士が緩衝し合う割合が増加し加工の効率が低下したためと思われる。

表 3.2 ガラスの加工条件

加工対象 (mm)	ソーダライムガラス (150x150x3t)
使用噴射材	GC #400 (35 μ m) GC #600 (25 μ m) GC#1000 (12 μ m) GC#2000 (8 μ m)
噴射圧力 MPa	0.25
噴射ノズル mm	ϕ 8 (I7-ジェット ϕ 4)
噴射距離 mm	50
噴射角度	垂直 (90°)
噴射回数 回	10
加工面積 mm	80 x 80

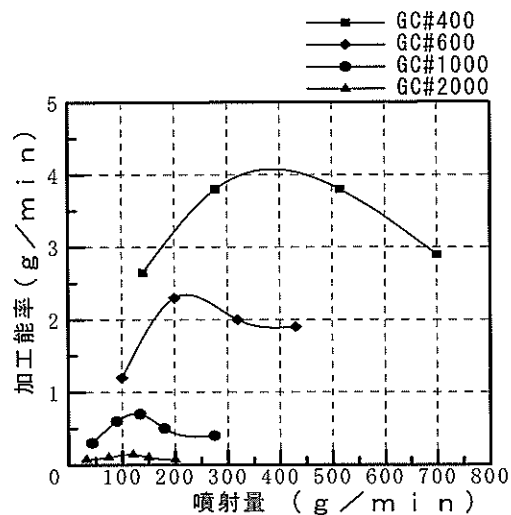


図 3.3 噴射材の各種粒度における最適噴射量

次に噴射の加工位置による安定性を見るために、150角のガラス基板にマスクにてパターンニングを施し加工評価を行なった。その条件を表3.3に、加工結果を図3.4に示した。150角内の任意の加工位置における加工深さを測定しプロットしたものである。本試験における加工深さの最大値は0.487mm、最小値は0.458mmで平均値は0.474mmであり、加工深さのバラツキは±3%程度となり概ね目標は達成できた。この目標値の達成には噴射の定量化以外にも各種噴射条件の検討が必要であったのは言うまでも無いがここでは割愛する。

表 3.3 ガラスの加工条件

加工対象 (mm)	ソーダライムガラス (150x150x3t)
使用噴射材	GC #600 (25 μ m)
噴射量 g/min.	220
噴射圧力 MPa	0.25 MPa
噴射ノズル mm	ϕ 8 (I7-ジェット ϕ 4)
噴射距離 mm	100
噴射角度	垂直
走査速度 mm/sec.	ノズル 50 工作物 1.2
噴射回数 回	24
加工範囲 mm	150 x 150

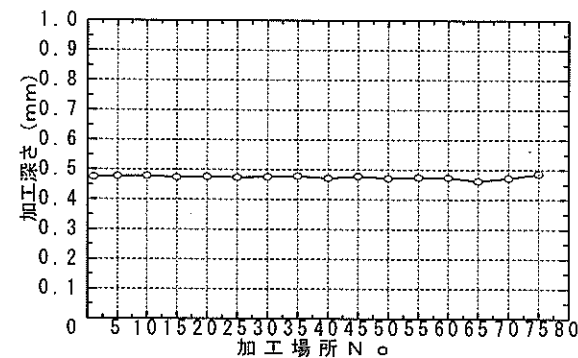


図 3.4 ガラス基板の加工における加工位置による加工深さのバラツキ比較

3. 4 結言

ブラスト加工における微細加工において、その加工精度を追求するために噴射材の定量供給装置を検討した。その結果下記の事柄が明らかとなった。

- (1) 噴射材の定量供給装置において、流動層方式、振動フィーダー方式、スクリュューフィーダー方式およびテーブルフィーダー方式の4種を検討した結果、噴射材の凝集が起らずかつ定量性の高い方式として、振動フィーダー方式が選定できた。
- (2) 振動フィーダー方式による定量供給装置を使用し、ガラスの加工試験を行ったところ加工深さバラツキにて $\pm 3\%$ 程度の加工結果が得られた。この値は十分に実用に供するものと思われる。
- (3) 加工能率に対する噴射材の噴射量には極大値が存在し、その値は噴射材の粒子径が小さいほど小さいことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 特許 No.2876400 投射材の定量供給装置
- 2) U S P No.6371839 投射材の定量供給装置
- 3) 特願 2000-63051 投射材の定量供給装置
- 4) 特開平 11-000866 ブラスト加工装置用投射材定量供給装置

第4章 高精度マスキング技術

4. 1 緒言

乾式ブラスト加工は雰囲気ドライであることおよび生産性が高いなどの理由より半導体、電子機器に使用される部品の加工に用いられつつあるが、まだ研究面での抑えが全く無いのが現状である¹⁾。

乾式ブラスト加工において微小径ノズルを用いてマスクレスにて局部にブラストを行う方法があるが²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾、マスキングを施し加工を行う方が精細度、加工品質の点において圧倒的に優れている。精度を追求する場合のマスキング材には一般に感光性の樹脂が用いられ、フォトリソグラフィーを含むマスキングプロセスによりパターンニングされ使用される。

パターンニングされたワークに乾式ブラスト加工を行うことによって所定のパターン形状を再現することが可能となる。すなわち加工の寸法精度を向上する因子の一つはマスキングにあると言え、マスキング技術の向上が乾式ブラスト技術の向上の一つであると言える。しかし、マスキング材の特性については未知な点が多く、加工精度の要求に対応するための基礎データが少ないが現状である⁶⁾⁷⁾。

本章では露光量に対するマスキング材の耐ブラスト性およびベーキングの耐ブラスト性に対する効果、噴射圧力の違いによる損耗特性などについて報告する。

4. 2 微細加工に使用されるマスキング方法

噴射加工に用いられるマスキング方法は、要求される精度、コストおよび操作性を考慮して、メタル、フォトレジストおよび印刷マスクから選択する。

最も高精度な加工に対応できるのは、フォトレジストマスクである。ドライフィルムで市販されており、フィルムの厚さによって解像度が異なり、精度に影響する。高精細な加工の例としては、 $40\mu\text{m}$ の線幅を $L/S=1/1$ で解像でき、噴射加工により溝加工も可能である。フィルムの材料には、ブラスト耐性を考慮して、紫外線硬化型のウレタン樹脂が用いられる。この方法では、直接ドライフィルムをワークに貼り付けた後、露光、現像してマスクを形成する直接法と、予めドライフィルムにパターン付けした後貼り付ける間接法がある。

印刷マスクは、最も安価にできる手法である。しかしながら、スクリーン印刷にてマスクが形成されるため、高精度の加工には不向きである。インテリアや建材用のガラス、ステンレス鋼板の模様付けなどの用途に用いられている。

メタルマスクには、エッチング加工されたステンレスの薄板やニッケルの電鍍品が用いられる。繰り返し使用される用途に用いられるが、加工によりひずむ等問題もあり特殊用途に限定される。

4. 3 フォトリソグラフィーによるマスキング技術

フォトリソグラフィーによるマスキングは、半導体のリソ技術の応用である。但し、市販されているマスキング材で高精度が追及できるのは、ドライフィルム型のレジストであり、本章ではこの方法を用いて実験を行った。

本試験は図4.1に示すような工程をへて行った。まず、ラミネータ（大成ラミネータ（株）：VA-400Ⅱ）を用い基板にドライフィルムレジスト（東京応化工業（株）：ORDIL BF-410, 405）を熱圧着する。その後マスクアライナ（新東ブレーター（株）：USB-250）にてアライメントおよび露光を行い、現像をへて乾式ブラスト加工（MICROBLASTER, MB1：新東ブレーター（株））を行う。乾式ブラストでは図4.2に示すように試料上全面を均一に加工するために砥粒を定量にて供給し、圧縮空気とともに噴出して定ピッチで基板上を走査する。尚、本工法の主装置であるマスクアライナの外観を図4.3に、その仕様を表4.2に示す。またマスクアライナの光源はウシオ電機（株）製超高圧水銀ランプ（USH-1000T, 700W）を用いた。

試験条件を表4.1に示す。試験は露光量、ベーク温度、噴射圧力をパラメータとし、マスキング材の耐久性の違いを評価した。寸法計測は万能投影機（（株）ニコン：V-16E）、断面形状は表面粗さ計（東京精密（株）：サーフコム1400A-12）、レーザー形状測定器（（株）キーエンス：VF-7510）を用いた。

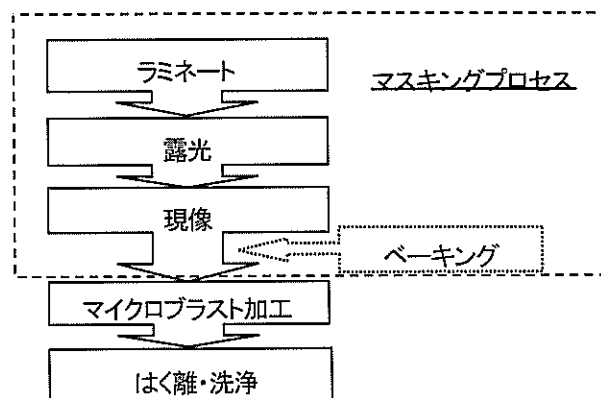


図4.1 乾式ブラスト加工フローチャート

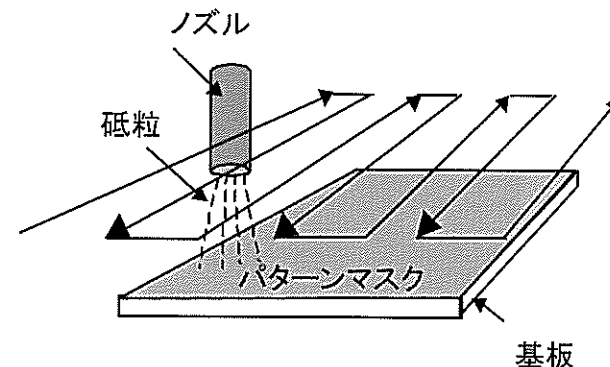


図4.2 乾式ブラストのモデル図

表4.1 試験条件

条件	パラメータ
マスキング材の膜厚 (μm)	50, 100
露光量 (mJ/cm^2)	50~450
噴射材(砥粒)	WA#600, 400
ベーク温度 ($^{\circ}\text{C}$)	80~180
ベーク時間 (min)	30~120
噴射圧力 (MPa)	0.15, 0.25, 0.35

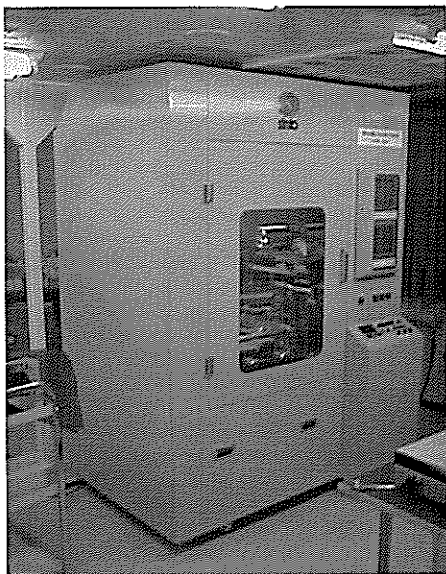


図 4.3 マスクアライナ外観 (USB 250)

表 4.2 マスクアライナ (USB 250) の主仕様

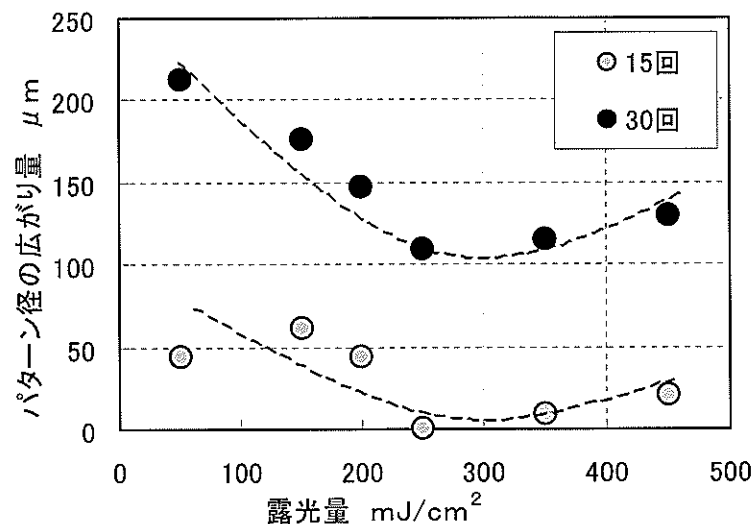
項目	仕様
光源	超高圧水銀ランプ 700W, 平行光
アライメント	
機構	両面
精度	10 μ m 以下
有効露光範囲	250 x 250

4. 4 マスキング材の損耗特性

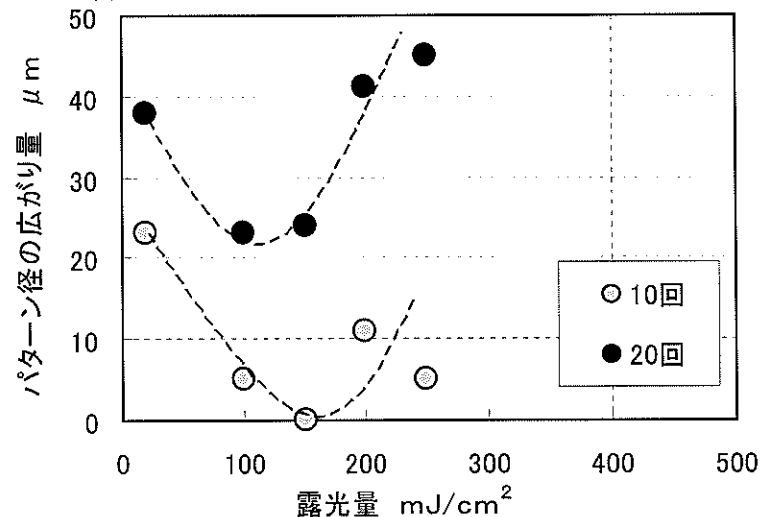
4. 4. 1 露光量と耐ブラスト性の評価

露光量によりマスキング材の硬化状態が変化する。その硬化状態によりマスキング材の耐ブラスト性が異なると考えられる。そこで露光量に対するマスキング材の耐ブラスト性について調査を行った。ソーダライムガラスを基板にして、厚さ 100, 50 μ m のマスキング材をラミネートし、各光量にて ϕ 0.5 のパターンを形成した。露光量とブラスト加工によるマスキング材摩耗量の関係をそれぞれ図 4.4 に示す。なお、マスキング材摩耗量はパターンニングされた穴径 ϕ 0.5mm が WA#600 での乾式ブラスト加工により摩耗して広がった量 (直径での拡大量) である。両マスキング材ともにマスク摩耗量は露光量が増すにしたがって減少し、ある点で極小値を取る。その後露光量の増加とともに摩耗量は増加する。また、50 μ m における極小値は 100 μ m の場合に比べ、光量が低い方へシフトしている。

低光量ではマスキング材が十分に架橋せず、モノマーの状態で存在するために削り取られやすい。また、高光量では硬化が著しくもろい状態になるために摩耗が増加する。極小値を示す点が最良の耐ブラスト性を有する光量であると言える。また、両マスキング材は組成が同じであるため 50 μ m のマスキング材は光の透過が 100 μ m のものに比べて多くなる。そのために極小値が低光量の方へシフトしたと考えられる。



(a) 噴射圧力: 0.35 MPa、マスク材の厚み: 100 μm



(b) 噴射圧力: 0.25 MPa、マスク材の厚み 50 μm

図4.4 露光量とマスク摩耗量の関係

4. 4. 2 マスキング材の摩耗進行状態の観察

被加工物に乾式ブラスト加工を行うとき、マスキングを行うことで寸法を規制し、選択的に加工を行うことが加工精度を保つ上で重要である。乾式ブラスト加工は砥粒を吹付けて行う物理的な加工であるため、マスキング材も必ず摩耗し、これが精度を低下させる要因となる。ここでは、乾式ブラスト加工でのマスキング材のパターンの摩耗について摩耗進行過程を評価した。試験はソーダライムガラス上に、厚み 100 μm のマスキング材をラミネートし、光量 250 mJ/cm² にて露光し、φ 0.5 mm のパターンを形成したものに噴射圧力 0.35 MPa にて WA#600 を噴射した。

図 4.5 に各走査回数におけるパターンの広がり、およびマスキング材の膜厚の変化を示す。図 4.5 より、パターン摩耗は走査回数の増加に伴ない、徐々に増加し、走査回数 32 回より急激に摩耗が大きくなる。膜厚は当初より変化無く進行し、走査回数 32 回から急激に減少する。

ここで、レーザー形状測定器にて観察したパターン断面の各測定点におけるパターン形状の断面形状モデル図を図 4.6 に示す。まず、マスキング材はエッジ部が摩耗し、走査回数の増加に伴いエッジ摩耗が進行する。ここまではマスキング材膜厚にほとんど変化はない。走査回数 32 回より膜厚が減少し始め、それにともないパターンの摩耗も大きくなる。走査回数 64 回では膜厚の減少がさらに進み、それにともないパターンの摩耗も著しく増加する。

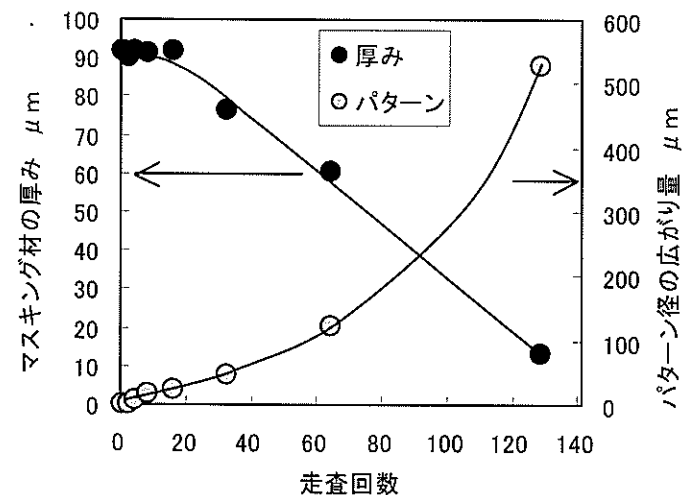


図4.5 走査回数に対するマスキング材の厚み変化

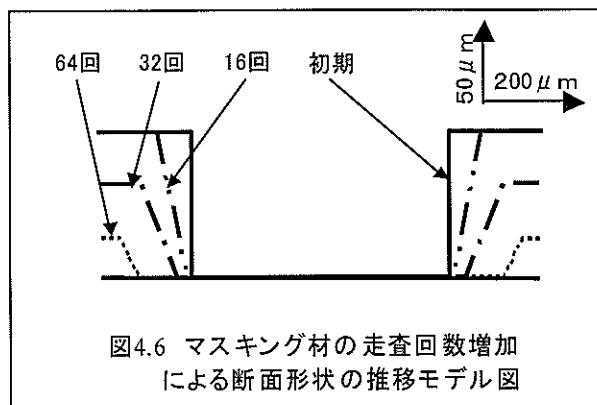


図4.6 マスキング材の走査回数増加による断面形状の推移モデル図

4. 4. 3 マスキング材の耐ブラスト性に与えるベーキングの影響調査

マスキング材には耐ブラスト性に適した露光量があり、通常の場合はその露光量を適用し図4.1に示した工程をへて加工が行われる。しかし、難加工材に対して乾式ブラスト加工を行うとき、ベーキング処理を施し、マスキング材の耐久性をより向上させることが経験的に知られている。そこで、ここでは現像後に各温度にてベーキング処理を施したマスキング材に乾式ブラスト加工を行い、マスキング材のベーキングによる耐ブラスト性の特性を調べた。試験では厚み100μmのマスキング材を用い、ソーダライムガラスにφ0.5mmのパターンを露光量250mJ/cm²にて形成させて恒温器にてベーキング温度と時間を変化させたものに、WA#600を0.35MPaにて噴射させた。

図4.7に各ベーキング温度におけるマスキング材の摩耗量を示す。なお、マスキング材摩耗量は穴径の広がった量を示している。

マスキング材の摩耗量はベーキング温度を高くするほど低下するのが認められる。80℃では効果が見られず、140℃ではベーキング無しの約2倍、180℃では約3倍の耐久性を得ることができる。

ベーキング有りの場合と無しの場合の走査回数と表面粗さの関係を図4.8に示す。また走査回数30回時のマスキング材の表面状態を図4.9に示す。ベーキング無しのものは、有りのものに対して表面の粗さが大きいのがわかる。すなわち、表面が粗いベーキング無は有に比べて砥粒の衝突により多くのマスキング材が削り取られながら摩耗が進行しているといえる。

次に耐ブラスト性に及ぼすベーキング時間の関係を図4.10に示す。図に示すように、60minより時間をかけてもベーキングの効果は変化しないことが認められる。

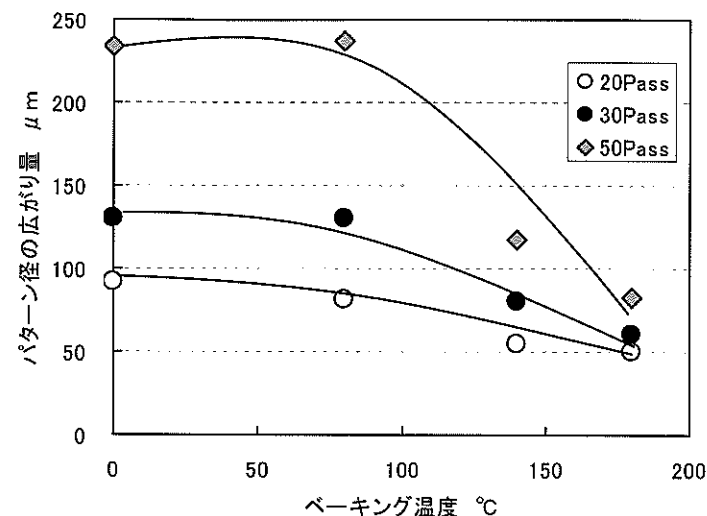


図4.7 ベーキング温度とマスク摩耗量の関係

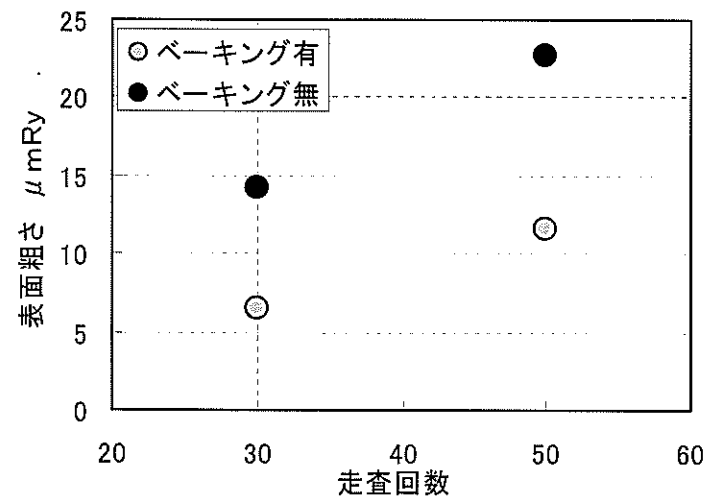


図4.8 走査回数と表面粗さの関係

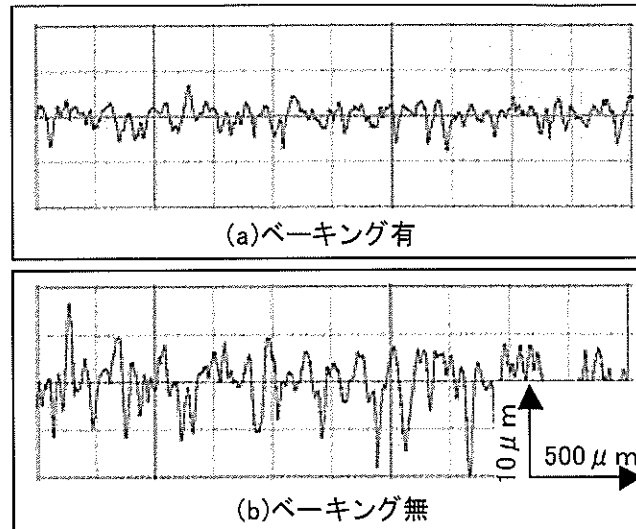


図4.9 ベーキング有無での表面粗さの違い(走査回数30回時)

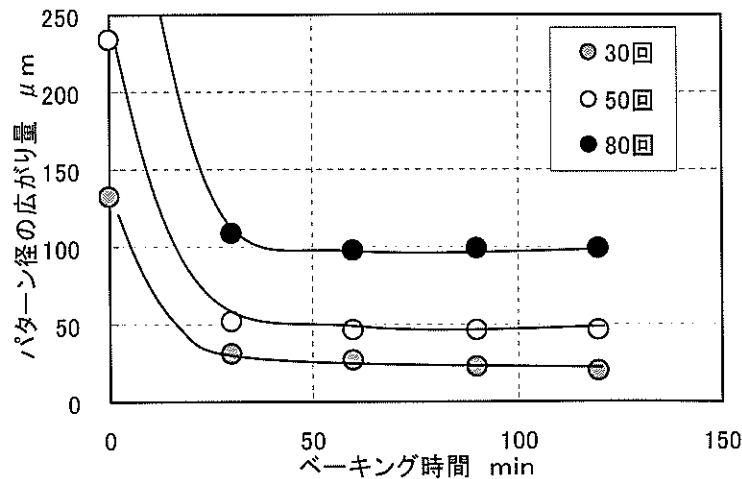


図4.10 ベーキング時間とパターン径の広がり量

4. 4. 4 噴射圧力変化によるマスキング材の耐ブラスト性

乾式ブラスト加工を行う際に能率を向上させるために噴射圧力を高くさせて加工を行うことがある。この場合、マスキング材が受ける損傷も当然大きくなると考えられる。そこで、ここでは噴射圧力の違いによるマスキング材の摩耗特性について調べた。試験はソーダライムガラス上に厚み $100\mu\text{m}$ 、露光量 $250\text{mJ}/\text{cm}^2$ で $\phi 0.5\text{mm}$ にパターンニングされたものに、WA#600 を噴射圧力 0.15 、 0.25 、 0.35MPa と変化させて加工を行った。

図4.11に走査回数と各噴射圧力でのパターンの摩耗進行を示す。噴射圧力が高いときのマスキング材の摩耗は大きく、いずれの噴射圧力でも同様な傾向を示すと思われる。

図4.12, 13に各噴射圧力における走査回数64回時における各噴射圧力でのマスキング材の表面状態を示す。噴射圧力が高いときのマスキング材の表面が粗く、マスキング材が大きく削り取られる状態であることが分かる。

図4.14に、マスキング材初期摩耗時における摩耗比率（摩耗レート）と、基板であるソーダライムガラスの加工レートとの噴射圧力に対する関係を示す。加工レートは噴射圧力が大きくなるに従い大きく増加するが、摩耗レートはほぼ比例して増加する。これは高噴射圧力での加工が低噴射圧力での加工に対して高能率かつマスキング材の摩耗を低減して行えることを示している。

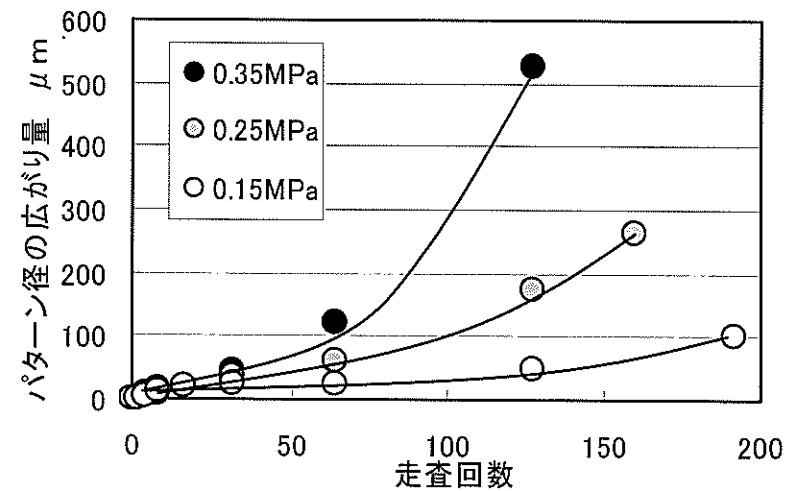


図4.11 圧力変化によるパターン径の進行

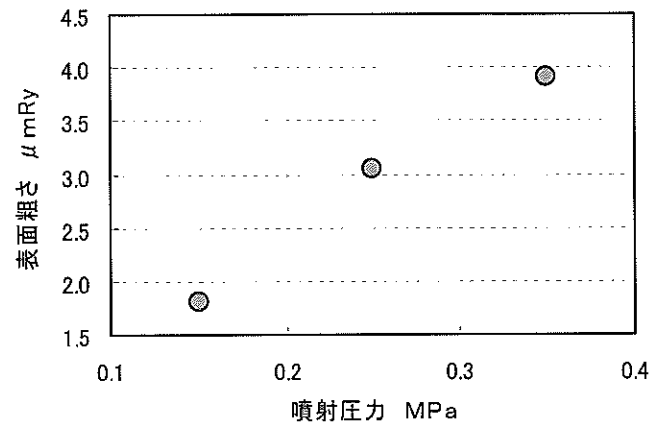


図4.12 噴射圧力と表面粗さの関係

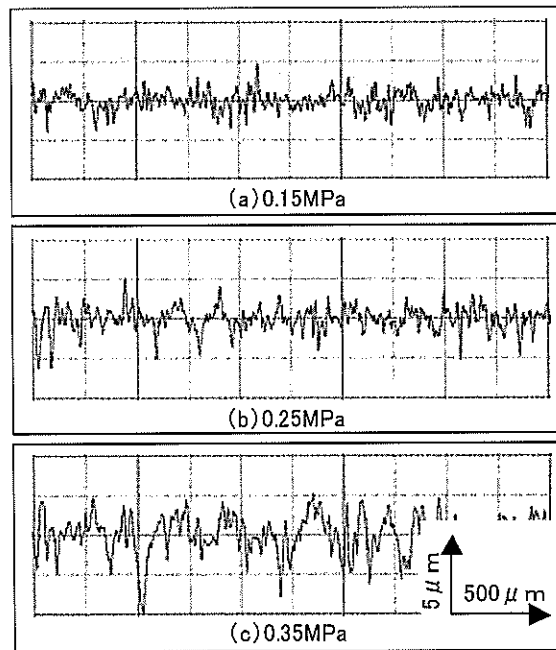


図4.13 走査回数64回での表面粗さ

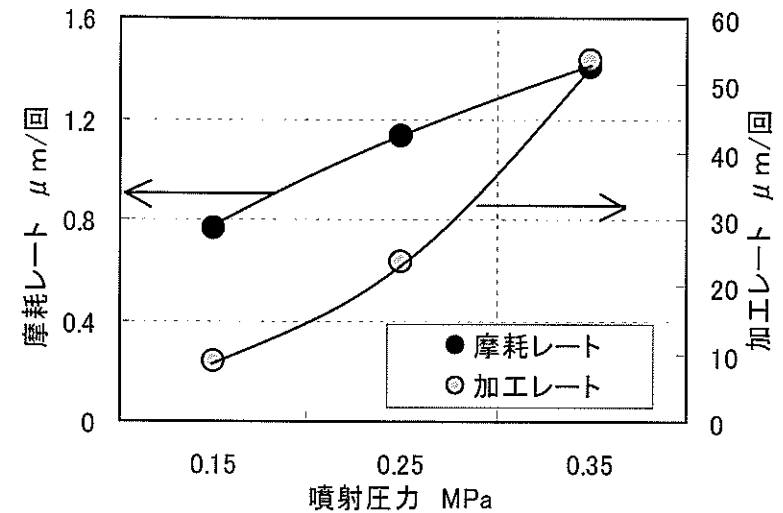


図4.14 各噴射圧力での摩耗・加工レート

4. 4. 5 パターニングの高精細化

ブラスト加工の高精細化はマスキングの高精細化技術にかかっているといえる。耐ブラスト性を付したドライフィルムレジストはその他に比べ厚みが大きく（約 $20\mu\text{m}$ 以上）、紫外線露光に対して低感度であるために高精細なパターンに適さない。それに加え、膨潤現像型のため、微細部分に現像液が回り難く、解像が困難である。そこで高精細なパターンを解像するためには、露光量、現像方法について詳細に検討していかなければならない。

乾式ブラスト加工のパターニングの限界は $20\mu\text{m}$ である。一例として図 4.15 にソーダライムガラス上に形成された $20\mu\text{m}$ の溝加工の例を示す。しかし、 $20\mu\text{m}$ が全ての材料に適用できるわけではない。本工法は硬脆材料を対象としている加工法であり、当然その種類は各種ガラス、セラミックスなど多岐にわたるものである。各種材料でのパターニング限界を表 4.3 に示す。高精細化の最大の壁は各材料のハレーション率が異なることである。フォトリソの際、紫外線を反射しやすい色または表面粗さを有しているとそこでハレーションが生じる。一般には光量の調整またはハレーション防止剤の塗布により対応している。

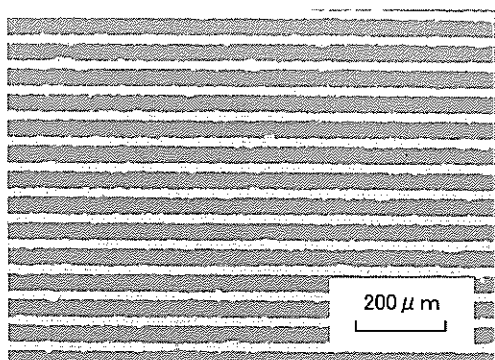


図 4.15 20 μ m 溝加工の例

表 4.3 材料別のパターンニング限界 (μ m)

材料	ライン	穴
シリコン(鏡面)	20	30
ガラス(鏡面)	20	30
炭化珪素	20	30
ステンレス鋼(鏡面)	20	30
ガラス	30	40
銅	30	40
窒化アルミ	50	70
アルミナ	80	100

4. 5 結言

乾式ブラスト加工におけるマスキング材の各種耐ブラスト性および解像性について評価した結果、次の事柄が明らかとなった。

- (1) マスキング材には耐ブラスト性において最適露光量が存在する。その厚みにより適量は異なる。
- (2) マスキング材の摩耗進行過程において、膜厚が減少しない初期摩耗と膜厚が減少しパターンが大きく摩耗する後期摩耗が存在する。
- (3) マスキング材にベーキングを行うことで 2~3 倍の耐ブラスト性を付与することができる。
- (4) 比較的高い噴射圧力での乾式ブラスト加工はマスキング材の摩耗を低減できる。
- (5) 現状の乾式ブラスト加工の最小寸法は 20 μ m である。

参考文献

- 1) 伊澤守康, 渡辺昌知, 八代祐靖, 荻原直幸, 堀川裕道, 小澤勝: 噴射加工による硬脆材料の微細加工, 1998 年度砥粒加工学会学術講演会論文集, (1998)217.
- 2) 厨川常元: アブレイシブ・ジェットマシニングの動向, 1995 年度砥粒加工学会学術講演会論文集, (1995)401.
- 3) 金原摂, 厨川常元, 庄司克雄: グラッシーカーボンのマイクロ穴あけ加工, 1995 年度砥粒加工学会学術講演会論文集, (1995)405
- 4) 厨川常元: マイクロ・アブレイシブ・ジェット・マシニングによる硬脆材料の微細加工に関する研究, 平成 7 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 47.
- 5) 刀原精: PDP におけるブラスト加工の現状と量産対応の課題, LCD Intelligence, No. 8(1997)73
- 6) 伊澤守康, 杉本真樹: マイクロブラスト加工におけるマスキング材の特性 (第一報), 1999 年度砥粒加工学会学術講演会論文集, (1999)109.
- 7) 三島彰生, 吉川隆, 土屋隆, 村松成治, 福谷亮人: 微粒子噴射による微細加工 (第 2 報), 1992 年度精密工学会春季講演大会論文集, (1992)935

第5章 マスクレス微細加工

5.1 緒言

ブラスト加工時に被加工物（ワーク）表面にパターニングを行う方法として、マスクを貼り付けて加工を行うマスキング加工と、マスク貼り付けを行わずワーク表面に直接パターニングを行うマスクレス加工が挙げられる。これらの方式は、要求される加工内容、加工精度、総加工時間等により使い分けられているが、高精度加工が望まれる場合には、高精度加工が可能であるマスキング加工が多く使用されている。

しかしながら、マスクレス加工はマスキング加工と比較して加工時間短縮、使用砥粒量削減、深穴・深溝（高アスペクト比）加工等が可能であり、現状よりも加工能率の向上と加工精度の向上を達成することで使用範囲が広がることが期待される。

そこで、本研究ではマスクレス微細加工における加工能率と加工精度の向上を目的として、噴射制御機構を導入した硬脆材料の微細加工装置の試作を行うと同時に、これまで使用されていなかったロングノズルの開発を行い、噴射制御機構とロングノズルが加工能率・精度に及ぼす影響について検討を行った。

尚、本章ではマスクレス微細加工をA J M（Abrasive Jet Machining）と称しており、以下同加工をA J Mと記す。

5.2 実験方法

本試験にて使用した装置は、小型の噴射材定量供給機構を搭載し、新たに間欠噴射機構を装備し試験に供した。表5.1に本装置の仕様を示す。本装置に使用しているA J Mユニットは、噴射材の定量供給機構および間欠噴射機構の2つの噴射制御機能を導入しており、X-Y-Z-θの4軸制御機能との組合せによりワークに対して各種パターニングが可能である。また砥粒およびノズルは交換が可能であり、種々の加工に対応することが可能である。

表5.1 A J M装置仕様

使用可能砥粒粒度	～ #1000
噴射圧力 MPa	0.1 ～ 1.1
ノズル可動範囲 mm	300×300×150
使用可能ノズル mm	φ0.3 ～ φ1.4
装置寸法 mm	1580×1640×1000

次に、表5.2に試験条件を示す。間欠噴射を使用した加工試験では噴射のON/OFF時間（デューティー比）の変化が加工能率および加工精度に及ぼす影響を、ロングノズルを使用した加工試験ではノズル長さおよびノズル内径が加工深さに及ぼす影響についてそれぞれ試験を行った。加工能率の評価はアスペクト比（穴深/穴径）の測定により行い、加工精度の評価は加工部周辺の欠けや砥粒の飛散による傷の観察より行った。

表5.2 試験条件

使用砥粒	#220、#320、#600
噴射距離 mm	0.5
噴射圧力 MPa	1.0
総噴射時間 sec	5 sec、60 sec
ノズル内径 mm	φ0.4 ～ φ4.0
ノズル長さ mm	10 ～ 200

5.3 実験結果および考察

5.3.1 間欠噴射が加工能率、加工精度に及ぼす影響

本試験では、最初に間欠噴射加工を行う場合に最適な加工条件の選定を行うために、短時間で噴射のON/OFFを行うことが出来るユニットを特別に作成して、試験を行った。図5.1および図5.2にデューティー比が加工深さに及ぼす影響を示す。

まず図5.1より、ON時間が同じ60秒になるように加工を行った場合、噴射ON時間が長くなると加工深さはより深くなっている。またON時間が同じ場合デューティー比が大きいほど、つまりOFF時間が短いほど加工深さが深くなっている。

次に図5.2より、加工時間が長くなった場合、デューティー比が小さいほど加工深さが浅く、加工時間が長くなっても加工が進展していないことがわかる。逆にデューティー比が大きい場合には、加工深さは時間の経過と共に大きくなっており、デューティー比2と0.25の20秒加工時の加工深さを比較すると3倍程度の差が生じている。

図5.1および図5.2では、デューティー比の影響を調査するために作成したユニットを使用して試験を行っているため、ON時間が5ms～20msと極めて短い時間になっているが、今回試作を行った装置のON時間、OFF時間の最小制御時間は300ms～350msとなっている。しかし、デューティー比が大きいほど加工深さが大きくなる傾向は変わらないと考えられる。

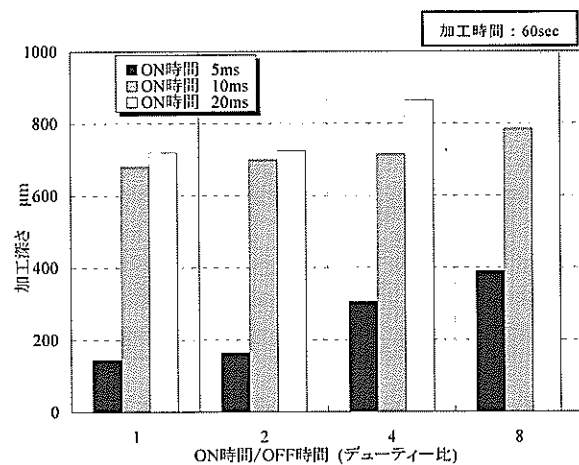


図 5.1 デューティー比が加工深さに及ぼす影響

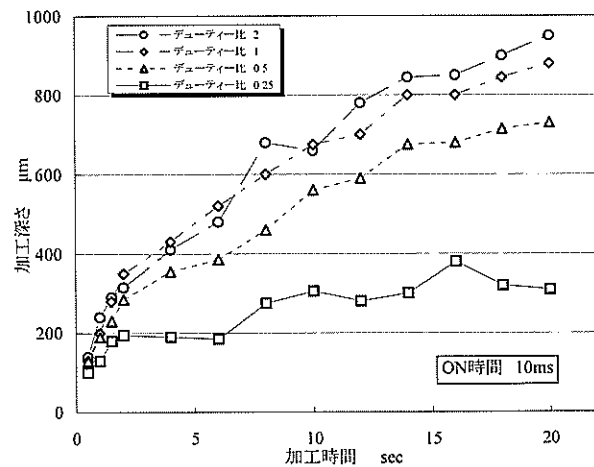


図 5.2 デューティー比による加工深さの時間的推移

以上の結果を元に、試作を行った微細加工装置にてデューティー比を4に固定、噴射材の粒子径がアスペクト比におよぼす影響について試験を行った。結果を図5.3に示す。

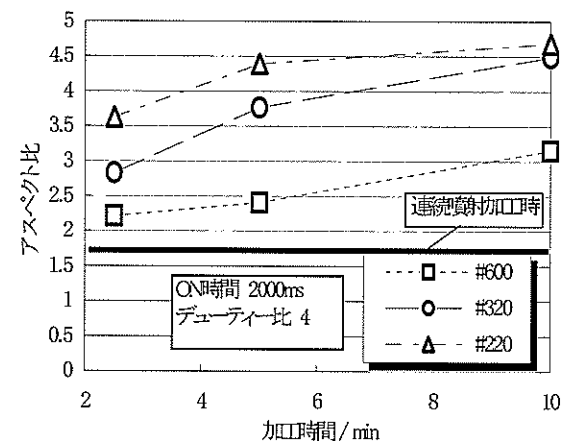


図 5.3 噴射材の粒子径がアスペクト比に及ぼす影響

図5.3より連続噴射加工時と比較して噴射材の粒子径によらずいずれもアスペクト比が大きくなっていることがわかる。特に加工時間10分の場合、連続噴射加工時と比較して#600で2倍、#220および#320では3倍程度のアスペクト比が得られており、間欠噴射が加工深さを向上させていることが明らかである。

次に図5.4に加工後のワーク表面写真を示す。連続噴射では加工された穴の周辺に砥粒の飛散による傷が生じていることがわかるが、間欠噴射ではそのような傷はほとんど確認されず、連続噴射と比較して加工精度が向上していると考えられる。

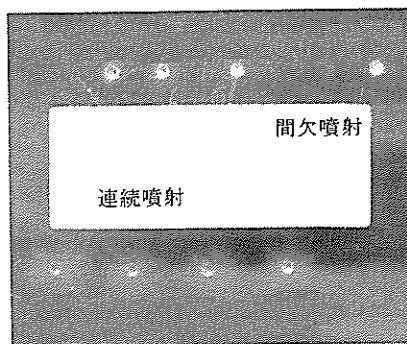


図 5.4 加工後ワーク表面写真

間欠噴射を行った場合、噴射エアは常に供給され続けており砥粒のみ供給・停止がデューティ比に従って繰り返されることとなる。咲山らによると、特に穴加工において砥粒の供給と停止が繰り返された場合、砥粒停止時に噴射エアにより穴中の砥粒が除去されるため、加工穴底面に砥粒が衝突しやすくなり、加工の進展が速くなると考えられる¹⁾²⁾³⁾。

これは咲山らが行った試験によりその有効性が確認されているが、咲山らが行った試験では、砥粒の供給量が数 mg/分程度の極微量であり、噴射量が数 g/分以上の場合には確認されていなかった。

しかしながら、本研究で得られた結果より 4g/分程度の噴射量であっても、間欠噴射を使用して加工を実施すると、連続噴射加工と比較して 2 倍から 3 倍程度のアスペクト比で深穴加工を行うことが確認された。よって任意のアスペクト比で加工を行う場合、間欠噴射を使用することにより、連続噴射加工と比較してより短時間で加工を終了することが可能となり、加工能率の向上を図ることが出来る。

一方図 5.4 に示すように、間欠噴射機能を使用することによりワーク表面に対する傷の発生を押さえることが可能となる。前述したように、間欠噴射機能を用いた場合、噴射エアは連続的に供給しているが、噴射材は供給と停止を繰り返しており、供給と停止のタイミングは任意に変更することが可能である。

仮にデューティ比が 1 で加工を行う場合、砥粒は供給：停止=1:1 で制御されるため、同時間の連続噴射加工と比較して砥粒の使用量はほぼ 2 分の 1 となる。

ノズルから噴射された噴射材は、図 5.5 のようにノズルの先端から円錐状に広がり、ワーク表面に衝突する。この際、実際に加工を進展させる部分は図中 A の部分のみであり、図中 B の部分は加工を進展させるだけのエネルギーを有して

いない。しかしながら、B 部においてガラスやシリコン等のワークに対して衝突した噴射材は、ワーク表面に傷を生じさせる。よって B の部分に衝突する噴射材の量が少ないほどワーク表面への傷の発生を押さえられることになる。

間欠噴射を使用した場合、噴射材使用量は連続噴射と比較して確実に減少させることが可能であり、ワーク表面に対する傷の発生を押さえることが出来ると考えられる。

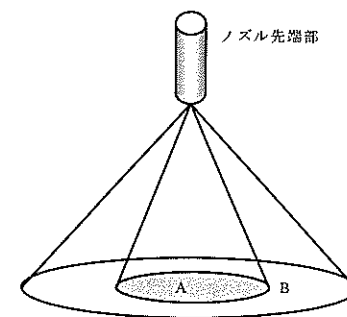


図 5.5 ノズルの先端からの噴射模式図

5. 3. 2 ノズルの長さが加工深さに及ぼす影響

図 5. 6 にノズルの長さが加工深さに及ぼす影響を、図 5. 7 にノズルの内径が加工深さに及ぼす影響を、図 5. 8 にノズルの長さ/ノズルの内径比がアスペクト比に及ぼす影響をそれぞれ示す。

まず図 5. 6 よりノズルの長さが 100mm になるまでいずれのノズルの内径でも加工深さが増加していることがわかる。しかし、ノズルの内径 $\phi 0.4$ と $\phi 0.8$ ではノズルの長さが 100mm を越えると逆に加工深さは低下している。またノズルの内径 $\phi 1.5$ では、ノズルの長さが 200mm に至っても減少に転じていない。

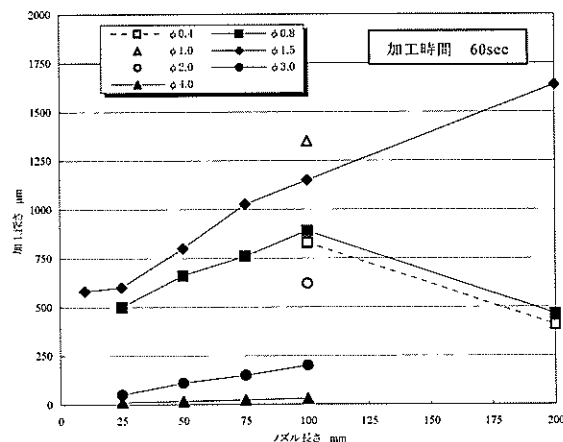


図 5. 6 ノズルの長さが加工深さに及ぼす影響

一方図 5. 7 より、ノズルの長さ 100mm の場合で比較すると、加工深さが最も大きいノズル内径は $\phi 1.0$ であり、ノズルが長くなるに従って加工深さも低下していき、 $\phi 4.0$ のノズルでは約 30 分の 1 にまで低下している。この傾向はノズル内径が小さくなった場合も同様であり、ノズル内径 $\phi 0.8$ と $\phi 0.5$ を見ると、 $\phi 1.0$ と比較して 4 割程度加工深さが減少している。

次に図 5. 8 より、ノズルの長さ/ノズルの内径比の大きいノズルを使用することにより、よりアスペクト比の高い加工を行うことが出来ることがわかる。図 5. 6 では、各ノズルの内径に対してノズルの長さ/ノズルの内径比が 100 ~ 250 程度でアスペクト比が最大となっているが、図 5. 6 の結果を見ると加工深さが最も大きいノズルの長さ/ノズルの内径比は 100 ~ 150 程度の範囲となっており、加工深さが大きいノズルの長さ/ノズルの内径比を持つノズルを使用して加工を行うことにより、高アスペクト比の加工を行うことが可能であることがわかる。

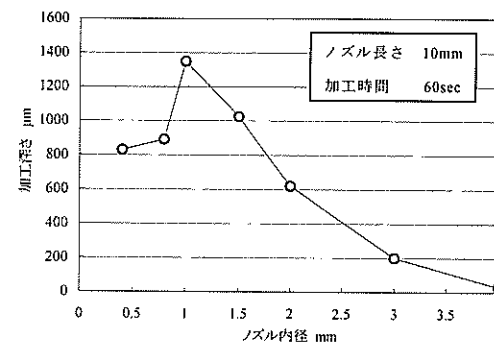


図 5. 7 ノズルの内径が加工深さに及ぼす影響

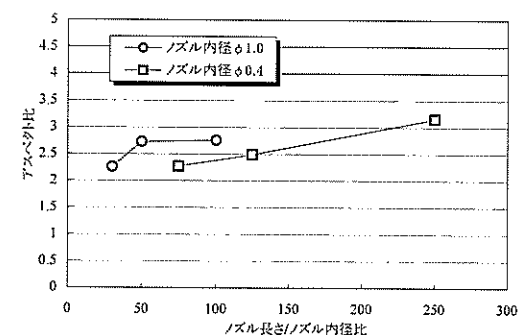


図 5. 8 ノズルの長さ/ノズルの内径比がアスペクト比に及ぼす影響

図 5. 6 ~ 図 5. 8 より、ノズルを長くすると加工深さが向上することが確認された。通常加工で使用されるノズルの長さは 5mm ~ 7mm 程度であるが、ノズルの長さを適切な長さまで長くすることによって加工深さを約 2 倍まで引き上げることが出来ることが明らかとなった。

図 5. 9 に示すように、ノズル長さを長くした場合、加速部が長くなり、ノズル内部で噴射エアによる噴射材の加速が長く行われるために、噴射材の速度が増加すると考えられる。しかしノズルの長さが平衡点に達すると、ノズル内壁と噴射エア、もしくはノズル内壁と噴射材との間に生ずる摩擦力和噴射材の加速が釣り合うため、噴射材の速度は上がらなくなる。さらにノズルが長くなった場合、摩擦力が噴射材の加速を上回り噴射材の速度が低下すると考えられる。

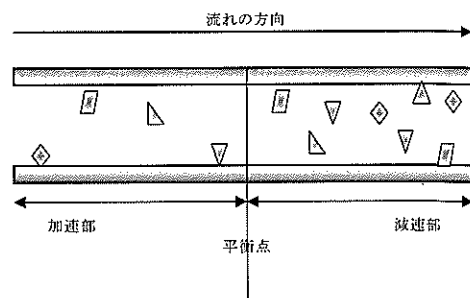


図 5.9 ノズル内部における噴射材の加速状態模式図

より効率的な加工を行うためには、加速部の長さが最大限長くなるようにノズルの長さを適切に設計する必要がある。このためには、各加工条件に対して加速部と減速部の間にある平衡点までの長さを明らかにする必要がある。そこで可視化画像流速計測システム(TSI 製 PIV システム)を使用して、数種類のノズルの長さに対してノズルの先端より噴射される噴射材の速度分布を測定した。

PIV システムは、高輝度のエキシマレーザシート光を2回発光することにより得られる時間差のある2枚の画像から、移動している粒子の速度ベクトルを得る手法である。図 5.10 に測定装置の模式図を、図 5.11 にその測定状態を表す。

本報では図 5.10 のようにノズルの軸線を含む平面に一致するようにレーザシート光を発光した。これにより図 5.11 に示すようにノズルから噴射される噴射材の 2 次元の速度ベクトルが得られる。噴射材の噴射速度は、加工特性を決定する重要な因子で、大きい方が加工能率は大きくなる。

これらの測定より得られた結果を図 5.12 および図 5.13 に示す。まず図 5.12 より、ノズル径 $\phi 0.4$ では、噴射量の多少に関わらずノズルの長さが 100mm の部分で噴射砥粒速度が最大となっている。また図 5.13 より、ノズル径が $\phi 0.8$ になると噴射砥粒速度が最大となるノズル長さは 100mm から 150mm の間になっている。噴射砥粒速度は、平衡点により近い部分で最大になると考えられるため、同一加工条件であってもノズルの内径が変化すると平衡点の位置が移動することがわかる。

このような傾向は他の内径のノズルでも同様であり、各内径のノズルについて同様の測定を行うことにより、各内径に対して最適な長さのノズルを決定することが出来ると思われる。

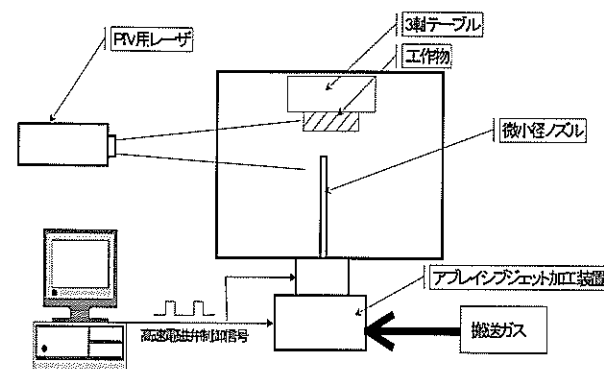


図5.10 砥粒の速度分布測定装置の模式図

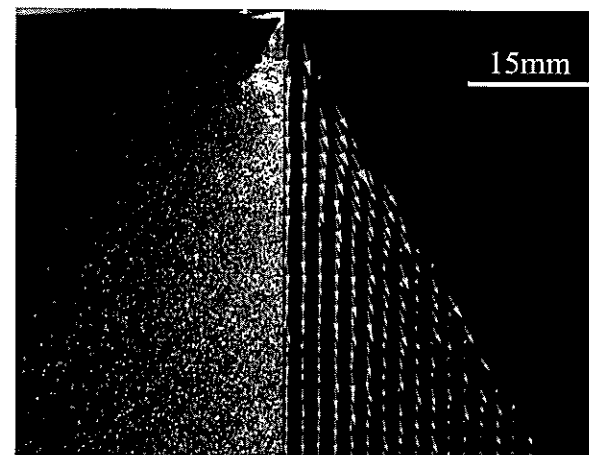


図5.11 噴射材の噴射速度ベクトル測定例

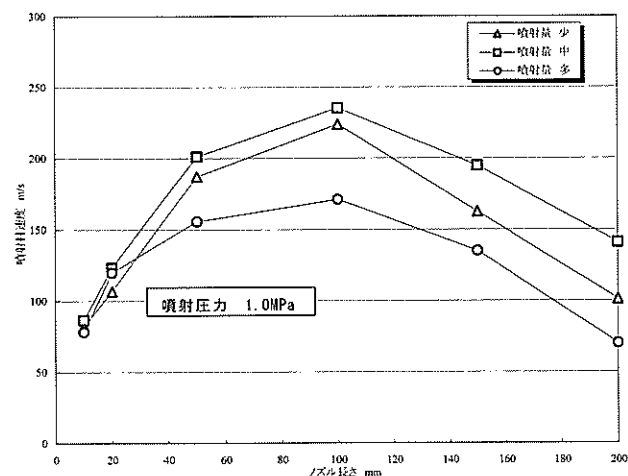


図5.12 ノズル長さと噴射材速度の関係 (φ 0.4)

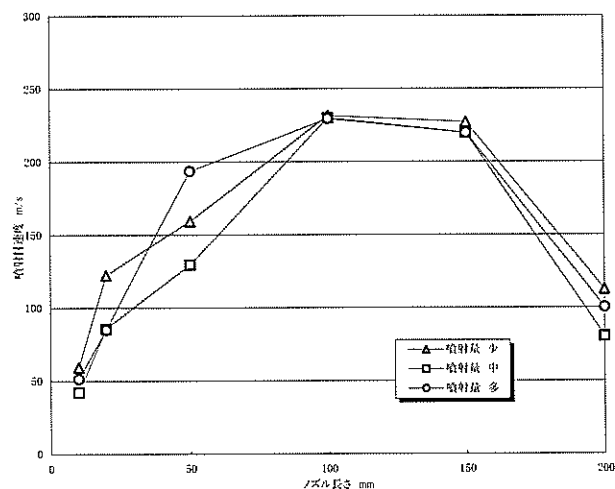


図5.13 ノズル長さと噴射材速度の関係 (φ 0.8)

5. 4 結言

噴射制御機構を導入した硬脆材料の微細加工装置の試作を行い、マスキング加工における加工深さと加工精度の向上を目的とした試験を実施し、以下の結論が得られた。

- (1) 間欠噴射機構を使用して加工を行うことにより、加工深さの向上と加工精度の向上を図ることが可能である。
- (2) 間欠噴射機構を使用して加工を行う場合、噴射 ON 時間が長く噴射 OFF 時間が短い（デューティ比が大きい）ほど加工深さが向上する。
- (3) 間欠噴射機構を利用した穴加工では、アスペクト比（穴深さ/穴径）で最大 4.5 が得られた。
- (4) 間欠噴射機構を使用することにより、加工部周辺に対する傷や割れ等の発生を抑え、加工品位を向上させることが出来る。
- (5) アスペクト比（ノズルの長さ/ノズルの内径）の大きいノズルを使用することにより、加工深さを約 2 倍まで向上させることが可能である。
- (6) ノズルの長さ/ノズルの内径比が 100 ～ 250 程度のノズルを使用すると、2.8 ～ 3.2 程度のアスペクト比（穴深さ/穴径）で加工を行うことが可能である。

参考文献

- 1) 厨川ら：1998 年度精密工学会秋季大会講演論文集 435
- 2) 咲山ら：1999 年度精密工学会春季大会講演論文集 716.
- 3) 咲山ら：1999 年度精密工学会秋季大会講演論文集 276

第6章 微細加工装置の開発と工業的応用

6.1 緒言

序論で述べたように、本研究では噴射加工により微細加工を行うために2つの観点から研究および要素開発を進めてきた。その結果、微粉噴射加工装置として2機種を市場に出すことができた。1つは大きな面積のワークを能率良く、均一に加工することに主眼を置き機種MB1として、また一方微小ワークを対象に、局部を集中的に加工する手法を取り機種MB2を開発できた。

硬脆材料の加工において、加工精度を確保するためにMB1では加工深さのバラツキをノズルに噴射材を定量的に供給することにより制御し、さらに加工寸法をマスキング技術により解決した。MB2では、マスキング無しの直接加工を目指し、ノズル内径を300 μ mと極めて微小にすることにより、噴射パターンの微細化を試みた。

その他、装置化のために加工能率および付加要素に関連する要素技術開発を行い、微粉噴射加工装置として市場に出すことができた。

これらの研究および要素技術開発を通じて、噴射加工による微細加工技術として目指すところは、加工精度10 μ m程度の生産性の高い加工技術であり、加工精度1 μ m程度の研削およびそれ以下のドライエッチング、ケミカルエッチング加工の領域と100 μ m程度の切削、放電加工の領域を補う加工技術および加工装置である。^{1) 3) ~ 8)}

6.2 微細加工装置の概要

前章までの研究成果および開発技術をベースとして、前述した微細加工の要素技術を確認し微粉噴射加工装置 MICROBLASTER を開発した。ここでは基本となる2機種につき述べる。

6.2.1 MICROBLASTER MB1

主としてセンサー用の基板、フラットパネルディスプレイ基板、セラミックス部材の加工用に大きな面積、ワークの均一加工用として開発した。その外観を図6.1に、主な仕様を表6.1に示す。

微粉噴射材として#2000(平均粒子径8 μ m)程度の循環使用が可能で、定量供給装置により噴射材を精度良く切り出し、ノズルから噴射することにより、ワークの加工深さのばらつきを極小に抑えることができ、この種の用途としては十分に実用に供するものと言える。

また異物分離装置および微粉対応サイクロンを設け、機械系、ワークおよび

噴射材等から取り込まれる粗粒や破碎した噴射材の微粉、ワークの加工屑のような微細粉塵を分離し、ワークの損傷を防止し加工の安定化を図っている。

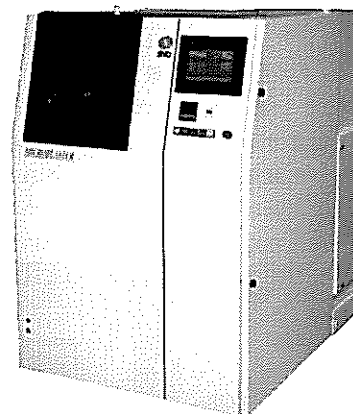


図6.1 微細加工装置 MICROBLASTER MB1の外観

表6.1 MICROBLASTER MB1の仕様

項目	仕様
噴射材	#400~2000 (40 μ m~8 μ m)
加工ワーク	150mm×150mm
噴射機構	微粉定量供給装置
供給精度	±3% (#600) ±5% (#2000)
循環機構	異物分離装置 微粉サイクロン方式
環境	騒音 80dB(A)以下

6.2.2 MICROBLASTER MB2

本装置は、小型化する電子部品の微細加工および液晶パネル用ガラス基板の穴あけ、太陽電池用基板の縁研磨用として開発した。

本加工に関する基本技術は、米国SSホワイト社よりもう50年前以上昔か

ら提案されている。しかしながら加工精度を考えたものではなく、ペンシルブラストと呼ばれ、小径ノズルより噴射し主として水晶振動子のトリミング用途などに用いられた。しかしながら精度加工への取組みは、東北大学工学部の厨川助教授により10年程前より研究されており、その研究成果に基づき米国テキサス・エアーソニクス社より高精度加工に対応した噴射ユニットを導入し、噴射材の回収系およびワークの位置決め、搬送系を主要な要素技術として捉え、装置としてアセンブリすることで商品化した。

本装置の外観を図6.2に示す。またMB1、MB2の噴射に関する仕様比較を表6.2に示す。

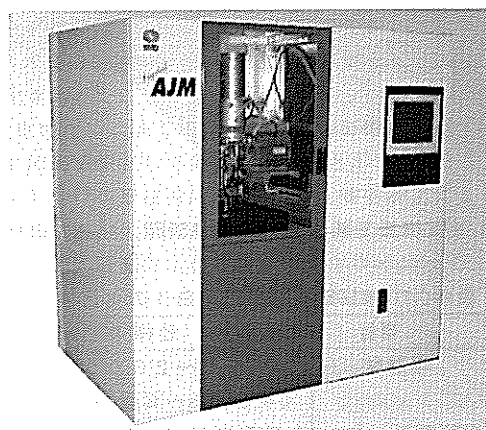


図6.2 微細加工装置 MICROBLASTER MB2の外観

表6.2 噴射に関する装置仕様比較

項目	MB1	MB2
噴射材粒度	#400~2000	#400~1000
噴射量 (g/min.)	50~500	0~50
循環使用	可	可(材料ロス必要)
噴射圧力 (MPa)	0.05~0.5	0.2~2.5
ノズル	φ6~8	φ0.3~1.4

6.3 微粉噴射材の循環システム

微細加工装置の概要につき述べたが、本研究の基幹を成すものは噴射材である。ここでは、その噴射材が微細加工装置においてどのような流れで利用されるのかを述べる。

6.3.1 MB1の循環システム

図6.3に微細加工装置MB1における噴射材の流れをフローチャートに示した。加工に供する砥粒は、定量供給装置より一定量切り出され、噴射ノズルから工作物に対して噴射される。ブラスト室内に噴射された砥粒および噴射材の粒度調整のためブラスト室内へ供給された新品の追加砥粒は、空気輸送により回収される際に、ブラスト室内およびダクト中で混合される。その後サイクロンにて微粉を捕集し分離、微粉を除いた回収砥粒が定量供給装置に戻されリサイクルされる。

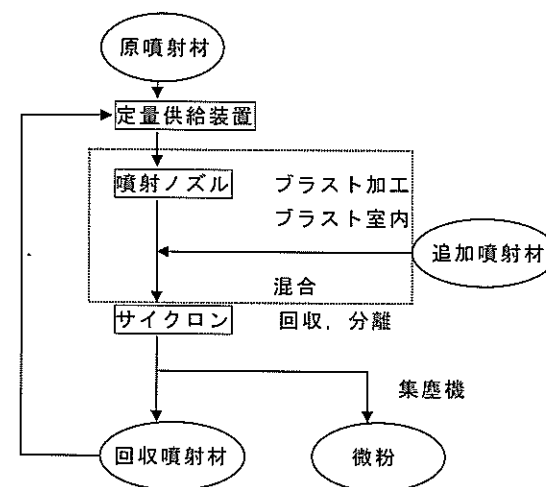


図6.3 微細加工装置MB1における噴射材のフローチャート

センサー用のガラス基板の穴あけ加工における前述の噴射材循環システムの実用例を示す。微細加工装置の外観を図6.4に、加工装置に付帯している噴射材の定量供給装置の外観を図6.5、噴射材の補給装置の外観を図6.6に示す。またこの循環系において用いられる噴射材の代表値を図6.7、噴射材の経時的な粒度分布変化を図6.8に示す。これは原噴射材としてGC#600を選定し、量産時における工作物の加工レートを一定に保つために、噴射材

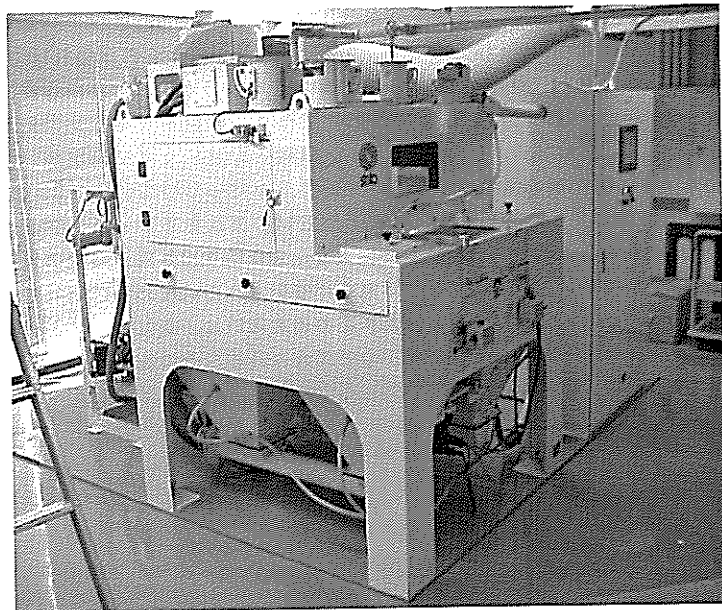


図 6.4 センサー基板加工用微細加工装置外観

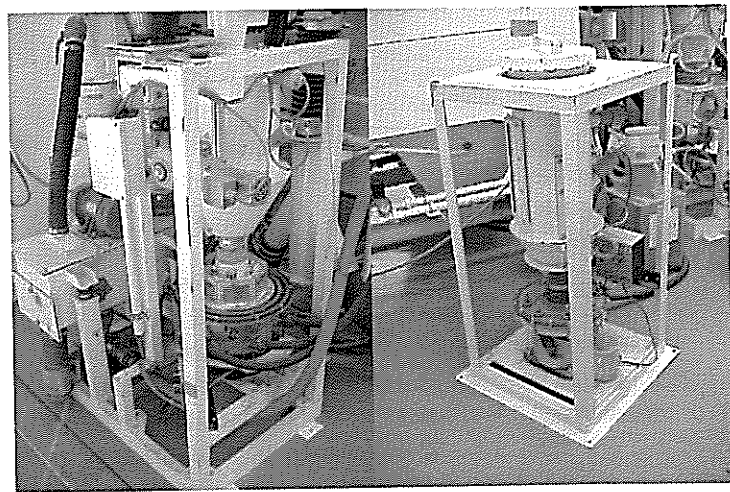


図 6.5 定量供給装置外観

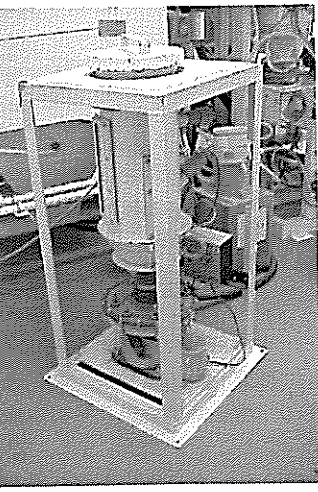


図 6.6 補給装置外観

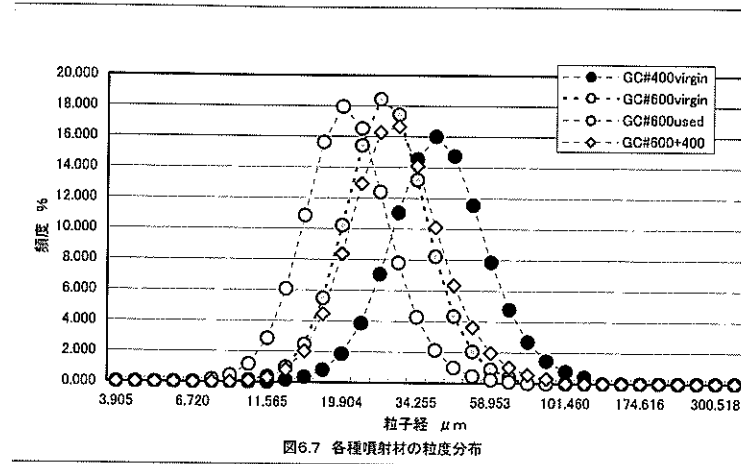


図6.7 各種噴射材の粒度分布

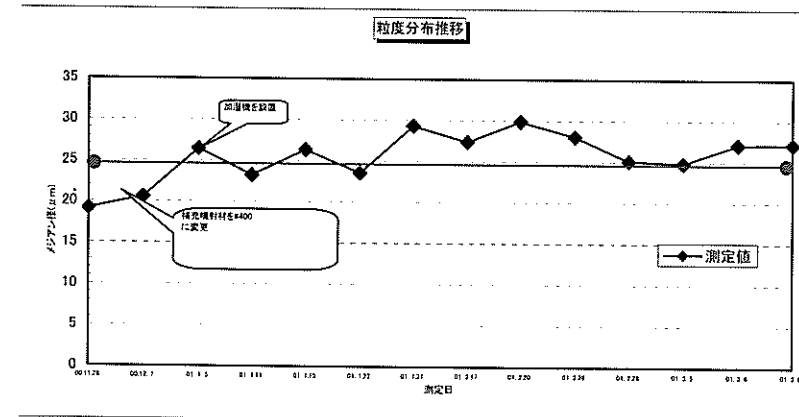


図 6.8 MB1における噴射材の粒度分布の推移

の損耗に対し追加噴射材としてGC#400を噴射量の2.5%投入し、加工の安定を計った事例である。

図 6.7 に示すように初期投入されたGC#600は、加工の進展に伴い次第に損耗し小径化していくが、追加噴射材としてGC#400を加えていった場合、元のGC#600とほぼ同程度の粒度分布を示し、図 6.8 に示すように経時的に見ても比較的安定して推移していることが確認されている。

6. 3. 2 MB 2の循環システム²⁾

図 6.9 に微細加工装置MB 2における噴射材の流れをフローチャートに示した。微細加工装置MB 2は加圧タイプのチャンバーを持ち、噴射材の循環を自動化し難い。そのため噴射された噴射材を回収するまではプラスト装置内で行なうが、追加噴射材との混合はオフラインにて行なうよう設計されている。加工に供する噴射材は、定量供給装置より一定量切り出され、噴射ノズルから工作物に対して噴射される。プラスト室内に噴射された噴射材は空気輸送により回収される。その後サイクロンにて微粉を捕集し分離、微粉を除いた回収噴射材および加工レートを一定にするために追加噴射材を補充し混合機にて混合、再生噴射材と成した後定量供給装置に戻されリサイクルされる。

本システムは、誘電体フィルターの電極を形成するため金属膜を剥離する用途に応用されている。

MB 1, MB 2の2種の噴射材の循環システムを述べたが、いずれにしても噴射加工のメリットである生産性を最大限発揮するため、噴射材の損耗特性を十分に把握した循環システムは不可欠なものであり、本研究の成果により実用に供されている。

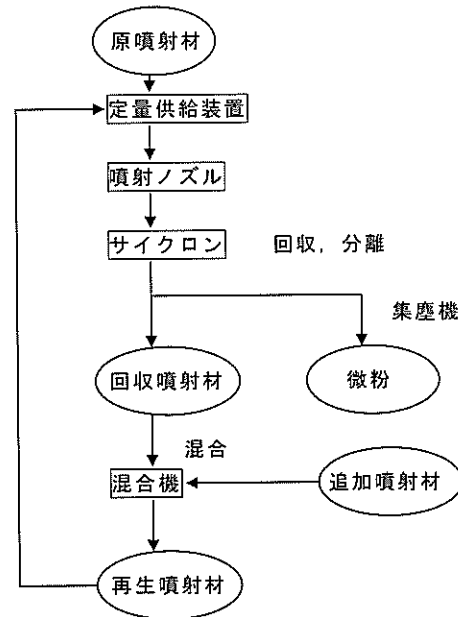


図 6. 9 微細加工装置MB 2における噴射材のフローチャート

6. 4 加工特性

6. 4. 1 噴射加工における硬脆材料の加工特性

今まで噴射加工による微細加工装置の概要およびその中で利用される噴射材の循環システムにつき述べてきたが、ここでは噴射加工による微細加工における基礎的な加工特性につき述べる。

各種硬脆材料に対する加工性を図 6.10 に示した。ガラスの加工性を1とした指標から強度の低い脆い材料ほど加工性は良く、反対に強度の高い材料は加工性が悪いのがわかる。

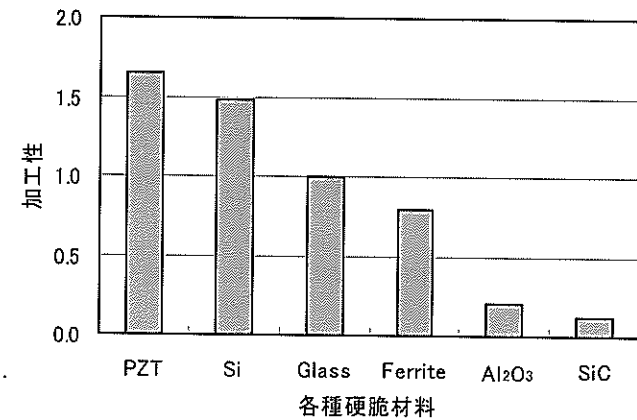


図6.10 各種硬脆材料のプラスト加工性比較

図 6.11, 6.12 には、ガラスを加工した場合の加工面粗さを噴射材の粒度別に示した。図 6.11 は一般的なガラスであるソーダライムガラスを対象に、図 6.12 は液晶のパネルなどに用いられる無アルカリガラスを対象に同一の加工条件にて加工した場合の粗さを示している。これらの図からは噴射材の粒度と加工面粗さには有る程度の相関関係が認められるが、粒子径が $5\mu\text{m}$ 以下になるとほとんど加工されておらず相関関係を逸脱する。また無アルカリガラスはソーダライムガラスと比較し、硬いため加工性が悪くそのため加工面粗さが小さくなっているのがわかる。

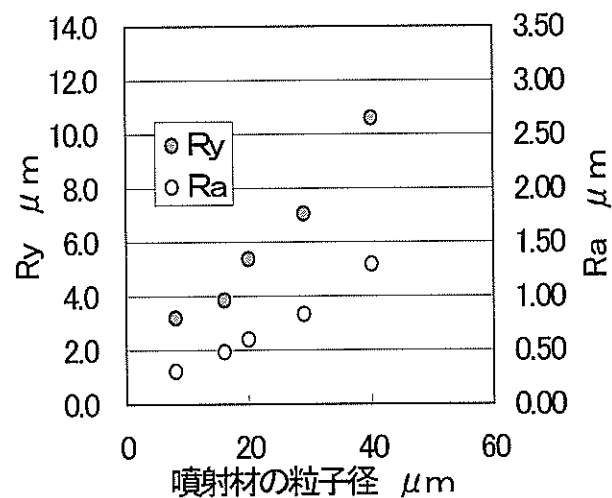


図6.11 噴射材粒度別ガラスの加工面粗さ
(ソーダライムガラスの場合)

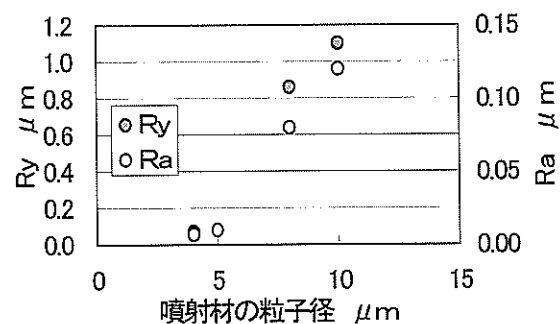


図6.12 噴射材粒度別ガラスの加工面粗さ
(無アルカリガラスの場合)

6. 4. 2 マスクを用いた加工における加工特性

乾式ブラストによる微細加工に期待されることの1つに高品位加工があげられる。クラックやチッピングの少ない、いわゆるダメージフリーの加工である。前述したフォトリソマスクを用いたセンサー用ガラス基板の穴加工の事例を図6.13に示す。500μm厚みのガラス基板に穴径400μmの貫通穴を開ける用途である。#600の噴射材を使用し、数μmレベルのチッピングに収まり、アスペクト比が1以上の加工を実現している。図6.14に示すように、設計値φ400μmに対し、マスク寸法は±3μm程度できているが、加工によりマスクが摩耗し加工後のワーク寸法は平均でφ433μmとなった。この寸法φ433μmに対し3σで20.8μmの精度にて加工ができた。これらマスクを使う加工では寸法精度は概ね±10~50μmで、使用するマスクの厚み、加工ワークの種類、噴射条件により規制される。

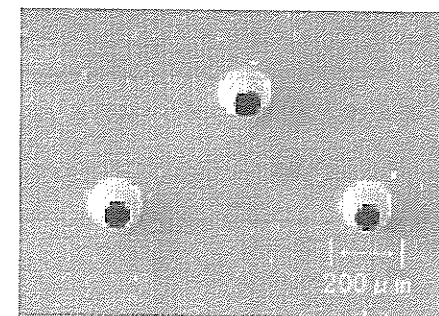


図 6.13 センサー用ガラス基板の穴加工の事例

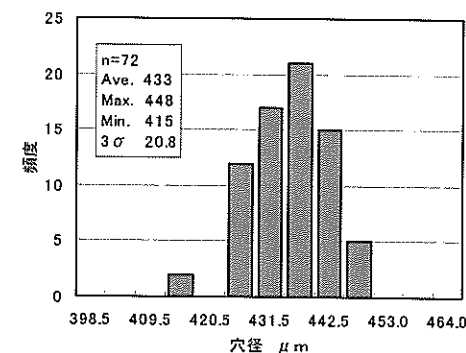


図 6.14 センサー用ガラス基板の穴加工のヒストグラム

シリコンウェハへの止まり穴加工例を図 6.15 に示す。シリコンウェハ上へ格子状 ($4 \times 2 \text{ mm}$) に深さ $170 \mu\text{m}$ の加工を行うものである。図 6.16 に示すように加工深さ $170 \mu\text{m}$ に対して 3σ が $6 \mu\text{m}$ という極めて高い精度にて加工が可能である。

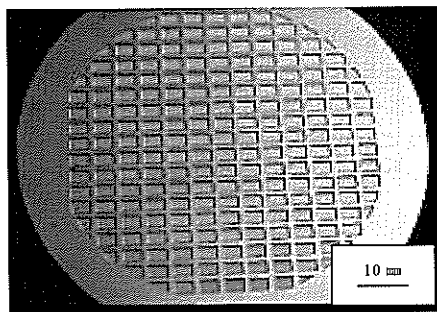


図 6.15 シリコンウェハへの止まり穴加工例

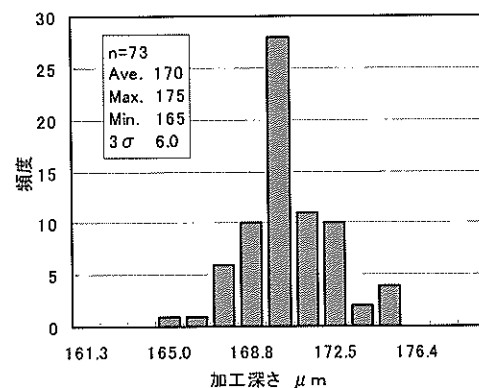


図 6.16 シリコンウェハへの止まり穴加工の加工深さのヒストグラム

また近年開発が盛んな MEMS における部品の微細加工にマイクロブラスト工法が適用されている。その適用例を図 6.17 に示す。材料に圧電材料として多用されている PZT 基板を用い、その上にマイクロ構造体を形成したものである。

また、マスキング、加工を繰り返すことにより段付加工が行え、複雑 3 次元形状の部品作成が可能である。

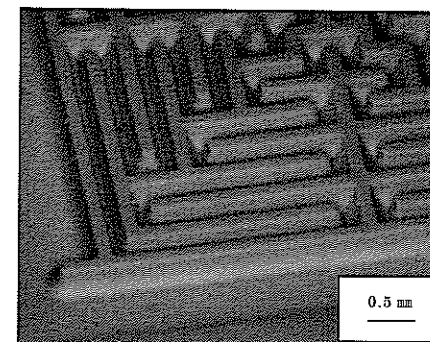


図 6.17 PZT マイクロ構造体

6. 4. 3 マスクレス加工における加工特性

ここではA J M装置を用いてマスクレス加工を行った事例を述べる。図6.18に穴および溝パターン加工例を示す。パイレックスガラスに、WA#600の噴射材を使用し、噴射圧力0.3MPaで加工したものである。間欠噴射機構を利用し、加工の始点、終点処理をしており、従来問題であった加工開始と終了時の異常噴射がなく安定した溝加工が実現できている。

溝幅0.5mm、間隔0.5mmの溝加工と、穴径 $\phi 0.5$ にて穴加工が行われており、穴の間隔は次第に狭くなるように加工されている。溝と溝の間がはっきりと分かれており、また穴周辺にもガラスが変色している部分はほとんど見られない。これは、加工部周辺への砥粒の飛散が少ないためである。

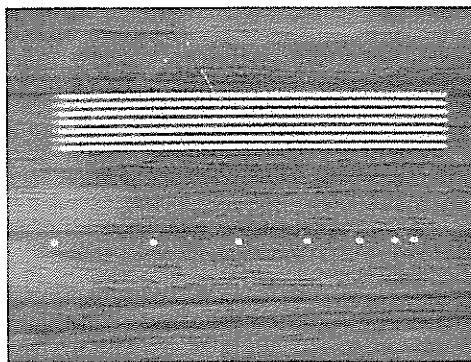


図 6.18 マスクレス穴および溝パターン加工

図6.19に深穴加工の事例を示す。ソーダライムガラスに、WA#600を用いて噴射圧力1.0MPaにて $\phi 1.0$ のノズルにて穴加工を行った例である。デューティー比4（ON時間0.5秒）で間欠噴射加工を行ったところ、深さ約3.8mmまで加工された。連続噴射で同様の加工を行うと、加工深さは1.5mm～2.0mmが限度であることから間欠噴射を使用することにより高いアスペクト比の加工が可能となることがわかる。光ファイバー挿入用の治具などの加工に利用される。

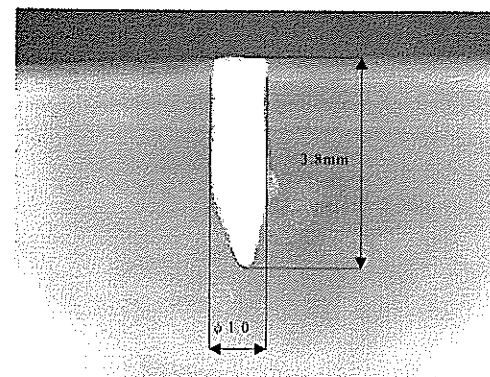


図6.19 深穴加工

次に噴射圧力制御を使った事例として、グラデーションパターン加工を図6.20に示す。SUS304の鏡面材にガラスビーズを噴射圧力を順次変化させながら加工を行っている。

X-Y軸による位置決め制御と噴射圧力制御を組み合わせることにより、無段階で連続グラデーションパターン加工の実施を可能にした。図6.21に示すように、表面粗さを連続的に変化させることが可能であり、加工開始位置からの距離と表面粗さの組合せは任意に変更することが出来る。液晶導光板用の金型の加工、時計のカバーガラスの加工などに利用される。

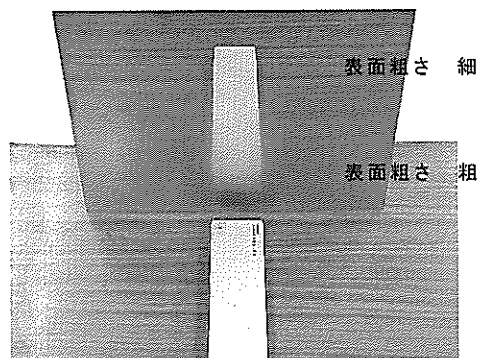


図6.20 グラデーションパターン加工

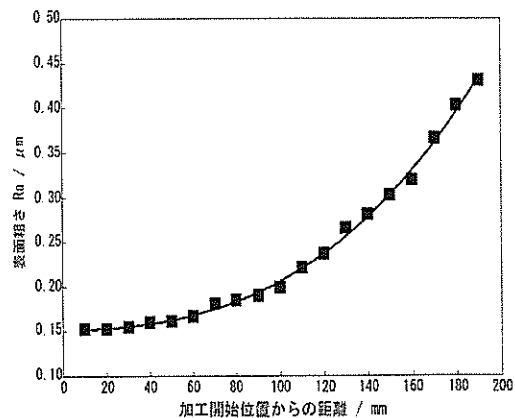


図6.21 グラデーションパターン表面粗さ測定結果

次に2次元パターン加工例を図6.22に示す。窒化アルミセラミックスにG C #600の噴射材を使用し、噴射圧力1.0MPaで一筆書きの要領で加工を行った事例である。溝の重なる点に噴射制御による交点処理を施し、X-Y-θ軸による位置決め制御を使用することにより、マスクレスでワーク上に直接パターンニングを行うことが可能となった。マスキング加工と比較して、加工時間を5分の1程度に短縮する事が可能であり、使用する砥粒量も10分の1以下にする事が出来る。半導体装置のウエハ固定用の静電チャック、吸着板などの加工に利用できる。

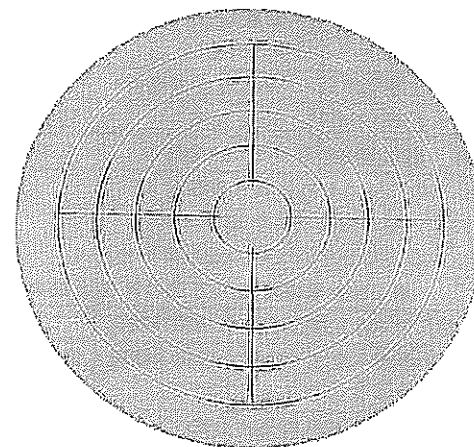


図6.22 2次元パターン加工

また、その加工特性値につき、現状の技術で到達できる加工精度、加工品位、につき表6.3に、また他の各種加工方法との特性比較を表6.4に示す。

これらの表から明らかなように、噴射加工では10～20μm程度の加工精度を維持しつつ、比較的生産性が高く、加工変質層およびチップの小さい高品位の加工が期待できる。さらに平面状の複雑形状に対応できるなど多くのメリットが認められる。

表 6.3 加工の特性値

項目	MB 1	MB 2
加工精度	(最小加工寸法)	
穴あけ	30±5 μm 7スベ°外比 1 形状:テ-ハ°状	400±50 μm 7スベ°外比 1 以上 形状:テ-ハ°状
溝加工	20±5 μm 7スベ°外比 2 形状:テ-ハ°状	400±50 μm 7スベ°外比 1 以上 形状:テ-ハ°状
加工深さ	ハ°ラツキ±5%	ハ°ラツキ±10%
加工品位	(最良の場合)	
チツビ°ンク°	5 μm 以下	10 μm 以下
表面粗さ	0.02 μmRa	0.1 μmRa

表 6.4 各種加工方法の特性比較

加工方法	加工精度			加工形状		コスト		適用材料	生産性
	寸法	粗さ	変質	単純	複雑	工具	装置		
切削	○	○	△	○	△	△	○	△	◎
研削	◎	◎	○	○	△	×	△	○	×
超音波加工	○	○	○	○	○	×	○	○	△
エキシマレーザ	○	△	○	○	◎	—	×	◎	×
レーザ	○	△	×	○	○	—	×	○	◎
放電加工	△	△	△	○	○	×	△	×	△
ケミカルエッチング	○	○	◎	○	○	—	◎	×	×
ドライエッチング	◎	○	◎	○	○	—	×	△	×
乾式プラスト加工	△	△	○	○	◎	○	○	○	○

注: ◎: 最良、○: 良、△: 可、×: 悪い、—: 関係なし

6.5 微細加工の工業的応用

今まで微粉噴射材に関する基礎的な押さえをし、微細加工に応用するための要素技術、特に噴射材の定量噴射技術、高精度マスキング技術およびマスクレス微細加工技術につき述べてきた。ここでは、これらの諸要素技術が組み込まれた実際の工業的な応用例につき、表 6.5 に示した具体例につき述べる。

乾式プラスト加工による微細加工に最も期待されているのは、高い生産性である。また半導体、電子部品、LCD 関連の材料は特に高い精度の加工が要求される用途もある。各アプリケーションの狙いおよび必要な要素技術を述べその効果を確認したい。

表 6.5 マイクロプラスト工法の適用例

分野	用途
半導体	半導体センサー基板の穴あけ、溝加工 IC 樹脂モールドパッケージのバリ取り
電子部品	デバイスウェハの穴あけ、溝加工 セラミックスウェハサセプタのエッチング 電極形成 (太陽電池、誘電体フィルタ、積層基板) タンタルコンデンサの微細バリ取り プリント基板のスミヤ処理
FPD 関連	動圧軸受のパターン溝加工 導電膜剥離 PDP の隔壁形成 ガラス基板の止まり穴加工 LCD 導光板金型のグラデーション加工

6.5.1 半導体部材への応用

急速に増加しつつある MEMS 技術を用いた半導体センサーにおいて、シリコン素子をバックアップまたは保持する台座ガラスの穴あけ、ザグリおよび切断加工などに用いられている。特にコストが厳しい自動車業界向け圧力センサー、加速度センサー、ジャイロセンサー用に用いられている。その他自動車業界に限らず、情報通信、分析、バイオ、福祉用途などその応用は今後とも増加していくものと思われる。

図 6.23 に圧力センサーの基板加工例を示す。また、これらの加工を実現している微細加工装置を図 6.24 に示す。この装置は、噴射材の定量供給装置お

よび噴射材の消耗にあわせ、新品の噴射材を自動的に補給する機構を装備し、6本の噴射ノズルを配置し加工の高能率化を図っている。4インチウエハを1カセット分25枚同時に加工することができ、きわめて高い生産性をあげている。また、特にジャイロセンサーの加工例は高精度マスクング技術を駆使し、基板の両面から異なる形状の加工を実現している。両面マスクアライナを使用した高精度マスク製作によるもので、最も生産性の高いマイクロマシニングであると言える。

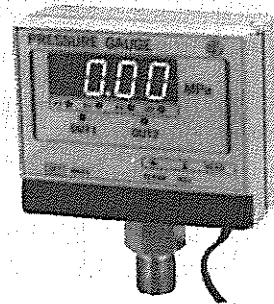
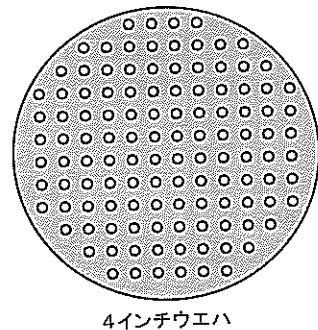
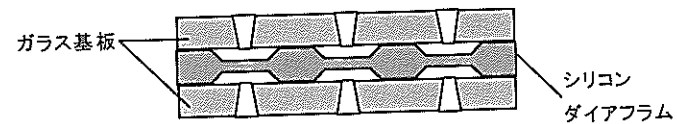


図 6.23 圧力センサーの基板加工例

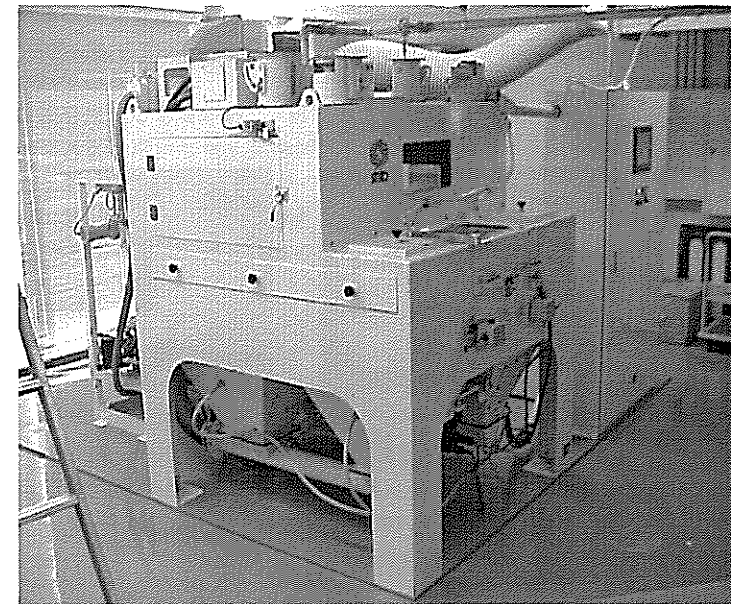


図 6.24 センサー基板加工用微細加工装置

ICパッケージでは、樹脂モールド面の粗面化、カーボン蒸着物の除去、リードフレームの不純物除去など、微細砥粒の噴射により加工対象表面を微細加工し機能アップする適用途がある。図 6.25、6.26 に適用例を示す。

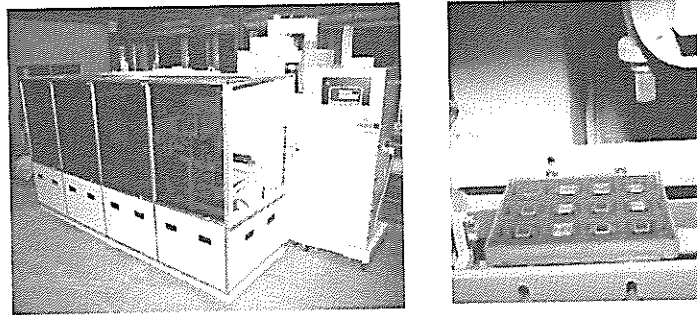


図 6.25 ICパッケージの微細加工装置および加工ワーク

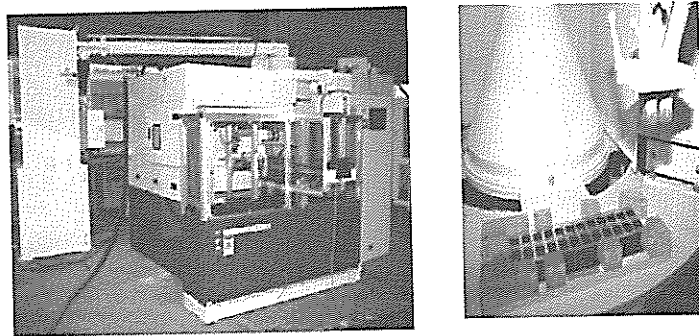


図 6.26 リードフレームの不純物除去装置および加工ワーク

半導体製造装置におけるプラズマエッチング装置、検査装置などでシリコンウエハを固定するために使用される吸着治具(材質: アルミナ、チタ化アルミなど)には、その吸着面に真空吸着するためのピンや溝などのパターンニングが要求されている。特に、ピン加工はピン径0.1~3mm程度のピンを吸着面に無数に形成する必要がある、他の加工方法では現実的に不可能であり、フォトリソマスクを用いたマイクロプラスト加工が最も効果を発揮する適用途と言える。図 6.27 にサセプターの加工例を、図 6.28 にその加工装置を示す。この加工装置は800角のワークテーブルを持ち、φ300用のウエハサセプター4枚を同時に加工できるもので、4本ノズル使用とし加工の高能率化を図っている。

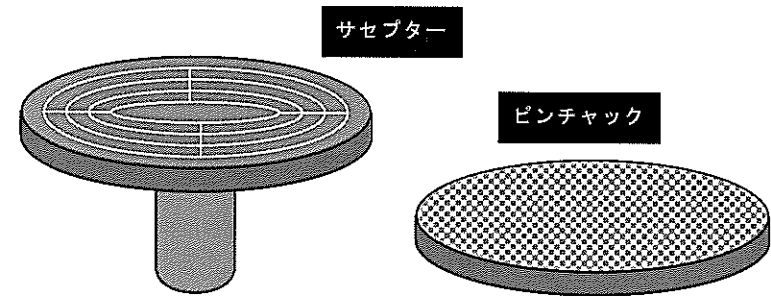


図 6.27 セラミックスサセプターの加工例

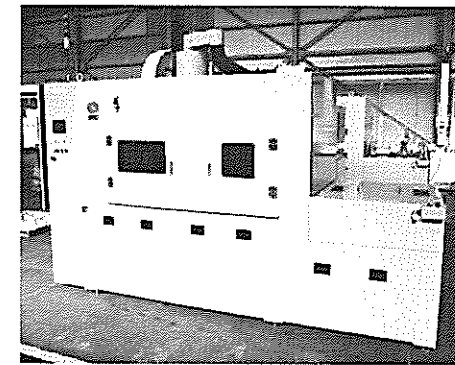


図 6.28 セラミックスサセプター加工装置外観

6. 5. 2 電子部品への応用

電子部品への適用例として、携帯電話、GPSなどに使用される周波数変換セラミックスフィルター（誘電体）、チップコンデンサー、タンタルコンデンサーなどがある。また、HDD用モーター、レーザープリンターなどに用いられる動圧軸受の駆動用溝加工などに応用されている。

誘電体フィルターでは、セラミックス表面に形成されている金属膜を部分的に剥離することにより電極を形成するもので、使い捨てのレジストマスクではなく、メタルマスクを用いてそれを何度も使用することでコストメリットを出している。図 6. 29 にその事例を示す。

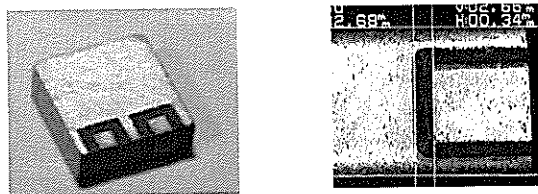


図 6. 29 誘電体フィルターの電極形成例

タンタルコンデンサーにおける適用は、図 6. 30 に示すようにコンデンサー表面に形成される樹脂のヒゲバリを除去することである。電子部品としての機能を損なわないようプラスチック系の噴射材を用い、その噴射材を定量かつ低圧で噴射することでバリ除去に成功した。図 6. 31 に使用されているマイクロブラスターを示す。この装置は、ワークをカセット・トゥ・カセットで処理することができる全自動処理装置で、従来手作業で行われていたこの作業を自動化することで、大きな省人化を果たすことが出来た。

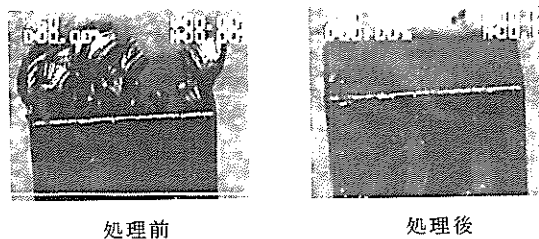


図 6. 30 タンタルコンデンサーの微細バリ取り事例

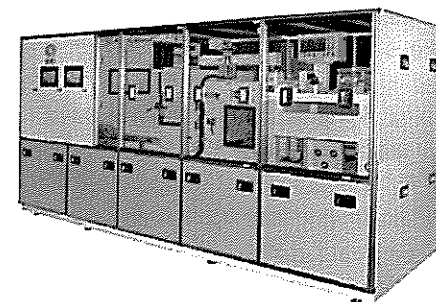


図 6. 31 タンタルコンデンサーの微細バリ取り用マイクロブラスター

動圧軸受では、動圧発生用の溝をスラストまたはラジアル軸受の表面に形成する必要があり、特に他の工法が使えないセラミックス部材の加工にマイクロブラスト工法が応用されている。特にラジアル軸受の場合には、円筒面へのマスキングが必要であり、加工精度を求められる場合には、ワークにレジストを貼り付けた後直接露光する必要があり、特殊な露光方式がとられている。

また、金属部材では従来ケミカルエッチングにて加工が行われているが、加工精度面および廃液処理などに問題を抱えており適用が検討されている。図 6. 32 にセラミックス部材への加工例を示す。

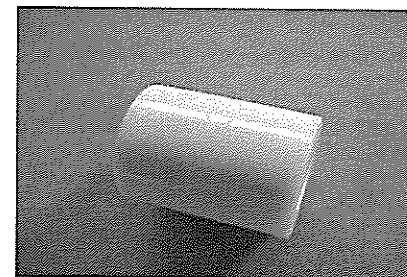


図 6. 32 セラミックス部材への動圧溝形成例

6. 5. 3 フラットパネルディスプレイへの応用

フラットパネルでは、PDPパネルの背面板の隔壁形成に用いられている。ガラス基板上に形成された低融点ガラスペースト層にフォトリソマスクを施し、ブラストにてパターンニングし後焼成するもので、現状主流の工法となっている。

液晶用途では、導光板の金型シボ加工に用いられ、マスクを用いたドットシボ加工や 6.4.2 節で述べたマスクを用いない連続グラデーション加工用途に使用されている。

最近の適用例では、有機ELディスプレイのデバイス封止用カバーガラスの乾燥剤埋め込み用止まり穴加工に用いられている。図 6.33 に 500x400 基板の加工例を示す。携帯電話やカーナビゲーション用に適用が開始されており今後使用量が拡大していくものと思われる。

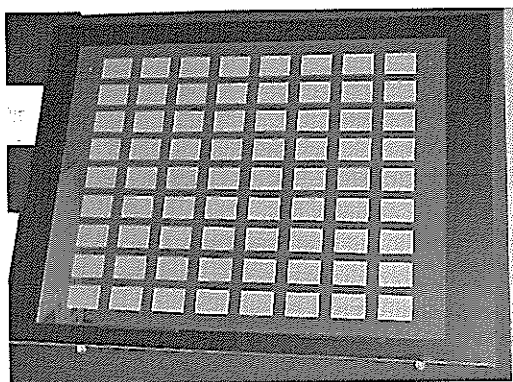


図 6.33 有機ELディスプレイカバーガラス加工例

6. 6 結言

噴射加工により微細加工を行うために2つの観点から開発を進め、1つは大きな面積のワークを能率良く、均一に加工することに主眼を置き機種MB1を、また一方微小ワークを対象に、局部を集中的に加工する手法を取り機種MB2を開発した。その結果下記の事柄が実現できた。

- (1) 硬脆材料の加工において、加工精度を確保するためにMB1では加工深さのパラツキをノズルに噴射材を定量的に供給することにより制御し、 3σ で5%以下にできた。さらに加工寸法をマスキング技術により解決し、最小 $30\mu\text{m}$ の穴あけ加工を達成した。また穴径のパラツキも 3σ で5%以下にできた。
- (2) MB2では、マスキング無しで直接加工を達成した。その結果 $\phi 0.3\text{mm}$ のノズルから直接加工できるようになった。
- (3) 噴射材については、MB1ではノズルから噴射された噴射材を回収し、破碎した微粉を分離し、原料の噴射材粒度よりも若干粗い粒度分布を持つ噴射材を混合し、粒度分布を一定とする噴射材の連続循環システムを構築した。またMB2ではパッチ処理ではあるが同様な噴射材の循環システムを構築した。
- (4) 現状の噴射加工で達成できる加工の特性値を明らかにした。その結果、噴射加工では最小寸法 $20\mu\text{m}$ の溝加工が可能であり、加工深さのパラツキを $\pm 5\%$ 以内に抑え、チッピングを $5\mu\text{m}$ 以下とする硬脆材料の高精度な加工が可能となった。
- (5) マスクレス加工において、噴射制御を用いることにより穴・溝パターン加工、深穴加工、グラデーションパターン加工、2次元パターン加工など種々の加工を実施することができた。
- (6) 微細加工の工業的応用として、半導体、電子部品、フラットパネルディスプレイ分野などで実用化できた。いずれも乾式ブラスト加工の最大限の特徴を生かした生産性を発揮しており、従来工法であるケミカルエッチング、超音波加工、研削加工などに対し大きなメリットをもたらし産業界に大きく寄与できた。

参考文献

- 1) 平山, 伊澤, 北嶋: マイクロブラスト工法, 砥粒加工学会誌, 46, 3(2002)111
- 2) 特願 2000-187842 高精度ブラスト加工法
- 3) 伊澤: 噴射加工による半導体・電子材料の微細加工技術, 新東技報, 18(1998)29
- 4) 伊澤: 固気二相流噴流を使ったマイクロブラスト工法(噴射加工による半導体・電子材料の微細加工技術), 日本混相流学会「混相流」, 13, 3(1999)255
- 5) 伊澤: マイクロブラスト工法—半導体・電子材料の微細加工技術—, 日本工業出版「クリーンテクノロジー」, 9, 7(1999)49
- 6) 伊澤: 噴射加工の動向と応用, 砥粒加工学会誌, 44, 1(2000)11
- 7) 伊澤: マイクロブラスト工法, 砥粒加工学会誌, 44, 2(2000)77
- 8) 伊澤: マイクロブラスト工法, 大河出版「ツールエンジニア」, 5(2000)

第7章 総括

近年, マイクロマシンパーツ, 半導体センサ等の開発が盛んになり, シリコン, ガラス, セラミックス, 金属およびこれらの複合材料などを微細加工する需要が高まり, またこれらが量産化されるにおよびコストを追求した生産性の高い加工技術が求められるようになった。

乾式ブラスト加工法は, 加工液を一切使用しないドライな加工であること, 生産性が高いこと, 加工熱による加工変質層を生じにくいことなどの理由から, 最近硬脆材料の微細加工に適用されるようになってきている。

しかしながら, 従来のブラスト加工法は寸法精度を保証する加工技術という観点からは全くとらえられておらず, 基礎的な研究もなされぬままエレクトロニクス部品の微細加工へ応用されているのが現状である。微細加工に応用するとなると, 従来さほど大きな問題とされなかった加工量の時間的变化が製品の加工品位や加工能率に直接的に影響を及ぼすことになり, これらを究明することが重要な課題となっている。

そこで本研究では, 乾式ブラスト加工法を微細加工技術として実用性の高い加工技術として普及させるため, その生命線であり, 特に従来の乾式ブラストではあまり考慮されなかった加工精度の因子を取り上げ, 微細加工の高精度化に向け, その加工精度に影響を与える要素として, 最近の研究でも全く報告の無い, 微粉噴射材およびその加工特性, 損耗特性, 噴射材の定量噴射技術, マスキング技術, マスクレス微細加工を取り上げ, その基礎的な面から研究および開発を進めた。本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

第2章では, 本研究の主テーマである噴射材の経時変化をとらえ, ガラス, セラミックスなどの硬脆材料に対し, その加工特性および噴射材の損耗特性につき基礎面からの検討を加えた。ブラスト加工による微細加工における噴射条件を確立するために, 噴射材には硬脆材料の加工に対して一般的に使用されるGC砥粒およびWA砥粒を用い, 工作物に一般的な硬脆材料であるガラス材およびセラミックスを適用して, 各噴射条件が噴射材の破碎プロセスおよび加工量, さらに工作物表面に及ぼす影響を実験的に解明し以下の結論を得た。

(1) ガラス材のブラスト加工に対する噴射材において, 破碎を起し易いGC砥粒では加工量の減少割合が大きくなり, 破碎を起しにくい靱性の高いWA砥粒では噴射回数が増加しても常に安定した加工量を維持することができる。

(2) 噴射材の比重が加工特性に及ぼす影響はほとんどない。

- (3) 噴射材の粒子径が小さいと加工量は安定する。しかし、粒子径が大きくなると加工量は増大するが、噴射材の破砕の進展が活発になるために安定しなくなる。
- (4) 噴射量が少なくなると加工量は増大するが、噴射材の破砕が進展し易くなる。また、噴射量が多くなりすぎる場合には、噴射材同士の干渉によって加工量が少なくなるだけでなく、噴射材同士の衝突によって噴射材の破砕が進展し易くなる。
- (5) 工作物の硬度が高くなるほど噴射材は破砕し易く、平均粒子径の減少割合が大きくなる。
- (6) セラミックスにおいて、加工量は噴射材の硬度による影響が大きく現れ、G C 砥粒の噴射材では効率の良い加工を行うことが可能である。
- (7) ガラス材において、加工表面の粗さは噴射材の材質が異なる場合にその平均粒子径だけでなく、硬度や形状が影響を及ぼす。また、噴射材の材質が同一の場合にはその粒子径の影響を直接受ける。
- (8) 工作物の硬度が噴射材と同等の場合には、加工表面の粗さには噴射材の平均粒子径だけでなく、その硬度や形状が大きな影響を及ぼす。

以上より、微細加工を目的としたブラスト加工における噴射条件と加工特性との関係が実験的に明らかとなった。

第3章では、微細加工を高精度で行うため、微粉噴射材の噴射量を制御し定量的に噴射するための供給装置の開発につき述べ以下の結論を得た。

- (1) 噴射材の定量供給装置において、流動層方式、振動フィーダー方式、スクリュウフィーダー方式およびテーブルフィーダー方式の4種を検討した結果、噴射材の凝集が起こらずかつ定量性の高い方式として、振動フィーダー方式が選定できた。
- (2) 振動フィーダー方式による定量供給装置を使用し、ガラスの加工試験を行なったところ加工深さバラツキにて $\pm 3\%$ 程度の加工結果が得られた。この値は十分に実用に供するものである。
- (3) 加工量に対する噴射材の噴射量には極大値が存在し、その値は噴射材の粒度が細かいほど小さいことが明らかとなった。

第4章では、高精度加工をするため、加工寸法を規制する因子としてマスキング技術を取り上げ、実用化におけるマスキング材の損耗特性および加工精度に影響を及ぼす解像性つき検討を加えた結果、次の事柄が明らかとなった。

- (1) マスキング材には耐ブラスト性において最適露光量が存在する。その厚みにより適量は異なる。

- (2) マスキング材の摩耗進行過程において、膜厚が減少しない初期摩耗と膜厚が減少しパターンが大きく摩耗する後期摩耗が存在する。
- (3) マスキング材にベーキングを行うことで2～3倍の耐ブラスト性を付与することができる。
- (4) 比較的高い噴射圧力での乾式ブラスト加工はマスキング材の摩耗を低減できる。
- (5) 現状の乾式ブラスト加工で達成できる最小寸法は $20\mu\text{m}$ である。

第5章では、マスキングに頼らず微細加工することを目指し、加工精度を支配する因子としてノズルを取り上げた。また噴射制御機構を導入し微粉噴射材をノズルから定量的または間欠的に噴射し、一筆書きの要領で加工を行うマスキング微細加工につき、加工深さと加工精度の向上を目的とした試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 間欠噴射機構を使用して加工を行うことにより、加工深さの向上と加工精度の向上を図ることが可能である。
- (2) 間欠噴射機構を使用して加工を行う場合、噴射 ON 時間が長く噴射 OFF 時間が短い（デューティー比が大きい）ほど加工深さが向上する。
- (3) 間欠噴射機構を利用した穴加工では、アスペクト比（穴深さ/穴径）で最大4.5が得られた。
- (4) 間欠噴射機構を使用することにより、加工部周辺に対する傷や割れ等の発生を抑え、加工品位を向上させることが出来る。
- (5) アスペクト比（ノズルの長さ/ノズルの内径）の大きいノズルを使用することにより、加工深さを約2倍まで向上させることが可能である。
- (6) ノズルの長さ/ノズルの内径比が100～250程度のノズルを使用すると、2.8～3.2程度のアスペクト比（穴深さ/穴径）で加工を行うことが可能である。

第6章では、微細加工するための要素技術を盛り込んだ微細加工装置の開発につき述べ、第2章の研究成果を盛り込んだ実機で使用される場合の噴射材の循環システムにつき記述し実用面での確認をした。また半導体、電子部品、フラットパネルディスプレイ分野など実用化例につき記述した。その結果下記の事柄が実現できた。

- (1) 硬脆材料の加工において、加工精度を確保するためにMB1では加工深さのバラツキをノズルに噴射材を定量的に供給することにより制御し、 3σ で5%以下にできた。さらに加工寸法をマスキング技術により解決し、最小 $30\mu\text{m}$ の穴あけ加工を達成した。また穴径のバラツキも 3σ

で5%以下にできた。

- (2) MB 2では、マスキング無しで直接加工を達成した。その結果 $\phi 0.3$ mmのノズルから直接加工できるようになった。
- (3) 噴射材については、MB 1ではノズルから噴射された噴射材を回収し、破碎した微粉を分離し、原料の噴射材粒度よりも若干粗い粒度分布を持つ噴射材を混合し、粒度分布を一定とする噴射材の連続循環システムを構築した。またMB 2ではバッチ処理ではあるが同様な噴射材の循環システムを構築した。
- (4) 現状の噴射加工で達成できる加工の特性値を明らかにした。その結果、噴射加工では最小寸法 $20\mu\text{m}$ の溝加工が可能であり、加工深さのバラツキを $\pm 5\%$ 以内に抑え、チップングを $5\mu\text{m}$ 以下とする硬脆材料の高精度な加工が可能となった。
- (5) マスクレス加工において、噴射制御を用いることにより穴・溝パターン加工、深穴加工、グラデーションパターン加工、2次元パターン加工など種々の加工を実施することができた。
- (6) 微細加工の工業的応用として、半導体、電子部品、フラットパネルディスプレイ分野などに実用化できた。いずれも乾式ブラスト加工の最大限の特徴を生かした生産性を発揮しており、従来工法であるケミカルエッチング、超音波加工、研削加工などに対し大きなメリットをもたらした産業界に大きく寄与できた。

謝 辞

本研究は、新東ブレーター株式会社にお世話になり、その開発テーマとして取り上げた「精密ブラスト」を、1995年より開始して以来続けてきた技術開発の成果、およびその主要な要素とする微粉噴射材に関し、共同研究として格別のご尽力を頂いた関西大学工学部機械工学科北嶋教授および研究室の研究の成果をまとめたものである。

本研究を行うに際して、終始ご懇切なご指導、ご助言、ご教示を賜りました北嶋弘一教授に対して深甚なる感謝の意を表します。また本研究をまとめるにあたり正嶋を射るご討論、ご教示を賜った関西大学工学部機械工学科新家昇教授と機械システム工学科樋口誠宏教授に厚く感謝の意を表します。

また研究室において実験の遂行および結果のまとめにつきご尽力頂いた木村善信氏（現在帝人㈱）、野中正貴氏（現在静岡バイオニア㈱）、山本泰三氏に厚く御礼申し上げます。

さらに、本研究において有益なご指導とご支援を賜った東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻厨川常元教授に厚く御礼申し上げます。

さらに、研究資金の一部をご提供頂きました財団法人科学技術振興事業団に厚く御礼申し上げます。

また本研究および開発を遂行するに当たり、物的および精神的な面から暖かい励ましと資材の提供を頂きました、新東ブレーター株式会社日江井敏会長、武田祐次郎社長を始め、実務を担当されました開発、技術、製造および関係部署の諸氏に厚く御礼申し上げます。さらに論文をまとめるに当たり、暖かい励ましとご配慮を頂きました新東工業株式会社永井謙会長、矢野武副会長、平山正之社長に心から感謝の意を表します。

最後に、常に多大なる精神的な励ましをしてくれ、支え続けてくれた妻：美恵子、父：謙次、母：律子および長男：康太郎、次男：雄貴に心より感謝します。

本研究に関する学術論文および学術講演会発表

【学術論文】

1. 伊澤, 北嶋, 野中, 渡辺: ドライブラスト加工に関する研究 (第1報)
— 噴射条件が加工特性に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会誌, 44, 7(2000)334
2. 伊澤, 北嶋, 野中: ドライブラスト加工に関する研究 (第2報)
— 工作物材質が噴射材の破碎に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会誌, 45, 7(2001)36
3. 伊澤, 杉本, 北嶋: 乾式ブラスト加工におけるマスキング材の損耗特性
— マスキング用感光性樹脂の耐ブラスト性 —, 砥粒加工学会誌, 45, 12(2001)34
4. 伊澤, 北嶋, 野中, 山本: ドライブラスト加工に関する研究 (第3報)
— 硬脆材料の加工面粗さに及ぼす噴射材の影響 —, 砥粒加工学会誌, 46, 4(2002)195

【学術講演会発表】

1. 伊澤, 北嶋, 木村, 野中: 乾式ブラスト加工に関する基礎的研究 (第1報)
— 噴射条件が噴射材の損耗特性に及ぼす影響について —, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999)715
2. 北嶋, 野中, 伊澤: 乾式ブラスト加工に関する基礎的研究 (第2報)
— 噴射材が加工特性に及ぼす影響 —, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2000)238
3. 北嶋, 野中, 伊澤: 乾式ブラスト加工に関する基礎的研究 (第3報)
— 噴射エネルギーと加工特性の関係について —, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2001)32
4. 山本, 北嶋, 伊澤, 杉本: ドライブラストの加工特性に及ぼす噴射材材質の影響, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2002)
5. 伊澤, 渡辺, 八代, 荻原, 堀川, 小澤: 噴射加工による硬脆材料の微細加工, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (1998)218
6. 伊澤, 杉本: マイクロブラスト加工におけるマスキング材の特性, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (1999)
7. 伊澤, 北嶋, 野中, 渡辺: ドライブラスト加工に関する研究 (第1報) — 噴射条件が加工特性に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (1999)
8. 伊澤, 杉本: マイクロブラスト加工におけるマスキング材の特性 (第2報) —

マスク材種の違いによるブラスト耐性 —, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (2000)

9. 伊澤, 北嶋, 野中: ドライブラスト加工に関する研究 (第2報) — 工作物材質が噴射材の破碎に及ぼす影響 —, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (2000)
10. 伊澤, 北嶋, 野中, 山本: ドライブラスト加工に関する研究 (第3報)
— 硬脆材料の加工面粗さに及ぼす噴射材の影響 —, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (2001)
11. 伊澤, 北嶋, 山本: ドライブラスト加工に関する研究 (第4報) — 硬脆材料の加工面に及ぼす噴射材の影響 —, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (2002)
12. 渡部, 伊澤, 八代, 荻原: 噴射制御機構を導入した硬脆材料の微細加工装置の開発, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (2002)
13. 伊藤, 伊澤, 内村, 坂, 文: 噴射加工によるセラミックスの表面強靱化, 砥粒加工学会学術講演大会講演論文集, (2002)
14. 伊澤, 杉本, 北嶋: マイクロブラスト加工における硬脆材料の加工特性, 機械学会生産加工部門講演大会講演論文集, (2000)

【国際会議】

1. 伊澤: マイクロブラスト工法 — 噴射加工による半導体・電子材料の微細加工技術 —, Proceedings of 4th Korea-Japan Joint Technical Conference on Surface Finishing & Burr Technology, (1999)139
2. 伊澤: マイクロブラスト工法, 仁川大学 ITIC 国際技術セミナー, (2000)
3. K. Kitajima, M. Nonaka, M. Izawa: Fundamental Study on Dry Blasting— Effects of Work Piece Material on Fracture of Abrasive Grain —, The Korean Association of Machining Engineers The Society of Grinding Engineers, Korean Society of Precision Engineering, ISAAT2001(2001)
4. K. Kitajima, T. Yamamoto, M. Izawa: A Fundamental Study on Dry Blasting: Effects of Abrasive Grains on Surface Roughness, The Hong Kong University of Science and Technology, The Japan Society for Abrasive Technology, ISAAT2002, (2002)

【その他の論文および発表】

1. 伊澤: 噴射加工による半導体・電子材料の微細加工技術, 新東技報, 18(1998)29
2. 伊澤: 固気二相流噴流を使ったマイクロブラスト工法 (噴射加工による半

導体・電子材料の微細加工技術), 日本混相流学会「混相流」, 13, 3(1999)255

3. 伊澤: マイクロブラスト工法ー半導体・電子材料の微細加工技術ー, 日本工業出版「クリーンテクノロジー」, 9, 7(1999)49
4. 伊澤: 噴射加工の動向と応用, 砥粒加工学会誌, 44, 1(2000)11
5. 伊澤: マイクロブラスト工法, 砥粒加工学会誌, 44, 2(2000)77
6. 伊澤: マイクロブラスト工法, 大河出版「ツールエンジニア」, 5(2000)
7. 伊澤: マイクロブラスト工法による微細バリ取り・仕上げ技術, 日刊工業新聞社「機械技術」, 9(2000)
8. 平山, 伊澤, 北嶋: マイクロブラスト工法, 砥粒加工学会誌, 46, 3(2002)111
9. 伊澤, 杉本: マイクロブラスト加工, 産業技術サービスセンター「ナノマイクロマシン技術総覧」, (2002)

【受賞】

1. 平成13年度関西大学工業技術研究所賛助員会産学協同賞
2. 平成13年度砥粒加工学会技術賞
3. 平成14年度精密工学会高城賞

【特許】

1. 特許 No. 2872967: ブラスト加工用マスキング材及びその製造方法並びに再生方法
2. 特許 No. 2876400: 投射材の定量供給装置
3. USP No. 6,371,839: Constant feeding apparatus for abrasives
4. 特開平 11-000866: ブラスト加工装置用投射材定量供給装置
5. 特願平 11-274720: 高精細サンドブラスト加工法
6. 特願 2000-41213: 噴射加工装置用ノズルおよび噴射加工装置
7. 特願 2000-63051: 投射材の定量供給装置
8. 特願 2000-187842: 高精度ブラスト加工法
9. 特願 2000-23032: ワークの噴射切断方法
10. 特願 2000-316394: 導光板および導光板成型型並びにその製造方法
11. 特願 2000-332306: 高精度ブラスト加工法及び高精度ブラスト加工装置
12. 特願 2000-332307: ブラスト加工用マスキングパターンの形成方法
13. 特願 2001-11025: 太陽電池パネルの仕上加工方法
14. 特願 2001-37224: 孔明け加工方法
15. 特願 2001-49087: 機能性セラミックスの表面強靱化方法
16. 特願 2001-216082: ブラスト加工法
17. 特願 2001-278338: グラデーションパターンの形成方法およびその形成装

置

18. 特願 2002-41370: 機能性硬脆材料の表面強靱化方法
19. 特願 2002-102132: 加圧式のエアープラスト装置に用いる噴射ノズルおよびその噴射ノズルを用いたエアープラスト加工方法

