博士論文

マイクロメカニカル加工のための デスクトップ駆動システムの研究

2008年3月

埼玉大学大学院理工学研究科 (博士後期課程)

情報数理科学専攻(主指導教員 大森 整)

上原 嘉宏

「マイクロメカニカル加工のためのデスクトップ駆動システムの研究」

1. 序章

1-1 研究の背景 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1-2 マイクロ加工とデスクトップ駆動システム ・・・・・・・・・・・・・・・
1-3 本論文の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1-4 参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2. ELID研削によるデスクトップ加工
2-1 緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19
2-2 3軸デスクトップ駆動システムによる超硬合金レンズ金型の鏡面研削 ・21
2-3 加工精度の調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
2-3-1 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
2-3-2 実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25
2-4 非球面加工・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27
2-4-1 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27
2-4-2 実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30
2-5 3軸デスクトップ駆動システムによる超硬合金のマイクロツール研削 ・36
2-5-1 マイクロツール加工用ELID研削ユニット(旋回電極式ELID研削ユニッ
$\vdash \qquad \cdots \qquad $
2-5-2 デスクトップ駆動システムのための研削液供給方法 ・・・・・41
2-5-3 デスクトップ駆動システムのためのツルーイングシステム・・・44
2-5-4 マイクロツールの研削加工結果・・・・・・・・・・・・・46
2-5-5 マイクロツールの評価について ・・・・・・・・・・・・・52
2-5-6 マイクロツールの加工条件の最適化 ・・・・・・・・・・55
2-5-7 マイクロツールの表面性状と破壊強度の関係 ・・・・・・・59
2-6 結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62
2-7 参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63
3.4軸デスクトップ駆動システムの開発および性能評価
3-1 緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・65
3-2 4軸デスクトップ駆動システムの開発経過 ・・・・・・・・・・65
3-2-1 4軸デスクトップ駆動システムの機械精度・・・・・・・・・69
3-2-1-1 静的精度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69
3-2-1-2 4軸デスクトップ駆動システムの仕様および特徴 ・・・・・69
3-3 4軸デスクトップ駆動システムによる平面研削加工 ・・・・・・・・75
3-3-1 実験装置および実験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・75
3-3-2 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76
3-4 4軸デスクトップ駆動システムによるポケット形状の切削加工 ・・・・77

3-4-1 実験装置および実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・77
3-4-2 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・78
3-4-3 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・79
3-5 4軸デスクトップ駆動システムによるレンズの鏡面研削加工・・・・・80
3-5-1 実験装置および実験条件・・・・・・・・・・・・・・・80
3-5-2 実験結果および考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・80
3-5-3 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・81
3-6 4軸デスクトップ駆動システムの鏡面切削加工の試み ・・・・・・82
3-6-1 実験装置および実験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・82
3-6-2 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85
3-6-3 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
3-7 4軸デスクトップ駆動システムの構造 ・・・・・・・・・・・88
$3-7-1$ \checkmark \neg \checkmark \cdot
3-7-2 門型構造 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・95
3-7-3 解析結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
3-7-4 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・113
3-8 機械特性の評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・115
3-9 4軸デスクトップ駆動システムの姿勢変化による使用 ・・・・・・117
3-10 結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・118
3-11 参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・120
4. 4軸デスクトップ駆動システムによるマイクロメカニカル加工
4-1 諸言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・121
4-2 4軸デスクトップ駆動システムによる非球面レンズの鏡面研削加工 ・・121
4-2-1 4軸デスクトップ駆動システムにおける鏡面研削実験 ・・・・・121
4-2-2 4軸デスクトップ駆動システムにおける機上計測加工 ・・・・・124
4-2-3 4軸デスクトップ駆動システムにより加工された非球面レンズの評価
$\cdots \cdots $
4-2-4 ELID研削による非球面レンズのポリッシングレス仕上げ加工
•••••129
4-2-5 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・130
4-3 球面レンズの高能率鏡面研削加工 ・・・・・・・・・・・・・・・130
4-3-1 CG方式による球面レンズの高能率鏡面研削加工 ・・・・・130
4-3-2 実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・134
4-3-3 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・137
4-3-4 酸化セリウム砥石の効果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・140
4-3-5 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・141

4-4 マイクロツールによるマイクロ切削加工特性 ・・・・・・・・・142
4-4-1 マイクロツール ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・142
4-4-2 切削加工方法およびその条件 ・・・・・・・・・・・・・・・142
4-4-3 マイクロツールの送り速度の影響 ・・・・・・・・・・・・145
4-4-4 マイクロツールの切り込み量の影響 ・・・・・・・・・・・148
4-4-5 マイクロ彫刻による文字加工 ・・・・・・・・・・・・・・150
4-4-6 マイクロツールによる金型材への切削加工 ・・・・・・・151
4-4-7 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・153
4-5 結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・153
4-6 参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・155
5. イオンショットドレッシング法によるマイクログラインディング技術の開発
5-1 緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・156
5-2 4軸デスクトップ駆動システムへのELIDⅢ研削法の適用 ・・・・158
5-2-1 実験装置および実験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・158
5-2-2 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・160
5-3 ノズル式ELIDⅢ法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・166
5-3-1 実験方式及び実験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5-3-2 実験装置および実験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・167
5-3-3 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・169
5-4 ノズル式ELIDⅢ研削法の組み合わせとその効果 ・・・・・・・171
5-4-1 実験装置および実験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・171
5-4-2 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・173
5-5 イオンショットドレッシング研削方式 ・・・・・・・・・・・・175
5-5-1 比較実験方法および実験装置 ・・・・・・・・・・・・・・・176
5-5-2 比較実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・177
5-6 イオンショットドレッシング法によるデスクトップ鏡面研削システムの検
討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・182
5-6-1 イオンショットドレッシング法のメリット ・・・・・・・182
5-6-2 実験装置および実験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・184
5-6-3 実験結果および考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・185
5-7 イオンショットドレッシング法における各種条件の影響 ・・・・・・188
5-7-1 電解条件と不導体被膜厚さの関係 ・・・・・・・・・・・188
5-7-2 研削液濃度と不導体被膜厚さの関係 ・・・・・・・・・・190
5-7-3 電解条件が加工特性に与える影響 ・・・・・・・・・・・・・・192
5-7-4 電解条件と研削液の状態について ・・・・・・・・・・・・・194
5-8 イオンショットドレッシング法のメカニズムの解析および解明 ・・・196

	ļ	5 —	8 -	- 1	イ	才	ン	シ	Э	ツ	\vdash	ド	レ	ツ	シ	ン	グ	法	の	電	気	的	涀彡	良 ・	•	•	•	•	•	•	•	•	•	196
	ļ	5 —	8 -	- 2	イ	オ	ン	シ	Э	ツ	arepsilon	ド	レ	ツ	シ	ン	グ	法	の	メ	力、	=;	ズノ	Å •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	199
	5 -	- 9	1	オ	ンシ	Έ	ツ	\mathbb{P}	ド	V	ツ	シ	ン	グ	法	に	よ	る	鏡	面	研	钊	シフ	マテ	- 4	の	V	ン	ズ	金	型	加	Τ	
			\sim	へ の	適用	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	204
	ļ	5 —	9 -	- 1	実	[験	装	置:	お	よ	び	実	験	条	件		•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	204
	Į	5 —	9 -	- 2	実	[験	結	果:	お	よ	U;	考	察		•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	206
	5 -	- 1	0	イ	オン	シ	É	ツ	arepsilon	ド	レ	ツ	シ	ン	グ	研	削	シ	ス	テ	4	2	おに	ける	電	極	の	検	討	•	•	•	•	212
	Ę	5 —	1 C) —	1	電	極	材'	質(の材	倹	討	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	212
	Ę	5 —	1 0) —	2	電	極	の .	長	寿1	命	化				•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	215
ł	5 -	- 1	1	結	言		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	220
	5 -	- 1	2	参	考文	献	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	221
6.	5	七端	科学	お	よび	マ	1	ク	<u></u> .	7.	Ξ.	ユ	フ	Г	ク	チ	ヤ	IJ	ン	グ	\sim	D,	芯月	月										
	6 -	- 1	兌	记端	科学	お	よ	U.	7,	1	ク	<u>п</u> .	7	Ξ	ユ	フ	P	ク	チ	ヤ	IJ		グィ	\J.)応	用			•	•	•	•	•	223
	(6 —	1 -	- 1	中	地性	子	光	学;	素	子	の	開	発		•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	223
	6	5 —	1 -	- 1	-1		実	験	装置	置;	お。	よる	び	実	験	条	件		•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	225
	6	5 —	1 -	- 1	-2		実	験	結	果	お。	よる	U:	考	察		•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	227
	6	— 1	ι —	2	Хź	泉ナ	七学	之素	₹子	- <i>0</i>)	開]発	ŝ		•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	230
	6	3 —	1 -	- 2	-1		実	験	験	捩	置;	お	よ	び	実	験	条	件		•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	231
	6	5 —	1 -	- 2 -	-2		実	験	結	果	お。	よる	U:	考	察		•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	233
	6	3 —	1 -	- 3	人	. T.	股	関	節	骨頭	頭($\mathcal{D} $	開	発		•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	237
		6 —	1 -	- 3	-1	-	NC	テ	<u> </u>	・タ	С,	生	一成	え 大	ラ注	Ę		•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	238
		6 —	1 -	- 3	-2	2	VC	CAD	デ	ž	-タ	を	:使	ミ月	Πl	った	<u> </u>	'- C	am	レン	フ	. Ի	ウ	I,	PO	り厚	昇多	Ě	•	•	•	•	•	241
	6	3 —	1 -	- 3	- 3		骨	頭	モ	デ	ルナ	加	T.		•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	244
	6 -	- 2	7	71	クロ	7	Ξ	ユ	フ	P	ク	チ	ヤ	IJ	ン	グ	シ	ス	テ	ム	\sim	D,	芯月	月		•	•	•	•	•	•	•	•	246
	6 -	- 3	絎	吉言		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	250
	6 -	- 4	参	\$考	文献	Ĵ		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	251
7.	糸	洁論			•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	253
	7 -	- 1	糸	論	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	253
	7 -	- 2	4	;後	の展	望	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	258
	Ň	図の	リフ	くト	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	259
	T	長の	リフ	くト	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	267
	才	く 論	で用	100	る記	号	のテ	意	朱		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	269
	謭	肘辞	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	272
	割	龠文	リフ	くト	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	274

第1章 序章

1-1 研究の背景

私たちは、日常から使用している弱電・家電商品を見ることで、高性能化、高機能化かつ小型化 の時代到来を目の当たりにすることができる.まず、音響機器の例を挙げる.古き時代の音響機 器のメディアは、レコードやカセットテープであった.しかし最近では、レコードに代わってコ ンパクトディスク(CD)が主流になり、カセットテープに代わってミニディスク(MD)が主流に なった.このように、信号の取り扱いがアナログ信号からデジタル信号に代わることで編集・録 音・再生がより手軽に出来るようになった.それを支えているのがマイクロシステム、マイクロ メカニカル技術によるものづくりである.

次に携帯電話の例を挙げる. 1970 年代の携帯電話は,長さが 21cm,幅 6.6cm,重さが 600g と, 大きくて重量もあり高価であった.しかし,今では,軽量なもので 70g を切るものまで登場して いる.このように,高度な技術が集約された携帯電話が極めて低コスト化されたのはマイクロメ カニカル技術によるものづくりの貢献が非常に大きい.その他に,パーソナルコンピュータやプ リンタも高性能化・高機能化かつ小型化したが,これらもマイクロメカニカル技術による貢献が 大きい.

また近年,形,デザイン,カラー,機能,性能などをオンデマンドでカスタマイズできること が製品の購買意欲を左右する時代に移行しているので,上述の軽薄短小化技術に加え,意匠性の バリエーションに基づくマス・カスタマイズ化が重要視され始めており,図1-1に示すように新 しいものづくりの時代へと移り変わろうとしている.カスタマイズ化・高性能化・高機能化への 流れを支えるには,製品を構成する精密部品の小型軽量化・高機能化・高性能化などが重要であ り,これらの部品を作製するマイクロメカニカル技術の発展が強く求められる.

しかし一般に、こうした精密・マイクロ部品のものづくり技術の発展は容易なことではない. 従来技術を基盤に開発を進めることはもちろんであるが、ものづくり技術にブレークスルーを与 える新しいシステム開発に関わる研究開発が新しいものづくりの時代の創出に必要不可欠であ る.図1-2に示すように実際の加工現場では、小さくなった製造部品に対して大型の工作機械を 用いて製造していることが多い.多くの治工具を機械テーブル上に設置して加工しなければなら ないが、製造部品の製品精度は、各治工具の固定方法、位置決め方法、位置決め精度に影響を受 けるため、多量かつ同時に精密・マイクロ部品を生産する上で、それぞれの僅かな段取り誤差が 加工精度トレランスを越え、多くの不良品を出す可能性が高い.従って、従来のものづくりシス テムおよびプロセス技術の適用は大きな困難に直面しているのが現状である.こうした状況を打 開するためには、小型化とともに多品種少量生産化を実現し、様々な加工手段、方法、装置など を駆使して、フレキシブルかつオンデマンドなものづくりシステムおよびプロセス構築が不可欠

1

と考える (図 1-3).

そこで、こうした時代的背景や要求に対応し、ブレークスルーを生み出す新しいものづくり技術の創出に向けて、1997年から「マイクロワークショップ¹⁾」というマイクロ加工の統合システムの提唱をしているマイクロ加工研究会²⁾、ELID研究会³⁾を通して、一連の新しいものづくり分野の技術開発に関する情報提供を行ってきた.「マイクロワークショップ」とは、デスクトップタイプの加工機や加工システムにより、新しいものづくりシステム・プロセスに基づくダウンサイジングとともに、精密・マイクロ部品に特化した加工効率の向上を目的とした生産加工システムを意味する.

デスクトップタイプの加工機械は、一般的な机の上に搭載できる省スペース型の加工機である. また、IT ならではのパーソナルコンピュータ (PC) を使用した機械制御で簡単に操作が行える. IT 援用デスクトップマシンツールを駆使することによりデジタル社会やマイクロシステムに必要不可欠な光学部品やその金型、マイクロギアなどのマイクロメカニズムのものづくり技術を可能とすることを企図した. PC による簡易な操作性からの親しみやすさだけではなく、加工機械そのものの大きさが小さいことによる親しみやすさも生まれる. これらのデスクトップタイプの加 工機械は必ずしも単機能に限定されず、多機能を有し、例えば、ある製造部品の生産ラインの一 部としても機能するが、スタンドアローンでの1つの工作機械としての性能を発揮し、装置の費 用対効果を向上させることが考えられる. また、デスクトップ型(卓上型) であるため、ハンド リング良く機械を移動することができ、フレキシブルな生産ラインの構築を実現する. これらの ことから多軸制御デスクトップ駆動システムを開発・確立することにより、精密・マイクロ部品 の新しいものづくり技術創出においてブレークスルーを生み出し社会に貢献できることを確信 し、本研究のスタートおよび推進に至った.



図 1-1 小型軽量,高性能,高機能部品開発ニーズの変化 4)



図 1-2 小型部品製作における現状の加工環境の例



図 1-3 小型部品のフレキシブル,オンデマンド生産化のコンセプト

1-2 マイクロ加工とデスクトップ駆動システム

前節で述べたようにマイクロ加工のニーズが高まっており,2002年には精密工学会の学会誌で 「マイクロ加工の最前線」という特集が組まれた.その特集の中では,桝田は,「マイクロ加工 の現状と展望」⁵⁾と題して,機械加工,塑性加工,レプリカプロセスなどを紹介し,その他,竹 内は「マイクロ切削加工⁶⁾」,大森は「マイクロ研削加工⁷⁾」,増沢は「マイクロ放電加工⁸⁾」,池 野は「レーザによるマイクロ加工⁹⁾」についての取り組みと展望について概説している.

厚みのある三次元マイクロ構造のニーズがあるにも関わらず、その形成が難しいことと高品位 な表面を作るのは困難であることから、マイクロ加工は、伝統的な研削加工や切削加工もその一 翼を担う期待が大きく、メカニカル加工の重要性が高まっている.また、そこで、報告されてい る加工結果の多くは、マイクロレンズやフレネルレンズなどの光学部品への適用であった.そし て、今後の展望として期待されているアプリケーションは、レンズの鏡面加工や金型の微細加工 などが多くを占めていた.

レンズとしては、内視鏡などのサブミリレベルのものもあるが、多くは数ミリメートルから数 センチメートル以内のマイクロ/小型レンズに多くの需要が集中している.レンズ金型について も同様のサイズに需要がある。例えば、携帯電話用カメラモジュールは、直径 10mm 前後のレン ズを使用している.また、その市場規模は、2007 年度で 5 億 4 千万個(1800 億円)¹⁰⁾と言われ ている.車載用カメラ(レンズ直径 2mm~5mm)の 2005 年度の市場は約 200 万台で、2010 年度の 市場は 1400 万台と予測されている¹¹⁾.また、市場規模の拡大が見込まれている DVD、ブルーレ イ、HD-DVD などの大容量光ディスクなどに使用される対物レンズ(ピックアップレンズ、ソリッ ドイマージョンレンズなど)は、さらなる高性能性に向けて直径 1mm 以下が求められている。例 えば、DVD における 2007 年度の市場規模は、パソコン用ドライブと民生用レコーダなどを合わせ て 1 億 1500 万台になると予測されている¹²⁾.その他にも直径 15mm 程度のコンタクトレンズは、 その装用人口が 2010 年には 1640 万人まで拡大する¹³⁾といわれており、20mm 以下の高精度なレ ンズの需要が急激に増えていることがわかる。また、マイクロ金型やマイクロパーツなどの微細 加工は、同様にサブミリの全体サイズから、表面の溝加工や微細形状加工には数十ミクロンから 数ミクロンのものまで出てきている.

ところで、レンズなどの加工においてはガラスやサファイヤや半導体やセラミックスなどの硬 質・脆性材料が多用されており、これらの加工には研削加工が適用される.またレンズ金型につ いては、金型鋼や超硬合金などが用いられ、同様に研削加工が適用される.溝などの微細な構造 を持つマイクロ金型は金型鋼が用いられるが、微細な溝加工には特殊なマイクロツールによるマ イクロミーリングやシェーパ加工が主たる加工原理となる.

本論文で取り扱う精密/マイクロ研削加工,精密/マイクロ切削加工を総称して,マイクロメ カニカル加工と呼ぶことにする.本論文で提唱するデスクトップ多軸駆動システムは加工ニーズ

4

が、より多品種少量生産になることを念頭に多自由度な鏡面研削および切削加工の両立を可能と するものを目指している.

これらの加工については、前述したように従来サイズの研削盤やマシニングセンタで行われて きているのが現状であるが、海外、特に東南アジアにおける人件費を主因とする生産コスト低減 との厳しい競争を強いられている我が国では、多品種少量生産における技術的なブレークスルー が必要であると考える.精度の高い新たな工作機械を導入することが考えられるが、製品の販売 価格や販売数量からは、高価な工作機械では、その償却が難しく、導入に躊躇される場面が多い. また、精度の高い工作機械を導入するためには、その工作機械に応じた環境が必要となり、所有 している工作機械との入れ替えも容易ではなくなっていることなどが課題となっている.また、 精度を維持するための環境には、空調設備による温度コントロールが欠かせないが、ある OA 機 器製造工場の消費動力の調査結果では、総称費動力の約 60%を空調が占めていたという結果があ る¹⁴⁾.こうした従来サイズの工作機械によるマイクロメカニカル加工における課題をクリアする ためには、こうした作業に適した加工システムを開発することが急務とされると認識できる.

一方、こうした中、産業技術総合研究所を中心としたマイクロファクトリー計画として、1990 年に最初の提案がされ,1991 年から通商産業省(現経済産業省)の産業科学技術研究開発プロジ |エクト「マイクロマシン技術の研究開発||が進められ, 1994 年からそのサーブテーマの一つとし て、「マイクロファクトリー技術開発」が開始されている¹⁴⁾.この計画は、小型の製品・部品を、 その寸法に見合ったサイズの小型生産システムで製作するという概念を狙ったものであり、上述 のマイクロメカニカル加工の用途としては近いシステムと考えられる.また、マイクロファクト リー計画では、新環境的側面、経済的側面、技術的側面、作業環境的側面のメリットとして、新 環境的側面では、省エネルギー、省資源、排出物の削減など、経済的側面では、低コスト化、設 置環境を含む設備投資の軽減、ランニングコストの低減など、技術的側面では、固有振動数が上 がり,外乱振動に強くなる.熱変位の軽減など,作業環境的側面では,オペレータへの精神的・ 肉体的負担が軽減されるなどとしている¹⁵⁾⁻²²⁾.しかしながら,100mm 立方程度の生産システムで は、小型の構成要素(部品、デバイス)の不足が指摘されるとともに、工業規格が小寸法まで十 分にカバーしていないという問題がある.また、構造・機構設計では、スケーリング則の適用限 界や必要とする相対寸法精度などの技術データが不足していることなどの課題が残されており 23),その後,実用化に向けたアクティビティが採られているものの,現実的な用途との整合が十 分であるとの認識は必ずしも言えない.このマイクロファクトリー計画の中で,セイコーインス ツルメンツから「ミニ円筒研削セルの開発」と題して,2002年度精密工学会春季大会学術講演会 にマイクロ研削などの事例が公表されている²⁴⁾⁻²⁵⁾.また,その後の動向として,2002~2004年 度に発足した「加工機械のマイクロ化分科会」では、マイクロ加工・組立機器の用途と適用効果、 関連技術の現状や研究開発状況について調査を行うなどの活動があり、それまでの調査・研究結 果について 2005 年度精密工学会春季大会・シンポジウム「マイクロファクトリーの実用化技術

 $\mathbf{5}$

動向」で報告があった.また,この活動を引き継いだ「マイクロ生産機械システム専門委員会」 が平成17年2月より発足した²⁶⁾.また,工作機械の小型化に関わるセッションが,精密工学会 学術講演会で「加工機械のマイクロ化」というオーガナイズドセッション(OS)名を,2006年秋 より「マイクロ生産機械システム」に名称を変えて,各種加工機械のマイクロ化やマイクロ機械 部品の加工に関する研究,さらにマイクロファクトリーを実現するために重要な技術となるマイ クロ部品のハンドリングやハンドリング機構,マイクロ組立,マイクロ部品やマイクロ工作機械 の計測に関する研究などの討議が進められている.さらに、2000年11月に,長野県諏訪地方に おいて、「DTF(デスクトップファクトリー)研究会」²⁷⁾が複数の企業により発足し,デスクトッ プファクトリーに向けた小型工作機械の議論が進められている.

近年の動向として,JIMTOF(日本国際工作機械見本市)において分かるように,森精機製作所 やその他の工作機械メーカー各社から特に大型,小型のサイズに関係なく省スペースタイプの工 作機械が開発,出展されており注目を集めている.しかし,これらの工作機械の間口は小型化し ているものの,小型タイプのものでも奥行きは2m程度有り,相応に長くなっていること,鏡面 研削を含むマイクロメカニカル加工を導入・使いこなすまでには至っていない.これらは,小型 金型や小型機構部品の加工には適用されているが,レンズやミラーなどの鏡面加工は実現されて いない.これらの主たる動向について,筆者らの研究グループにおける活動を含め,図1-4にま とめ示す.

次に,工作機械サイズとこれまでに報告されている加工原理について表 1-1 に示す.また,表 1-2 に機械サイズと普及状況を示す¹⁴⁾.これは,上述の各研究グループやメーカーのアクティビ ティを全て含むものではないが,本論文の研究で目指した領域と重ねると,切削~鏡面研削を全 て実現する本研究によるターゲットのオリジナリティを主張することができると考える.

6

1990年:マイクロファクトリーが提案された.

1994年:1991年から開始した通商産業省(現経済産業省)の産業科学技術研究開発プロジェクト「マイクロマシン技術の研 究開発」のサブテーマとして「マイクロファクトリー技術開発」が開始された.

1997年:理化学研究所において「マイクロ・ワーク・ショップ」が提唱された.

1998年:理化学研究所において「3軸デスクトップ駆動システム」の開発が開始された.

1999年:理化学研究所において「4軸デスクトップ駆動システム」の開発が開始された.

2000年:11月に,長野県諏訪地方において、「DTF(デスクトップファクトリー)研究会」が複数の企業により発足し,デスクトップファクトリーに向けた小型工作機械の議論が進められた.

2001年:理化学研究所において「フルクローズドループ制御4軸デスクトップ駆動システム」の開発が開始された.

2002年:精密工学会春季大会にマイクロ研削などの事例がセイコーインスツルメンツから「ミニ円筒研削セルの開発」と題して公表された.

「加工機械のマイクロ化分科会」が発足した.

2003年:理化学研究所において「デスクトップ駆動システムのためのイオンショットドレッシング法」の研究が開始された.

2004年:アメリカWTEC (WORLD TECHNOLOGY EVALUATION CENTER) がマイクロマニュファクチュアリングの世界動向 を調査.

理化学研究所において「リニアモータタイプ4軸デスクトップ駆動システム」の開発が開始された.

- 2005年:精密工学会春季大会・シンポジウム「マイクロファクトリの実用化技術動向」で調査・研究結果が報告された. 「加工機械のマイクロ化分科会」の活動を引き継いで、「マイクロ生産機械システム専門委員会」が発足した.
- 2006年:工作機械の小型化に関わるセッションが,精密工学会秋季大会で「加工機械のマイクロ化」というオーガナイズド セッション(OS)名を、【マイクロ生産機械システム】に名称を変えて活動を継続して行っている.

2007年:理化学研究所において「フルクローズドループ制御4軸デスクトップ駆動システム」の販売が開始された.

図 1-4 我が国におけるマイクロ加工およびマイクロ駆動システムの主たる動向

装置名称	開発機関・企業	本体サイズ	切削加工	研削加工	鏡面研削加工
マイク ロ旋盤	産業技術総合研究所	32×28×30 mm	0	×	×
ミニ円 筒研削 セル	セイコーインスツルメ ンツ株式会社 ²⁴⁾²⁵⁾	200×200×200 mm	×	0	×
ピエゾ 素子応 用マイ クロ加 工機	福井県工業技術センタ - ²⁸⁾	250×250×250 mm	0	×	×
超小型 精 密 CNC 旋 盤	株式会社ナノ ²⁹⁾	150 imes 100 imes 100mm	0	×	×
超微細 NC 旋盤	高島産業株式会社 ³⁰⁾	480 imes 575 imes 733 mm	0	0	×
マイク ロマシ ニング センタ ー	株式会社ピーエムティ ³¹⁾	600×800×1050 mm	0	0	×
デスク トップ 駆動シ ステム	理化学研究所	約 600×600×600 mm	0	0	0

表 1-1 開発された卓上型工作機械サイズと報告されている加工原理

実用機比 (寸法)	重量	総称	普及状況
1/1	CELN	省スペースタイ	既存機の代替促進
(約 1800mm 立方内)	69KN	プ	
1/3	1 51-N - 51-N	デスクトップタ	普及段階
(約 600mm 立方内)	1. 3 KIN \sim 5KIN	イプ	
1/6	1 51-N		実用化が進行
(約 300mm 立方内)	1. ƏKİN	ラップトップタ	
1/10	400N	イプ,	DTF:一部が実用化
(約 200mm 立方内)	400N	パームトップタ	
1/2 0	FON	イプ,	デバイス:実用化の段階
(約100mm 立方内)	DON	フィンガートッ	システム:概念構築の段階
<1/40		プタイプ	基礎研究の段階
(<50mm 立方内)	δN		

表 1-2 機械サイズと普及状況¹⁴⁾

こうした背景から、本論文の研究で目指したマイクロメカニカル加工のためのデスクトップ駆動システムは、時代のニーズとされる上述のマイクロメカニカル加工を合理的に実現するために 創案されたものである.その全体的な特長としては、現存する工作機械システムには持ち合わせ ていないものと言える.

上述のようにニーズが増大する精密・マイクロ部品の超精密・高効率なものづくりを実現する ためには、対象物のサイズと素材(材質)、そして加工システムとマッチした加工プロセスを採 ることになる.こうした背景により、ここで開発を目指したマイクロ加工システムのコンセプト ³²⁾⁻³⁸⁾としては、デスクトップサイズ:幅1000mm×奥行き 600mm が標準サイズである 0A デスク上に 設置できることとエルゴノミクス(人間工学)的デザインから日本人の平均的な人の肩幅を 400mm としたとき、機械手前端と前膊(ぜんはく)とのなす角度は 120°以内の作業効率が良い³⁹⁾との ことから機械幅は、600mm を目安として幅 600mm×奥行き 600mm 以内とした.加工システムの重 量は、0A デスクの最大積載荷重 1kN (100kgf)程度を目指す.また、加工システムの数値制御に は、コストパフォーマンスと独自の操作性を求めることを目的として PCNC とした.しかし、従 来の加工機械との互換性のある操作を視野に入れた G コードに代表されるような NC 装置専用の 言語も使用できるように検討した.また、機械的除去加工が行えるものとして、直線軸3軸を有 するとともに、独自開発によるロータリ軸の追加もユニークな加工を実現するべく検討を行った (4軸同時制御としての多軸駆動システム化).そして,鋼材だけでなく,ガラス,セラミックス, 単結晶シリコン材などの難加工性を有する硬脆材料の加工を実現するために ELID 研削システム などのドレッシング技術を標準搭載する.つまり,デスクトップ(卓上)にて,切削加工のみな らず,硬質・脆性材料に対して自由曲面や複雑形状のナノレベルでの鏡面研削をカバーするマイ クロメカニカル加工を実現する世界初のシステム開発を目指して研究を進めた.

本論文で提唱するデスクトップ駆動システムとして.

1)本体サイズの小型化

→事務机サイズの約 600mm×600mm×600mm

2)本体重量の軽量化

→大人二人で持ち運べる重さ 1kN(100kgf)前後

PC での簡単操作

→PCNC の採用

4) 工業製品の加工が可能なシステムの構築

→鋼, セラミックス, 硬脆材料などを対象

- 5) 硬質かつ複雑形状を有する光学素子や金型などのナノ表面品質での加工を実現 →ELID 研削法との複合化
- 6) 切削加工・研削加工を両立

などの特徴・効果を発現することが望まれる.また,その適用範囲としては,上述のマイクロ メカニカル加工としてニーズの高い100mm×100mm×100mm以内の工作物サイズにターゲットを絞 り,開発研究をスタートしたものである.このサイズに含まれる具体的なニーズとしては,上述 したレンズサイズの他に,例えば,射出成形用金型で合理化を目的として製作されているカセッ ト金型のサイズは,100mm以下の規格のものが多く⁴⁰⁾⁻⁴¹⁾,射出成形機メーカーもそのカセット金 型の採用を推奨している⁴²⁾.これらのことから,比較的広くカバーできるサイズとして開発目標 スペックの中心に据えた.

以上から,求められるデスクトップ駆動システムに関わるサイズにおける決定要因を図 1-5 に まとめ示す.



図 1-5 求められるデスクトップ駆動システムに関わるサイズにおける決定要因

100mm×100mm×100mmの加工サイズの実現を目標に据えた場合,多軸駆動系の設計思想上,ア クチュエータ(モータ),送り機構,テーブルサイズの構成から,下記の要素部品が必須の選択 アイテムとなっている.開発を目指したデスクトップ駆動システムの実現に必要な具体的要素部 品のサイズを考察した場合,以下の選定を前提として開発を進めることとした.これらから,開 発したデスクトップ駆動システムを構成する要素部品は規格品が多いが,それらの組立精度への 留意とともに,これまでにない独自の軸受・回転軸の開発が本システム構築のキーとなった上, 後章にて述べる門型対称構造とベッドレス化による軽量化等の構造的複合効果が最もユニーク なものとなっている.

1. サーボモータ

三菱電機株式会社 サーボモータ:HC-KFS13B

アンプ :MR-J2 S-10-A1

モータ仕様 :131072 palus/rev

2. リニアスケール

株式会社ミツトヨ AT211 (分解能:0.1µm)

3. ボールネジ

黒田精工株式会社 ボールネジ:GP1502 DS-BAPR-0600B-C3B (研削仕上げ品)

4. ガイドレール

日本トムソン株式会社 リニアローラウェイ:LRXDG15C2 R***SLT1UP

(***:X 軸:360mm, Y 軸・Z 軸:300mm)

5. カップリング

株式会社ミスミ 高トルクタイプ:MCKLC25-8-10

- 6. ベース:アルミ
- 7. 構造:アルミ門型構造
- 8. 多軸化 (3 軸リニア, 1 軸ロータリ)
- 9. シュラウド:フルカバー
- 10. スピンドル

C軸:独自開発、工具軸:独自開発およびナカニシ(加工方法により交換利用)

上述のガイドレール:X軸 360mm,Y軸-Z軸:300mmの採用と門型構造,C軸との融合化によって,本体サイズを約 600mm×600mm×600mm に抑えることが合理的であることが分かる.

本論文で論ずる研究のアプローチとして,第2章においては,デスクトップにおいて硬質・脆 性材料の鏡面研削機能を実証する基礎実験として,現有の3軸デスクトップ駆動システムにおい て,ELID研削法⁴³⁾⁻⁴⁵⁾を適用すること,またデスクトップにおけるELID研削法として独自に考案 したミスト式クーラント供給法の適用を試み,光学部品ならびにマイクロツールの加工の基本実 験を行い,本論文で目指したマイクロメカニカル加工(切削と鏡面研削との両立)の実現につい て議論する.ここで,適用した ELID 研削法については,これまで大森らにより多数の文献があ るが,本論文で新たに創出した非導電材料対応電極レス ELID 研削法(イオンショットドレッシ ング法)を列挙した形で図 1-6 にまとめ示す.

デスクトップにおける ELID 研削法の有効性を確認したことにより、本論文で述べる精度を要求されるマイクロメカニカル加工(特に光学素子の鏡面研削および金型の微細切削)を実現した加工方式は参考文献 14 からも存在しないものと考えられる.

そして基礎実験から得られた知見に基づき,多軸化を果たすことで,さらなる効率化・高精度 化(特に光学素子やその金型に対して)を実現するために独自に開発した4軸デスクトップ駆動 システムの開発および特性評価について第3章において詳述する.さらに,4軸デスクトップ駆 動システムの開発成果を生かしたマイクロメカニカル加工の実用的かつ具体的事例について第4 章において詳述し,開発成果の有効性を実証する.

一方,開発したデスクトップ駆動システムにおいて,鏡面研削の一層のダウンサイジングおよ び高品質化の実現を果たす上で,大森らにより発明された従来の ELID 研削法における電極は大 きな障害となっていた.そこで第5章では,従来の ELID 研削において砥石への対設が必要であ った電極をなくすることにより,第3章で開発したデスクトップ駆動システムに専用的に適用す るイオンショットドレッシング法の発明に至った実験の詳細についてまとめる.本発明において, ELID 研削法の開発の流れにおいては,非導電材対応電極レス ELID 研削法と位置づけることも可 能であるが,イオンショットドレッシング法のメカニズムの解析・解明を通じ,その新規・独創 性を主張した. 以上のように、本論文では、4 軸デスクトップ駆動システムの開発とその専用鏡面研削法であるイオンショットドレッシング法を大きな柱とし、切削加工等の技術をもマイクロメカニカル加工として融合させたオリジナリティを有するものである(図 1-7).



図 1-6 デスクトップ加工との複合化を目指した ELID 研削法



図 1-7 本論文における研究の骨子

1-3 本論文の構成

本論文では、独自に研究開発を進めてきたデスクトップ駆動システムにおけるマイクロメカニ カル加工技術について論ずる.

第1章では、本研究の背景および動機を述べ、マイクロメカニカル加工およびデスクトップ加 エシステムのニーズや、本論文で目指すマイクロメカニカル加工の定義、そしてその実現のため のキーテクノロジーである ELID 研削について概説するとともに、デスクトップ駆動システムの コンセプトを立案した.

第2章では、本論文で目指すマイクロメカニカル加工の実現、特にデスクトップでの鏡面研削 の実現に必要な ELID 研削法を、現有の3軸デスクトップ駆動システムに適用し、その工夫点お よび基本的な効果について述べる.大きく、光学素子金型およびマイクロツールのデスクトップ での鏡面研削加工を実現する.特にマイクロツールの製作については、その加工方法および加工 技術について検討を行い、表面粗さによる寸法効果について議論を行う.ここで完成したマイク ロツールについては第4章において金型のマイクロ溝加工に応用する.

第3章では、多目的な光学部品および金型の加工を可能とする独自設計による4軸デスクトッ プ駆動システムの開発および性能評価について述べる.4軸デスクトップ駆動システムの門型構 造について軽量化の問題点などについて構造解析シミュレーションを行った結果を述べ、現実的 な研削加工において精度面への影響を予測する.また、駆動制御については、フルクローズドル ープ制御による位置決め精度について検討を行い、フルクローズドループ制御の必要性について 確認し論ずる.さらに固有振動数および剛性の評価を行い、その特性について論ずる.

第4章では、第3章で独自に開発した4軸デスクトップ駆動システムによるマイクロメカニカ ル加工の実例として、投写照明系光学素子である楕円面形状非球面レンズとして石英ガラスを対 象にした研削加工について述べる.また、撮像系光学素子である球面レンズで、CG(カーブジェ ネレータ)方式ユニットの開発を行い、硝材の軽バリウムフリントガラスを対象にした研削加工 について述べる.これらの研削加工を行った結果により表面粗さについて議論を行う.また、4 軸デスクトップ駆動システムによるマイクロメカニカル加工において必要となるマイクロ切削 加工の検討を行い、その効果について言及する.

第5章では、前章までに開発された4軸デスクトップ駆動システムによるマイクロメカニカル 加工技術に不可欠かつ有機的に搭載されるべき新しい専用の鏡面研削加工法として、独自に発明 に至ったイオンショットドレッシング法を用いた小径砥石専用の加工技術により本システムの 有用性を明らかにする.イオンショットドレッシング法については、その特性を明らかにするた めに、電気分解により生成される不導体被膜に着眼して電解液濃度や電解条件による影響につい て基礎実験を行い、イオンショットドレッシング法のメカニズムの解析・解明について論ずる. そして、イオンショットドレッシング法を実際にレンズ金型加工に適用して有用性を確認した事

14

例を示す.

第6章では、開発した4軸デスクトップ駆動システムを応用することにより、先端科学への応 用のためのデスクトップ・マイクロメカニカルファブリケーションの実用・普及の状況について 事例を述べる.また、4軸デスクトップ駆動システムと相補的な役割を果たすデスクトップ駆動 システムとの連携により、比較的小スペースのマイクロマニュファクチャリングシステムの構築 が可能であることを示唆する.

最後に,第7章では,結論として本論文における研究成果についてまとめる.また,本論文で 議論を行った4軸デスクトップ駆動システムによるマイクロメカニカル加工技術について,今後 の課題と展望を述べ,最後にまとめを行う.本論文の各章の関係について図1-8に示す.



1-4 参考文献

- 1) 大森 整: "MICRO-WORK-SHOP (マイクロワークショップ)"の開発状況, 理研シンポジウム テキスト、Vol.5 (1999), 56~60
- 2) 「マイクロ加工研究会」:http://www.micro.ne.jp/
- 3) 「ELID 研究会」:http://www.elid.ne.jp/main.html
- 4) 広末さんと通信・放送技術の総合サイト:

http://www.interq.or.jp/blue/rhf333/K-HIST.htm

- 5) 桝田正美:マイクロ加工の現状と展望,精密工学会誌,第69巻,2月号(2002)161-166
- 6) 竹内芳美:マイクロ切削加工,精密工学会誌,第68巻,2月号(2002)167-170
- 7) 大森 整:マイクロ研削加工,精密工学会誌,第68巻,2月号(2002)171-174
- 8) 増沢隆久:マイクロ放電加工,精密工学会誌,第68巻,2月号(2002)180-184
- 9) 池野順一: レーザによるマイクロ加工, 精密工学会誌, 第68巻, 2月号(2002) 193-196
- 10) 株式会社ブレーンチャイルド:携帯電話用カメラモジュール及びその光学部品の開発動向と 需要予測, http://www.brainchild-inc.co.jp/service/svnew/2 006CameraModule.htm
- 11)株式会社ブレーンチャイルド:2006 年度版車載用カメラの開発動向とその世界需要予測, http://www.brainchild-inc.co.jp/service/svnew/2 006Shasai.htm
- 12) 杉山勝彦:モノづくり復権を支える光デバイス, http://www.musashi-bd.co.jp/ industry/img/1.pdf
- 13)株式会社シード:http://ir.eol.co.jp/ASP/7743?task=download&download _category=tanshin&id=309 544&a=b.pdf
- 14) 北原時雄, 三井公之, 宮川政義:マイクロファクトリ技術に関する調査研究, MEMOIRS OF SHONAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Vol. 39, No. 1, (2005) 25-35
- 15) 北原時雄:マイクロファクトリ,マイクロメカトロニクス(日本時計学会誌), Vol. 51, No. 9, (2006) 44-54
- 16) 芦田 極, 岡崎 祐一:マイクロファクトリにおけるナノ・マイクロ加工要素開発のアプロ ーチ, 日本機械学会誌, 108, 1040, (2005), 2-4
- 17)田中 誠, 芦田 極, 三島 望, 前川 仁, 谷川 民生:デスクトップタイプの機械加工マ イクロファクトリ, 機械研 NEWS, 6, (2000), 1-16
- 18)林 亮:超小型精密 CNC 旋盤「マイクロターニングシステム」の開発, 砥粒加工学会誌, 46, 7, (2002), 330-334
- 19) 和栗 創一,上中 玲子,中島 尚正,村上 存:二方向性形状記憶合金を用いたマイクロ ファクトリ用マイクログリッパの開発,日本機械学会論文集(C編),68,668,(2002), 205-212

- 20) 黒田雅治,吉田秀治,北原時雄,石川雄一,荒牧宏敏:超小型工作機械における非線形振動 とその制御(第1報:切削過程の数字モデル化と基礎実験),日本機械学会学術講演論文集, No. 98-8, (1998)
- 21)川俣敦史,齋藤義夫,田中智久:一体構造による工作機械の小型軽量化に関する研究,2007 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2007)3-4
- 22)林 亮,島田和裕,安川 晋,飯島大典,山中 将,白井健二,小林義和:超小型精密 CNC 加工機「MTS」による加工例~第3報~,2007 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2007)389-390
- 23) (社)日本機械工業連合会:MEMS・マイクロファクトリーの実用化に関する調査研究(I)-MEMS・マイクロファクトリー実用化研究交流会報告書-,(2004)28-29
- 24) 大田眞士,友瀧 桂,中村幸正,木原弘之,宇野武志,高比良 彰,加藤秀雄,ヨシザワLA,森 正緑:ミニ円筒研削セルの開発,2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2002) 86
- 25) 鬼島幸光,徳永範夫,新谷裕之,高比良 彰,中村幸正,宇野武志:ミニ円筒研削セルの開発(第2報) -評価結果と新型ミニ研削システム-,2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2003) 646
- 26) 東北大学 山中研究室:http://www.elm.mech.tohoku.ac.jp/yama/rd/rd.html
- 27) DTF (デスクトップファクトリー) 研究会:http://www.dtf.ne.jp/
- 28) 福井県工業技術センター:http://www.fklab.fukui.fukui.jp/kougi/new/02 12 17_1.pdf
- 29)株式会社ナノ:http://www.nanowave.co.jp/
- 30) 高島産業株式会社:http://www.takashima.co.jp/kouki4-9.htm
- 31) 株式会社ピーエムティー:http://www.pm-t.com/products/nc/index.html
- 32) Hitoshi Ohmori, Ichirou Takahashi:Efficient Grinding Technique Utilizing Electrolytic In-Process Dressing for Precision Machining of Hard Materials, Advancement of Intelligent Production, (1994) 320
- 33) 大森 整, 伊藤 伸英, 林 偉民, 守安 精, 片平 和俊, 上原 嘉宏, 山形 豊, 松澤 隆, 森
 田 晋也: "ELID 加工統合加工システム "マイクロワークショップ"の構築", 2001 年度砥
 粒加工学会学術講演会(ABTEC2001)講演論文集, (2001.9) 107-108
- 34) Yoshihiro Uehara, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, Shin-Ya Morita, Toshiro Higuchi, Muneaki Asami, and Ken-Ichi Yoshikawa: "Development of "Micro-Workshop" by RIKEN~Microfabrication Using Desktop Machine with ELID System ~", 2 nd Korea-Japan Joint Symposium on Micro-Fabrication, Seoul, Korea, (Feb 2 0, 2001) 97-106
- 35) Yoshihiro Uehara, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin:

"Development of "micro-workshop" ~microfabrication using desktop machine with elid system~", 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation Conference, Hiroshima, Japan, (July 14-17, 2002) 357-362

- 36) Testsuya Naruse, Yoshihiro Uehara, Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Yutaka Watanabe, Kazutoshi Katahira, Soichi Ishikawa, Koji Yamamoto, "Development of the Micro Tool by the Desk-top ELID Grinding System", 3rd International Conference on Leading EdgeManufacturing in 21st Century (LEM21), Nagoya, Japan, (October, 2005). 237-242
- 37) Hitoshi Ohmori, Uehara Yoshihiro, Watanabe Yutaka, Suzuki Toru, Lin Weimin, Katahira Kazutoshi, Mitsuishi Norihide, Muneaki Asami "Micro-mechanical Fabrication on Desktop Machine-Tools", 1st Topical Meeting on Microfactories `DesktopMEMS and Nano Factories" (TMMF2005), Tsukuba, Japan.
- 38) 大森 整, 森田晋也, 上原 嘉宏, 林 偉民, 鈴木 亨, 郭 泰洙: "ナノ精密加工=デスク トップ加工システムで取組む", ツールエンジニア, 45,5 (2004), 32-37
- 39) 倉田正一:機械設計に伴う人間要素-人間工学について-,日本機械学会誌,第64巻,第504
 号,(1960) 135-143
- 40)株式会社ハルナ http://www.haruna-ltd.co.jp/technology/cassette/about/index.html
- 41) セイコープレシジョン株式会社:http://www.seiko-p.co.jp/pl/qsystem01_2.html
- 42) ファナック株式会社:http://www.fanuc.co.jp/ja/product/new_product/2 006/0603/0603_roboshots2 000ib.html
- 43) 大森 整:ELID 研削加工技術-基礎開発から実用ノウハウまで-,工業調査会,(2000) 68,
 83,147,169,170,304,318
- 44)次世代の超精密加工技術編集委員会:次世代の超精密加工技術(上巻)超精密平面と面粗さ、 産業技術サービスセンター,(1993)28,38,251
- 45) 小林 昭:鏡面加工技術の進歩,総合技術センター,(1992) 287, 288

第2章 ELID研削によるデスクトップ加工

2-1 緒言

本章では、本論文で提案するマイクロメカニカル加工の実現に必要な加工技術として、デスク トップにおいて特に硬質材料の鏡面研削加工を実現する手法について、基礎実験を通して検証を 行う.デスクトップでの鏡面研削の検証対象としては、硬質材料からなる光学部品用金型および マイクロツールを選定する.マイクロツールに関しては、第3章で開発する独自の4軸デスクト ップ駆動システムによるマイクロ切削用の工具として利用すること、また鏡面研削面粗さがマイ クロツールのようなマイクロ構造体の強度に与える寸法効果を検証する意義に基づいて選定す る.

さて、従来の加工機械とデスクトップ駆動システムを比較する対象となるワークが小さい場合、 従来の加工機械では、スペース・エネルギー効率などの面で課題がある.次に量産ラインを形成 した場合、単純な平面加工なら大型加工機一台で多数の製品の加工は可能であるが、金型や微細 機構部品のように形状が複雑になると加工機一台で多数の製品を加工することは困難になって くる.このため必然的に加工機一台あたり一つの製品を加工することが必要となり、加工機一台 一台が大型の場合、スペース・エネルギー効率の観点からコストパフォーマンスの高い量産加工 が困難になる.

一方,加工機をデスクトップサイズにすることで、上述の事はクリアできるが加工機のパワー や負荷容量などから加工に要する時間の増大や、精度劣化が懸念される.これを検証するため直 線軸3軸のデスクトップ駆動システム¹⁾⁻³⁾を導入し、被削材に硬質材料である超硬合金材を用い て ELID 研削加工を行い、このような硬質材料に対してデスクトップでの鏡面加工が可能である か否かの検証を行った.超硬合金金型材を選定した理由としては、一般に研削加工が困難な難加 工材であること、またレンズなどの光学素子金型材料として広く普及していること、鏡面状態が 要求されることから、デスクトップでの鏡面研削加工の対象としては十分な適性を有しているた めである.

また近年,微細形状を有する超小型部品や金型の製作において,小径ツールを用いたマイクロ 切削による高精度・高品位加工の研究が,めざましい進歩を遂げている.しかし,マイクロ切削 による微細加工において必要不可欠な微細工具(マイクロツール)を製作するには概して多大な 時間やノウハウを要する場合が多く,マイクロ切削技術の進展の妨げとなっている.現在,一般 的に入手できるマイクロツールは工具メーカのカタログによると,微細ドリルでは直径0.08mm, 刃長0.8mm,微細エンドミルでは直径0.1mm,刃長0.2mm,微細ボールエンドミルでは先端半径 0.05mm(直径0.1mm),刃長0.2mm前後のものである.これらのマイクロツールは研削加工によっ て作られているが,さらに小径のマイクロツールとなると,加工時に折れや曲がりが発生し易く なり,特に表面粗さによるスクラッチがクラックオリジンとなり折れやすくなるなどの理由から 一層製作が困難となる.

19

マイクロツールを開発するためには、ELID研削法を適用することで、微細ピンの表面にできる スクラッチを減少させることができ、強度向上に効果があると推測される.切れ刃形状について は、角柱形状について検討を行い、ツールとしての適用性を確認し、完成したマイクロツールを 実際に使用して、加工特性を調査する必要がある.そこでこれらの要求に応えるために、マイク ロツール加工を専用として開発を行った3軸デスクトップ駆動システムを用いて検証を行う.ま た、マイクロツール加工の専用性の高いELIDシステム(旋回電極式 ELID研削システム)および ミスト式 ELID研削方式を考案した.考案したシステムの特徴および性能についてまとめ、開発 したマイクロツール専用3軸デスクトップ駆動システムにより角柱形状のマイクロツールをELID 研削により製作し、製作したマイクロツールによる加工試験を行う. 2-2 3軸デスクトップ駆動システムによる超硬合金レンズ金型の鏡面研削

本実験に使用した加工機¹⁾⁻³⁾は、X 軸, Y 軸, Z 軸の 3 軸で構成され、駆動システムにステッピ ングモータと台形ネジの組合せによりオープンループ制御で位置決め分解能は、10 µ m/step とし た.機械サイズ幅 720mm×奥行き 680mm×高さ 600mm,本体重量 588N を実現した.また、鏡面研 削の検証を行うために、ELID 研削ユニット研削ユニットを付加している.加工機の制御は、PCNC を採用しており、操作はコントローラからと PC から行うことができる.自動運転のためのプロ グラムの転送は PC で行う.使用できるプログラムは G コード言語を使用する.本加工機械の構 成を以下に示す.

①本体(マイクロクーラントユニット含む)
 ②コントローラ(ハンディタイプ)
 ③NC プログラミングコンピュータ(デスクトップまたはノートブック PC)
 ④ELID 専用電源、専用電極(100V 商用電源使用可)・・・独自製作
 ⑤工具(メタルボンドダイヤモンド(SD)/cBN/DB(ダイヤモンド+cBN)砥石)

加工機械の全体写真を図 2-1 に,砥石部周辺の写真を図 2-2 に,コントローラを図 2-3 示す. 加工機械の仕様を表 2-1 に示す.



図 2-1 加工機全体写真



図 2-2 砥石部周辺写真



図 2-3 コントローラ

XY テーブルサイズ	570 mm imes 180 mm					
	X 軸:250mm					
最大加工範囲	Y 軸:150mm					
	Z 軸:150mm					
X, Y, Z 軸駆動方式	ステッピングモータ					
マイクロスピンドルモータ	200W (AC モータ)					
マイクロスピンドル回転数	3000~8000min ⁻¹					
赴 /広海座	X, Y 軸:3m/min					
IJ1F述皮	Z 軸:1.5m/min					
分解能	オープンループ制御 10μm/step					
インターフェース	パラレルおよびシリアル (RS-232C)					
最大加工物重量	98N(10kgf)(取付治具含む)					
クーラントユニット容量	5L					
	本体:720mm×680×600mm					
外形寸法	コントローラ:					
	250mm $ imes 140$ mm $ imes 60$ mm					
舌鼻	本体:588N (60kgf)					
里里	コントローラ:14.7N (1.5kgf)					
雪酒	AC100V ±10%					
电/你	50/60Hz, 5A					
消費電力	約 300VA					

表 2-1 3 軸デスクトップ駆動システムの仕様

2-3-1 実験方法

本加工機械の基礎的加工特性の調査を行うため、カップ型砥石を用いて超硬合金の平面研削加 工を試みた.初期電解ドレッシングを、砥石回転数 3000min⁻¹、最大電流 10A、無負荷電圧 60V、 パルス τ on/τ off time 2/2 μ s で 20 分間行い、砥石表面に ELID 研削特有の不導体被膜の形成 を確認した(砥石表面が銀白色から茶褐色に変化).加工はワークの形状に合わせパーソナルコ ンピュータによりプログラミングを行い、そのプログラムにより ELID 研削加工を自動的に行っ た.砥石は、SD#4000 カップ型鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石を用いた.ELID 電源は、専用の高周 波パルス電源を用いた.研削液は専用の弱導電性研削液を水道水により 50 倍に希釈して用いた. 評価装置として、触針式表面粗さ測定装置を用いた.表 2-2 に実験システムの仕様を、表 2-3 に 加工条件を示す.

 砥石 カップ型鋳鉄ボンド砥石 φ 50×W5mm SD#4000
 ELID 電源 NX-ED1505 (新世代加工システム㈱)
 研削液 AFG-M (㈱ノリタケカンパニーリミテッド) (水道水で 50 倍に希釈)
 測定機 サーフテスト 701 (㈱ミツトヨ)

表 2-2 実験システムの仕様

表 2-3 超硬合金材の平面研削加工条件

砥石粒度	SD#4000						
砥石回転数	3000min^{-1}						
送り速度	30mm/min						
切込み量	$10~\mu$ m						
設定ピーク電流	10A						
無負荷電圧	60V						
パルス τon/τofftime	$2/2\mu$ s						

2-3-2 実験結果

初期電解ドレッシングの後, ELID 研削試験を実施した. 図 2-4 に,加工によって得られた加 工面粗さプロファイルを示す.加工機の小型化に伴い機械剛性の低下,スピンドルのトルク減少 等の影響があるにもかかわらず,SD#4000 砥石で超硬合金を Ry0.0725 µm, Ra0.01 µm という, 高品位に加工することができた. この時,電解電流値の変動やその他の異常は観察されず終始安 定した状態であった. 図 2-5 に加工中の電解電流値の変動を,図 2-6 に加工後のワーク外観を示 す.加工後のワーク表面は,良好な鏡面状態が得られている. これにより,デスクトップ加工機 上において,超硬合金の鏡面研削が実現できることが検証された.



図 2-4 表面粗さプロファイル



図 2-5 電解電流値変動グラフ



図 2-6 加工後ワーク外観

2-4 非球面加工

非球面光学素子が様々な分野で利用されるようになり、非球面加工の需要も高まってきている. しかし非球面光学素子は高品位な表面粗さ、高い形状精度が要求され、さらにはこれらの形状は 非常に複雑であり、前述したように1台の加工機で複数の製品を加工するのは不可能である.そ こで、先の実験により超硬合金の鏡面研削が可能であることを実証した3軸デスクトップ駆動シ ステムにより実際に軸対称の非球面加工を行い、その精度等を検討した.

2-4-1 実験方法

まず,加工機に市販のロータリーテーブルをX軸と平行に取り付け4軸とした.ロータリーテ ーブルはメタルボンド砥石のプラズマ放電ツルーイング⁴⁾が適用可能なように軸などの絶縁が なされた機構とした.まずロータリーテーブルにツルーイング用の砥石を装着し,さらにロータ リー軸の先端にワークを装着した後に砥石のツルーイングを行った.ツルーイング時の様子を図 2-7に示す.



図 2-7 ツルーイング時の様子

次に,NCデータの生成を行った.軸対称の非球面形状は一般的に以下に示す非球面公式により 得られる.

$$z = \frac{c \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1) \cdot c^2 \cdot x^2}} + Ax^4 + Bx^6 + Cx^8 + Dx^{10}$$
(2-1)

k=-e² (e:離心率, k=非球面係数) (2-3)

ツルーイング終了後砥石の径を測定し、非球面の公式で 0.1mm ピッチごとに求められた数値から、砥石径の分だけオフセットされた軌道をとる NC プログラミングの生成を行った.本実験では、r = -30, k = 0.5, A = -0.002 で生成し、それに従って X 軸方向に切込みを行いながら加工を行った.工具の軌道を表した図を図 2-8 に示す.



図 2-8 工具の軌道

生成した NC データを用いて超硬合金に対し加工を行った.まず,DB#400 で粗加工を行い,仕上げに SD#2000 で加工を行った.荒加工,仕上げ加工ともに加工後,表面粗さと形状を測定し評価した.実験システムの仕様を表 2-4 に,加工条件を表 2-5 にそれぞれ示す.加工中の様子を図 2-9 に示す.

加工機	3軸デスクトップ駆動システム
砥石	鋳鉄ボンド砥石
	DB#400(ダイヤモンド, cBN 複合)砥石 t5mm
	SD#2000(ダイヤモンド)砥石 t5mm
ELID 電源	NX-ED1505 (新世代加工システム㈱)
研削液	弱導電性水溶性研削液
	AFG-M (㈱ノリタケカンパニーリミテッド)
	(水道水で 50 倍に希釈)
測定機	触針式粗さ測定機
	サーフテスト 701(㈱ミツトヨ)
	非接触三次元測定装置
	NH3 (三鷹光器㈱)

表 2-4 実験システムの仕様

砥石	DB#400	SD#2000
砥石半径	35.91mm	37.49mm
砥石回転数	$2700 \mathrm{min}^{-1}$	$2700 \mathrm{min}^{-1}$
ワーク半径	20mm	20mm
ワーク回転数	$2000 \mathrm{min}^{-1}$	$1500 \mathrm{min}^{-1}$
切込み量	$10~\mu$ m	$10~\mu$ m
送り速度	30mm/min	30mm/min
設定ピーク電流	1A	1A
無負荷電圧	60V	60V
パルス τ on/τ off time	10/10μs	$10/10 \mu$ s
スパークアウト	2 回	2 回

表 2-5 超硬合金材の非球面レンズ加工条件


図 2-9 加工中の様子

2-4-2 実験結果

DB#400 で加工したワーク写真を図 2-10,表面粗さプロファイルを図 2-11 に,SD#2000 で加工 したワーク写真を図 2-12,表面粗さプロファイルを図 2-13 にそれぞれ示す.表面粗さとして, DB#400 では Ry0.785 µ m, Ra0.116 µ m が,SD#2000 では Ry0.095 µ m, Ra0.012 µ m と良好な結果が 得られた.

DB#400 で加工したワークの測定値に対し設計値をフィッティングさせたグラフを図 2-14, それ による設計値と測定値の誤差を表したグラフを図 2-15 に, SD#2000 で加工したワークの測定値に 対し設計値をフィッティングさせたグラフを図 2-16, それによる設計値と測定値の誤差を表した グラフを図 2-17 にそれぞれ示す.測定誤差として DB#400, SD#2000 共に最大誤差 0.025mm 程度 となった.軸対称非球面の形状誤差には,砥石中心とワーク回転中心との位置ずれ誤差とプログ ラミングの際の理論砥石径と加工時の実際の砥石径との誤差,そして,加工機械の動作経路の追 従精度誤差や加工機械のフレームの変形や工具逃げなどの剛性などが考えられる.理論砥石径と 実際の砥石径との誤差については,加工後の砥石径を測定することで,誤差発生の有無を予測す ることができる.

また,砥石中心とワーク回転中心との位置ズレ誤差は,非球面の形状誤差に大きな影響を与え るため,形状補正の第一段階としては,砥石中心とワーク回転中心との位置ズレ誤差を修正する ことが多い.本加工機械の位置決め分解能は,10µm/step であるため,その砥石中心とワーク回転中心の位置ズレ誤差を10µm以下に修正することが困難である.このことから最大誤差0.025mm以下に修正することができなかったと考える.これ以上の高精度化のためには,位置決め分解能の高い駆動システムを構築し,その制御性について検討を行う必要がある.こうした知見を,後章で述べる新たに開発したデスクトップ駆動システムの仕様導出の参考とした.



図 2-10 DB#400 加工後ワーク



図 2-11 DB#400 表面粗さプロファイル



図 2-13 SD#2000 表面粗さプロファイル



図 2-14 DB#400 ワーク形状



図 2-15 DB#400 形状誤差



図 2-16 SD#2000 ワーク形状



図 2-17 SD#2000 形状誤差

2-5 3軸デスクトップ駆動システムによる超硬合金のマイクロツール研削

次に、3 軸デスクトップ駆動システムにより、同じく超硬合金のマイクロツールの鏡面研削実 験を行い、その可能性について検証を行った.本システム⁵⁾⁻⁷⁾のX軸,Y軸,Z軸の各直進軸はク ロスローラガイドのステージを採用している.X軸,Y軸の最小分解能は0.25µm,Z軸の最小分 解能は0.35µmにより制御が可能である.また、繰返し位置決め精度は各直進軸とも±0.5µmを 実現している.操作方法はPCにより制御を行う.本システムの加工方法はワークに回転運動を 与えずX-Yステージの制御動作により、所望の形状に加工を行う.この加工方法により円柱形状 のみならず正方形や長方形の角柱形状、楕円形状、コーナーR付角柱形状などの様々な形状の加 工を可能とする.図 2-18に本実験で使用した3軸デスクトップ駆動システムの外観を示す.ま た、本システムの構造図を図 2-19に示す.図 2-20に加工イメージ図を示す.表 2-6にマイクロ ツール加工専用3軸デスクトップ駆動システムの仕様を示す.



図 2-18 マイクロツール加工に適用した3軸デスクトップ駆動システムの外観



図 2-19 加工機の構造

XY テーブルサイズ	70mm×70mm	
最大加工範囲	X 軸:50mm, Y 軸:50mm, Z 軸:20mm	
X, Y, Z 軸駆動方式	ステッピングモータ	
マイクロスピンドルモータ	170W (AC モータ)	
マイクロスピンドル回転数	2000~40000min ⁻¹	
分解能	X, Y 軸:0.25 μ m/step, Z 軸:0.35 μ m/step	
インターフェース	GB-IB	
最大加工物重量	40N (4kgf) (取付治具含む)	
クーラントユニット容量	10L	
外形寸法	本体:560×500×500mm	
	コントローラ:デスクトップ PC	
重量	本体:588N (60kgf)	
電源	AC100V \pm 10%, 50/60Hz, 5A	
消費電力	約 1.72kW	

表 2-6 マイクロツール加工専用3軸デスクトップ駆動システムの仕様



2-5-1 マイクロツール加工用ELID研削ユニット(旋回電極式ELID研削ユニット)

本加工機は、ワークが砥石の周囲を渦巻状に移動し、切り込みはワークが砥石周囲を1回転す るに従い、ワーク軸心を砥石軸心方向に一定量切り込み送りするように加工を行う方法であるた め、ELID 研削⁸⁾に必要な電極を固定することができないという問題がある。そこで、この問題 に対応できるようなマイクロツール加工用の ELID 研削システムを開発した。その加工方法の模 式図を図 2-21 に示す。また、図 2-22 に本 ELID 研削システムの外観を示す。



図 2-21 旋回電極式 ELID の加工方法



図 2-22 旋回電極式 ELID 研削システム

また,図 2-23 に旋回電極式 ELID 研削システムの構造を示す.このシステムは、軸受部の内輪 に固定されて自由回転可能な電解用電極,電極をワークから離れた位置に案内する電極案内板で 構成されている.給電体により砥石自体を(+)側の電極とし,(-)側電極アタッチメントを 砥石面に対向させることで,ELID 研削を可能とした.また,被削材と電極との干渉の問題は、電 極に固定された電極案内板が被削材と接し,被削材の動きに合わせて電極案内板が押され、電極 案内板とともに電極も動くように構成されている.このことにより,被削材と電極との干渉の問 題を改善した.



図 2-23 旋回電極式 ELID 研削システムの構造

2-5-2 デスクトップ駆動システムのための研削液供給方法

さらに、この ELID 研削では、通常のクーラント供給ではクーラントの供給圧力や砥石回転に よる動圧の発生によりワーク (マイクロツール) に撓みが大きく発生する懸念がある. そのため、 マイクロツールの ELID 研削時にはクーラントをミスト化して砥石-電極間に供給する手法(ミス ト式 ELID 研削方式)を考案した. ミストクーラント供給方式および装置の外観を図 2-24 に示す. $\Phi5 \times 10$ mm の#325 鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石を使用して、研削液ミスト供給条件、砥石回転数 を替えて、砥石表面に生成する不導体被膜厚さおよび電解電流値の変化を測定した. ミストは、 圧縮空気 0. 2MPa とし、研削液量を 6/4mL/min、26. 4mL/min、49. 0mL/min、砥石回転数は 8000min⁻¹, 10000min⁻¹, 15000min⁻¹ とした. ミストノズルと電極間を 30mm、電極と砥石のギャッ プは 70 µ m とした. また、電解条件は無負荷電圧 90V、最大電流 1A、デューティ比 50%とした. 図 2-25 に、砥石回転数 15000min⁻¹の場合の研削液量と不導体被膜厚さ(電解時間 30min)の関係 を示す.研削液量の増加に伴い、不導体被膜も厚くなる傾向を示した. これは、電極と砥石間に 研削液溜まりが発生し易くなり、安定した電解現象が起こりやすくなるためと考えられる. 図 2-26 には、電解ドレッシング中の電解電流値の変化を示す.研削液量が多い場合、初期実電流値 が高く、急な低下傾向を示しており、活発な不導体被膜生成が起こっていることが推察できる. その他の砥石回転数においても同様の傾向を示した.



図 2-24 ミストクーラント供給方式



図 2-26 電解ドレッシング特性に及ぼす研削液量の影響

図 2-27 に,研削液量を 6.4mL/min とした場合の砥石回転数と不導体被膜厚さ(電解時間 30min)の関係を示す.砥石回転数が高くなるに伴い,不導体被膜が薄くなる傾向を示した.これは,砥石回転数が高くなるのに伴い,遠心力の影響が大きくなり,砥石表面に付着した研削液が飛散し易くなり,電解に必要な研削液量が確保し難くなるためと考えられる.また,砥石回転数20000min⁻¹の場合では,放電が発生して安定した電解が不可能となった.この場合,極間の研削液量が不十分となり,電解が発生しなくなったためと考えられる.図 2-28 には,砥石回転数8000,15000min⁻¹における電解ドレッシング中の実電流値の変化を示す.両者とも僅かではあるが実電流値の減少が確認できた.

これらから、小径砥石に対してミスト供給方式により、不導体被膜厚さから考えて十分な電解 ドレッシングを実施できることがわかった.



図 2-27 砥石回転数と不導体被膜厚さの関係の影響



図 2-28 電解ドレッシング特性に及ぼす回転数の影響

2-5-3 デスクトップ駆動システムのためのツルーイングシステム

通常の研削では、加工前のドレッシング工程の際に砥石形状の成形および、砥石振れの除去を 目的としたツルーイング工程を兼ねて行われることが多いが、ELID研削ではドレッシング工程と ツルーイング工程を分けて行われる.その理由は、ELID研削用砥石がボンド材に主として鋳鉄を 使用しているため、難ツルーイング性を持ち砥石形状を成形し難いためである.そのため、ELID 研削システムにおける砥石のツルーイングは、プラズマツルーイング法を用いて行われる.プラ ズマ放電ツルーイング法⁴⁾とは、研削砥石を+側電極に、そして、ツルーア砥石を-側電極とし、 対向させた両電極間に電圧を印加する.この時、ミスト化した研削液を供給する.両極間で局所 的にプラズマ放電が発生し、砥石のボンド部が溶融除去され、所望の形状に成形できる.ツルー アの砥石には、SD#1200のブロンズボンドダイヤモンド砥石を用い、プラスチック製の絶縁ホル ダーに固定した.ツルーア砥石側は無回転である.研削砥石がツルーア砥石の円周上を公転しな がら切り込む NC 制御でプラズマ放電ツルーイング加工を行った.放電用の電源装置には、ELID 電解電源装置を兼用した.ツルーイング加工を行った結果、砥石の振れを1μmに仕上げること ができた.図 2-29 にツルーイングシステムを示す.また、表 2-7 にツルーイング条件を示す.



図 2-29 ツルーイングシステム

研削条件	研削砥石	SD#325	
	(鋳鉄ボンドタイヤモンド砥石)	0D#020	
	ツルーア砥石	SD#1200	
	(ブロンズボンドダイヤモンド砥石)		
	研削砥石回転数	9000min^{-1}	
	切り込み	1μ m	
放電条件	設定ピーク電流	1A	
	無負荷電圧	60V	
	パルス τ on/τ off time	$2/2\mu$ s	

表 2-7 ツルーイング条件

ツルーイング,初期電解ドレッシングを行った後,角柱形状のマイクロツールの ELID 研削加 工実験を行った.加工実験条件を表 2-8 に示す.マイクロツールの形状は,一辺 71 µm,長さ 500 µm (アスペクト比 5)の角柱形状であり,材質は超硬合金を用いた.測定個所を図 2-30 に,測定結 果を表 2-9 に示す.測定には,レーザースキャニングマイクロメータを使用し,Vブロックの溝 にマイクロツールのシャンク部分を固定して,少しずつ回転させながら一辺の長さ及び対角線の 長さを計測した.実験によって得られたマイクロツールの外観を図 2-31 に示す.

研削条件	研削砥石	SD#325
	砥石回転数	20000min^{-1}
	切り込み 量	0.5 μ m
電解条件	設定ピーク電流	1 A
	無負荷電圧	30V
	パルス τ on/τ off time	$2/2\mu~{ m s}$
研削液		
	(水道水で 50 倍に希釈)	

表 2-8 角柱形状マイクロツール ELID 研削条件



46

	A 寸法	B 寸法	対角線寸法
	71μ m	$71~\mu$ m	$100~\mu$ m
先端部	78μ m	78μ m	$111~\mu$ m
			$(110.3\mu{ m m})$
中間部	78μ m	79μ m	$111~\mu$ m
			$(111\mu$ m)

表 2-9 角柱形状の測定結果

※ 対角線の()内の数値はA測定値とB測定値から算出した数値(単位:µm)



図 2-31 角柱形状のマイクロツール

これらの結果から、3 軸デスクトップ駆動システムにおける ELID 研削により、超硬合金の約80µmの角柱形状のマイクロツールが破損せずに加工できることを実証した.次に、この角柱形状のマイクロツールが、実際に切削工具として機能するのかどうかを確認するため、SUS420J2を対象に彫刻文字の切削加工を試みた.加工機には、本システムを用いて NC 制御にて "ELID"の文字を彫刻した.切削液は、液滴化の状態で供給した.切削条件を表 2-10 に示す.図 2-32 に加工後の彫刻文字、図 2-33 に加工後のマイクロツールの先端部を示す.

加工機械	3軸デスクトップ駆動システム	
切削液	石油系	
加工工具	角柱マイクロツール	
	一辺:約80µm	
被削材	SUS420J2	
回転数	30,000min ⁻¹	
切り込み量	$1\mu{ m m/pass}$	
総切り込み量	20 μ m	
送り速度	75mm/min	

表 2-10 SUS420J2 材の ELID 彫刻文字切削条件



図 2-32 加工後の彫刻文字



図 2-33 加工後のマイクロツール先端部

加工は、4 文字ごとに 1 µm の切り込みを行い、総切り込み量 20 µm まで加工を行ったところ、 マイクロツールは総切り込み量 21 µm 目の加工途中で破損した.しかし、文字は十分加工するこ とができ、マイクロツールとして機能することが確認できた.

同様の加工方法により、さらに一辺の長さを約 35 µm と小さくしたマイクロツールを製作し、 SK4 材(板厚 10 µm)を対象にマイクロギアの切削加工を試みた.切削液は液滴化の状態で供給 した.切削条件を表 2-11 に、図 2-34 に被削材固定方法の模式図を示す.

加工機械	3 軸デスクトップ駆動システム	
切削液	石油系	
加工工具	角柱マイクロツール	
	一辺:約 35µm	
被削材	SK4 材	
回転数	30000min ⁻¹	
切り込み量	1μ m/pass	
総切り込み量	15 µ m	
送り速度	3mm/min	

表 2-11 マイクロギア切削条件



図 2-34 被削材固定方法の模式図

被削材が板厚 10µm という薄板を使用したことから,固定方法に注意する必要があったため, 両面研削加工により仕上げた押さえ板と固定治具で被削材を挟み込むようにして図 2-34 に示す ように固定を行った.押さえ板および固定治具は真鍮材で製作したものを使用した.また,押さ え板と固定治具の固定には接着剤を用いた.表 2-12 にマイクロギアの諸元を示す.加工は 1µm の切り込みを行い,総切り込み量 10µm まで加工を行った.図 2-35 に加工の様子を,図 2-36 に 加工後のマイクロギアを示す.

本実験では、3軸デスクトップ駆動システムによるマイクロツール加工に適応した ELID 研削シ ステムの開発を行い、本装置を使用してマイクロツールの製作を行った.そして、製作したマイ クロツールを使用して、文字彫刻やマイクロギアの加工を行った.

その結果を下記に示す.

・一辺が約80µmのマイクロツールや一辺が約35µmのシャープエッジの角部を持つ角柱形状の マイクロツールの加工が可能であることがわかった.

・マイクロツールを破損させずに ELID 研削を適用することができた.

・彫刻文字や、マイクロギアの製作を実現し、マイクロツールとしての機能を果たすことが確認 できた.

モジュール	0.3	
歯数	8	
歯先円直径	3. Omm	
全歯たけ	0.675mm	
被削材	SK4 材 (t=10 µ m)	

表 2-12 マイクロギアの諸元



図 2-35 マイクロギア加工の様子



図 2-36 加工後のマイクロギア

2-5-5 マイクロツールの評価について⁹⁾⁻¹⁴⁾

マイクロツールの加工における表面性状の改善を目的とした研削加工条件の最適化について 検討を行った.特に、マイクロツールの機械的強度への表面性状の影響について、微小変位およ び微小荷重制御可能な超微小硬度試験機を応用し、加工されたマイクロツールの破壊試験を行っ た.さらに、実加工品の性能における表面性状の影響を検討するためマイクロツールによる薄膜 金属シートへのマイクロプレス試験を行った.

図 2-37 にマイクロツール加工の様子を.表 2-13 に主な加工条件を示す.マイクロツールの寸 法は,先端 2µm,根元 60µm,長さ 600µm の四角錐形状に設定した.なお,被削材には,超硬 合金を使用した.その本加工機により製作したマイクロツールの一例を図 2-38 に示す.本図よ り,品質の良いマイクロツールが加工できたことがわかる.

そこで、加工したマイクロツールの表面性状について AFM (原子間力顕微鏡 (SII 社 製:Nanopics1000))を用いて測定を行った.図2-39 にその AFM 像を示す.マイクロツールの表 面性状は、根元と先端において異なっていた.根元では、細かい研削痕とともに結晶粒界の粒界 段差が確認できるが、先端では細かい研削痕が消え、粒界段差がはっきりと確認できる.加えて、 先端ではねじれのような跡が見られることから、先端側ほどマイクロツール自身の剛性が低下す るため、びびり振動のような現状を起こし、図2-39 (b)のようなうねりのあるデータが確認さ れたものと示唆される.

	鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石		
砥粒粒度	SD#1200, SD#4000		
	(SD#325, SD#2000)		
被削材	超硬合金		
	送り速度	75mm/min	
研削条件	砥石回転数	$8000 \mathrm{min}^{-1}$	
	ステップ切り込み	0.5, 1μ m	
電解条件	設定ピーク電流	1A	
	無負荷電圧	30V	
	パルス τ on/τ off time	$2/2\mu$ s	
研削液	NX-CL-CG7 (新世代加工シ	ステム(株)	
	(水道水で 50 倍に希釈)		

表 2-13 四角錐形状マイクロツール ELID 研削条件



図 2-37 マイクロツール加工の様子



図 2-38 マイクロツール



(a) 根元部分



(b) 先端部分図 2-39 マイクロツールの表面性状 (AFM)

2-5-6 マイクロツールの加工条件の最適化

SD#1200 の砥石を使用して加工したときのマイクロツールの表面性状を三次元表面構造解析顕 微鏡 (Zygo 社製: New View 5032) で観察した. その結果を図 2-40 に示す. 図 2-40 (a) は切り 込み量が 1 μ m の時,および,図 2-40(b)は,切り込み深さ 0.5 μ m で加工した場合の 3D 画像結 果である. なお,加工されたマイクロツールは,切り込み量以外の加工条件は同一とし,さらに 測定する際もほぼ同じ位置で測定するように設定した. これらの結果から,0.5 μ m の切り込み量 の場合の表面は,1 μ m の切り込み量の場合に比べ,非常に滑らかであることがわかる.

また, SD#1200 砥石と SD#4000 砥石で加工した場合のエッジ部の相違について SEM で観察した 結果を図 2-41 に示す. なお, 図 2-41 (a) は SD #1200, 図 2-41 (b) は SD #4000 加工した場合 の SEM 像である.これらの結果より, SD #1200 の砥石で加工した場合では, 砥粒径の影響もあり, エッジ部の段差(凹凸)が大きいが, SD #4000 の砥石で加工した場合では, エッジ部が非常にシ ャープにできていることが確認できる.

さらに,最終仕上げ SD #4000 砥石での加工に至るまでの砥石選定と表面性状の関係について, SEM 観察した結果を図 2-42 に示す.なお,図 2-42 (a) は SD #325, SD #4000 の 2 段階の粒度を, 図 2-42 (b) は SD #325, SD #1200, SD #2000, SD #4000 の 4 段階の粒度を用いてそれぞれ加工し た場合の SEM 像である.これらの結果より,4 段階の粒度の砥石を用いた加工は,2 段階の粒度 を用いた場合に比べ,表面性状が良くなっていることが確認できる.すなわち,最終仕上げに至 るまでの砥石選定は非常に重要であり,表面性状の向上には SD #1200 から SD #4000 までの粒度 の砥石を用いることが必要であることが確認された.





(b) 切り込み量 0.5µm図 2-40 切り込み量による表面性状 (New View)



(a) SD#1200



(b) SD#4000図 2-41 砥石粒度によるエッジ部の状態(SEM)



(b) SD#325→SD#1200→SD#2000→SD#4000
 図 2-42 マイクロツールの表面状態 (SEM)

10µm

これらのように、加工条件の最適化は、高品位かつ、より微細なマイクロツールの加工を可能 とすることが示唆される.より微細なマイクロツールの一例を図 2-43 に示す.本マイクロツー ルは、先端部の一辺の長さが約 2µm で、加えて非常に高いアスペクト比が達成されている.そ れとともに、この結果が示す重要な点は、被削材(超硬)が延性モードで加工されているという 点である.なお、マイクロツールの根元および先端の表面性状は同様であった.



図 2-43 マイクロツールの先端部拡大 (SEM)

2-5-7 マイクロツールの表面性状と破壊強度の関係

マイクロツールの表面性状がその機械的強度へ及ぼす影響を検証するため,超微小硬度試験機 (CSM社製:NHT)を用いて,破壊強度試験を行った.図2-44 に超微小硬度試験機(NHT)の概観 写真を,図2-45 に破壊強度測定の様子を示す.超微小硬度試験機は,通常,硬質薄膜の硬度測 定に使用されているものであるが,今回は,マイクロツールの破壊強度を測定するために,図2-45 に示すようにマイクロツールの四角錐形状の勾配に合わせて,マイクロツールを適度に傾斜させ ることができる治具を製作し,マイクロツールを固定して破壊強度の測定を行った.なお,マイ クロツールへの押し込み位置は先端から 5µm として,破壊強度(押し込み荷重)および押し込 み深さ(たわみ量)を測定した.ここで,押し込み深さは,マイクロツールの変形量に相当する と考えられる.測定されたサンプルは,SD #1200 および SD #4000 の砥石で加工されたマイクロ ツールであり,破壊強度測定結果をそれぞれ図2-46 (a)および (b) に示す.

この結果より、マイクロツールの押し込み荷重および押し込み深さ量を示す折れ線グラフは、 双方ともに安定したカーブを示しており、この破壊強度試験が適切に行われたことを示唆してい る¹⁵⁾. また、破壊強度および押し込み深さは、SD #1200 の砥石で加工されたマイクロツールの 場合、それぞれ177mN、1.25µm、SD #4000 の砥石で加工されたマイクロツールの場合、それぞ れ242mN、1.65µmであった. これらの結果は、表面性状がマイクロツールの機械的強度に大き な影響を及ぼすことを示している.



図 2-44 超微小硬度試験機 (NHT)



図 2-45 破壊強度測定の様子



図 2-46 破壊強度測定結果

加えて,図 2-47 に、マイクロツールの破断面の SEM 像を示す.この結果より、破断の起点は、 表面粗さの凹凸の大きい箇所から発生していることがわかる.すなわち、マイクロツールの機械 的強度の低下を回避するためには、高品質な表面性状を必要とすることが示唆される.このこと から、デスクトップ駆動システムにおける ELID 研削の複合効果として、マイクロツールの加工 を実現した意義は大きいと考える.



図 2-47 マイクロツールの破断面 (SEM)

2-6 結言

本章では、スペース・エネルギー効率の観点からコストパフォーマンスの高い生産加工が可能 なデスクトップ加工機において、加工機のパワーや負荷容量などがかかる加工に要する時間の増 大や精度劣化が懸念されるので、これらのことを検証した.超硬合金を用いたレンズ金型および マイクロツールの鏡面研削実験をデスクトップ駆動システムによって行った結果を述べた.ステ ッピングモータを使用した3軸のデスクトップ駆動システムを用い、分解能10µm/stepの駆動 システムを用いて、超硬合金の平面研削加工および非球面研削加工を実施し、また分解能 2.5µm/stepの駆動システムを用いて、マイクロツールの研削加工を実施した.

分解能 $10 \,\mu$ m/step の駆動システムによる超硬合金の平面研削加工では, SD #4000 のダイヤモンド砥石で Ry0.0725 μ m, Ra0.01 μ m の表面粗さを達成した. 次に同じ駆動システムによる超硬合金の非球面加工では, SD#2000 のダイヤモンド砥石で Ry0.095 μ m, Ra0.012 μ m の表面粗さを得ることができたが,分解能の影響から形状精度は, 25 μ m であった.

さらに分解能 2.5μm/step の駆動システムによって,先端部分 2μm のピラミッド型マイクロ ツールを加工できた.そして,製作したマイクロツールを用いたマイクロ切削加工を,鋼材に対 して行い,文字彫刻や歯車の切り出しを実現した.

以上により、デスクトップ駆動システムと ELID 研削法¹⁶⁾⁻¹⁸⁾を複合させることにより、硬質材 料の鏡面研削が可能であること、加工に実用可能なマイクロツールを製作できることを実証した. また、適用した加工機の仕様から精度面での課題に関わる知見を得た.これらの知見を集約する と下記のようにまとめられると考える.(図 2-48)

・ELID研削との複合化により、業界で初めてデスクトップ サイズの駆動システムで鏡面研削を実現
・そして、硬質・脆性材料に対してデスクトップでの鏡面研 削を実現
・さらに、低研削負荷、砥石の高剛性などからデスクトップ 駆動システムにおいても高精度化を実現

▼ 求められるデスクトップ駆動システムによる生産スタイルのターゲット として,光学部品や金型などの工業的実用製品の作製が可能となる ことを見いだした.

図 2-48 目標達成項目

2-7 参考文献

- 1) 大森 整他:卓上3軸ELID加工機の開発,日本機械学会九州支部久留米地方講演会講演論文 集,(1997)7月
- 2) 松澤 隆他:テーブルトップ3軸ELID研削加工機の開発,1999年度砥粒加工学会学術講演会, (1999)9月
- 大森 整他:卓上型 ELID3 軸加工機による加工特性,1999 年度精密工学会秋季大会学術講演 会,(1999)9月
- 4) 李 偉他:プラズマツルーイング装置の開発,日本機械学会講演論文集,No.998-2, (1999)
 92
- 5) 大森 整: "MICRO-WORK-SHOP (マイクロワークショップ)"の開発状況, 理研シンポジウム ~マイクロファブリケーション研究の最新動向~テキスト, Vol. 5, (1999) 56
- 6) 上原 嘉宏他:ELID マイクロファブリケーションにおけるマイクロツールの開発(第1報:
 マイクロツールの加工特性について),砥粒加工学会誌,46,1,(2002)38
- 7) 大森 整:マイクロツール開発のための ELID マイクロファブリケーションシステム, 2000 年 度精密工学会春季学術講演会論文集, (2000) 348
- 8) 大森 整:超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法,精密 工学会誌,第59巻,9,(1993)1451
- 9) 上原 嘉宏他:ELID マイクロファブリケーションにおけるマイクロツールの開発(第2報: マイクロツールの評価について), 砥粒加工学会誌, 48, 5 (2004) 269
- 10) Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, Yoshihiro Uehara, Yutaka Watanabe and Weimin Lin.:
 " Improvement of Mechanical Strength of Micro Tools by Controlling Surface Characteristics", Annals of the CIRP, Vol. 52, No. 1, (2003) 467
- 11) 潘 燕, 佐々木 哲夫, 伊藤 伸英, 大森 整, 上原 嘉宏, 林 偉民, 大森 宮次郎, 大井 豊:"微小量研削液供給による ELID 研削特性",型技術協会誌, 17, 7 (2002) 122
- 12) Yoshihiro Uehara, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, Ken-Ichi Kumakura, Shin-Ya Morita, Tomoyuki Shimizu, and Tetsuo Sasaki: "Development of Small Tool by Micro Fabrication System Applying ELID Grinding Technique", 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Micro-Fabrication, Seoul, Korea, (Feb 20, 2001) 107
- Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, Yoshihiro Uehara, and Weimin Lin: "ELID-Grnding of Microtool and Applications to Fabrication of Microcomponents", 2002 CIRP design SEMinar, Hong Kong, (May 16-18, 2002) MF02 (CD-ROM)
- 14) 石川惣一他:ELID マイクロファブリケーションシステムにおけるマイクロツールの開発(第 3報:マイクロツールの高能率加工について), 砥粒加工学会誌, 49, 3 (2005) 157

- 15) 材料強度学,(社)日本材料学会(大南正瑛編集),京都,(1988)102
- 16) 大森 整, 上原嘉宏:微細形状加工用 ELID 研削装置, 公開番号:特開 2002-1657, 公開日:平成 14 年 1 月 8 日
- 17) 大森 整,上原嘉宏,三石憲英:電解ドレッシング用自在電極とこれを用いた電解ドレッシング方法,出願番号:特願 2003-322948
- 18) 大森 整,上原嘉宏,片平和俊,浅見宗明,三石憲英,石川惣一:マイクロツール研削装置
 及び方法,特開 2006-175528,公開日:平成 18 年 7 月 6 日

第3章 4軸デスクトップ駆動システムの開発 および性能評価
3-1 緒言

本論文の目標とするマイクロメカニカル加工およびそのための4軸デスクトップ駆動システム の実現を目指し、第2章においては3軸デスクトップ駆動システムによる平面研削加工、非球面 形状加工、マイクロツール加工などの実現性について検証を行った.その結果、デスクトップタ イプサイズの駆動システムを使用しても良好な表面粗さが得られる研削加工手法と、マイクロツ ールを用いた切削加工が実現可能であることを実証した.しかしながら、これまでのデスクトッ プ駆動システムは制御分解能が低く、使用可能な砥石粒度や形状精度の限界も明らかとなってい る.また、複雑かつ微小な形状加工のためには微小ステップにより駆動することが必要となり、 さらに自由な形状加工のためには、多自由度のデスクトップ駆動システムが必要となる.

そこで本章においては、これまでにない独自の4軸デスクトップ駆動システムを開発し、加工 自由度の高い操作性を目指して、駆動システムとしての制御性や加工システムとしての性能評価 および検討を、実験を通して行った.

3-2 4軸デスクトップ駆動システムの開発経過

開発した4軸デスクトップ駆動システムは、本論文の序章で述べた4軸デスクトップ駆動シス テムのコンセプトに基づき、卓上型で鏡面研削加工と切削加工とを両立することを目的として開 発を目指したものである.開発された初号機は,直線軸3軸と回転軸1軸の合計4軸の駆動系を ステッピングモータ駆動による精密ステージとモータドライバおよびボールブッシュガイドに より構成した. 制御は, PC からモータドライバとの RS-232C の通信により行った. このシステム による加工結果は、1 軸制御による研削加工では、市販の平面研削盤に ELID 研削システムを搭載 したものと同等の加工結果を得ることができた. さらに, 第2章の加工結果と初号機の加工結果 により、卓上サイズの加工機において ELID 研削システムを搭載することにより精密研削加工を 実現した実績と問題点に留意して,2 号機の開発を行った.2 号機は,駆動系をサーボモータお よびローラーガイド, ボールネジにより構成し, セミクローズドループ制御とした. また, NC コ ントローラにオープンモーションコントローラを使用し,3軸同時制御を可能とした.そして3 |号機は, 2 号機をさらに発展させて, ガラススケールを用いてフルクローズドループ制御を採用 した. また, Y 軸にエアースライドガイドを採用し, NC コントローラにモーションコントロール ボードを使用することで、プログラムの先読み機能、マクロ機能などの NC 機能を充実させ、鏡 面切削加工をも可能とした.図 3-1 に当該4軸デスクトップ駆動システム開発の推移を示す.ま た,表 3-1 に各加工機における使用要素の比較を,表 3-2 に加工機の仕様を示す. 開発された 4

65

軸デスクトップ駆動システムは序章で述べたコンセプトにより可搬性に優れたものであるが、使 用温度範囲については構成する要素部品の使用可能温度範囲から18~25℃の仕様としている.当 該4軸デスクトップ駆動システムの開発を実現した重要な機械要素としてはC軸(ワーク軸)ベ アリングおよび専用工具スピンドルの開発がある.特にC軸について市販品/規格品はなく、当 該デスクトップ駆動システム独自の機械要素であり、機械構造設計とあいまって、最も工夫した 点である.これらについては後述する.

ステッビングモータ仕様

(a) 初号機(モデルI)





サーボモータ仕様 LMボールガイドタイプ 作業性向上のため間口を広げた 剛性向上のためにガイドレールと門型構 造を分けた



(b) 2 号機(モデルⅡ)



(c) 3 号機(モデルⅢ)

図 3-1 4 軸デスクトップ駆動システム開発の推移

		モデルI	モデルⅡ	モデルⅢ
	X 軸			リニアローラウ
摺	Z 軸	ボールブッシュ	IMボールガイド	エイ
部	Y 重由	ガイド		エアースライド
	т тра			ガイドウェイ
駆動モータ	X, Y, Z 軸	ステッピングモ ータ	オプティカルエ ンコーダ付サー ボモータ	オプティカルエ ンコーダ付サー ボモータ
制御方式	X, Y, Z 軸	オープンループ	セミクローズド ループ/フルク ローズドループ	フルクローズド ループ

表 3-1 4 軸デスクトップ駆動システムの使用要素の比較

	X 軸	100mm
ストローク	Y 軸	100mm
	Z 軸	100mm
	X 軸	0.1 μ m
分解能	Y 軸	0.1 μ m
(最小設定単位)	Z 軸	0.1 μ m
	C 軸	0.036° (500min ⁻¹)
主軸回転数	30	$00{\sim}40000$ min ⁻¹
本体の大きさ	56	$0 \times 580 \times 650$ mm
本体重量	約1	.2kN (130kgf)
入力電源		AC100V
使用環境	周囲	温度 18~25℃
	推奨許	容温度変動 ±1℃

表 3-2 4 軸デスクトップ駆動システムの仕様

3-2-1 4軸デスクトップ駆動システムの機械精度

開発した4軸デスクトップ駆動システムの機械精度について,静的精度を検証した.

3-2-1-1 静的精度

開発した4軸デスクトップ駆動システムの静的精度は、4直角マスタを使用して、直角度、真 直度の測定を行った.また基準バーを使用して、回転テーブルの芯振れおよび面振れ精度の測定 を行った.図3-2に直角度の測定の様子と測定結果を示す.結果として、直角度および真直度は 各軸3.5µm/80mm以内の精度に抑えられていることが分かる.また、回転テーブルの芯振れ、面 振れともに1µm以下を達成していることが分かる.さらに、テーブル上面に水準器を置いて水 平面を出すことにより、ほぼ、再現良く図3-2に示す測定結果のデータが得られることが確認さ れている.

	Ż		
1	1	þ	
	ine		1

I, 直角度(4直角マスタ使用)

X軸に対するY軸	1.5 μ m/80mm
X軸に対するZ軸	2.5μm/80mm
Y軸に対するZ軸	3.5 μ m/80mm

Ⅱ,真直度

X軸	1.0 μ m/80mm	Ⅲ,回転	テーブル	(C軸)
Y軸	0.5 μ m/80mm	芯振精度	1.0μ m	
Z軸	3.5 μ m/80mm	面振精度	0.5μ m	

図 3-2 測定の様子と測定結果

3-2-1-2 4軸デスクトップ駆動システムの仕様および特徴

開発した4軸デスクトップ駆動システムの仕様について詳述する.まず始めに,座標軸数はX 軸,Y軸,Z軸,C軸の4軸を有し,また,X,Y,Z軸の直線軸の分解能(最小設定単位)は 0.0001mm(0.1µm),C軸の分解能(最小設定単位)は0.036°である.本デスクトップ駆動シス テムの開発において最も工夫したC軸について図3-3,図3-4に示す.本軸受は,ワーク軸とし て連続回転および割出機能を両立するために,精度面,トルク面,そしてコンパクト性に優れた 特徴を必要とするため,市販品/規格品が存在しないことから独自に設計・開発を行ったもので あり,当該デスクトップ駆動システムのキー要素部品の1つと言うことができる.図3-5に主軸 スピンドルの取付方向を示す.図3-5のように主軸スピンドルは2つの軸方向に対応しているの で,ストレートインターナル砥石を用いた平面研削加工や半円R付ストレート砥石を用いた球形 状などの三次元自由曲面加工ができ、そして、軸付インターナル砥石を用いた穴の内面加工およ び側面の研削加工、または、ボールエンドミルなどを用いた三次元切削加工および穴明け加工な どが行える.図 3-6 および図 3-7 にそれぞれの取付方向に応じた加工イメージを示す.主軸スピ ンドルの回転数は1分間に3000~40000回転が可能であり,直径0.1mm以下の超微細工具を用い た加工が可能と考える.工具スピンドルについても、剛性・トルクと回転数とを両立する独自開 発の軸受を搭載することにより、コンパクトながら硬質材料の研削および切削加工を可能とする 特徴を有している. 独自開発の工具スピンドルを図 3-8 および図 3-9 に示す. 本体の大きさは幅 ×高さ×奥行きが560mm×580mm×650mmと通常のテーブルの上に設置することのできる大きさで、 しかも、本体の重量は約 1.2kN(130kgf)と一般に大人二人で持ち上げることのできる重量であ り, 重厚感を感じさせないコンパクトな仕様を実現した. 機械本体の前面部分にクーラントタン クを設置して、取り付け、取り外しが容易に行えるようにして、クーラント液の交換などを必要 に応じて簡便に行うことを可能とする工夫をした. 図 3-10 にクーラントタンクの設置位置を示 す.制御装置はパーソナルコンピュータを使用するためLAN接続による加工機のモニタリングや 加工プログラム指示などの集中管理システムを構築することが可能である.また2章によりデス クトップ駆動システムにより検証を行った ELID 研削システムを標準装備しており, 鏡面研削加 工を実現できるのみならず、エンドミル加工などの切削加工にも対応できる.



図 3-3 独自設計された C 軸の構造



図 3-4 独自設計された C 軸の外観



(a) 横方向取付

(b) 縦方向取付 図 3-5 工具スピンドルの取り付け方法







図 3-7 縦方向取付時の加工イメージ



図 3-8 独自開発の工具スピンドルの構造



図 3-9 独自開発の工具スピンドルの外観



図 3-10 クーラントタンク

3-3 4軸デスクトップ駆動システムによる平面研削加工¹⁾⁻²⁾

3-3-1 実験装置および実験条件

開発した4軸デスクトップ駆動システムの研削加工における基本性能評価を目的として,被削 材に超硬合金を用いて平面研削加工を行い,表面粗さを測定して性能評価を行った.加工方法は, 砥石にストレートタイプの鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石を使用し,機械の左右送り(X軸)を研 削方向,上下送り(Z軸)を切り込み方向,前進後退送り(Y軸)を送りピッチ方向として加工 を行った.加工システム全景の, ELID 電極周りの様子を図 3-11 に,加工条件を表 3-3 に示す. 図 3-12 に加工原理の模式図を示す.



図 3-11 ELID 電極関係

	無負荷電圧	60V
電	設定ピーク電流	10A
解条	パルス τ on/τ off time	$2/2\mu$ s
件	NX-CL-CG7 (新世代加工システム(㈱)	
	(水道水で 50 倍に希釈)	
	研削砥石	SD#4000
研 削 条 件	砥石周速	$3500 \mathrm{min}^{-1}$
	送り速度	500mm/min
	切り込み	0.001mm/pass

表 3-3 超硬合金材の平面 ELID 研削条件



図 3-12 加工原理

3-3-2 実験結果および考察

図 3-13 は、研削加工された超硬合金の様子を、図 3-14 には研削加工時の面粗さの測定結果を示す. Ry0.076 µm, Ra0.0088 µm となった. この結果からも ELID 付与による効果とともに機械の 安定性等により良好な研削面が得られていることが分かる.



図 3-13 加工サンプルの様子



図 3-14 研削面の性状

3-4 4軸デスクトップ駆動システムによるポケット形状の切削加工³⁾⁻⁵⁾

3-4-1 実験装置および実験条件

次に、開発した4軸デスクトップ駆動システムの切削加工における有効性を確認するために、 スピンドル軸を研削時の横方向から縦方向に付替え、本機の加工特性を調査するために切削加工 を行った.ワークには、SKD11を使用し超硬エンドミルにてポケット加工および、X,Y,Z 軸なら びに回転軸のC軸を駆使し超硬ボールエンドミルにて彫刻加工を行った.実験条件を表 3-4 に示 す.

加工機	4 軸デスクトップ駆動システム		
	超硬エンドミル φ3mm		
切削工具	超硬ボ−ルエンドミル φ0.6mm		
ELID 電源	NX-ED-1505(新世代加工システム㈱)		
被削材	SKD11 (HRC60)		
	回転数	$18000 min^{-1}$	
切削条件	切込み量	$10{\sim}20\mu$ m	
	送り速度	1000mm/min	

表 3-4 SKD11 材のポケット加工実験条件

3-4-2 実験結果および考察

SKD11 材を超硬エンドミルにて、ポケット加工ならびに超硬ボールエンドミルにて彫刻を行った加工後のワークを図 3-15 に示す.

加工精度に関しては、図 3-16 に加工寸法個所を示す.その結果、目標加工寸法の 5µm 以内に 測定値が入っており良好な切削が可能である事と良好な機械剛性が確認できた.



図 3-15 エンドミル加工後の様子



図 3-16 加工寸法測定個所と測定結果

3 - 4 - 3 $\pm \delta b$

本節では、4軸デスクトップ駆動システムの開発を行い、ストレートインターナルタイプ鋳鉄 ボンド砥石を用いて超硬合金の鏡面研削加工および、超硬エンドミルを用いてのマイクロ切削加 工を行った.この基礎実験の結果により、良好な鏡面研削加工ならびに切削加工が行うことがで きた.開発機されたデスクトップ駆動システムは、加工機としての基本的な能力が確認されたと 言える. 3-5 4軸デスクトップ駆動システムによるレンズの鏡面研削加工⁶⁾⁻⁹⁾

3-5-1 実験装置および実験条件

本節では、フルクローズドループ制御の有効性を調査するために、開発した4軸デスクトップ 駆動システムの駆動制御方式をセミクローズドループ方式とフルクローズドループ制御方式で 構築した2種類の駆動システムで、被削材にBK-7を用いて凸型レンズの研削加工を行った.研 削砥石は、SD#325、SD#2000、SD#4000の順番で3種使用した.その時の研削条件および電解条件に ついて表3-5に示す.加工後、非接触三次元測定装置で形状精度の測定を行い、フルクローズド ループ制御タイプについて精度評価を行った.

加工機械	セミクローズドループ4軸デスクトップ駆動システム	
	フルクローズドループ4軸デスクトップ駆動システム	
研削砥石	ストレートインターナルタイプ鋳鉄ボンド砥石	
	(φ75, 5.0厚, SD#325, SD#2000, SD#4000)	
ELID 電源装置	NX-ED1505(新世代加工システム(株)	
被削材	BK-7	
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム㈱)(水道水で 50 倍に希釈)	
その他	非接触三次元形状測定装置 NH-3 (三鷹光器㈱)	

表 3-5 実験システム構成

3-5-2 実験結果および考察

加工実験の結果,セミクローズドループ方式の4軸デスクトップ駆動システムによる加工形状 精度は P-V 値 8µm であった.それに対して,フルクローズドループ方式を搭載した4軸デスク トップ駆動システムの形状精度は P-V 値 3µm であった.これらは,公式からの理論値により生 成した加工プログラムとの誤差を評価した結果である.この結果から,デスクトップタイプの駆 動システムであっても制御系をフルクローズドループ制御にすることでセミクローズドループ 制御の場合より NC の追従性を向上できることが確認できた.加工サンプルの様子を図 3-17 に示 す.また,各制御方式による加工形状精度の比較データを図 3-18 に示す.



図 3-17 加工サンプルの様子



図 3-18 各制御方式による形状精度の比較

3 - 5 - 3 the test states that 3 - 5 - 3 the test states are straight the test states at the test state

本節では、4軸デスクトップ駆動システムの開発において、フルクローズドループ制御の効果 について加工結果による比較を行った.この基礎検討の結果、デスクトップタイプの加工機であ っても制御系をフルクローズドループ制御にすることで追従性を向上でき、光学部品の加工形状 精度を向上できることがわかった. 3-6 4軸デスクトップ駆動システムの鏡面切削加工の試み

3-6-1 実験装置および実験条件

次に、開発したフルクローズドループ制御による4軸デスクトップ駆動システム(図 3-19)に より鏡面切削の基礎的実験を行うために、被削材は無酸素銅を使用し、加工機にダイヤモンドバ イトを取り付けるために必要な治具を作成し、ダイヤモンドバイトを被削材に垂直になるように 固定した.追従性を確認するために、テーブルに任意の傾きを持った駆動システムで、1 軸のみの 送りと、2 軸同時の送り、つまり、2 軸により送りの角度の補正を行い、その追従性を検証した.X 軸 と Y 軸ではガイド方式が異なるため、X 軸を加工方向とする加工と、Y 軸を加工方向とする加工 の 2 種類の加工を行った.X 軸の構成を図 3-20 に示す.加工実験の結果、被削材の表面形状を測 定した.表 3-6 に加工システムの仕様を、表 3-7 に加工実験条件を示す.図 3-21 に加工原理を、 図 3-22 に加工の様子を示す.



図 3-19 鏡面切削実験に使用した4軸デスクトップ駆動システム



図 3-20 X 軸構成

	X 軸	150mm
ストローク	Y 軸	200mm
	Z 軸	100mm
	X 軸	クロスローラガイド
ガイド	Y 軸	エアースライドガイド
24 F	Z 軸	クロスローラガイド
	C 軸	ボールベアリング
	X 軸	0.1 μ m
分解能	Y 軸	0.1 μ m
(最小設定単位)	Z 軸	0.1 μ m
	C 軸	0.036° (1000 m in ⁻¹)
主軸回転数		2000~40000min ⁻¹
本体の大きさ	$840 \times 750 \times 790$ mm	
本体重量	約 2.2kN(230kgf)	
入力電源	AC100V	

表 3-6 適用した超精密 4 軸デスクトップ駆動システムの仕様

バイト	単結晶ダイヤモンドバイトR0.5mm
被削材	無酸素銅 φ20mm
スピンドル回転数	$20000 min^{-1}$
ワーク回転数	500min^{-1}
切込み量	1.0 μ m
送り速度	1.Omm/min

表 3-7 単結晶ダイヤモンドバイトを使用した鏡面切削条件



図 3-21 加工原理図



図 3-22 加工の様子

3-6-2 実験結果および考察

加工実験の結果, Z 軸による補正がない場合, X 軸の加工方向では, P-V5.07 µ m の真直度が得られ (図 3-23), Y 軸の加工方向でも P-V3.71 µ m と (図 3-24), 相応の傾きがあることが分かった. そこで, Z 軸を用いて加工時の軸制御を補正した場合には, それぞれ P-V0.97, 0.92 µ m となり (図 3-25, 図 3-26), 傾きが著しく補正されていることがわかる. このことから, NC 制御による Z 軸の追従性は高いと考えられる.

しかし, X, Y 軸共に約 2mm ピッチの周期で振動していることが分かり, また, 約 0. 2mm ピッチの周 期でも振動している. 各軸の送りねじが 2mm ピッチであるので, 2mm ピッチの周期に関しては送り ねじのピッチが影響している可能性と考えられるが, 精密加工の場合, ボールねじ以外にもガイ ド, サーボモータ, スピンドル, スケールなどの各要素の精度によっても加工機の精度が大きく影 響を受ける可能性がある. 表面粗さの結果を図 3-27 に示す. また, 加工された被削材の様子を 図 3-28 に示す.



10000 測定範囲 μm

図 3-26 加工方向 Y 軸, Z 軸切込み補正での加工結果



図 3-28 加工後の被削材

3 - 6 - 3 the test of the second s

本節では,NC動作の追従性の評価を目的として,鏡面切削加工を行った結果を示した.その結 果,高精度な追従性を有することが確認できた.また,デスクトップ駆動システムにより,鏡面切 削加工が十分行えることがわかった.しかし,加工面には振幅は制御可能なものの,粗さ成分とし ては残るうねりが確認でき,その改善を含め,卓上機で超精密切削加工を行う上での第一歩にな ったことが示唆される. 3-7 4軸デスクトップ駆動システムの構造

ここでは、光学部品や金型の加工を狙った4軸デスクトップ駆動システムの開発および性能評価について述べる.4軸デスクトップ駆動システムの門型構造について軽量化の課題などについて構造解析シミュレーションを行った結果を述べ、また、駆動制御については、フルクローズドループ制御による位置決め精度について検討を行い、フルクローズドループ制御の必要性について確認する.

4 軸デスクトップ駆動システムのサイズは、可搬性を確保する重量と机上に設置できる大きさ、 また熱的安定性を得やすいサイズとして 500mm~1m×500mm~1m、1.5kN 以内程度を 目標として構造設計を行っている.また、実際に可搬性を確保したことから、軽量化には大きな 工夫を施している.その1つとしては一般的な工作機械が有するベッド(図3-29)を有さず、代 わりに肉盗みを施したベース構造があり、4 軸デスクトップ駆動システムの設置時の姿勢による 加工機の変形などを考えておかなければならない.そして、デスクトップタイプでも剛性を持た せることを目的として門型構造の設計を行っているが、構造体に対して軽量化のために肉盗みを 実施している.肉盗みによる強度の低下についても同様に考えておかなければならない.そこで、 4 軸デスクトップ駆動システムの設置時の姿勢よるシステムの変形については、4 箇所ある足(ジ ャッキ)の内の1 箇所が設置台から浮いていたと仮定した時の2 次元構造解析を行った.また、 肉盗みの強度低下については、単純なモデルを元に、肉盗みの有り・無しの2条件について三次 元構造解析を行った.図3-30 に開発した4 軸デスクトップ駆動システムの構造図を示す.



図 3-29 一般的な工作機械が有するベッド¹⁰⁾



(a)図面1 単位:mm



(b)図面 2 単位:mm





3-7-1 ベース

4 軸デスクトップ駆動システムを作業環境に設置する際のベースの変形量について構造解析を 行った.条件は、奥側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いた場合と手前側の設置ボルト1 箇所が接地面に対して浮いた場合との2条件で行い,解析諸元は,材質をジュラルミン(A2017), 荷重を 300N とした.ソフトウェアは,CADTOOL の FEM5 を使用した.図 3-31 に設計した4軸デ スクトップ駆動システムのベースの寸法図を,図 3-32 に4軸デスクトップ駆動システムの構造・ ベースと設置ボルトの様子を示す.また,図 3-33 に奥側の設置ボルト1箇所が接地面に対して 浮いた条件の解析結果を,図 3-34 に手前側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いた条件の 解析結果を示す.ベースのサイズは,図 3-31 に示したように幅585mm×奥行き680mm×厚さ60mm となっている.奥側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いている場合は,8.3µmの最大変形 量が発生し,また,手前側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いている場合は,1.6µmの最 大変形量が発生することがわかる.このことから設置する際の左右方向のレベリング作業では、 奥側の2箇所を接地面に対して,確実に接触させるように設置ボルトのジャッキの調整を行なわ なければならないこと,また,手前側の設置ボルトの1箇所については,前後方向のレベリング 作業に利用されるが,残った前側の設置ボルト1箇所についても同様にレベルを変化させない程 度に接触させる必要があることが示唆された.



図 3-31 ベース部の寸法



図 3-32 4 軸デスクトップ駆動システムの構造・ベースと設置ボルトの様子



図 3-33 奥側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いた条件の解析結果



図 3-34 手前側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いた条件の解析結果

開発した4軸デスクトップ駆動システムの構造は、門型構造をとっているが、重量に対するコ ンセプトから各構造の要素に対しては、肉盗みを実施している.この肉盗みが強度に与える影響 について三次元構造解析を行った.構造解析の条件は、肉盗み無し(1条件)・肉盗み有り(3条 件)の4条件で行った.また、解析諸元は、材質アルミ相当、変位の傾向を確認することを目的 として荷重を100kNとした.図3-35に両サイドの支柱の寸法図を、図3-36に支柱の上に固定し て門型構造を構成するX軸ベースの寸法図を示す.実際は、支柱の上にX軸ベースを設置して、 ボルトで締結しているが、構造解析に使用したモデルは単純化するために一体型の門型構造フレ ームとした.本解析では実際の加工機に対して、八方向に梁を持つ形状、対角線方向に梁を持つ 形状、十字線方向に梁を持つ形状について単純化した.図3-35に八方向に梁を持つ肉盗み有り 形状図面を、図3-37に対角線方向に梁を持つ肉盗み有り形状図面を、図3-38に十字線方向に梁 を持つ肉盗み有り形状図面を示す.また、4種類のモデルに対して、それぞれX軸、Y軸、Z軸の 3つの条件で変形シミュレーションと相当応力分布の解析を実施した.図3-39に解析モデルを示 す.



図 3-35 門型構造の支柱部(八方向の梁)







図 3-39 解析モデル

また,両モデルに対して使用したソフトウェアは,ITAS3D,要素の種類は,四面体二次要素, 材料は,アルミ相当(縦弾性係数70000N/mm²,ポアソン比0.3)とした.肉盗み無し形状(以下, 肉盗み無し)の離散化された解析モデルを図3-40(a)に示す.図3-40(b)に八方向に梁を持 つ肉盗み有り(以下,八方向の梁)の解析モデルを,図3-40(c)に対角線方向に梁を持つ肉盗 み有り(以下,対角線方向)の解析モデルを,図3-40(d)に十字線方向に梁を持つ肉盗み有り (以下,十字線方向)の解析モデルを示す.



(a) 肉盗み無しのモデル (要素数: 13523 節点数: 22510 重量 548N)



(b) 八方向の梁モデル(要素数:210063 節点数:127605 重量 362N)



(c)対角線方向の梁モデル(要素数:258592 節点数:153177 重量 338N)



(d) 十字線方向の梁モデル(要素数:262275 節点数:156046 重量 313N)図 3-40 解析モデル

4 種類のモデルにおける変形形状および相当応力分布を示す.X 方向の荷重負荷時,肉盗み無 しでは最大変位量 0.6mm,相当応力 65N/mm²となるのに対し,八方向の梁では最大変位量 1.8mm, 相当応力 228N/mm²となっている.対角線方向の梁では,最大変位量 2.8mm,相当応力 418N/mm² となっている.十字線方向の梁では,最大変位量 2.5mm,相当応力 380N/mm²となっている.また, 肉盗み有りモデルと肉盗み無しモデルを比較すると,100kN の荷重をかけたときに,八方向の梁 の肉盗みを有することにより荷重負荷時の変位量が肉盗み無しに比べ3倍程度の変位が確認され た.(図 3-41,42).なお,対角線および十字線方向の梁は,いずれも八方向の梁の場合の方が, 変位が少ないことがわかった.



(a) 肉盗み無しのモデル

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 210063 nodes, 127605 elements Variable: Displacement(norm)





(b) 八方向の梁モデル

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 258592 nodes, 153177 elements Variable: Displacement(norm)



(c) 対角線方向の梁モデル

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 262275 nodes, 166046 elements Variable: Displacement(norm)





inbow(16) 2.844e+000

2.667e+000 2.489e+000 2.311e+000 2.133e+000 1.955e+000 1.778e+000 1.600e+000 1.422e+000 1.244e+000 1.067e+000 8.889e-001 7.111e-001 5.333e-001 3.555e-001 1.778e-001 0.000e+000

Max: 2.844e+000 Min: 0.000e+000 Background: 100 Image size: 1048x651




(a) 肉盗み無しモデル

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 210063 nodes, 127605 elements Variable: EquivalentStress(scalar)

x y J





(b) 八方向の梁モデル



Rainbow[16]	
4.180e+002	
3.919e+002	-
3.658e+002	-
3.397e+002	-
3.136e+002	-
2.874e+002	-
2.613e+002	-
2.352e+002	-
2.091e+002	-
1.830e+002	
1.569e+002	-
1.308e+002	
1.046e+002	
7.852e+001	-
5.241e+001	-
2.629e+001	
1.796e-001	
Max: 4.180e Min: 1.796e Background: 100 Image size: 1048	+002 -001) 3x651

ainbow[16 3.806e+002 3.568e+002 3.330e+002 3.093e+002 2.855e+002 2.617e+002 2.379e+002 2.141e+002 1.904e+002 1.666e+002 1.428e+002 1.190e+002 9.525e+001 7.147e+001 4.769e+001 2.391e+001 1.338e-001

Max: 3.806e+002 Min: 1.338e-001 Background: 100 Image size: 1048x651

(c) 対角線方向の梁モデル





図 3-42 X 軸プラス方向荷重の時の相当応力分布比較 (N/mm²)

次に、Y 方向の荷重負荷時, 肉盗み無しでは最大変位量 0.25mm, 相当応力 55N/mm²となるのに 対し, 八方向の梁では最大変位量 0.9mm, 相当応力 104N/mm²となっている. 対角線方向の梁では, 最大変位量 1.3mm, 相当応力 219N/mm²となっている. また, 十字線方向の梁では, 最大変位量 1.9mm, 相当応力 212N/mm²となっている. 肉盗み有りモデルと肉盗み無しモデルを比較すると, 100kN の 荷重をかけたときに, 八方向の梁の肉盗みを有することにより荷重負荷時の変位量が肉盗み無し に比べ 3 倍程度の変位が確認された. (図 3-43, 44). この場合も, 対角線および十字線方向の梁 は, いずれも八方向の梁の場合の方が, 変位が少ないことがわかった.



(a) 肉盗み無しモデル

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 210063 nodes, 127605 elements Variable: Displacement(norm)





(b) 八方向の梁モデル

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 258592 nodes, 153177 elements Variable: Displacement(norm)



(c) 対角線方向の梁モデル



1.929e+000 1.809e+000 1.688e+000 1.568e+000 1.447e+000 1.326e+000 1.206e+000 1.085e+000 9.647e-001 8.441e-001 7.235e-001 6.029e-001 4.823e-001 3.617e-001 2.412e-001 1.206e-001 0.000e+000 Max: 1.929e+000 Min: 0.000e+000 Background: 100 Image size: 1048x681

ainbow(16)

w[16] 1.302e+000 1.221e+000 1.139e+000 1.058e+000 9.766e-001 8.952e-001 8.138e-001 7.325e-001 5.697e-001 4.883e-001 4.069e-001 3.255e-001 2.442e-001 1.628e-001 8.138e-002 0.000e+000

Max: 1.302e+000 Min: 0.000e+000 Background: 100 Image size: 1048x651

(d) 十字線方向のモデル

図 3-43 Y 軸マイナス方向荷重の時の変位量比較 (mm)



Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 210063 nodes, 127605 elements Variable: EquivalentStress(scalar)





(b) 八方向の梁モデル





(c) 対角線方向の梁モデル





次に Z 方向の荷重負荷時, 肉盗み無しでは最大変位量 0.25mm, 相当応力 63N/mm²となるのに対 し, 八方向の梁では最大変位量 0.4mm, 相当応力 77N/mm²となっている. 対角線方向の梁では, 最大変位量 0.48mm, 相当応力 99N/mm²となっている. 十字線方向の梁では, 最大変位量 0.42mm, 相当応力 88N/mm²となっている. 肉盗み有りモデルと肉盗み無しモデルを比較すると, 100kN の 荷重をかけたときに, 八方向の梁の肉盗みを有することにより荷重負荷時の変位量が肉盗み無し に比べ 2 倍程度の変位が確認された. (図 3-45, 46). この場合も, 対角線および十字線方向の梁 は, いずれも八方向の梁の場合の方が, 変位が少ないことがわかった. 以上の結果をまとめ, 表 3-8 に示す.



Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 210063 nodes, 127605 elements Variable: Displacement(norm)





Rainbow[16]	
4.029e-001	1
3.777e-001	
3.525e-001	
3.273e-001	-
3.021e-001	-
2.770e-001	-
2.518e-001	-
2.266e-001	-
2.014e-001	
1.763e-001	
1.511e-001	
1.259e-001	
1.007e-001	
7.554e-002	
5.036e-002	
2.518e-002	-
0.000e+000	_
Max: 4.029e Min: 0.000e Background: 100 Image size: 1048	-001 +000) 3x651

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 258592 nodes, 153177 elements Variable: Displacement(norm)



(c) 対角線方向の梁モデル



Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 262275 nodes, 156046 elements Variable: Displacement(norm)





(d) 十字線方向の梁モデル

図 3-45 Z 軸マイナス方向荷重の時の変位量比較 (mm)



(a) 肉盗み無しモデル

Analysis: StaticLinear, Results: FinalResult, Solver: ADVCSolver 3.2.1 Model size: 210063 nodes, 127605 elements Variable: EquivalentStress(scalar)





(b) 八方向の梁モデル



9.95	3e+001	- 1	
9.33	1e+001	1 -	
8.70	9e+001	1 -	
8.08	7e+001	- 1	
7.48	5e+001	-	
6.84	3e+001	1 -	
6.22	1e+001	1 -	
5.59	9e+001	- 1	
4.97	7e+001	- 1	
4.35	5e+001	1	
3.73	3e+001	-	
3.11	2e+001		
2.49	0e+001	1 -	
1.86	8e+001	1	
1.24	6e+001	-	
6.23	9e+000) -	
1.98	4e-002		
Max:	9.953	le+	001
Min:	1.984	le-C	102
Backgro	ound: 10	10	
Image s	ize: 104	48×	661

ainbow[16]

(c) 対角線方向のモデル





	X軸変位量	Y 軸変位量	Z 軸変位量	支柱の重量
肉盗み無し	0.6 mm	0.25 mm	0.25 mm	548 N
八方向の梁	1.8 mm	0.9 mm	0.4 mm	362 N
対角線方向の梁	2.8 mm	1.3 mm	0.48 mm	338 N
十字線方向の梁	2.5 mm	1.9 mm	0.42 mm	313 N

表 3-8 構造解析シミュレーション結果と重量

次に,固有振動数解析について,加工機の共振モードを調べるために固有値解析を行った.ソ フトウェアは,COMSOL Ver. 3.2 を使用した.要素数は,40195,自由度 213567 とした.解析条件 は,材料定数として,ヤング率 70000MPa,ポアソン比 0.3,質量密度 2700kg/m³,境界条件は, 足部分と台が接触する箇所を完全拘束とした(図 3-47).解析結果を,図 3-48 に1次モードの結 果を示す.また,図 3-49 に 2 次モードを,図 3-50 に 3 次モードを示す.その結果は,1次モー ドでは f1=63.52Hz,2 次モードでは f2=209.32Hz,3 次モードでは f3=321.96Hz という結果とな った.



図 3-47 解析モデル



図 3-48 1 次モード



図 3-49 2 次モード



図 3-50 3 次モード

3 - 7 - 4 the test states that 3 - 7 - 4 the test states are straight the test states at the test state

開発した4軸デスクトップ駆動システムの設計に対して、構造解析を行い、任意の荷重を与え たときの構造の変位量および相当応力分布、そして、周波数応答解析について調査を行った.こ の構造解析は、ベースに対しては、構造体の重量を目安として 300N の荷重を付与した時の解析 を行い,また門型構造については,変位の傾向を得るため,100kN と,実際に加工などで発生す る荷重以上の大きな負荷を与えて解析を行ったものである.その結果は、ベースについて、設置 時ボルトの着座姿勢がベース変形に影響を与え、設置時の留意事項が明らかになった、また、フ レームの構造解析では、軽量化のためにフレーム素材に肉盗みを施しているが、肉盗みが無いと きに比べて、X 軸方向の変位量が3 倍程度になることが確認され、そして、3 種類の肉盗み形状 については、八方向の梁の強度が高く、次いで十字線方向となり、対角線方向の強度が弱いとい う結果になった.また, Y軸方向は、肉盗みが無いときに比べて、Y軸方向の変位量が3倍程度 になることが確認され、そして、3 種類の肉盗み形状については、八方向の梁の強度が高く、次 いで対角線方向となり、十字線方向の強度が弱いという結果になった.また、特に加工抵抗を大 きく受ける方向の Z 軸方向については、肉盗み無しの時と肉盗み有りの時とでは、前者の変位が 少ないものの、他の方向に比べ相対的に変位も小さく、相当応力分布の差異が少ないことが確認 された. そして、3 種類の肉盗み形状については、八方向の梁の強度が高く、次いで十字線方向 となり、対角線方向の強度が弱いという結果になった.これらの結果より八方向の梁は重量の軽 量化と剛性を両立していると言える.しかし、これらの結果は、100kNの時の結果であり、実際 にかかる重量(加工荷重)が,例えば φ150mm×W5mmのストレートホイールで100mm×100mm×100mm

113

の各面を加工する際,通常の加工条件下(切り込み量 2 μ m,砥石回転数 4000min⁻¹,送り速度 100mm/min)では,法線方向研削抵抗 Fn が 20N 程度である¹¹⁾ことから,この荷重を 20N としたとき,解析結果の 1/5000 として,八方向の梁の場合,X 軸方向の変位量は荷重 20N の時は,0.36 μ m 程度と想定される.同様に Y 軸の変位量は,0.18 μ m,Z 軸の変位量は,0.08 μ m と想定され,肉 盗みが有っても,強度は十分な値であると考えられる.図 3-51 にこれらをまとめる.



図 3-51 実際に想定される変位

この解析結果からは、肉盗みを施すことにより、肉盗み無しの重量 548N に対して、肉盗み有 りの重量 362N と約 186N の軽量化を実現できる.そして、軽量化により懸念される強度不足につ いては、20N の加工荷重の時に X 軸方向への変位は約 0.36 µm の発生が考えられるが、デスクト ップ駆動システムとしてのメリットを活かすために、追従性の良いフルクローズドループ制御方 式を採用することにより、変位の補正が十分可能であることが示唆される.また、ELID 研削加工 では一般に、研削抵抗(負荷)が従来研削の数分の一となっていること、また、システムの変形 量は現実的に少ないことなどから考えても、重量比とのメリットと含め、極めて合理的なシステ ム化が成り立つものと考える. 機械特性として、固有振動数と各軸の剛性の測定評価を行った.固有振動数の測定は、マイク ロセンスを用いて、ハンマーインパクト法により測定を行った.また、各軸の剛性の測定は、マ イクロセンスを用いて、バネばかりを使用して測定を行った.図 3-52 に固有振動数の測定結果 を示す.図 3-53 に各軸の剛性の測定結果を示す.図 3-48~50 に示したシミュレーションの結果 では、1 次モードでは、f1=63.52Hz、2 次モードでは、f2=209.32Hz、3 次モードでは、f3=321.96Hz となったが、図 5-52 に示した測定結果からも 63Hz 付近、200Hz 付近、320Hz 付近にピークが観 測できる.このことから固有振動数の解析は、解析と、実験の両面から確認できたといえる.



図 3-52 固有振動数の測定結果

また,図 3-53 より各軸の剛性測定の結果は,それぞれの剛性について傾きから求めた.X 軸は, 20N/ μ m, Y 軸は, 20N/ μ m, Z 軸は, 20N/ μ m となった.これは,本体フレーム,ベース,ガイド ローラ,ボールネジなどで構成される各軸の剛性である.結果として,4 軸デスクトップ駆動シ ステムの使用上,工具回転数として使用することの多い 2000min⁻¹, 3000min⁻¹ などで は,偏心が生じた場合でも上述の固有振動数を外れており,安定した加工ができることが示唆さ れたと考える





3-9 4軸デスクトップ駆動システムの姿勢変化による使用

開発された4軸デスクトップ駆動システムは、その重量とサイズから傾斜、つまり姿勢を変化 させて使用することができる.図 3-54 に、開発したデスクトップ駆動システムを回転させるル ープ構造および姿勢変化をさせた様子を示す.加工の段取り等のセットアップ時には通常の設置 位置により行い、加工時には回転させ傾斜もしくは横倒しさせた状態で利用することで、研削屑 や切削屑の重力による落下現象を利用して、マシン内部をクリーンに維持することが可能となる ことや、ワークの搬送や着脱においても前後の搬送方法や工程から有利になる場合が考えられる. また、デスクトップ駆動システムにおける切削時の重力の影響を、回転させない場合と 90°回転 (横倒しさせた状態) させた場合とで比較したところ、差異は、ほとんど認められなかった(図 3-55).一般のサイズおよび重量の NC 加工機が自在に姿勢変化させることができないことから考 えても、本デスクトップ駆動システムのスケールメリットが確認できたといえる.



図 3-54 回転式デスクトップ駆動システム



図 3-55 切削加工における重力の影響

本章では、自由度の高い制御性を有し、硬質・脆性材料の加工の実現を目的として、実際に4 軸デスクトップ駆動システムの開発し、その運動性能と加工特性について調査を行い、本駆動シ ステムの効果について検討を行った.また、4軸デスクトップ駆動システムの設計に対して、構 造解析を行った.

- ELID 研削加工を適用した基礎実験において,超硬合金材に対して Ry0.076 μm, Ra0.0088 μm
 の鏡面を実現した.また切削加工では,バラツキは5 μm 以内であった.
- 2) サーボモータを採用することにより、同期性の高い制御を実現した.そして、スケールフィードバックの効果を検討するために、セミクローズドタイプとフルクローズドタイプを準備して、その追従性についてレンズ加工の実験を行った.その結果は、スケールフィードバックしたものは、補正加工無しで、形状精度4µm以下を達成した.デスクトップタイプの駆動システムにおいてもスケールフィードバックを行ったフルクローズドタイプの効果があることを確認した.
- サーボモータの 2 軸の同期性を確認するため単結晶ダイヤモンドバイトによる鏡面切削加 工を行った. 3~5μm程度傾きが生じた条件に対して, 傾きを NC により補正した加工した 結果は, X 軸 - Z 軸も Y 軸 - Z 軸のいずれも, 1μm以下を実現した.
- 4) 4軸デスクトップ駆動システムは、その軽量化のためにベッドを有さず、また肉盗みを施しているため、強度に対してどのような影響を与えているかを確認するために構造解析を行った.ベース部は、設置ボルトの着座状況により10µm 程度の変形を生じることが確認された.そのために、設置ボルトの調整順序などの留意点を確認することができた.
- 5) 軽量化のための肉盗みを有した門型構造は、肉盗みがないときに比べて、左右方向(X軸方 向)および前後方向(Y軸方向)の荷重に対しては、3倍の変位を発生することが分かった. しかし、上下方向(Z軸方向)では、その差は小さいことが分かった.また、相当応力分布 からも肉盗みによる影響は少ないことが分かった.前述の加工実験結果からも、186Nの軽 量化のメリットとフルクローズドループ制御方式のメリットを活かすことにより、肉盗み による変位量は、十分補正できる範囲内であると考えられる.
- 6) 機械特性として固有振動数ならびに剛性を評価した.固有振動数は、ほぼ、シミュレーション結果と同等であり、1次モード 63.52Hz、2次モード 209.32Hz、3次モード 321.96Hz で ピークを示した.また、剛性面の検証では、各軸ともに 20N/μm という剛性を確認した.
- 7) 開発した4軸デスクトップ駆動システムは姿勢変化をさせることができ、実際、通常の姿勢と同等の状態で切削加工を行うことができた.このことから、開発したデスクトップ駆動システム上で本実験における重力の及ぼす影響はほとんどなく、システムをクリーンに

維持できることや前後の工程の利便性から姿勢を自在にセットすることができるスケール メリットが確認できたと考える.

まとめとして、開発したデスクトップ駆動システムにより創出されるメリットとして、コス ト面においては製造作業を基本的に一人で行うことができ、製造環境が大がかりにならないこ とから低コスト化が可能であること、機械精度面では短いストロークにより部品の小型化、軽 量化により精度調整や精度維持が容易であること、環境対応面では本体サイズの小型化、低質 量化、小電力化(約 2.0kW)により機械専用の特殊環境の部屋を用意する必要がほとんどないこ とや駆動時に振動を発生しづらいこと、熱変位により工具~ワーク間の相対変位が少ないこと、 その他、可搬性や PC ベースの簡便な操作性を考えると、新たな高性能かつ次世代生産コアシ ステム技術が確立できたといえる. 3-11参考文献

- 1) 大森 整他:テーブルトップ超精密4軸加工機の開発,1999年度精密工学会九州支部沖縄地 方講演会
- 大森 整他:卓上 4 軸 ELID 鏡面加工機の開発およびその加工特性,日本機械学会 2000 年 度年次大会
- 3) 大森 整他:テーブルトップ超精密4軸加工機の開発:第2報,2000年度精密工学会春季大 会学術講演会
- 4) 浅見宗明他:テーブルトップ4軸加工機TRIDER-Xによるマイクロメカニカルファブリケーション,2000年度砥粒加工学会学術講演会
- 5) Hitoshi Ohmori, Yoshihiro Uehara, Weimin Lin, Kazutoshi Katahira, Muneaki Asami, and Ken-Ichi Yoshikawa: "Development of Desktop Micro-Fabrication System", Proceedings of The 4th Tunisian Interdisciplinary Workshop on Science and Society TIWSS' 2001, Tokyo, Japan, (2001, 10) 110
- 6) 上原 嘉宏,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,三浦 隆寛,浅見 宗明,大井 豊,潘 燕,石川 惣一,佐々木 哲夫: "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発,第2報:フルク ローズドループ制御の効果",2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2002.3) 579
- 7) 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,三浦 隆寛,浅見 宗明,大井 豊,今井 圭介,佐々木 哲 夫: "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発~第10報:超精密4軸加工機を使用した鏡面 加工における NC 動作の追従性の検証実験",2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演 論文集,(2004,3)205
- 8) 上原 嘉宏, 片平 和俊, 大森 整, 石川 惣一, 村上 淳: "セラミックスの微細加工のためのデスクトップ加工システム", セラミックス, 39, 12, (2004) 990
- 9) Yoshihiro Uehara, Hitoshi Ohmori, Katahira Kazutoshi, Weimin Lin, Yutaka Watanabe, Muneaki Asami, Norihide Mitsuishi, "Advanced Desktop Manufacturing System for Micro-Mechanical Fabrication", International Conference on PrecisionEngineering and Micro/Nano Technology in Asia(ASPEN2005), Shenzhen, China, (2005, 11)
- 10) 相川鉄工 株式会社:http://www.siz-sba.or.jp/mariko/kakusya/aikawa.htm
- 11) 大森 整:ELID 研削加工技術-基礎開発から実用ノウハウまで-,工業調査会,(2000)128

第4章 4軸デスクトップ駆動システムによる マイクロメカニカル加工

第4章 4軸デスクトップ駆動システムによるマイクロメカニカル加工

4-1 緒言

本章では,第3章で開発した4軸デスクトップ駆動システムをマイクロメカニカル加工に適用 して,その特性について検証を行う.ここで,本論文で扱うマイクロメカニカル加工としては, 既述のように,鏡面研削加工および切削加工が両立できるものとする.

そこでまず,開発された4軸デスクトップ駆動システムにELID研削法を適用して非球面レンズ の鏡面研削実験を行う.次に,4軸デスクトップ駆動システムにおける切削加工については,第 2章において述べた既述の方法により加工されたマイクロツールを用いて,マイクロ切削特性に ついて検証を行う.このように本章では,開発された4軸デスクトップ駆動システムにおいて, 鏡面研削加工とマイクロ切削加工の両加工法の具現化を実証する実験結果について述べる.

4-2 4軸デスクトップ駆動システムによる非球面レンズの鏡面研削加工¹⁾

4 軸デスクトップ駆動システムによる鏡面研削加工の対象として検討がなされるものとして、 各種光学機器に使用されるレンズやミラー、プリズムなどの光学部品がある.多くの光学製品は、 非球面レンズを使用することにより、小型化、薄型化、そして、高解像度化、高画質化を実現し ている.また、プロジェクタでは、焦点ずれによる色滲みを抑え、高輝度化を実現している.多 くのデジタルカメラなどでは、20mm 前後のレンズを使用することが多く、この非球面レンズは、 ガラスモールド工法により生産されることが多い.しかし、ガラスモールド工法では、20mm 前後 の外形寸法をもつレンズまでしか製作することができないため、プロジェクタ用の 20mm を超え る非球面レンズなどは、研磨工法によって製作されているのが現状である.そこで、前章で独自 に開発された4軸デスクトップ駆動システムにおいて、ELID 研削法により、直径 50mm の非球面 レンズ加工²⁰⁻³⁾の実現を目的として、ガラス材を対象に基本的な加工実験を行ったのでまとめる.

4-2-1 4軸デスクトップ駆動システムにおける鏡面研削実験

本実験では、ストレートタイプ鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石を使用した.また、砥石断面が R 形状になるように、ツルーイング砥石にカップ型砥石を使用し、カップ砥石の内周部分を研削砥 石に接触させて加工を行った.カップ砥石は内径 46mm のものを使用した.表 4-1 にツルーイン グの条件を示す.また、図 4-1 にツルーイングの様子を示す.

121

研削砥石:SD#325, SD#1	200	
ツルーイング砥石:SD#1200		
研削砥石回転数	$2000 \mathrm{min}^{-1}$	
ツルーイング回転数	$2000 \mathrm{min}^{-1}$	
切り込み量	$10\mu{\rm m/min}$	

表 4-1 ツルーイング条件



図 4-1 ツルーイングの様子

ガラス材には直径 50mm の石英ガラスを用いて,金属製の治具にワックスで貼り付け,その金属 部分を三爪チャックで C 軸(回転テーブル)上に固定した.ツルーイングで R 形状にした砥石 (φ50mm, t10mm)を使用して楕円面形状の非球面加工を行った.

切込み方向に Z 軸,研削方向に X 軸として,2 軸同期制御により非球面形状の動作経路をとった.加工は,SD#325 で荒取り工程を行い,SD#1200 で中仕上げ加工を行った.また,加工した非球面レンズは,最終工程で別の装置によりポリッシング加工⁴⁾を行った.表 4-2 に研削条件を示す.また,図 4-2 に非球面加工の様子を示す.

	SD#325	
研削条件	SD#1200 ♥	
	砥石回転数	2000 min^{-1}
	ワーク回転数	200 min^{-1}
	送り速度	$100\mu{ m m/min}$
電解条件	設定ピーク電流	10 A
	無負荷電圧	60 V
	パルス τ on/τ off time	$2/2\mu$ s
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム(株)	
	(水道水で 50 倍に希釈)	

表 4-2 石英ガラスの非球面レンズ研削条件



図 4-2 非球面加工の様子

4-2-2 4軸デスクトップ駆動システムにおける機上計測加工

SD#325 で全面の加工が終了するまで研削を行い,全面が同一な表面性状になったことを確認して,加工機上計測プローブ⁵⁾⁻⁷⁾を4軸デスクトップ駆動システムに搭載して,機上計測を行った. 計測範囲は,ワーク(非球面レンズ)中心から±18mm,全長にして36mmの範囲の測定を行った. 図 4-3 に加工機上計測の様子を示す.また,図 4-4 に芯ずれ量補正無しの解析結果を,図 4-5 に 芯ずれ量補正有りの解析結果を示す.図 4-4,図 4-5 より機上計測前は,研削砥石と被削材の回 転中心が芯ずれ量補正の解析結果から12.8 μ m のずれを有していたが,その量をX軸方向の中心 座標に補正を加えて加工を行い,形状測定結果について同様に芯ずれ補正量の解析を行った結果 は,芯ずれ量が1.7 μ m とずれ量が低減している.この時の形状誤差は,SD#1200の粗さ成分を含 んではいるが 36mm の範囲で P-V9.3 μ m となっていた.



図 4-3 機上計測の様子



図 4-4 芯ずれ量補正無しの解析結果



図 4-5 芯ずれ量補正有りの解析結果

4-2-3 4軸デスクトップ駆動システムにより加工された非球面レンズの評価

図 4-6 に加工前のレンズを,図 4-7 に ELID 研削後のレンズを示す.また,図 4-8 に SD#1200 による ELID 研削後の表面粗さを,図 4-9 にポリッシング後の表面粗さを示す.図 4-7 より SD#1200 による加工でも透明性があることがわかる.また,図 4-8 より表面粗さは,144 μ m×108 μ m 範囲 で P-V800nm, rms131nm, Ra90nm であった.この非球面レンズをポリッシングした後の表面粗さ の図 4-9 より同じく 144 μ m×108 μ m 範囲で P-V10nm, rms1.09nm, Ra0.8nm であった.また,ポ リッシング後の当該非球面レンズを超精密三次元測定器(UA3P(パナソニックファクトリーソリ ューションズ㈱))で測定した形状誤差で,有効径 17mm の解析結果を図 4-10 に示す.その結果は, 有効径 17mm の時は, P-V3.5 μ m となり,非球面レンズの仕様の表面粗さ,形状精度ともに十分満 足する結果となった.これらの結果により4軸デスクトップ駆動システムは,非球面レンズの開 発ツールとして有効であることが確認された.



図 4-6 加工前のレンズの様子



図 4-7 加工後のレンズ





図 4-9 ポリッシング後の表面粗さ



4-2-4 ELID研削による非球面レンズのポリッシングレス仕上げ加工

前節では、最終工程としてポリッシング加工を行って非球面レンズの仕上げを行ったが、ELID 研削法において、さらに微細かつガラス材に対し加工面粗さ低減効果のある砥粒を有する砥石を 使用することにより、ポリッシング工程を省略できる可能性が考えられる.

そこで、仕上げ工程に#8000 メタルーレジン複合ボンド酸化セリウム砥石を使用して、非球面レンズの研削加工試験を行った.表4-3 にその研削条件を示す.また、加工後の表面粗さを図4-11 に示す.その結果、144 µ m×108 µ m 範囲で Ral.18nm、rms1.49nm、P-V15.3nm が実現された.ポリッシング後の表面粗さと比較すると僅かではあるが本加工の方が1.5 倍程度の粗い結果になっているが、数値的には、ELID 研削による仕上げ加工の可能性を示唆したと考えられる.

	SD#1200	
研削条件	#8000 酸化セリウム	
	砥石回転数	2000 min ⁻¹
	ワーク回転数	200 min ⁻¹
	送り速度	$50\mu{\rm m/min}$
電解条件	設定ピーク電流	10 A
	無負荷電圧	60 V
	パルス τ on/τ off time	2/2μs
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム(株)	
	(水道水で 50 倍に希釈)	

表 4-3 酸化セリウム砥石による鏡面研削条件



図 4-11 #8000 酸化セリウム砥石による加工表面粗さ

4-2-5 まとめ

本節では、4軸デスクトップ駆動システムにおいて ELID 研削法および加工機上計測法を適用す ることにより、微細砥粒砥石により石英ガラスの非球面研削加工を行った.その結果、透明性の 高い表面性状と高精度な形状精度を実現し、非球面レンズの加工ツールとして有効であること、 また、ELID 研削加工による仕上げ加工(ポリッシング工程の省略)の可能性が示唆された.本結 果から、開発された4軸デスクトップ駆動システムによる高精度な鏡面研削効果が実証された.

4-3 球面レンズの高能率鏡面研削加工⁸⁾

本節では、4 軸デスクトップ駆動システムにより、高能率に球面レンズの加工を行うことを目 的とし、CG(カーブジェネレータ)方式ユニットを搭載し、本ユニットによる球面レンズの高能 率鏡面研削の実験結果についてまとめる.

4-3-1 CG方式による球面レンズの高能率鏡面研削加工

球面レンズ製造の主な流れは⁹,図4-12のようにガラスの溶解,ガラス切断/丸め,荒ずり, 砂かけ、研磨、芯取り、コーティングの7つの工程を必要とする。ガラスの溶解、ガラス切断/ 溶解は,ガラスの製造メーカで行われ,荒ずり以降の工程をレンズの製造メーカで行うことが多 い.荒ずり工程ですりガラス状の表面のレンズ形状に加工を行い,砂かけ工程で仕上げ寸法に近 い形状まで加工する.次に、研磨工程で表面性状を仕上げる.そして、芯取り工程でレンズを軸 対称になるように外周部の加工を行う.最終工程でコーティングして製品となる.全ての工程を 一貫して行っているレンズメーカもあるが、多くは、荒ずり工程のみを行うメーカがあり、分業 化されているのが現状である.また,荒ずり工程では,CG方式の加工装置を使用して加工が行わ れるが、焼けの発生などの問題からほとんどが SD#300 以下の粗い粒度での加工である.しかし ながら, 球面レンズの形状化を行う場合, CG 方式は高能率に加工することができ, レンズの曲率 はレンズと砥石の傾きによって設定されるため、どのような曲率のレンズ面も作ることができる ので、レンズ製造の工程には必要不可欠である.しかし、荒ずり加工メーカでは、レンズの製造 に熟練度を要し,技術の継承,存続が問題となってきている.そこで,4 軸デスクトップ駆動シ ステムを CG 方式に適用することで微細砥粒砥石を用いて、レンズの鏡面化、形状寸法出しまで 行い、砂かけ工程を省略することを考える.また将来は、NCを有効に用いることで非球面レンズ の製造も可能になると考えられる.

130



図 4-12 ガラスレンズの製造工程

従来の CG 加工機は,外形寸法が小さいものでも 1000×590×1300 mm,本体重量が約 4kN(400kgf) の大きさを有している.実験に使用した加工機械は,前章で開発された外形寸法が幅 560×奥行 き 580×高さ 650 mm,本体重量が約 1.3kN(130kgf)と非常にコンパクトで作業台の上に設置可 能な 4 軸デスクトップ駆動システム¹⁰⁾⁻¹²⁾である.

CG 方式ユニットの模式図を図 4-13 に示す.また,図 4-14 に CG 方式ユニットの搭載の様子を 示す.ワークチャックは、コレットチャック方式を採用し、レンズワークの着脱を容易にした. CG 方式ユニットは、C 軸テーブル上に設置し、球面レンズの曲率を決めるワークと砥石との相対 角度を任意に決めることができるようにした.また、砥石には、直径 50mm、内径 44mm の SD#325、 SD#2000、SD#4000 鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石と、同寸法の SD#12000 メタル-レジン複合ボンド ダイヤモンド砥石を使用した.図 4-15 にコレットチャックを、図 4-16 にコレットナットを示す.



図 4-13 CG 方式ユニットの模式図



図 4-14 CG 方式ユニット搭載の様子



図 4-15 コレットチャック



図 4-16 コレットナット

4-3-2 実験方法

4 軸デスクトップ駆動システムを使用し,砥石は鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石(SD#325,SD#1200, SD#4000),メタル-レジン複合ボンドダイヤモンド砥石(SD#12000)を使用し,被削材は,軽バリ ウムフリントガラスを使用した.実験方法は,加工工程による影響を確認するために加工前のガ ラスを,最初から SD#12000 で加工したもの,SD#325→SD#12000 で加工したもの, SD#325→SD#1200→SD#12000 で加工したもの,SD#325→SD#1200→SD#4000→SD#12000 で加工した ものについてそれぞれ調査を行った.また,図4-17にレンズ形状の設計値を,図4-18に砥石と ワークの傾斜角度を,図4-19に加工前のガラス材を示す.表4-4に実験条件を示す.







図 4-18 CG 方式の模式図


図 4-19 加工前のガラス材

	Type1	Type2		Type3		Type4	
研削条件	SD#12000	SD#325	SI	D#325		SD#325	
		SD#12000	SD	#1200	¥	SD#1200	
	SD#1		12000		SD#4000	¥	
						SD#12000	
	砥石回転数			2000min^{-1}			
	ワーク回転数			500min^{-1}			
	送り速度			$3\sim 1\mu\mathrm{m/min}$			
	設定ピーク電流		10 A				
電解条件	無負荷電圧		60 V				
	パルス τ on/τ off time		2/2 μ s				

表 4-4 CG 方式による球面レンズ研削条件

4-3-3 実験結果および考察

実験結果として、図 4-20 にそれぞれの粒度の砥石を使用して加工したレンズの表面状態を、 図 4-21 に各加工工程による表面を示す. これらの図より、工程の選択が及ぼす表面性状への影 響が大きいことがわかる.また、図 4-22 に有効径 21mm の時の形状精度を、図 4-23 に有効径 14mm の時の形状精度をそれぞれ示す. これらの結果より、CG 方式に ELID 研削システムを採用して加 工を行った結果、SD#12000 超微粒砥石を使用しても、焼けを発生させずに表面粗さ Ra8.656nm を有 する球面形状の加工が可能であることを確認した. このことから粒度を適切に選択しなければ、 最終のレンズに対する表面性状を悪化させることになり、また、異なる粒度の砥石を多く利用す れば生産性を低下させてしまうため、最終工程における粒度およびそれに至るまでの粒度の最適 化について検討を行なう必要がある.また、形状精度については、有効径 21mm の時は、形状精 度 P-V10 µ m となった.しかし、有効径を 14mm の時は、形状精度 1.5 µ m を達成していることが わかる.すなわち、14mm までの曲率と 21mm から外周までの曲率に違いが発生している.これは、 ワーク側の中心付近と外周付近との周速度の違いに影響されているものと考えられる.また、有 効径 14mm では、ベストフィットの曲率が 63.294mm となった.この曲率精度を向上させること が必要と考えられる.



図 4-20 加工後のレンズ



図 4-21 加工工程による表面性状



図 4-22 有効径 21mm の時の形状精度



図 4-23 有効径 14mm の時の形状精度

4-3-4 酸化セリウム砥石の効果

仕上げ砥石の比較を目的として,鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石の#325,#1200,#4000を使用し た下加工を行い,メタルーレジン複合ボンドダイヤモンド砥石の#8000,#12000 とメタルーレジン 複合ボンド酸化セリウム砥石を使用してそれぞれについて表面粗さの検討を行った.表4-5 に実 験条件を示す.また,図4-24 に仕上げに使用した砥石による表面粗さを示す.図4-24 から Ra の値をそれぞれの砥粒材質,粒度により比較した結果は,#8000酸化セリウム砥粒砥石の表面粗 さが最も良好であった.また,その値も Ra0.79nm と 1nm 以下を実現した.また,加工能率は, 酸化セリウム砥粒砥石とダイヤモンド砥粒砥石とでは,ほぼ同程度なことを確認した.

	ダイキ	7#230		
	ダイヤ#2000			
	ダイヤ#4000			
研削条件	ダイヤ#8000, #12000,	,酸化セリウム#8000		
	砥石回転数	700 min^{-1}		
	ワーク回転数	$500~{\rm min^{-1}}$		
	送り速度	$6{\sim}20000\mu{ m m/min}$		
	設定ピーク電流	10 A		
電解条件	無負荷電圧	60 V		
	パルス τ on/τ off time	$2/2\mu$ s		

表 4-5 酸化セリウム砥石による研削条件



(a) #8000 ダイヤモンド砥粒砥石



4-3-5 まとめ

本節では、4軸デスクトップ駆動システムにCG 方式ユニットを搭載して、酸化セリウムなどを 使用した微細砥粒砥石により ELID 研削加工を行った.その結果、1nm 以下の鏡面性の高い表面粗 さが得られることが示唆された.また、加工工程における砥石の粒度の選択は、レンズの表面性 状の品質に大きな影響を与えることが確認された.そして、前述した非球面レンズ加工の結果と 同様に、ELID 研削加工による仕上げ加工(ポリッシング工程の省略)の可能性が示唆された.本 結果から、開発された4軸デスクトップ駆動システムによる高精度な鏡面研削効果が実証された. 4-4 マイクロツールによるマイクロ切削加工特性

4-4-1 マイクロツール

次に、4 軸デスクトップ加工システムにおいて、マイクロツール¹³⁾を切削工具として用いて、 その切削性能を評価するために形状や寸法の違ういくつかのマイクロツールを製作して、金属材 料を対象に送り速度や切り込み深さなどを変化させて切削加工を行い、摩耗量や切削状況の調査 を行った. 図 4-25 にマイクロツールの SEM 像を示す. これらのマイクロツールは第2章の3軸 デスクトップ駆動システムにより研削加工されたものである.マイクロツールの素材には超硬合 金を用い、全て SD#4000 の鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石により仕上げ加工されたものを用いた. これらのマイクロツールの寸法は、直径 100 µm に内接する四角形であり、工具長はすべて 600 µm である. いずれのマイクロツールも、優れた表面性状と比較的シャープなエッジが得られている ことがわかる.



図 4-25 四角形状マイクロツール

4-4-2 切削加工方法およびその条件

マイクロツールを用いた切削加工は,表 4-6 に示すような3タイプの実験を行った. (実験 1) および(実験 2)では,無酸素銅を用いた四角形状マイクロツールによる基礎的な切削特性の評価 を行った.まず,(実験 1)では,マイクロツールの送り速度の影響を検討するため,切り込み量 を2.5µm/pass 一定として,送り速度を0.1,1,10および1000mm/minの4パターンで切削加工 を行った.また、(実験 2)では、マイクロツールの切り込み量の影響を検討するため、送り速度 を 0.1mm/min 一定とし、切り込み量を 2.5、12.5、40 および 80 µ m/pass の 4 パターンで切削加 工を行った.さらに、(実験 3)では、鋼材を用いてマイクロツールによる金型材への切削加工特 性について検討を行った.これらの切削加工では、図 4-26 に示すように、被加工物のエッジ部 外より加工を開始し、長さ 1mm の溝加工を行った.なお、参考データとして、四角形マイクロツ ールにおける一刃当たりの送り量について算出したデータを表 4-7 に示す.それぞれの被加工物 は、SEM によりバリ発生の有無など切削特性を観察し、三次元表面構造解析顕微鏡(Zygo 社製:New View 5032)により切削溝底部の表面性状を観察した.

実験	1 2		3	
マイクロツール	四角		-	
工具回転数	40000 min^{-1}			
		2.5 μ m/pass		
切りはな是	2 5	12.5 μ m/pass	$2.5\mu\mathrm{m/pass}$	
別り込み里	2.5μm/pass	$40\mu{ m m/pass}$		
		$80\mu{ m m/pass}$		
総切り込み量	5μ m	_	5μm	
	0.1 mm/min			
)それ,主座	1 mm/min	0.1	0.1	
広り迷皮	10 mm/min	0.1 mm/min	0.1 mm/min	
	1000 mm/min			
加工長さ	1 mm			
力中半日十十	無酸素銅 SKD11 特殊ダイス:		SKD11	
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1			特殊ダイス鋼	
クーラント	ケロシン(ミスト供給)			

表 4-6 マイクロツールによる溝切削実験条件

送り速度	4角形状
0.1mm/min	0.6nm
0.5mm/min	3nm
1mm/min	6nm
5mm/min	31nm
10mm/min	62nm
100mm/min	625nm
1000mm/min	6000nm

表 4-7 マイクロツールの一刃当たりの送り量



図 4-26 加工方式

無酸素銅を用いた四角形状マイクロツールによる切削加工実験1について、ここではマイクロ ツールの送り速度の影響として、送り速度を0.1、1、10および1000mm/minの4パターンに変化 させて行った.その結果の一例として、図4-27に送り速度1mm/min、図4-28に送り速度1000mm/min の結果を示す.なお、それぞれの図において、(a)が SEM 像を示し、(b)が New View による溝底 部の三次元形状を示している.これらの結果により、加工溝にバリの発生が認められる.これは、 銅材料の切削には、一般にすくい角を大きくとることが行われているが、実験に使用しているマ イクロツールは、すくい角が-45°であるため、剪断角が大きくなりバリを発生させていると考 える.また、送り速度1mm/minの場合、切削溝底部には送りピッチのような切削痕が若干見受け られる.その切削溝底部の平均粗さ Ra は 260nm を示した.一方、送り速度 1000mm/min の場合、 切削溝底部は比較的良好な表面性状を示した.これらのデータをもとに切削溝底部の平均粗さ Ra で整理した結果を図 4-29 に示す.いずれの送り速度においても、切削溝底部の平均粗さ Ra は 200nm 前後を示しており、本実験の範囲においては、送り速度を増加させても表面性状に大きな 影響を与えないことがわかった.以上の結果より、表 4-7 に示した一刃当たりの送り量 6μm(送 り速度 1000mm/min 時)でもマイクロツールによる切削加工が可能であることがわかった.



(a) SEM 像



P-V:2856nm, Ra:260nm (b) 三次元形状(New View) 図 4-27 送り速度 1mm/min の場合の性状



(a) SEM 像







図 4-29 送り速度と表面性状の関係

4-4-4 マイクロツールの切り込み量の影響

無酸素銅を用いた四角形状マイクロツールによる切削加工実験 2 について,ここではマイクロ ツールの切り込み量の影響として,切り込み量を 2.5,12.5,40 および 80 μ m/pass の 4 パター ンに変化させて行った.その結果の一例として,図 4-30 に切り込み量 12.5 μ m/pass の場合,図 4-31 に切り込み量 80 μ m/pass の場合の SEM 像を示す.切り込み量 12.5 μ m/ pass の場合,バリ は多少発生するものの,切削溝底部は比較的良好な表面性状を示している.一方,切り込み量 80 μ m/pass の場合,切り込み量が極度に大きいためか,バリ発生が多く,切削溝底部の表面性状 が大きな凹凸を示している.しかしながら,切削加工後におけるマイクロツールの SEM 像を図 4-32 に示すように,いずれの切り込み量においても、マイクロツールは破損や摩耗をすることなく切 削加工が行われたことがわかった.以上の結果より、無酸素銅に対して、工具長 600 μ m,工具径 100 μ m のマイクロツールでは、バリ発生が大きいものの、最大 80 μ m の切り込み量による切削加 工が可能であることがわかった.



図 4-30 切り込み量 12.5 µm の時の加工状態



図 4-31 切り込み量 80 µm の時の加工状態



図 4-32 加工後のマイクロツール

4-4-5 マイクロ彫刻による文字加工

上述のマイクロツールによる切削加工結果を踏まえ、ここではマイクロツールを用いたマイク ロ彫刻による文字加工を試みた. 無酸素銅に対して、先端形状 25 µm 角、工具長 400 µm の四角 形状マイクロツールを用いて、「ELID」文字の加工を行った. その結果の一例として、図 4-33 に SEM 像を示す. なお、主な加工条件は、切り込み量 2.5 µm、送り速度 0.1mm/min で行った. その 結果、バリの発生は認められるものの、良好なマイクロ彫刻文字の加工が施された.



図 4-33 マイクロ彫刻文字

4-4-6 マイクロツールによる金型材への切削加工

鋼材を用いて、マイクロツールによる金型材への切削加工特性について検討を行った.ここで は、SKD11と特殊ダイス鋼(ブロックゲージ)を用いた.その結果の一例として、図4-34に特殊ダ イス鋼の三次元形状の測定結果を示す.また、図4-35にSKD11の場合、図4-36に特殊ダイス鋼 の場合の加工状態を示す.なお、主な加工条件は、切り込み量2.5µm、送り速度0.1mm/minで行 った.その結果、バリの発生は認められるものの、良好なマイクロ彫刻加工が施された.



P-V:3621nm, Ra:79nm 図 4-34 特殊ダイス鋼加工溝の三次元形状(New View)

これらの結果より,SKD11 と特殊ダイス鋼ともに,切削屑,送りピッチ,あるいは,ツールの 傾きなどの影響のためか P-V 値は約 3.6 µm と大きな値を示しているが,SEM 像や平均粗さ Ra を 見る限りでは,既述の無酸素銅の結果に比べ,平均粗さ Ra が 79nm という良好な切削溝底部の表 面性状を有していることがわかる.さらに,SKD11 では若干バリの発生が認められるが,特殊ダ イス鋼ではほとんどバリの発生が認められなかった.

以上の結果より,超硬合金を素材としたマイクロツールでは,金型材に使用される鋼材に対し て,良好な切削加工が行えることがわかった.



図 4-35 SKD11 の加工状態



図 4-36 特殊ダイス鋼の加工状態

本節では、3軸デスクトップ駆動システムにおける研削加工を用いて製作されたマイクロツー ルを切削工具として使用して、独自に開発した4軸デスクトップ駆動システムによるマイクロ切 削加工を行った.その結果、開発された4軸デスクトップ駆動システムにより、超硬合金を素材 としたマイクロツールを用いて、金型材に使用される鋼材に対して良好な切削加工が行うことが でき、またさらにはマイクロ彫刻による微細加工等が可能であることを実証した.

4-5 結言

本章では,第3章で開発した4軸デスクトップ駆動システムをマイクロメカニカル加工に適用 して,その特性について非球面レンズの鏡面研削加工,球面レンズの高能率鏡面研削,およびマ イクロツールを使用した切削溝加工について検証を行った.

- 1)直径 50mmの非球面レンズ加工の実現を目的として,4軸デスクトップ駆動システムを使用し, ELID 研削により加工実験を行った.その結果,有効径 17mmの時に,形状精度 P-V3.5µmが 得られ,非球面レンズの仕様上,表面粗さ,形状誤差ともに十分満足する結果となった.こ れらの結果により4軸デスクトップ駆動システムは,非球面レンズの開発ツールとして有効 であることが確認された.そして,ポリッシング工程の省略を試みるため,仕上げ工程に SD#8000の酸化セリウムを砥粒とした研削砥石を使用して,非球面レンズの研削加工試験を 行ったところ,144µm×108µm 範囲で P-V15.3nm,rms1.49nm, Ra1.18nm となった.ポリッ シング後の表面粗さ P-V10nm,rms1.09nm, Ra0.8nm と比較すると僅かではあるが研削加工の 方が 1.5 倍程度粗い結果になっているが,数値的には,ELID 研削による仕上げ加工実用の可 能性を示唆した.
- 2) 球面レンズの効率的な加工の実現を目的として、4 軸デスクトップ駆動システムに CG ユニットを搭載して、球面レンズ加工を行った.その結果は、酸化セリウム#8000 超微粒砥石を使用しても、焼けを発生させずに表面粗さ Ra0.79nm を有する球面形状の加工が可能であることを確認した.また、砥粒選択による工程が及ぼす表面性状への影響が大きいことがわかった.また、効率的な球面レンズ加工を実現するためには、ワークの中心付近と外周付近との周速度の違いを少なくし、曲率精度を向上させるためには、砥石内径の測定誤差を少なくすることと、砥石とワークの傾斜角度の精度を向上させることが重要であることが示唆された.
- 3) マイクロツールによる切削溝加工実験では、被削材の無酸素銅に対して、直径 100µm に内 接する四角形で、工具長は 600µm のマイクロツールによる溝切削加工において、一刃当た りの送り量 6µm(送り速度 1000mm/min 時)でもマイクロツールによる切削加工が可能である

ことが分かった.また,最大 80 µm の切り込み量による切削加工が可能であることが確認された.そして,被削材として無酸素銅のみならず,金型材に使用される鋼材に対しても,良好な切削加工を行うことができ,さらにはマイクロ彫刻による微細加工が可能であることを実証した.

4-6 参考文献

- 1) 上原 嘉宏,三石 憲英,成瀬 哲也,大森 整, 厨川 常元,林 偉民,三浦 隆寛" ELID 研削 システム搭載デスクトップマシンツールにおける非球面レンズの開発" 2005 年度砥粒加工学 会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集,(2005.9) 303
- 2) 大森 整:ELID 加工統合システム"マイクロワークショップの構築,2001 年度砥粒加工学会学 術講演会講演論文集,(2001)107
- 3) 大森 整:マイクロ研削加工,精密工学会誌,68,2 (2002) 171
- Weimin Lin, Hitoshi Ohmori, Toru Suzuki, Yoshihiro Uehara, Shin-ya Morita, "Polishing Characteristics of ELID-Ground Surfaceof Nano Precision Optical Elements", Key Engineering Materials, 291/292, (2005) 365
- 5) 守安 精他:機上計測用縦型超精密触針式形状測定プローブの開発,2000 年度精密工学会春季 大会学術講演会講演論文集,(2000)578
- 6) 大森 整,森田 晋也,浅見 宗明,渡邉 裕,上原 嘉宏,林 偉民:"ナノ精度・計測融合ファ ブリケーションを目指す加工機上測定システム",機械と工具(工業調査会)50, No. 12 (2006)
 26
- 7)浅見 宗明他:低圧触針式機上形状測定システムの開発(低圧接触式プローブの高精度化),
 2006年度日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会,神奈川,11月,(2006)
- 8) 三石 憲英,上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,石川 惣一,三浦 隆寛: "デスクトップマシンツールにおける球面レンズ高能率 ELID 研削システムの開発",2004 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2004)講演論文集,(2004.9)5
- 9) 永田信一: 図解レンズがわかる本,日本実業出版社,(2002)60
- 10) 上原 嘉宏他:テーブルトップ超精密 4 軸加工機の開発 第 2 報:フルクローズドループ制御の効果,2002 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集,(2002)579
- 12) Yoshihiro Uehara, Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Yoshiyuki Ueno, Testsuya Naruse, Norihide Mitsuishi, Soichi Ishikawa, Takahiro Miura, "Development of spherical lens ELID grinding systemby Desk-top 4-axes machine tool", 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Nagoya, Japan, (October, 2005) 247
- 13) 上原 嘉宏, 大森 整, 石川 惣一, 片平 和俊, 林 偉民, 渡邉 裕, 三石 憲英, 伊藤 伸英, 山本 幸治: "ELID マイクロファブリケーションシステムにおけるマイクロツールの開発 ――(第4報:マイクロツールの切削特性評価)", 砥粒加工学会誌, 49, 4 (2005)219

第5章 イオンショットドレッシング法による

マイクログラインディング技術の開発

第5章 イオンショットドレッシング法によるマイクログラインディング技術の開発

5-1 緒言

第4章では、4軸制御デスクトップ駆動システムによるマイクロメカニカル加工の可能性につ いて議論した.このマイクロメカニカル加工には、加工対象物が微小形状の場合に微小径の砥石 を使用する必要がある場合や、3 軸以上の制御を有する複雑形状加工の場合に、砥石軸中心に対 して全方位方向で砥石を接触させる必要がある場合などでは、硬脆材料のマイクロメカニカル加 工のキーテクノロジーである ELID 研削加工法において必須要素である電極の設置が困難となる. このような場合、微小形状加工に対して無理に電極を設置すると電極と加工対象物との距離が接 近し、被削材に対して電気分解が作用して、電解焼け(電食)を発生させてしまう恐れがある. また、複雑な加工対象物に対しては、電極と被削材との干渉の恐れがあり、自由な加工の実現の 妨げとなる.そのため,電極を使用しない ELID 研削システムが必要となるが,これまでに検討 されてきた従来の電極レス ELID 研削(ELIDIII)法¹⁾では,加工対象物が導電性を有する必要があ った.またその加工対象物は、加工機と絶縁する必要があり、砥石と加工対象物間での放電の発 生を低減させるために、その砥石は導電性を低くしたメタル-レジン複合ボンド砥石に限定され るなどの制約要件が多く存在した.そこで本章では,砥石に電極の設置を必要とせず,導電性を 有する加工対象物以外の被削材(非導電材)にも対応でき,砥石材質の限定のない電極レス ELID 研削加工法として開発した, イオンショットドレッシング研削法の発明の経緯とそのメカニズム を明らかにし、4 軸デスクトップ駆動システムおよびそれによるマイクロメカニカル加工技術の 新たなキーテクノロジーとして提唱するものである.従来の ELID 研削では砥石をインプロセス で電解するために、電極設置のスペースが必要であった.このため、電極設置が困難な、ホーニ ング砥石や軸付砥石などにおいては、間欠的にドレッシングを行う ELID 研削(ELID II)²⁾が適用 されてきた.一方,ワークに導電性がある場合には、メタル-レジン複合ボンドの半導体砥石を 用いて,砥石とワーク間に通電して電解ドレッシングを行いながら研削する,電極レス ELID 研 削(Electrodeless Electrolytic Dressing:ELIDⅢ)法が開発され,円筒内面研削や金型自由曲 面の研削加工などに適用されてきている.また、この方法は、加工対象物が導電性を有し、その 加工対象物は、加工機と絶縁する必要があった.また、電導率を低くしたメタル-レジン複合ボ ンド砥石に限定されていたためボンド材の耐摩耗性が低くなることを余儀なくされ、メタル-レ ジン複合ボンドを用いた φ 5mm 以下の小径砥石を使用する場合,砥石摩耗による砥石径変化の影 響が大きくなる事が懸念される.図 5−1 に電極レス ELID (ELIDⅢ) 研削法を示す.本章で考案・ 提案し発明したイオンショットドレッシングに至る方式の遷移:①ワークに通電する電解ドレッ シング研削(ELIDIII)法、②砥石と研削ノズル間に通電する電解ドレッシング研削(ノズル式 ELIDIII)法、③研削液ノズルにより電解された研削液を砥石に照射することで電解ドレッシング

156

研削を行う方式(イオンショットドレッシング法)を図 5-2 に示す.



図 5-1 電極レス ELID 研削(ELIDⅢ)法の概略図



①ワークに通電する電解ドレッシング研削(ELIDII)法



②砥石と研削液ノズル間に通電する電解ドレッシング研削(ノズル式 ELIDⅢ)法



③研削液ノズルにより電解された研削液を砥石に照射する電解ドレッシング研削 (イオンショットドレッシング)法

図 5-2 イオンショットドレッシング法の発明に至る方式の推移

5-2 4軸デスクトップ駆動システムへのELIDⅢ研削法の適用

5-2-1 実験装置および実験条件

4 軸デスクトップ駆動システムに対しELIDIII研削法を適用する基礎実験を,被削材にSKD11 を使 用して行った³⁾⁻⁴⁾.研削工具としては,鋳鉄ボンド砥石 (SD#4000)を使用し,まず砥石とワーク 間のギャップを,0.1~0.5mmを 0.1mm間隔で変化させた時に生成される不導体被膜厚さの調査を 行った.次に研削液の濃度(10 倍,50 倍),初期ドレッシング後にELID OFF (ELID無し)で加 工するインターバル方式 (ELIDII)の3条件での研削加工特性の評価を行い,砥石摩耗,ワーク 除去量の調査を行った.使用機器・実験条件を表 5-1 に示す.

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム	
ELID 電源	NX-ED1505(新世代加工システム㈱)	
砥石	鋳鉄ボンド, 形状:φ75mm, t5mm	
工具回転数	$3000 min^{-1}$	
切り込み量	0.001mm/pass	
総切り込み量	0. 09mm	
送り速度	100mm/min	
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム㈱)	
	(水道水で 10, 50 倍に希釈)	
電解条件	60V, 10A, パルス τ on/ τ off 2/2μs	

表 5-1 ELIDⅢ実験条件

同システムにおいて,電解条件(60V,10A),研削液の濃度(10 倍,50 倍希釈),初期ドレッシング後(60V,10A)に ELID 0FF で加工するインターバル方式(ELID II)の3条件での加工特性の評価を行い,砥石摩耗,ワーク除去量の調査を行った.次に,電流値,電圧値の変化による加工特性の比較を行った.使用機器および実験条件を表 5-2 に示す.加工風景を図 5-3 に示す.

使用機械	4軸デスクトップ駆動システム	
ELID 電源	NX-ED1505(新世代加工システム(㈱)	
砥石	- 鋳鉄ボンド,形状:φ75mm,t5mm	
工具回転数	3000min ⁻¹	
切り込み量	0.001mm/pass	
総切り込み量	0. 09mm	
送り速度	100mm/min	
研削液 NX-CL-CG7(新世代加工システム(株))		
(水道水で 10, 50 倍に希釈)		
電解条件	30~60V, 1~10A, パルス τ on/ τ off 2/2μs	

表 5-2 電解条件による ELIDⅢ実験条件



①システム外観



②加工中 図 5-3 加工の様子

5-2-2 実験結果および考察

図 5-4 に, 砥石, ワークギャップを 0.1~0.5mm と変化させた時の被膜厚さを示す. 砥石間の ギャップ変化に関しては, 10µm 程度のバラツキが見られたが, どの条件でも不導体被膜が生成 され電解ドレッシングが可能であった.



図 5-4 砥石ワークギャップの違いによる不導体被膜厚さ

図 5-5 に,加工前,加工後の表面性状を示す.図 5-6 に研削液濃度(10,50 倍),インターバル加工(ELIDⅡ)と変化させた時の研削比,図 5-7 に表面粗さ Ra を示す.



①加工前



②50 倍希釈時



③10 倍希釈時



④インターバル(ELIDⅡ)図 5-5 加工前,加工後の表面性状

図 5-5 に示すように,水道水で 50 倍,10 倍に希釈した時には砥石,ワーク間で放電現象が起 こり,研削液濃度が濃いほど,強く放電することが分かった.また研削比に関しても,50 倍,10 倍に希釈して加工したものに関しては,恐らく放電によるものと考えられる砥石摩耗が多く研削 比が低下し,加工面に関しても放電痕が残り,50倍,10倍希釈ともに加工面も悪化していた. それに対し、インターバル加工(ELIDII)に関しては、放電痕も見られず砥石摩耗を抑えること ができ、研削比、加工面ともに、非常に良好な結果が得られた.また、ELIDの効果を確認するた めにツルーイング後、ELIDを付与しない条件で加工を行ったところ、総切り込み量 90μmに対し て、30μm程度切り込んだところで目詰まりによると思われるスピンドル負荷過大が発生し、砥 石回転が停止した.しかし、ELID研削では、インプロセスおよびインターバルともに 90μmを切 り込んでも、スピンドル負荷過大は発生しなかった.このことからも電極レス方式における ELID 研削の効果が示唆された.





図 5-7 各条件における表面粗さ

次に、電圧値 30,60A と変化させた時の、電流値(1,5,10A)による研削比を求めた結果を 図 5-9 に示す.電圧値が 60V,電流値が 1A の時に、研削比が 3.9 と良好な結果が得られた.また、 表面粗さを図 5-10 に示す.表面粗さに関しても電流値が低い程、良好な結果が得られた.図 5-11 に加工後の表面性状を示す.結果より、電流値が高いほど放電現象が見られ、砥石の摩耗が大き く表面粗さを悪化させている事が分かった.また、ELID 研削の効果を確認するためにツルーイン グ後、ELID を付与しない条件で加工を行ったところ、総切り込み量 90 µm に対して、30 µm 程度 切り込んだところで目詰まりによると思われるスピンドル負荷過大が発生し、砥石回転が停止し た.しかし、電極レス ELID 研削を適用した場合は、インプロセスおよびインターバルともに 90 µm を切り込んでも、スピンドル負荷過大は発生していない.このことからも電極レス ELID 研削の 効果が確認された.



図 5-8 電流値,電圧値変化による研削比



図 5-9 電流値,電圧値変化による表面粗さ Ra



①60V, 5A



②60V, 1A 図 5-10 電流値,電圧値変化による表面性状

前節では、4軸デスクトップ駆動システムにおけるマイクロメカニカル加工法の1つとして、 ELIDIII研削法の適用可能性の検討を行った.その結果、条件の適正化により電極レス ELID の効 果を確認できた.一方で、加工対象物(ワーク)に直接通電を行うことによる放電現象の抑制に は難しさが残る結果ともなった.4軸デスクトップ駆動システムによる加工対象物として、小径 ワークを考えた場合、砥石に電極を対設することも困難であり、またワークに導電性がない場合、 ワークに直接通電することも困難である.そこで本節では、砥石やワークとは別に研削液ノズル 部に電極を設置した方式「ノズル式電極レス ELID 研削(ノズル式 ELIDIII)法」の考案・開発を 行い、その基礎的効果の検証を行った.

5-3-1 実験方式および実験条件

考案したノズル式 ELIDIII研削法の模式図を図 5-11 に示す.図 5-12 に試作した装置の様子を示 す.砥石には陽極を接触させ,研削液ノズル先端部に陽極・陰極の電極を設置し,各電極間に研 削液を流し,通電した研削液を砥石に照射して電解ドレッシングする加工方式である.従来の ELIDIII研削法では,ワークを電極に見立て陰極を配線しており,導電性のあるワークに限られて いたが,本ノズル式 ELIDIII研削法では,ワークの導電性の有無によらず加工が可能となり,研削 加工ができるワークの対象が拡大できるメリットが予測される.



図 5-11 ノズル式 ELIDⅢ研削法の配線図



図 5-12 試作したノズル式電極

5-3-2 実験装置および実験条件

開発した4軸デスクトップ駆動システムを使用し、被削材にはSKD11 (HRC52)を使用して実験 を行った.研削工具として、従来の ELIDIII研削法では主としてメタルーレジン複合ボンド砥石を 使用していたが、ここでは砥石摩耗を考慮して、鋳鉄ボンド砥石 (SD#2000)を使用した.実験 条件としては、ノズル式 ELIDIII研削法での電極正負配線による加工比較を行った.加工前に砥石 の初期状態を統一するためにツルーイングを行い、加工実験を開始した.また砥石のドレッシン グは、加工開始と同時に電解電源をスタートさせ、平面加工による比較を行った.加工後は砥石 摩耗、ワーク除去量、表面粗さの調査を行った.使用機器および実験条件を表 5-3、正負配線時 の接点を表 5-4、加工の様子を図 5-13、実験 1 から 3 に関しては、ノズル部、砥石部の正負配線 を条件毎に変更し、実験 4 に関しては、ツルーイング後に初期ドレッシングを行わず加工を行っ ている.実験 5 に関しては、研削液をミスト状にして加工比較を行った.



図:	5-13	加工の様子

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム	
ELID 電源	NX-ED1505 (新世代加工システム㈱)	
被削材 SKD11 (HRC52)		
44.7	ボンド材:鋳鉄ボンド	
他们	粒度:SD2000, 形状:φ75mm, t5mm	
开出心运	NX-CL-CG7(新世代加工システム(株)	
4月1代文	(水道水で 50 倍に希釈)	
砥石回転数	$4000 min^{-1}$	
送り速度	200mm/min	
切り込み量	2 μ m	
総切り込み量	$100~\mu$ m	
電解条件	150V, 10A, パルス τ on/τ off 2/2μs	

表 5-3 使用機器およびノズル式 ELID 加工実験条件

表 5-4 正負配線時の接点

実験	接点 A	接点 B	接点 C
	(ノズル部)	(ノズル部)	(砥石)
1	マイナス	なし	プラス
2	マイナス	マイナス	プラス
3	マイナス	プラス	プラス
4	電解なし		
5 (ミスト)	マイナス	プラス	プラス

5-3-3 実験結果および考察

実験2のドレッシング前後の砥石表面性状を図 5-14 に示す.この図より,ノズル式電極レス ELID 研削システムによる不導体被膜生成が確認できた.その他の実験1,5の条件では,砥石表 面にあまり被膜が見られなかった.図 5-15 に加工結果を示す.表面粗さに関しては,実験1が 他の条件と比べて悪い結果となったが,研削比に関しては良好な結果が得られた.これは,実験 2、3と比較すると砥石の電解ドレッシングが加工に対して追い付いていないために,粗さが悪化 したと考えられる.実験2,3 に関しては,表面粗さ,研削比とも他の条件に比べ良好な結果が 得られ,ノズル部にマイナスとプラスもしくはマイナスを付加しても大きな差が得られなかった. 実験4に関しては,加工途中の62µm切込んだ所で砥石負荷によりスピンドルがストップした結 果である.原因は砥石目詰まりである.実験5 に関しては,ミスト供給ノズルにマイナスを給電 したが,研削比が実験2,3 と比べると劣っており,不導体被膜生成が追い付いていない結果と なった.加工結果より,砥石にプラスを給電し,ノズル部にマイナスとマイナスもしくはプラス を給電する事により良い効果が得られた.



①電解前



②電解後 図 5-14 実験 2 の砥石ドレッシング前後の表面性状


5-4 ノズル式ELIDIII研削法の組み合わせとその効果

5-4-1 実験装置および実験条件

4 軸デスクトップ駆動システムを使用し,被削材には SUS420 (HRC52)を使用して実験を行っ た.研削工具としては、メタルーレジン複合ボンド砥石 (SD#4000)を使用した.実験条件は、電 極の消耗の比較のために砥石に正極を、被削材に負極としたもの(方式 A)とノズルの上下に正 負としてノズル内で電解したもの(方式 B)と、砥石に正極をノズル先端部に負極としたもの(方 式 C)の3種類で行った.加工前に、砥石の初期状態を統一するため、ツルーイングを行い加工 開始した.また砥石のドレッシングは、加工開始と同時に電解をスタートさせ、凹型球面加工に よる比較を行った.加工後は被削材の表面粗さの調査を行った.使用機器および実験条件を表 5-5 に示す.また、3種類の電極レス方式を図 5-16 に示す.



(a) 方式A(ELIDⅢ研削法)



(b) 方式 B



(c) 方式 C (ノズル式 ELIDⅢ方式の一法)図 5-16 比較した電極レス電解ドレッシング方式

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム
ELID 電源	NX-ED1505(新世代加工システム㈱)
被削材	SUS420 (HRC52)
	ボンド材:メタル-レジン複合
砥石	粒度:SD4000
	形状:外径 φ25mm, 内径 φ20mm
	カップ型砥石
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム㈱)
	(水道水で 50 倍に希釈)
工具回転数	$1500 \mathrm{min}^{-1}$
送り速度	50mm/min
切り込み量	$1\mu{ m m/pass}$
総切り込み量	40μ m
電解条件	150V, 10A, パルス τ on/ τ off $2/2 \mu$ s

表 5-5 使用機器およびノズル式 ELID 方式による実験条件

5-4-2 実験結果および考察

加工後の表面粗さを図 5-17 に示す. この結果よりノズルに正・負極を配したもの(方式 B)の Ra13nm が良好ではあるが,砥石に正極/ノズルに負極のもの(方式 C)も Ra20nm で,ほぼ同等の 結果であった.また,砥石に正極/被削材に負極のもの(方式 A)の Ra68nm が悪い結果となった. 方式Aの表面観察では放電痕が確認できた.砥石の摩耗量は,方式Aの時が 35 µm と多く,次い で,方式Bの 18 µm,方式Cは 16 µm と最も少ない結果となった.次に,方式Bの研削加工後の 電極の状態を図 5-18 に示す.この写真から,ノズルに正・負極を与える方式 B では,電極の正 極側が電解摩耗し,加工中には負極側には黒色物質が付着することが分かった.



(a) 方式A(ELIDⅢ研削法)







(c) 方式C(ノズル式 ELIDⅢ方式の一法)図 5-17 加工表面粗さ



図 5-18 方式 B における電極の消耗(左:陰極、右:陽極)

5-5 イオンショットドレッシング研削方式⁵⁾⁻⁸⁾

前節までの実験結果により、ノズル式 ELID III 研削法とともに、前節における方式 B、つまり砥 石に何ら電圧を印加する手段を用いない方式の有効性が確認された.これは、砥石を、従来の ELID における給電ブラシや電極(陰極)の対設から解放する意味で極めて意義深い成果と考えられる. そこで本節では、研削液ノズルに正・負極を与える、前節における方式 B に着目して、基礎的研 削特性を確認する実験を行った.ここで、この方式 B を「イオンショットドレッシング法」と呼 称することとする.これは、研削液がノズル先端部を通過する際に電解されたイオンが砥石に照 射(ショット)されることを想起させることから命名したものである.再度確認すると、ELID III 方式とイオンショットドレッシング方式の相違を図 5-19 に示す.また、イオンショットドレッ シング法における研削液ノズル部の電極を図 5-20 に示す.



①ELIDⅢ法
 ②イオンショットドレッシング法
 図 5-19 ELIDⅢ法とイオンショットドレッシング法の加工原理



図 5-20 イオンショットドレッシング法におけるノズル電極

5-5-1 比較実験方法および実験装置

4 軸デスクトップ駆動システムを使用し,被削材には SKD11 を使用して実験を行った.研削工 具としては,鋳鉄ボンド砥石(SD#2000)を使用し,ELID 電解条件(90V,10A)で ELID III 研削法 とイオンショットドレッシング研削法での初期ドレッシングにおける砥石性状の変化の確認を 行った後,SKD11 の加工を行った.加工後は砥石摩耗,ワーク除去量,ワーク表面性状を SEM に より観察して調査を行った.使用機器と実験条件を表 5-6 に示す.

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム
ELID 電源	NX-ED1505(新世代加工システム㈱)
砥石	鋳鉄ボンド,形状:φ75mm, t5mm
工具回転数	3000min^{-1}
切り込み量	0.001mm/pass
総切り込み量	0. 09mm
送り速度	100mm/min
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム㈱)
	(水道水で 50 倍に希釈)
電解条件	90V, 10A, パルス τ on/τ off 2/2μs

表 5-6 使用機器とイオンショットドレッシング法による実験条件

5-5-2 比較実験結果および考察

図 5-21 に ELIDIII法による初期電解ドレッシング前後の砥石表面性状を,図 5-22 にイオンショ ットドレッシング法による初期電解ドレッシング前後の砥石表面性状を示す. ELIDIIIでは,ワー クとのクリアランスを 0.1~0.5mm と変化させ評価を行ったが,いずれの条件でも同様に不導体 被膜が生成され電解が可能であった.また,イオンショットドレッシング法においても,砥石に 電解した研削液を照射する事により,ELIDIIIと同様に不導体被膜の生成が確認できた.

加工後のワーク表面を SEMにより観察を行った結果を図 5-23 に示す. ELIDIIIでは表面に放電 痕が見られたものの、イオンショットドレッシング法では放電痕が見られない加工面となった. 図 5-24 より表面粗さに関しては、ELIDIII法の方が Ra0.02 µm とやや良好な結果となっているが、 図 5-25 に示した研削比の比較をすると、イオンショットドレッシング法が 3 倍以上良好な結果 となり、加工面粗さ、研削比を総合的に評価すればイオンショットドレッシング法の有効性が実 証できたと考える. ELIDIII法に比ベイオンショットドレッシング法の方が砥石摩耗が少なく、ワ ークの除去量が多いことが分かった.また、加工状態の観察により、ELIDIIIでは放電現象により、 砥石摩耗が多いことが分かった.なお、ELID 無しで、同条件にて加工をした結果は、10 µm 切込 んだところでスピンドル負荷過大が発生し砥石回転が停止した.この結果により、イオンショッ トドレッシング法でのドレッシング効果が示唆されたと言える.



①電解前



②電解後図 5-21 ELIDⅢによる初期電解ドレッシング後の砥石性状



①電解前



②電解後 図 5-22 イオンショット方式による初期電解ドレッシング後の砥石性状



①ELIDⅢ法



②イオンショットドレッシング法図 5-23 加工後の表面性状 (SEM)



図 5-24 加工後のワーク表面性状



図 5-25 加工後の研削比比較

5-6 イオンショットドレッシング法によるデスクトップ鏡面研削システムの検討

5-6-1 イオンショットドレッシング法のメリット

上述のイオンショットドレッシング法における電流の流れを考察すると、ツイン電極式⁹⁾⁻²¹⁾ 交流電解ドレッシング(図 5-26)に類似し、電流は、陽極電極→研削液→砥石→研削液→陰極電 極のように流れ、電気分解反応を発生させることによりドレッシング効果を得る原理と考えてい る. この電流の流れの模式図を図 5-27 に示す.ツイン電極式交流電解ドレッシングでは、ELID 研削システム同様に電極の設置が必要となり、レイアウトに制約がある.また、小径砥石を使用 する場合などでは、加工中に陰極電極とワークとの干渉と、陰極電極がワークに近づき過ぎるこ とによる金属腐食が発生してしまう恐れがある.図 5-28 に小径砥石を使用したときのワークと 砥石と電極との位置関係を示す.また、陰極電極がワークに近づき過ぎて電食した様子を図 5-29 に示す.イオンショットドレッシング法では、設置の自由度があり、砥石とノズルとの距離を離 すことができるため、電食(金属腐食)の恐れもなく、利便性の高いシステムが開発できたと言 える.



図 5-26 ツイン電極式交流電解ドレッシングの原理図



図 5-27 イオンショットドレッシング法における電流の流れの模式図



図 5-28 小径砥石を使用した場合の問題



図 5-29 陰極電極がワークに近づきすぎて電食を起こした様子(材質:SUS316)

5-6-2 実験装置および実験条件

電極材の電気分解について基礎実験を行うため、4 軸デスクトップ駆動システムを使用し、ノ ズル部の電極材には、ステンレス材を用いて電気分解の状況について実験を行った。研削工具と しては鋳鉄ボンド砥石(SD#2000)を使用した。実験条件としては、イオンショットドレッシン グ法におけるステンレス電極の電気分解による摩耗状況の調査を行った。電解前に砥石の初期状 態を統一する為にツルーイングを行い、加工を開始した。使用機器および実験条件を表 5-7 に、 実験システムを図 5-30 に示す。

使用機械		4 軸デスクトップ駆動システム
ELID 電源		NX-ED1560(新世代加工システム(株)
		鋳鉄ボンド, 粒度:SD2000
低石		形状:φ75mm, t5mm
電極材質		ステンレス, 長さ:150mm
研削液		NX-CL-CG7(新世代加工システム㈱)
		(水道水で 50 倍に希釈)
	無負荷電圧	150V
重韶文件	設定ピーク電流	60A
・ 単単条件 パンパン パンパン パンパン パンシン パンシン (1997) 1000000000000000000000000000000000000	パルス τ on/τ off	$2/2\mu$ s
	電解時間	60min
	砥石回転数	4000min^{-1}
研削条件 -	送り速度	100mm/min
	切り込み量	$2\mu\mathrm{m/pass}$
	電解時間	100μ m

表 5-7 イオンショットドレッシング法による加工実験条件



図 5-30 イオンショットドレッシングシステム

5-6-3 実験結果および考察

イオンショットドレッシングによる電解前後の砥石の表面状態を図 5-31 に示す.図 5-31 の結 果より,砥石色の変化が観察できる.生成された不導体被膜厚さは 25 µm であった.

また,電解実験後の電極の内側の様子を図5-32に示す.正極側電極のノズル先端部分で20 μ m, 根元部分では 3 μ m の摩耗量であった. 負極側電極には黒色の付着物があったが,布で拭き取る と図 5-32 に示した正極側と同様な銀白色となった.また,イオンショットドレッシングを行っ た砥石を使用して SKD11 を加工したときの表面粗さは,Ry69 μ m,Ra12 μ m であった.また,総切 り込み量 100 μ m に対して,被削材の除去量 100 μ m,砥石摩耗量 1 μ m となり,極めて良好な加工 が行えることがわかった.



(a)電解前



(b)電解後 図 5-31 イオンショットドレッシングによる砥石色の変化



図 5-32 イオンショットドレッシング後の電極の表面状態

5-7 イオンショットドレッシング法における各種条件の影響

5-7-1 電解条件と不導体被膜厚さの関係

イオンショットドレッシング研削システムについて,電解条件による不導体被膜生成の効果と その影響について調査を行った.4000min⁻¹で回転させた砥石に,電極間で電解した研削液を照 射した.実験条件は,各電圧の設定値毎に電流の設定値を変化させ,それぞれ 60 分間の電解を 行い,砥石に生成した不導体被膜の厚さを求めるために砥石外径の測定を行った.表 5-8 に実験 条件を示す.また,図 5-33 に実験結果を示す.

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム
電解電源装置	NX-ED1560(新世代加工システム㈱)
	ノズル材質:SUS304
電解条件	無負荷電圧:60, 90, 120, 150V
	設定ピーク電流:10, 20, 30, 40, 50, 60A
	パルス τ on/ τ off 2/2μs
	電解時間:60min
砥石-ノズル距離	20mm
砥石	鋳鉄ボンド, 粒度:SD2000 形状:φ75mm, t5mm
工具回転数	4000min^{-1}
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム㈱)

表 5-8 電源設定値による電解実験条件

図 5-33 より無負荷電圧が 60V では,設定ピーク電流値が 60A を要しても被膜の生成は確認で きなかった.また,150V-60A の時に,被膜が 30 µm と最も厚く生成した.また,それぞれの条件 で電流値を高くすることで不導体被膜が厚くなる傾向が確認された.また,低い方の電圧では, 90V-60A の時に 10 µm 程度の被膜の生成が確認された.これらの結果により,被膜を生成させる には,電圧 90V では 60A 以上が必要,電圧 120V では 40A 以上が必要,150V では 10A 以上が必要 であることが確認された.この結果に基づき,イオンショットドレッシング研削システムのため の最適条件の設定が重要と考えられる.



図 5-33 電解条件と不導体被膜厚さの関係

5-7-2 研削液濃度と不導体被膜厚さの関係

イオンショットドレッシング研削システムにおいて,研削液濃度が不導体被膜の生成厚さに与 える影響について調査を行った.実験は,電圧値150Vとし,電流値を20Aとした時,60Aとした 時の2種類の条件で調査を行った.また実験方法は,電解液の濃度を,水道水で20倍,50倍, 100倍にそれぞれを希釈したものと水道水のみの場合で砥石に生成される不導体被膜厚さにつ いて実験を行った.実験条件を表 5-9に示す.また,研削液濃度と不導体被膜厚さの実験結果に ついて図 5-34に示す.

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム	
電解電源装置	NX-ED1560, ノズル材質:SUS304	
	無負荷電圧:150V,	
雪栅久冲	設定ピーク電流:20A, 60A	
	パルス τ on/ τ off 2/2μs	
	電解時間:60min	
砥石ーノズル距離	20mm	
砥石	鋳鉄ボンド,	
	粒度:SD2000, 形状:φ75mm, t5mm	
工具回転数	4000min ⁻¹	
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム(㈱)	
	希釈倍率:水道水のみの場合,	
	20 倍, 50 倍, 100 倍(水道水で希釈)の各場合	

表 5-9 研削液濃度による電解実験条件

実験の結果,無負荷電圧値が 150V で設定ピーク電流が 20A 以上あると水道水のみでも不導体 被膜が生成することが確認された.また,150V-60A-20 倍希釈の条件で 35µm の不導体被膜厚さ が確認され,同様に 150V-20A-20 倍希釈の条件で 25µm の不導体被膜厚さが確認され,電解濃度 が濃くなると不導体被膜が厚くなることが確認された.



図 5-34 研削液濃度と不導体被膜厚さの関係

5-7-3 電解条件が加工特性に与える影響

4 軸デスクトップ駆動システムによるイオンショットドレッシング研削システムにおいて,実際の加工を行い,ドレッシング性能について調査を行った.実験の方法は,被削材に超硬合金を 用い,砥石に SD#2000 を使用した.電解条件は,無負荷電圧を 150V 一定として設定ピーク電流 を 10~60A まで変化させて加工したときの砥石の摩耗量,被削材の除去量,表面粗さについて測 定を行った.実験条件を表 5-10 に示す.また,図 5-35 に実験結果を示す.

使用機械	4軸デスクトップ駆動システム
電解電源装置	NX-ED1560, ノズル材質:SUS304
電解条件	無負荷電圧:150V
	設定ピーク電流:10, 20, 30, 40, 60A
	パルス τon/τoff 2μs
砥石-ノズル距離	20mm
被削材	超硬合金
砥石	ボンド材:鋳鉄ボンド
	粒度:SD2000, 形状:φ75mm, t5mm
工具回転数	$4000 min^{-1}$
切り込み量	0.002mm/pass
総切り込み量	0. 1mm
送り速度	200mm/min
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム(㈱)
	(水道水で 50 倍に希釈)

表 5-10 電解条件による加工実験条件



図 5-35 電解条件の加工への影響

実験結果より,電解条件の設定電流値が低いと表面粗さは悪化しており,ワーク除去量も減少, 砥石摩耗量は増加する傾向がみられる.150V-60Aでは,表面粗さは良好で,砥石の摩耗もほぼ認 められない程度であり,ワーク除去量も良好であった.一方,150V-10Aの条件では十分な加工が 実施できなかった.

5-7-4 電解条件と研削液の状態について

イオンショットドレッシング研削システムにおいて、ノズル先端から照射される研削液がどの ような変化をしているのかの調査を目的として、噴射される研削液を採取して、電気伝導度、pH, 溶存酸素量を調べた.実験条件を表 5-11 に示す.また、実験結果を図 5-36 に示す.実験方法は、 採取用タンクに、電気伝導度、pH 計と溶存酸素計を設置し、ノズルから噴射された研削液を直接 タンクに採取し、データのロギングを行った.

使用機械	4軸デスクトップ駆動システム
重留重酒壮罢	NX-ED1560(新世代加工システム(株)
电胜电你表世	ノズル材質:SUS304
	無負荷電圧:90, 120, 150 V
電磁冬州	設定ピーク電流: 60 A (一定)
电胜利性	パルス τ on/τ off 2/2μs
	電解時間:60min
砥石-ノズル距離	20mm
开出小海	NX-CL-CG7(新世代加工システム(㈱)
9月1日9日2	(水道水で 50 倍に希釈)
<i>再与口</i> 送去 11测力明	WM-22EP
电 X 仏 导 皮 , p n 例 上 奋	(東亜ディーケーケー(㈱)
<u> </u>	D0-21P
俗行跋杀侧足奋	(東亜ディーケーケー㈱)

表 5-11 研削液における電解実験条件

電解条件は,設定ピーク電流 60A 一定として,無負荷電圧を 90V,120V,150V と変化させた. また,比較のための水道水のみの場合と,50 倍希釈した研削液に電解を与えない場合についても 調査を行った.実験の結果,イオンショットドレッシングにより電気伝導度と溶存酸素量が上昇 した.また,150V-60A の時が,溶存酸素量がもっとも多く検出される傾向が確認された.このこ とにより,砥石の電解ドレッシング現象において,特に不導体被膜の形成において,電解された 研削液中の酸素量が影響を与えていることが示唆される.



図 5-36 電解条件と研削液の状態

5-8 イオンショットドレッシング法のメカニズムの解析および解明

5-8-1 イオンショットドレッシング法の電気的現象

これまでの実験結果によりイオンショットドレッシング法による研削効果および各種条件の 影響について検証を進めてきたが、本節ではそのメカニズムについて検討・検証を行う.まず、 砥石とノズル電極部との間の電圧値の測定を行った.測定は、砥石とノズルとの距離を 20mm か ら 10mm ごとに 100mm まで設定して測定を行った.表 5-12 に実験条件を示す.また、ノズル先端 部分の電極間距離 1.5mm、3.5mm について、砥石とノズル電極部との間の電圧値について測定を 行った.測定は、砥石とノズルとの距離を 20mm から 10mm ごとに 100mm まで設定して測定を行っ た.表 5-13 に実験条件を示す.図 5-37 に実験方法についての模式図を示す.

使用機械	4軸デスクトップ駆動システム	
電解電源装置	NX-ED1560, ノズル材質:SUS304	
電解条件	無負荷電圧:150V,設定ピーク電流: 60A	
	パルス τ on/τ off 2/2μs	
ノズルー砥石距離	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100mm	
電極間距離	1.5mm	
TIT. 7-	鋳鉄ボンド,	
144.7日	粒度:SD2000, 形状:φ75mm, t5mm	
工具回転数	$4000 min^{-1}$	
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム(㈱)	
	(水道水で 50 倍に希釈)	

表 5-12 ノズルと砥石の距離における電解実験条件

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム	
電解電源装置	NX-ED1560, ノズル材質:SUS304	
電解条件	無負荷電圧:150V,設定ピーク電流: 60A	
	パルス τ on/τ off 2/2μs	
ノズルー砥石距離	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100mm	
電極間距離	1.5, 3.5mm	
砥石	鋳鉄ボンド,	
	粒度:SD2000, 形状:φ75mm, t5mm	
工具回転数	4000m i n ⁻¹	
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム(㈱)	
	(水道水で 50 倍に希釈)	

表 5-13 電極間距離における電解実験条件



図 5-37 電圧測定の模式図

ノズルと砥石間の距離と電圧の関係を図 5-38 に示す.ノズルと砥石間の距離と不導体被膜厚 の関係を図 5-39 に示す.また,電極間距離によるノズルと砥石の距離と,砥石とプラス側ノズ ル間の電位の関係を図 5-40 に示す.図 5-38 より砥石とノズル正側の電圧値と砥石とノズル負側 の電圧値との和がほぼ電極間の電圧になることがわかる.また,ノズルと砥石の距離が離れても 電位値に変化がないことが確認された.また,図 5-39 よりノズルと砥石の距離と不導体被膜厚 さの関係の傾向については、距離が短いほど不導体被膜厚が最も厚く、40mm以上では不導体被膜 厚は次第に薄くなるが急激な変化はないことが確認された.図 5-40 より電極間距離について 1.5mm と 3.5mm の比較においては、その傾向と値が変わらないことが確認された.



図 5-38 ノズルと砥石の距離と電圧の関係



図 5-39 ノズルと砥石の距離と不導体被膜厚さの関係



図 5-40 電極間距離によるノズルと砥石の距離と電圧の関係

5-8-2 イオンショットドレッシング法のメカニズム

5-6 節において、イオンショットドレッシング法の電流の流れはツイン電極式交流電解ドレッ シング法に類似していることを触れたが、ツイン電極式交流電解ドレッシング法では不導体被膜 が生成されないのに対し、イオンショットドレッシング法では、不導体被膜の生成ならびに各種 条件の影響が検証されている.そこで、ここでは、イオンショットドレッシング法のメカニズム について検証を試みる.横山らは、電解ドレッシング用研削液の開発²²⁾⁻²⁴⁾の中で、塩素イオンの 効果について言及している.また、防錆・防食技術総覧²⁵⁾⁻²⁶⁾より鉄系材料の水溶液中での腐食図 では、ペーハー(pH) 8~10 において電解を与えるとき、塩素イオンを含まない水溶液中の場合 は不動態域を示すが、塩素イオンを含んだ水溶液中の場合は孔食域が示されることがわかる.図 5-41 (a) に塩素イオンを含まない水溶液中の腐食図を、図 5-41 (b) に塩素イオンを含んだ水溶 液中の腐食図を示す.これらのことから塩素イオンに着目し、その影響について検証実験を行い、 鏡面研削に不可欠な、電解ドレッシングによる不導体被膜が生成されるメカニズムについて解析 を行った.

199



塩素イオンの影響を確認するため2種類の研削液と2種類の希釈水,そして,電解を付与する 場合と付与しない場合の,全8種類の条件について実験を行った.研削液は,ELID用研削液(以 下NX-CL-CG7)と塩素イオンを含まない新しい研削液(以下NX-CL-CG7(-C1))の2種類を用い た.また希釈水は,水道水と純水の2種類を組み合わせて使用した.実験は,NX-CL-CG7を水道 水で50倍に希釈したもの,NX-CL-CG7を純水で50倍に希釈したもの,NX-CL-CG7(-C1)を水道 水で50倍に希釈したもの,NX-CL-CG7(-C1)を純水で50倍に希釈したもの,水道水のみ,純水 のみ,使用済み研削液に電解を付与しないもの,水道水のみに電解を付与しないものの8種類で 行った.また,それぞれの研削液条件について砥石とノズルの距離を20mmから100mmまで,10mm ずつ離しながら,不導体被膜厚の測定を行った.表 5-14に実験条件を示す.

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム
電解電源装置	NX-ED1560, ノズル材質:SUS304
電解条件	無負荷電圧:150V
	設定ピーク電流:60A
	パルス τ on/τ off 2/2μs
砥石-ノズル距離	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100mm
<i>τ</i> μ. 7.	鋳鉄ボンド,
和3.47	粒度:SD2000, 形状:φ75mm, t5mm
工具回転数	4000min^{-1}
研削液	NX-CL-CG7(水道水で 50 倍に希釈)
	NX-CL-CG7(純水で 50 倍に希釈)
	NX-CL-CG7(-C1)(水道水で 50 倍に希釈)
	NX-CL-CG7(-C1)(純水で 50 倍に希釈)
	水道水のみ
	純水のみ
	使用済み研削液の電解無し
	水道水のみ電解無し

表 5-14 研削液の種類における電解実験条件

図 5-42 にノズルと砥石間の距離 20mm の時の研削液条件と不導体被膜厚の関係を示す.図 5-43 に研削液条件によるノズルと砥石間の距離と不導体被膜厚の関係を示す.図 5-43 より塩素イオ ンを含まない純水のみや NX-CL-CG7 (-C1) を純水で 50 倍に希釈したものでは,不導体被膜の生 成が確認されなかった.また,電解を付与しない場合も同様に不導体被膜の生成が確認されなか った.そして,不導体被膜厚さは,NX-CL-CG7 を水道水で 50 倍に希釈したものが厚く,次いで, 水道水のみに電解を付与したもの,NX-CL-CG7 (-C1) を水道水で 50 倍に希釈したもの,NX-CL-CG7 を純水で 50 倍に希釈したものの順となった.NX-CL-CG7 には,僅かな塩素イオンが含まれている が,その含有量は僅かであるため,純水で希釈したものは不導体被膜厚さが薄い結果となった. また図 5-43 より,不導体被膜の生成が確認できる研削液条件では,ノズルと砥石間の距離 40mm から 100mm の間は,不導体被膜厚に変化が少ないことが確認された.この結果から,イオンショ ットドレッシング法における不導体被膜生成では,塩素イオンの存在の寄与が大きいことが判明 した.この塩素イオンの効果に関わる実験結果ならびに文献調査から,イオンショットドレッシ ング法による被膜生成のメカニズムとして、まず陽極反応として、塩素イオンの放電で塩素が発 生し、次亜塩素酸イオンが生成され、その次亜塩素酸イオンが鉄系砥石の表面を孔食し、続いて、 砥石表面付近で発生する電気分解現象により不導体化反応が発生して、被膜が生成されるものと 考えられる. すなわち、イオンショットドレッシングのメカニズムは、直流によりツイン電極化 するノズル先端部と砥石間における電気化学反応として、次亜塩素酸イオン(塩素成分は水道水 および研削液中に含まれる)によるアニオン効果(孔食の発生)の後、水の電気分解によって発 生した水酸イオンや酸素イオンと鉄系メタルボンドとの反応により不導体被膜が生成し電解ド レッシング効果が実現できるものと考えられる. 図 5-44 にイオンショットドレッシング法のメ カニズムに関する模式図を示す.



図 5-42 研削液条件と被膜厚さの関係



図 5-43 研削液条件によるノズルと砥石の距離と被膜厚さの関係



5-9 イオンショットドレッシング法による鏡面研削システムのレンズ金型加工への適用

5-9-1 実験装置および実験条件

イオンショットドレッシング法の鏡面研削加工への展開を図るため、非球面レンズ金型の鏡面 研削加工実験を行った. 被削材には、SiC セラミックスの基材に CVD-SiC を被覆した素材を使用 した. 表 5-15 に実験条件を示す. また、図 5-45、46 に加工の様子を示す. NC プログラミングは、 ツルーイング終了後砥石の径を測定し、非球面の公式(5-1)で 0.1mm ピッチごとに求められた 数値から、砥石径の分だけオフセットされた軌道をとる NC プログラミングの生成を行った.本 実験では、C=-7.09×10⁻²、k =-2.56、A=-5.906×10⁻⁵、B=4.288×10⁻⁷、C=-6.826×10⁻¹⁰、D=-2.156 ×10⁻¹¹で生成し、それに従って X 軸方向に切込みを行いながら加工を行った.

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム
ELID 電源	NX-ED1560(新世代加工システム㈱),ノズル材質:SUS304
被削材	CVD-SiC (基材は焼結 SiC)
砥石	鋳鉄ボンド, 粒度:SD4000, 形状:φ17mm, t2mm
工具回転数	$2500 min^{-1}$
切り込み量	0.001mm/pass
総切り込み量	0. 1mm
送り速度	1mm/min
ワーク回転数	10 min ⁻¹
研削液	NX-CL-CG7(新世代加工システム㈱)(水道水で 50 倍に希釈)
	無負荷電圧: 150V,
電解条件	設定ピーク電流: 60A
	パルス τ on/ τ off $2/2\mu$ s

表 5-15 レンズ金型加工実験条件

$$z = \frac{c \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1) \cdot c^2 \cdot x^2}} + Ax^4 + Bx^6 + Cx^8 + Dx^{10}$$
(5-1)



図 5-45 レンズ金型加工の様子



図 5-46 加工の様子

5-9-2 実験結果および考察

図 5-47 に加工前,加工後の非球面レンズ金型を示す.また,図 5-48 にイオンショットドレッ シング法による鏡面研削において, SD#4000 および SD#20000 を用いて得られた加工表面粗さの測 定結果と,図 5-49 にレンズの形状誤差を,図 5-50 に比較のために,従来の ELID 研削法を適用 してレンズ加工を行った時の形状誤差の測定結果を示す. 図 5-48 より Ra1.5nm と極めて良好な 表面粗さが得られていることがわかる. また, 従来の ELID 研削の加工条件は, イオンショット ドレッシング法との比較を行うために表 5-15 と同じ条件で行った.そして, 電極材には, SUS304 を使用し、砥石の形状に合わせたものを使用した.図 5-49 と図 5-50 とを比較すると、イオンシ ョットドレッシング法を適用したレンズ加工により,従来の ELID 研削加工法と同等以上の結果 が得られることを確認した.また、一度目の加工の形状誤差として 3.4µm あったものが、砥石 の中心位置を補正して再加工を行った結果は、図 5-51, 52 の通り P-V0.75 μm と 1 μm 以下を実 現している.また,4軸デスクトップ駆動システムの NC 追従性を確認することを目的として,形 状誤差を NC プログラムに補正して加工したものを図 5-53,54 に示す.その結果は、一度目の加 工の形状誤差が 1.7μm あったものに対して, 補正して再加工を行ったものでは P-V0.74μm と 1µm以下を達成している.これらの結果より、4軸デスクトップ駆動システムにおいて、イオン ショットドレッシング法による鏡面研削は、極めて高品位かつ高精度な非球面レンズ加工を実現 できることを実証した.


(a)加工前



(b)加工後 図 5-47 加工後のレンズ金型



(a) SD#4000の表面粗さ





図 5-49 イオンショットドレッシング法で加工した形状精度(UA3P)



図 5-50 従来の ELID 研削法で加工した形状精度(UA3P)



図 5-51 中心位置補正前の形状精度(UA3P)



図 5-52 中心位置補正後の形状精度(UA3P)



図 5-53 形状誤差 NC 反映補正前の形状精度(UA3P)



5-10 イオンショットドレッシング研削システムにおける電極の検討

5-10-1 電極材質の検討

イオンショットドレッシングシステムにおける電極材種による電気分解に基づく消耗の差異 について基礎実験を行った.具体的には,開発した4軸デスクトップ駆動システムを使用し,電 極材として,銅材,カーボン材,および銅基板に金メッキを施したもの,およびステンレス材を 用いて電気分解の状況について検証する実験を行った.研削工具としては鋳鉄ボンド砥石 (SD#2000)を使用した.実験条件としては,イオンショットドレッシングシステムでの,それ ぞれの電極材質について電気分解による電極の摩耗状況と初期電解ドレッシングによる電流値・ 電圧値の変化による比較を行った.電解前に,砥石の初期状態を統一するため,砥石のツルーイ ング後,実験を開始した.使用機器および実験条件を表 5-16 に示す.

使用機械		4軸デスクトップ駆動システム	
ELID 電源		NX-ED1505(新世代加工システム㈱)	
砥石		鋳鉄ボンド, 粒度:SD#2000	
		形状:φ75mm, t5mm	
電極材質		銅電極	
		銅基板に金メッキ電極	
		カーボン電極	
		ステンレス電極	
研削液		NX-CL-CG7 (新世代加工システム㈱)	
		(水道水で 50 倍に希釈)	
電解条件	無負荷電圧	150V	
	設定ピーク電流	10A	
	パルス τ on/ τ off	2/2 µ s	
	電解時間	60min	

表 5-16 使用機器および電極材質における電解実験条件

電解後の電極の表面状態を図 5-55 に示す.結果より,銅電極は,電解の進行に伴い,電流が 流れなくなる事を確認した.また,1時間電解後の電極の摩耗量は100µm程度であった.次に, 銅基板に金メッキを施した電極材は,電解の進行に伴い金メッキが剥離し,結果としては銅電極 と同様の状態となった.カーボン電極は,実験開始後,間もなくノズル(電極間)に詰まりが発 生し,研削液が吐出できなくなった.1時間後の電解後の電極の摩耗量は,多い部分で300µm程 度あった.最後に,ステンレス電極では,電解中の電流値は1.75Aと安定して電解が持続できた. また,電解1時間後の電極の摩耗量は10µm以下であった.また,写真から観察できる(-)側 の汚れ(黒色の付着物)は,拭き取ることで容易に除去することができた.この結果,電解によ る摩耗量が少ないことや電解中の電流値の安定性などから,イオンショットドレッシング法にお ける電極材は,実験した素材の中ではステンレス材質が適していると考えられる.



(a) 銅電極材



(b) カーボン電極材



(c) ステンレス材 図 5-55 電解後の電極の表面状態

5-10-2 電極の長寿命化

イオンショットドレッシング法における電極の長寿命化を狙って,電極材の電気分解の 基礎実験を行った.具体的には,開発した4軸デスクトップ駆動システムを使用し,電極 材として,SUS304,グラファイト,普通鋳鉄の3種を用いて,イオンショットドレッシン グにおける電極摩耗状況の調査を行った.研削工具としては鋳鉄ボンド砥石(SD#2000)を 使用した.実験の方法は,それぞれの材質によりノズルを作製し,60分間,ノズル内に研 削液を流し,電解電力を印加した.その際に,正負の極性を10分毎に変化させて検討を行 った.極性を変化させない時は,正側の電極材が著しく摩耗すること,負側の電極材には 電解現象により生成物が発生することが分かっていることから,正負の極性を定期的に変 化させることを発案した.使用機器および実験条件を表 5-17に示す.開発した極性の自動 切替装置を図 5-56に示す.この極性自動切替装置は,大容量に対応した直流電磁接触器を 正側用・負側用の2機を搭載している.この直流電磁接触器は,440V,120Aの容量に対応 し,切り換え時のスパークに対する耐性も有している.本極性自動切替装置に搭載のタイ マーにより10分毎に極性を切り替えて実験を行った.

使用機械	4 軸デスクトップ駆動システム
電解電源装置	NX-ED1560(新世代加工システム㈱)
重韶久出	無負荷電圧:150V,設定ピーク電流 60A
电胜米什	パルス τ on/ τ off 2/2μs
電解時間	60min
砥石-ノズル距離	20mm
ノズル材質	SUS304, グラファイト, 普通鋳鉄
44.7	鋳鉄ボンド,
低石	粒度:SD2000, 形状:φ75mm, t5mm
工具回転数	$4000 \mathrm{min}^{-1}$
極性切り換え時間	10min
研削液	NX-CL-CG7 (新世代加工システム㈱)
	(水道水で 50 倍に希釈)

表 5-17 長寿命化を目的とした電極材質による電解実験条件

図 5-57 に使用した電極材のサイズを示す.図 5-58 に電解実験後の SUS304 ステンレス材 を、図 5-59 に電解実験後のグラファイト材を、図 5-60 に電解実験後の普通鋳鉄材を示す. また、図 5-61 に 200 時間電解実験を行ったステンレス材を示す.極性変化させた時の各電 極材質における板厚の変化量を図 5-62 に示す.各材質の板厚の変化量を比較した時に、グ ラファイト材は大きく摩耗しているが、SUS304 の摩耗量は非常に少ないことがわかった.

215

また,普通鋳鉄は,硬質な電解生成物の発生により,電極が厚くなる現象が確認された. これらの材質によるイオンショットドレッシングにより,図 5-63 に示すように砥石に片側 30µm 程度の不導体被膜の生成が確認された.このことにより,適用した φ75mm 程度のサ イズの砥石に対しては,従来の ELID 研削加工システムと同様にドレッシングが行える可能 性が示唆された.電極の材質については,電解による摩耗が少ないこと,両側の電極の変 化がほぼ均等であること,電解生成物が厚くならないことが重要な要素と言える.また, 極性の変化を与えることにより両側の電極材に対してほぼ均等な摩耗を与えることができ, 片側だけ摩耗したときに比べ寿命を大きく伸ばす結果となった.そして,ステンレス材に ついては,極性を変換させない時は 40 時間程度で電極間に電解生成物により詰まりが発生 してしまうが,極性を変換させることで 200 時間の使用を実現することができた.











図 5-57 ノズル電極形状(SUS304)



図 5-58 電解実験後のステンレス材



図 5-59 電解実験後のグラファイト材



図 5-60 電解実験後の鋳鉄材



図 5-61 電解実験 200 時間後のステンレス材



図 5-62 電解実験後の電極材の板厚の変化量



(a) 電解前



(b) 電解後図 5-63 不導体被膜の生成が確認された砥石

5-11 結言

本章では、4軸デスクトップ駆動システムにおいて、複雑形状の鏡面研削で電解焼けなど の問題となりうる電極の最適化を目指し研究を行った.まず導電性被加工物に直接通電す る電極レス ELID 研削(ELIDⅢ)法を適用し、この基本的効果を確認した.次に砥石に電極 を対設させずに,研削液ノズルに電極を組み込み,砥石側に陽極を設置したノズル式 ELIDⅢ 研削法を考案し、その基本的効果を確認した.さらに、砥石側に陽極を設置せずに、研削 液ノズルに一対の電極を対設させ、研削液ノズル先端で電解された研削液を砥石に照射す ることにより電解ドレッシングを行うイオンショットドレッシング法を考案・発明し、4軸 デスクトップ駆動システムに組み込むことによりシステム化を果たした.また,イオンシ ョットドレッシングにおける最適な電解条件、電解の環境などの検討を行い、その適用上 の特徴を明らかとした. デスクトップ駆動システムの用途として小径砥石による小型部品 を意識した場合、従来の ELID 研削では対処が困難である電極の干渉や電食などの問題を解 決するとともに、開発されたイオンショットドレッシング研削システムは φ75mm 程度以下 のサイズの砥石に対して、従来の ELID 研削法と同様の鏡面研削効果が得られることを実証 した.特に、4軸デスクトップ駆動システムとのマッチングにより、超精密非球面レンズ金 型の鏡面研削において、ナノレベルの表面品質とサブミクロンレベルの形状精度の両立を 果たした.さらに,イオンショットドレッシング法のメカニズムについて解析を行い,直 流によりツイン電極化するノズル先端部と砥石間における電気化学反応として、次亜塩素 酸イオン(塩素成分は研削液中に含まれる)による鉄系メタルボンドに対するアニオン効 果(孔食の発生)の後、水の電気分解によって発生した水酸イオンや酸素イオンとメタル ボンドとの反応により不導体被膜が生成し電解ドレッシング効果が実現できることを解明 した. 最後に、イオンショットドレッシングにおける電極の消耗について、複数種の電極 材における状態の差異を調査するとともに、極性を一定時間毎に切り替えることにより、 著しく電極寿命を伸ばす手法を考案しその効果を示した.以上により、本章で述べたイオ ンショットドレッシング法によるマイクログラインディング技術は,4軸デスクトップ駆動 システムとシステム化することにより、他に類を見ない、独自かつ新しい効率的な生産プ ロセス・システムとして構築できたものと考える.

220

5-12 参考文献

- 3. 銭 軍,大森 整,林 偉民,牧野内 昭武,松澤 隆,厨川 常元,庄司 克雄:金型材の 電極レス ELID 研削(ELIDⅢ)特性,1999 年度精密工学学会秋季大会学術講演会講演論 文集,(1999)297
- 2) 大森 整,朴 圭烈,高橋 一郎,中川 威雄:電解インタバルドレッシング研削による小 径円筒内面の鏡面加工,1990年度精密工学学会秋季大会学術講演会講演論文集(1990) 253-254
- 3) 浅見 宗明,三石 憲英,上原 嘉宏,上野 嘉之,成瀬 哲也,林 偉民,大森 整,三浦 隆寛:デスクトップマシンツールにおけるノズル式電極レス ELID 研削システムの開発, ELID 研削研究会会報(2005.12)152-153
- 4) 上原 嘉宏:デスクトップ研削システムのための新しい ELID 研削技術, 2006 年度日本機 械学会年次大会講演論文集,(2006) 25
- 5) 上原 嘉宏:デスクトップマシンツールにおけるノズル方式電極レス ELID 研削システム の開発 第2報:ノズル方式の効果の検証,2006 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文 集,(2006)91
- 6) Hitoshi Ohmori, Yoshihiro Uehara, Weimin Lin, Yutaka Watanabe, Kazutoshi Katahira , Testsuya Naruse , Norihide Mitsuishi, Soichi Ishikawa "New ELID Grinding Technique for Desk-top GrindingSystem Based on VCAD Concept", 3rd International Conference on Leading EdgeManufacturing in 21st Century (LEM21), Nagoya, Japan , (2005, 10)703-708
- 7) Hitoshi Ohmori, Yoshihiro Uehara, Weimin Lin, Katahira Kazutoshi, Naruse Testsuya, Norihide Mitsuishi, "Development of a New ELID Grinding Method for Desk-Top Fabrication System", International Conference on PrecisionEngineering and Micro/Nano Technology in Asia (ASPEN2005), Shenzhen, China, (2005, 10)
- 8) 大森 整, 上原 嘉宏, 三石 憲英, 石川 惣一, 山本 幸治:ノズル式 ELID 研削方法及 び装置, 特開 2006-159369, 公開日:平成 18 年 6 月 22 日
- 9) 沖田 高敏,田村 祐二,久保田 護:ダイヤモンド砥石のツイン電極式接触放電ドレッシング,日本機械学会精密工学会共日立地方講演会講演論文集,(1988)139-140
- 10) 綿引 拡,田村 祐二,久保田 護:メタルボンドダイヤモンド砥石の接触放電ドレッシン グについて、日本機械学会精密工学会共日立地方講演会講演論文集,(1988)145-147
- 11) 久保田 護,田村 祐二,沖田 高敏:メタルボンド超砥粒砥石の接触放電ドレッシング, 精密工学会春季大会学術講演会論,(1988)653-654
- 12) 久保田 護,田村 祐二,沖田 高敏:ツイン電極式接触放電ドレッシングの機構,精密工 学会春季大会学術講演会講演論文集,(1989)701-702
- 13) 久保田 護,田村 祐二,綿引 拡:メタルボンド超砥粒砥石の接触放電ドレッシングシス テム,精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(1990年)933-934
- 14) 鈴木 憲二,高橋 邦夫:ツイン電極式接触放電ドレッシング法の実用化研究(第 1)-ク リープフィード研削用メタルボンド CBN 砥石への適用効果-,年度精密工学会秋季大会

学術講演会論文集,(1989)327-328

- 15) 鈴木 憲二,高橋 邦夫:接触放電ドレッシング法の実用化研究(第2報) 新電極構成の 効果について;精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(1990)427-428
- 16) 鈴木 清,毛利 尚武,直松 哲太郎,中川 威雄:ツイン電極法による放電ツルーイング法 の提案,精機学会秋季大会学術講演会論文集,(1985)575-578
- 17)田牧純一,北川武揚:回転電極方式によるメタルボンドダイヤモンド砥石の接触放電 ドレッシング(第1報)ツルーイング特性について,精密工学会秋季大会学術講演会講 演論文集,(1990)429-430
- 18) 田牧 純一,北川 武揚:回転電極方式によるメタルボンドダイヤモンド砥石の接触放電 ドレッソング(第2報)ツルーイング能率について,精密工学会春季大会学術講演会講 演論文集,(1991)909-910
- 19) 澤 武一, 幾瀬 康史, 海野 邦昭, 安井 平司:開発した直流電源使用ツイン電極電解ド レッシング法の検討(ブロンズボンドダイヤモンドホイールへの適用の可能性), 精密 工学会誌, 69, 3, (2003)412-416
- 20)前田 禎三,伊東 祐光,吉野 知祐,久保田 護,黒田 寿紀:電解を応用した加工と処理,日本機械学会誌、71,599,(1968)1-10
- 21) 植松 哲太郎,鈴木 清,宮崎 英児,田中 敏之,稲見 博之,渡辺 善仁:ツイン電極法 による電解/放電ドレッシングの研究 (第4報:電解ドレッシングの諸条件-その2), 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(1990)985-986
- 22) 横山 健三, 中西 雅秋, 落合 哲夫, 黒崎 順功, 大森 整, 中川 威雄: 電解ドレッシング用 研削液の開発(第1報)-研削液に適用する各種塩類の電解性について-, 1992年度精密工 学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992) 59-60
- 23) 横山 健三, 中西 雅秋, 高梨 真彰, 大森 整: 電解ドレッシング皮膜の構造解析, 1993 年 度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1993) 933-934
- 24) 中西 雅秋, 横山 健三, 落合 哲夫, 黒崎 順功, 伊澤 守康, 大森 整, 中川 威雄: 電解ド レッシング用研削液の開発(第3報)-電解皮膜生成に及ぼす無機塩の影響 -, 1992 年度 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1992)851-852
- 25)株式会社産業技術サービスセンター,防錆・防食技術総覧, 2000.5.17,324-332
- 26)株式会社産業技術サービスセンター,防錆・防食技術総覧, 2000.5.17,58-63

第6章 先端科学およびマイクロ マニュファクチャリングへの応用

第6章 先端科学およびマイクロマニュファクチャリングへの応用

6-1 先端科学およびマイクロマニュファクチャリングへの応用

本章では、開発した4軸デスクトップ駆動システムおよびマイクロメカニカル加工技術を、放 射線科学、先端光科学や生体工学などの先端科学分野への応用とともに、マイクロマニュファク チャリングシステムへの応用の検討を行った.

まず,4 軸デスクトップ駆動システムの先端科学分野への応用については,放射線科学に寄与 する中性子光学素子の加工について検討を行い,先端光科学としてはX線用 CVD-SiC ミラーの加 工について検討を行った.また生体工学への応用としては,人工股関節骨頭の加工について検討 を行った.

次に、マイクロマニュファクチャリングへの応用としては、開発された4軸デスクトップ駆動 システムをコアとして構築可能な小サイズの生産システムとして、ワークの切断から形状加工ま でをデスクトップ規模で行うことのできるデスクトップスライシングシステム、デスクトップラ ッピングシステムとの組み合わせについて提案を行った.

6-1-1 中性子光学素子¹⁾の開発

近年,パーキンソン病,アルツハイマー病,白内障等の疾患に関連した蛋白質の希薄溶液中で の振る舞いを中性子小角散乱²⁾を用いて研究し、その会合・線維化の測定、あるいは希薄水溶液 中での蛋白質の形態変化を測定し、病気との対応関係を明らかにしようとしている.しかし、中 性子小角散乱装置のマシンタイム不足は大きな問題となっている。そこで、回転楕円体ミラーや フレネルレンズを用いた収束型小角散乱装置により、従来の小角散乱装置にそれほど劣らない性 能を有し、なおかつ数分の1以下の大きさを有した中性子散乱装置を実現することが急務となっ ている.本装置が実現されれば,蛋白質の研究者のみならず,ソフトマター,物質系,磁性系等々, 非常に広い範囲の研究者、特にこれまで中性子を利用できなかった研究者や産業界に対して中性 子を利用する機会を提供でき、中性子コミュニティーの飛躍的拡大に期待が大きい.中性子線は、 物質研究に利用される放射線の内,代表的な X 線と比較した場合,X 線が主に電磁相互作用によ って物質と相互作用をし、物質中の原子の原子番号が大きくなるにつれて急激に相互作用が強く なるのに対し、中性子と原子核の相互作用は、原子番号に対する単純な依存性は示さず、原子核 構造に依存して複雑に変化する.中性子は軽元素に対する高い識別性を伴ったユニークな物質研 究の手段、有機系の物質研究に大変好都合である.特に生体分子などの研究には優れた解析能力 を持ち、中性子の質量は原子と同程度であるために原子に有効にエネルギーを受け渡しやすく、 物質中の励起状態を研究するのには好都合となっている.また,磁気能率を持っていることを利

223

用して磁気構造の研究が可能であり、物質透過力が高いため構造物の透視が可能などの利点があ る.しかし、一般的な研究手法として広く用いられない最大の理由は中性子ビームの弱さである. 中性子ビームの弱さを克服する、最も直接的な解決方法は中性子源(原子炉等)の増強であるが、 巨額の費用と労力を要する.中性子光学素子を積極的に利用することにより、中性子の利用効率 を向上させることができれば、比較的安価に同等な効果を実現できる.

そこで、本研究により開発した4軸デスクトップ駆動システムを中性子光学素子の加工開発に 適用し、その実用に向けたアクティビティを展開している.図 6-1 に放射線の中の中性子線の特 徴について示す.図 6-2 に中性子光学系ユニットを示す.また、図 6-3 に被削材のフッ化マグネ シウム (MgF₂)の透過率を示す.図 6-1 からわかるように、 α 線は紙を透過せず、 β 線は紙を透 過するが薄い金属は透過せず、X線と γ 線は薄い金属は透過するが鉛は透過せず、中性子線は鉛 も透過することを表している.このような中性子を集光するための中性子光学系ユニットは、図 6-2 のように厚さ 1.0mm の同じ溝形状を持つフレネルレンズを 50 枚程度積層して製作する³⁾.ま た、フレネルレンズ材料には、図 6-3 に示した透過率特性を持つ、フッ化マグネシウムを採用し た.



図 6-1 中性子線の透過



図 6-2 中性子光学系ユニット



6-1-1-1 実験装置および実験条件

図 6-4 に中性子フレネルレンズ加工³⁾⁻⁵⁾に使用した砥石を示す.この砥石は,直径 44mmの一体 成形タイプの総型砥石で 12 種の溝形状を有している.図 6-5 に 4 軸デスクトップ駆動システム に装着した砥石の様子を示す.ここでは,電極を用いた ELID 研削加工を行っている.当該中性子 フレネルレンズは適用したデスクトップ駆動システムのワークサイズとして適正な範囲にあり, 本デスクトップ駆動システムの適用は大型の加工機の適用に比べ段取りの簡便性や熱的精度の 安定性などから,当該レンズ加工に適したものと考える.図 6-6 に加工の原理図を示す.また, 図 6-7 に加工の様子を示す.加工方法は,砥石と被削材を回転させて 2 軸のマイナス側に切り込 み方向を取り,1 軸のみの制御で加工を行った.加工工程は,SD#325→SD#1200→SD#4000 の 3 工 程で行っている.それぞれの加工条件を表 6-1 に示す.加工条件は,1 回の切り込み深さに対し て,設定した切り込み速度で切り込み,設定位置に達したところで、ドウェル時間の設定時間分 滞留させ、また切り込みを開始することを繰り返して行った.総切り込み深さは、SD#325 で 0.8mm の除去を行い、SD#1200 および SD#4000 により 0.1mm の除去を行った.



図 6-4 フレネルレンズ用マルチ砥石



図 6-5 砥石のセットアップ状態



	砥石	SD#325	SD#1200	SD#4000	
加工条件	砥石回転数	1200 min^{-1}	$1500 \mathrm{~min^{-1}}$	$1500 \mathrm{~min^{-1}}$	
	ワーク回転数	180 min^{-1}	180 min^{-1}	$180 \mathrm{~min}^{-1}$	
	切り込み速度	$200\mu{ m m/min}$	$200\mu{\rm m/min}$	$200\mu\mathrm{m/min}$	
	切り込み深さ	$2\mu{ m m/pass}$	$2\mu\mathrm{m/pass}$	$1\mu{ m m/pass}$	
	ドウェル時間	1s	1s	3s	
	総切り込み深さ	0.8mm	0.1mm	0.1mm	
	設定ピーク電流	10A	10A	10A	
電解条件	無負荷電圧	60V	60V	60V	
	パルス τ on/τ off time	2⁄2μs	$2 \swarrow 2 \mu s$	$2/2\mu$ s	
石工当门运行	NX-CL-CG7 (新世代加工システム(株)				
191 日月11文	(水道水で 50 倍に希釈)				

表 6-1 フレネルレンズ加工条件



図 6-7 加工の様子

6-1-1-2 実験結果および考察

図 6-8 に加工後のフレネルレンズを示す.図 6-9 に表面粗さの結果を示す.SD#4000 を使用して 加工した結果は、表面粗さ Ra10nm という透明度の高いフレネルレンズ加工を実現した.このフレ ネルレンズを使用した集光実験の方法を図 6-10 に示す.また、図 6-11 にフレネルレンズを使用 した時と使用しない時の集光結果について示す. 清水らの研究⁶⁾により,フレネルレンズを使用し ないときは,集光距離が離れるにつれてスポット径が広がりを見せているが,フレネルレンズを 使用したときは,スポット径が小さくなっており集光されていることが分かる.また,図 6-12 に SD#1200 と SD#4000 の散乱強度の 2D イメージを示す.この結果から SD#1200 と SD#4000 を比較す ると,SD#4000 の仕上げのものの散乱が少ないことが分かる.これにより,中性子に対して加工表 面粗さの影響が確認された.

以上により,開発したデスクトップ駆動システムにより中性子フレネルレンズの加工・開発に 成功した.



図 6-8 中性子フレネルレンズ



図 6-9 表面粗さ (Zygo 社 New View)



図 6-10 集光実験方法







(a) SD#1200





6-1-2 X線光学素子の開発

近年,光学素子として球面,非球面を問わず,自由曲面形状を持つレンズやミラーは一層の高 精度かつ超平滑面が求められてきている.これらの光学素子の開発には,より極限の平滑性,超 精密性,高能率化が要求されているが,それらの両立は困難を極めている.さらに光学部品に使 用される材料には硬脆材料が適用されることが多く,超精密,高能率な加工の実現が困難な理由 の一つとなっている.SiC 材⁷⁾⁻⁸⁾は光学特性や機械的特性,電気的特性などの優れた特性に富ん だ材料であることから,宇宙望遠鏡,レーザー光やX線反射用のミラー⁹⁾など多種多様な光学素 子用途に用いられ,様々な分野から注目されている材料であるが,加工性が悪く難加工材の1種 である.

これまで、CVD-SiC 材に対して ELID 研削法¹⁰が適用された事例があるが、研削加工であるた め加工物の表面上には微少な加工痕が残存してしまう.そこでここでは、CVD-SiC 材に対して、 まず4軸デスクトップ駆動システムを適用してミラー形状を得るための鏡面研削加工を行い、さ らに研削痕の低減のため研磨加工法を連携させる手法について検討を行ったのでまとめる.本ミ ラーは軟X線ミラーとして用いられ、直径はφ30mmと本デスクトップ駆動システムによる加工に は適正サイズであり、また加工の安定性も期待される.

230

6-1-2-1 実験装置および実験条件

球面形状の CVD-SiC ミラー加工には、4 軸デスクトップ駆動システムにおける ELID 研削法によ る超精密研削加工を適用して形状加工を行った.使用した砥石粒度は SD#325, SD#1200, SD#4000 の3種類を用い、粗粒度から鏡面研削まで行った.いずれも砥石のボンド材としては鋳鉄ボンド ダイヤモンド砥石を用いて加工を行った.加工条件および使用した砥石の緒元,ELID 条件を表 6-2 に示す.また、本節の目的でもある加工痕の低減のため、鏡面研削加工の後、図 6-13 に示す オスカー式研磨機を用いて研磨加工実験を行った.試験内容は、CVD-SiC の研磨除去量と、SD#4000 により ELID 研削加工を実施した面に対して、研磨加工による面粗さの向上について検討を行っ た.表 6-3 に研磨加工の実験条件を示す.

D. A	材質:CVD-SiC, φ30mm
<i><i>y-y</i></i>	設計形状 R=300mm
加工機械	4軸デスクトップ駆動システム
研工	鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石 (新世代加工システム㈱),
主	粒度:SD#325/SD#1200/SD#4000, 砥石径:40mm
加丁冬伊	ワーク 100min ⁻¹ , 砥石回転 10000min ⁻¹ ,
加工未件	切込み量 0.5µm~2µm,送り量 5~20mm/min
ELID 電源	NX-ED921(新世代加工システム㈱)
石工当山海	NX-CL-CG7(新世代加工システム(㈱)
477 月11 代义	(水道水で 50 倍に希釈)
	設定ピーク電流:10A, 無負荷電圧:40V,
LLID 重破冬州	パルス τ on/ τ off time $2/2\mu$ s,
电胜朱件	インターバル方式 15s 間隔

表 6-2 CVD-SiC 材の ELID 研削実験条件

ワーク	CVD-SiC φ30mm
当ちま	SD#4000 砥石
	(ELID 研削)
パッド	ウレタンパッド 平面
莊麻刘	ダイヤモンド砥粒 SD#8000
如酒泊	0.02g 程度を 5 分毎に供給
潤滑剤	水道水を霧吹きで適時供給
皿回転数	$180 \mathrm{min}^{-1}$
カム回転数	18min ⁻¹
圧力	0.1MPa, 0.2MPa

表 6-3 研磨加工条件



図 6-13 オスカー式研磨機

6-1-2-2 実験結果および考察

図 6-14 に ELID 研削法を用いて形状研削加工を行った結果を示す. 形状誤差は SD#325 では P-V2.460µm, SD#1200 で P-V1.141µm となり, その後, SD#4000 で P-V0.179µm を得た. さらに ZYGO 社 NEW VIEW により加工面の評価を行った結果を示す. SD#4000 では P-V49nm, Ra3.5nm を得 た. しかしながら図 6-15 から, 加工表面には微少な加工痕が確認できる.



図 6-14 ELID 研削後の形状精度



図 6-15 ELID 研削後の表面粗さ

研磨実験の結果について,図 6-16,図 6-17 に研磨除去量および表面粗さの経時変化について 示す.加工除去量は加工時間と加工圧力に比例して増加し,加工面粗さは加工時間 10~20 分ほど で安定した.レーザー干渉計による形状測定結果を図 6-18 に示す.表面粗さ測定結果を図 6-19 に 示す.また,加工した X線 CVD-SiC ミラーを図 6-20 に示す.研磨の結果は形状精度約 55.9nm を実 現し,表面粗さは Ra0.99nm と, 1nm 以下を達成した.

以上から、4 軸デスクトップ駆動システムにより、X 線用 CVD-SiC ミラーの加工の大半の工程 を実現することができ、さらにデスクトップでの研磨加工工程との連携により実用に耐える形状 精度ならびに表面粗さを両立することができた.



図 6-16 研磨時間と除去量の関係



図 6-17 研磨時間と表面粗さの関係



図 6-18 研磨加工後の形状精度



図 6-19 研磨加工後の表面粗さ



図 6-20 X線 CVD-SiC ミラー

6-1-3 人工股関節骨頭の開発

生体工学は、医学における人工心臓、人工内耳などに代表される器官やその他の人体部位を人 工物やメカニカルシステムに置き換え、治療・状態改善を行うことを狙い、近年では、人工器官 だけでなく生体材料やインプラントの発展もめざましい。特に人工股関節などのインプラントで は、その形状精度や表面粗さを考慮した加工手法についての研究が行われているが、形状が複雑 であることなどから、加工工数の低減や加工効率の改善は難儀しているのが現状と言える、その ため、試作加工のイベント数を減らし、やり直し、作り直しの無駄を省くことに対応するための 施策としてシミュレーションソフトへの期待は大きくなってきている.理化学研究所で研究開発 が進められている"物の内部構造や内部物理属性"がそのまま表現できる Volume-CAD (VCAD)¹¹⁾ システムによるデータは、そのまま構造解析や流動解析などのシミュレーションを行うことがで き,その解析結果に基づいた NC データを生成する CAM ソフトウェア (V-Cam)¹²⁾⁻¹⁴⁾の研究開発が 進められている.4軸デスクトップ駆動システムを、多軸制御を可能とする V-Cam の優位性を活 かして,バイオインプラントの加工に対応させることで一層難易度の高い加工を実現することを 検討した. そこで, CT (Computed Topolography) スキャン装置で取得した大腿骨画像データか ら VCAD で取り扱える形状データを V-Cat¹⁵により生成し、その形状データを V-Cam を用いて生 成した加工パスを使って骨頭部分の加工を試みた.図 6-21 に大腿骨画像を取得した CT スキャン 装置を示す.図 6–22 に V–Cat で生成した形状データイメージを示す.また,図 6–23 に加工の検 討を行う股関節骨頭部分の模式図を示す.



図 6-21 CT (Computed Topolography) スキャン装置



図 6-22 CT で取得して V-Cat で生成した形状データイメージ



図 6-23 大腿骨骨頭部分の模式図

6-1-3-1 NCデータの生成方法

VCAD データを使用しない場合, CT などから取得した画像データのファイル形式は STL 形式を 取り扱うことが多い. この骨頭部分の STL 形式のデータ容量は, 17 メガバイトである. 図 6-24 に STL 形式のイメージを示す. 多くの NC 加工機用の CAM では, STL 形式のデータは表示のみとな っており, NC データの作成ができないことがある. そのため, 一旦, IGES 形式のデータに変換 する必要があるが, IGES 形式のデータに変換すると 160 メガバイト程度のデータ容量になってし まう. 図 6-25 に IGES 形式のイメージを示す. このデータを, 市販の CAM で読み込みを行うとデ ータ容量が大きいため, 起動するまで長い時間を要し, 画像を回転させたり, 面を指定したりす る操作を行う度に, PC の動作がスムーズではなくなり,作業性に困難が生じている. 図 6-26 に 市販の CAM により骨頭画像を表示したイメージを示す. また図 6-27 に CAM で作成した NC データ により加工パスのシミュレーションを行っているイメージを示す. 点列データに欠落している部 分などがあり,加工パスシミュレーションの結果,深い部分まで切り込んでしまうような場所が 発生している. そのため,市販の CAM により加工を実施することは困難であった.



図 6-24 STL データ



図 6-25 IGES データ



図 6-26 CAM ソフトウェア



図 6-27 加工パスシミュレーション

6-1-3-2 VCADデータを使用したV-Camソフトウェアの開発

前節で検討したように、通常のデータ形式では、加工データの作成は容易な作業ではない、そのため、CT 画像データから V-Cat により VCAD データを生成し、直接、そのデータを読み込むことができる CAM の開発は、非常に意義深いものである.図 6-28 に開発した V-Cam ソフトウェアを示す.これは、V-Cat データを読み込み、表示したものである.図 6-29 に V-Cam で加工形状の骨頭部分と被削素材との位置決め作業を示す.図 6-29 は、四角形のブロック材から削り出すこととして、ブロック材の振り回しと骨頭形状の位置関係を検討したものである.図 6-30 に NC パスを作成し、加工パスシミュレーションを行っている様子を示す.また、図 6-31 に加工パス生成コンソール、図 6-32 に加工パス生成コンソールの説明、図 6-33 に加工パス生成後の NC データを示す. 形状データの読み込みから NC データの作成まで、数十分程度と短時間で行うことができた.



図 6-28 V-Cam


図 6-29 骨頭形状と被削素材との位置決め作業



図 6-30 加工パス作成シミュレーション



図 6-31 加工パス生成コンソール



図 6-32 加工パス生成コンソールの説明



図 6-33 加工パス生成後の NC データ

6-1-3-3 骨頭モデル加工

生成した NC データを 4 軸デスクトップ駆動システムにダウンロードして,実際に切削加工を 行った.材料には,基礎試験としてアルミニウム材を使用した.工具には,ノーズアール 3mm の ボール型エンドミルを使用し,クーラントをミスト供給して加工を行った.表 6-4 に加工条件を 示す.図 6-34 に加工の様子を示す.また,図 6-35 に加工された人工股関節骨頭を示す.加工の 結果は,工具干渉チェックがないためアンダーカットになる部分の削り込みが発生しているもの の,それ以外の箇所では,骨頭部は画像データの凹凸やくぼみを十分再現していることが分かる.

以上から、4 軸デスクトップ駆動システムにより、複雑形状を持つ人工股関節骨頭モデルの切 削加工を実現することができた.

加工工具	超硬ボールエンドミル (ノーズアール 3mm)
切削液	切削油 (ミスト供給)
工具回転数	8000 min^{-1}
送り速度	50 mm/min
切り込み量	0.5 mm/pass

表 6-4 骨頭モデル加工条件



図 6-34 骨頭モデル加工の様子



図 6-35 加工されたアルミニウム製人工股関節骨頭モデル

6-2 マイクロマニュファクチャリングシステムへの応用

本論文で提唱し開発した、マイクロメカニカル加工を実現する4軸デスクトップ駆動システム はそのコンセプトから多機能を有しているが、生産規模に応じて、例えば①素材の切断(切り出 し)や②切断面(端面)の平坦化などを専用的に行う加工システムと相補的に組み合わせること で、オンデマンドで小規模・適正規模の生産システムを構築することが可能であると考える.こ の考え方をさらに拡張すると、本論文で「マイクロワークショップ」と呼ぶ、個々の仕様に特徴 を有するデスクトップ駆動システム群を構成したマイクロマニュファクチャリングシステムの 構築が可能であると考えられる.

序論で触れたように、マイクロファクトリーやマイクロマニュファクチャリングの現実的なシ ステムが模索されている時代に至り、本論文で述べたデスクトップ駆動システムがその実現にお いて中心的な役割を果たすものと考える.

図 6-36 に、①切断工程、②平坦化工程、③形状加工工程をシリーズ化することで実現するマ イクロマニュファクチャリングシステムの構想を例示する.この時、③形状加工工程については、 本論文で開発し主に述べた4軸デスクトップ駆動システムが大きな役割を果たすことになる.以 下に、本マイクロマニュファクチャリングシステムの実現において、4 軸デスクトップ駆動シス テムに相補的に必要となる①切断工程、②平坦化工程を担うデスクトップ加工システムの開発事 例とその効果について説明する.ここでは、いずれのシステムについても ELID 研削加工を適用 した事例について触れる.



図 6-36 マイクロマニュファクチャリングシステムの事例

①切断工程を実現するデスクトップ駆動システムの開発事例

本システムは、高スピードでワークテーブルを動かし、微小な切り込みで切断を行うデス クトップ研削切断システム¹⁶⁾である.図 6-37 にその外観を示す.また、図 6-38 および図 6-39 に、ELID の適用の有無による研削切断結果を比較して示す.図 6-39 の ELID 研削加工では、 鏡面状態の切断面が得られている.この結果からデスクトップでの研削切断においても切断 面を鏡面化できることが確認できた.



図 6-37 デスクトップ研削切断加工機



図 6-38 通常切断加工結果

図 6-39 ELID 研削加工結果



図 6-40 デスクトップ鏡面研削切断の例

②平坦化工程を実現するデスクトップ駆動システムの開発事例

本システムは、ラップ研削¹⁷⁾⁻¹⁸⁾方式を用い、固定砥粒によるデスクトップでのラッピングを実 現することで、硬質・脆性材料の効率的な平坦化加工が実現できる.また、超微粒砥石が使用で きるため、ナノレベルの高品位平坦化加工面が実現できる.図 6-41 に加工システムの外観を示 す.図 6-42 に加工サンプルの様子を示す.前項において例示した、切断工程を担うデスクトッ プ駆動システムにおいて切断された加工面に対して、微粒砥石により高品位な平坦化加工を実現 できることを示唆している.



図 6-41 デスクトップラップ研削加工機

図 6-42 加工結果

4 軸デスクトップ駆動システムについては既に論ずる余地もなく,形状創成を担い,上述の両 加工システムの後工程として応用される.図 6-43 は,上述の切断工程,平坦化工程,ならびに 4 軸デスクトップ駆動システムによる形状創成を経て製作された金型の例を示す.



図 6-43 切断工程,平坦化工程,形状創成工程を経て製作された金型の例

4 軸デスクトップ駆動システムは、本論文で実現したマイクロメカニカル加工として鏡面研削 加工ならびに切削加工を両立するシステムの中心として、フレキシブルにマイクロマニュファク チャリングに応用されることが期待される(図 6-44).



図 6-44 4 軸デスクトップ駆動システムの生産における利用形態

本章では,前章までで開発・改良された4軸デスクトップ駆動システムの先端科学の放射線科学, 先端光科学,生体工学で使用する部品の加工を行った.次に,マイクロマニュファクチャリング システムへの応用として,4軸デスクトップ駆動システムと相補的に機能するデスクトップ駆動 システムの開発事例ならびに加工効果について述べた.以下に,結論を示す.

1) 放射線科学への応用については、中性子光学系ユニットのためのフッ化マグネシウム材のフ レネルレンズの加工検討を行い、表面粗さ10nmのフレネルレンズを実現した.また、そのフレネ ルレンズをユニットに組み込み、ビームラインで中性子線の集光試験を行った結果として、加工 したフレネルレンズによる集光効果が確認され、表面粗さが散乱に影響を与えることが示唆され た.今後、建設が進められるJ-Parkにおける実用が予測されている.

- 2) 先端光科学への応用については、X線用ミラーとして期待されている CVD-SiC ミラーについて 加工検討を行った.その結果、研削加工では、形状精度 0.179 µm、表面粗さ Ra3.5nm を達成し た.さらに研削痕の除去を目的として、オスカー式研磨機により仕上げ加工を行い、形状精度 0.055 µm、表面粗さ 0.9nm を実現した.これらの工程の連携により、超精密な軟 X線用 CVD-SiC ミラーの開発に成功した.本ミラーは、現在、理化学研究所を中心に進められているエクスト リームフォトニクス研究に寄与することが期待される.
- 3) 生体工学への応用については、人工股関節骨頭の加工に対して、画像データの取り込みから、 NC データの作成までのソフトウェアの開発を行い、実際に切削加工を行った.具体的には、 V-Cat で生成された VCAD データを取り扱うことのできる V-Cam を開発し、+数分の所要時間で NC データの作成を実現し、アルミニウム製人工股関節骨頭モデルの切削加工を行い、形状デー タの微細な凹凸の再現に成功した.本成果は、今後も VCAD システム研究における応用が期待 される.
- 4) マイクロマニュファクチャリングへの応用について、「マイクロワークショップ」において 4 軸デスクトップ駆動システムの応用を最終工程に据えた場合、相補的な役割を担う切断工程、 平坦化工程を担うデスクトップ駆動システムの開発事例および適用効果について紹介した.また、4 軸デスクトップ駆動システムにより最終的に実現した生産工程として、鏡面研削ならび に切削加工の実現形態について改めて述べた.次世代のマイクロマニュファクチャリングのコ アテクノロジーとしての応用が期待される.

- Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, J. Guo, Yoshihiro Uehara, Shin-ya Morita, Norihide Mitsuishi, Kenichi Yoshikawa, Miyajiro Ohmori, Kazuaki Ikeda, Takayuki Oku, Tomohiro Adachi and Hirohiko M Shimizu: "Fabrication process and system for neutron refractive optics", Int. J. Nuclear Instruments & methods in Physics Research (ELSEVIER), Section A, 529 (2004) 106-111
- Michihiro Furusaka et al. : "First results from a mini- focusing small-angle neutron scattering instrument (mfSANS) with an ellipsoidal mirror", ICANS-XVIII, Dongguan, China, April 25-29 (2007) D3-2
- 大森 整,守安 精,森田 晋也,樋口 俊郎,山形 豊,柴田 順二,長江 晃,松澤 隆:中性 子物質レンズの ELID 研削,1999 年度砥粒加工学会学術講演会(1999)269
- 4) 大森 整,山形 豊,森 啓文,清水 裕彦,森田 晋也,柴田 順二:中性子物質レンズの ELID
 研削加工,日本機械学会東北支部多賀城地方講演会,(2000)
- 5) 安達 智宏,奥隆之,清水裕彦,酒井健二,鈴木淳市,武田全康:中性子化合物光学素 子の屈折角に対する表面状態の効果,日本中性子科学会第1回年会,(2001)
- 6) 清水 裕彦: 低速中性子光学, 第 32 回電磁界理論シンポジウム, (2003)
- 7) Hitoshi Ohmori, Yoshihiro Uehara, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, and Akitake Makinouchi: "Grinding Characteristics of CVD-SiC Cylindrical Mirror with ELID Grinding Method (2nd Report: Effect of ELID Truing Method)", Advances in Abrasive Technology 4, (2001) 89-94
- 8) Yoshihiro Uehara, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, Akitake Makinouchi, and Kazutoshi Katahira: "Grinding Characteristics of CVD-SiC Cylindrical Mirror with ELID Grinding Method", 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Micro-Fabrication, Seoul, Korea, (Feb 20, 2001) 65-70
- 9) 大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,上原 嘉宏,牧野内 昭武: "X 線用 CVD-SiC ミラーの超精密 ELID 研削",2000 年度日本機械学会東北支部多賀城地方講演会講演論文集,(2000.9) 123-124
- 10) 上原 嘉宏,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,森田 晋也: "マイクロ ELID 研削による CVD-SiC 非球面ミラーの製作――第2報 ELID を付与したツルーイングの効果",2001 年 度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2001.3)143
- Kiwamu KASE, etc: Volume CAD, Volume Graphics 2003 Eurographics / IEEE TCVG Workshop Proceedings, (2003)145
- 12) 大森 整, 鈴木 亨, 森田 晋也, 林 偉民, 渡邉 裕, 上原 嘉宏: VCAD V-Cam を利用した非球

面金型加工の試み、砥粒加工学会誌(速報)、48、12(2004)714-715

- 13)林 偉民,渡邉 裕,森田 晋也,上原 嘉宏,惠藤 浩朗,大森 整: "V-Cam による複雑形状金型の高精度加工",型技術 21,14 (2006) 56
- 14) 林 偉民他:V-Cam 援用による自由曲面の仕上げ加工効果, 砥粒加工学会誌, 51, 9 (2007) 514
- 15) 西村 将臣他: VCAD システムによるテーラーメードインプラント制作システム、日本機械学会
 2006 年度年次大会講演論文集 5(2006)101
- 16) 大森 整, 上原 嘉宏, 石橋 正明, 山本 幸治, 仁平 正三: "卓上 ELID レシプロ研削切断機の開発", 2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2000)346
- 17) 伊藤 伸英、大森 整、上竹 主税、矢野 洋夫、勝又 真彦、河西 敏雄、土肥 俊郎、堀尾 健一郎, ELID ラップ研削盤 "Lap de Top"による硬脆材料の加工特性,2000 年度精密工学会,2000.03
- 18) 長谷川 勇次、伊藤 伸英、伊藤 吾朗、大森 整、河西 敏雄、土肥 俊郎,マイクロ ELID 研削
 機 Lap de Top による加工特性,2000 年度砥粒加工学会,2000.09

第7章 結論

第7章 結論

7-1 結論

第1章においては、本研究の背景および動機を述べ、多品種少量生産などのニーズを満 たすには、従来の加工法では困難であり、マイクロメカニカル加工およびデスクトップ 駆動システムの確立が強く求められていることを述べた.そして、本論文で目指すマイ クロメカニカル加工の定義と、その実現のために必要となるELID研削について概説する とともに、デスクトップ駆動システムのコンセプトを立案した.また、本論文の構成を 示した.

第2章では、デスクトップ駆動システムの懸念事項である加工負荷による精度劣化の 有無を検証した.まず、分解能 10µm/step の駆動システムを用いて、超硬合金の平面研 削加工を実施し、SD #4000 のダイヤモンド砥石で Ry0.0725µm, Ra0.01µm の表面粗さ を達成した.次に、同じ駆動システムによる調合合金材の非球面加工を行い、SD#2000 のダイヤモンド砥石で Ry0.095µm, Ra0.012µm の表面粗さを得ることができたが、分解 能の影響から形状精度は 25µm であった.さらに、分解能 2.5µm/step の駆動システム によるマイクロツール加工を行い、先端部分 2µm のピラミッド型マイクロツールの加工 を実現した.製作したマイクロツールを使用したマイクロ切削加工を鋼材に対して実施 し、文字彫刻や歯車の切り出しが可能なことを実証した.以上により、デスクトップ駆 動システムに ELID 研削法を複合することにより、硬質材料の鏡面研削が可能であること、 実用のマイクロツールを作製できることを実証した.また、適用した加工機の仕様から 精度面での課題に関わる知見を得た.これらの知見を集約すると下記のようにまとめら れると考える.

- 1)業界で初めてデスクトップサイズの駆動システムで鏡面研削を実現。
- 2) 硬質・脆性材料に対してデスクトップでの鏡面研削を実現。
- 3)低研削負荷,砥石の高剛性などからデスクトップ駆動システムにおいても高精度 化を実現。

したがって, 求められる駆動システムによる生産スタイルのターゲットとして, 光学 部品や金型などの工業的実用製品の作製が可能となることを見出した.

第3章では、第2章で実験に使用した3軸デスクトップ駆動システムをさらに複雑形

状の加工システムへと応用するために、4 軸デスクトップ駆動システムを開発した.この運動性能と加工特性について調査を行い、本駆動システムの効果について検討を行った.また、4 軸デスクトップ駆動システムの設計に対して、構造解析を行った.

- ELID 研削加工を適用した基礎実験において,超硬合金材に対して Ry0.076μm, Ra0.0088μmの鏡面を実現した.また切削加工では,バラツキは 5μm 以内であった.
- 2) サーボモータを採用することにより、同期性の高い制御を実現した.そして、スケ ールフィードバックの効果を検討するために、セミクローズドタイプとフルクロー ズドタイプを準備して、その追従性についてレンズ加工の実験を行った.その結果 は、スケールフィードバックしたものは、補正加工無しで、形状精度4µm以下を 達成した.デスクトップタイプの駆動システムにおいてもスケールフィードバック を行ったフルクローズドタイプの効果があることを確認した.
- 3) サーボモータの2軸の同期性を確認するために,単結晶ダイヤモンドバイトによる 鏡面切削加工を行った. 3~5µm 程度傾きが生じた条件に対して,傾きを NC によ り補正した加工した結果は,X軸-Z軸もY軸-Z軸のいずれも,1µm以下を実現 した.
- 4) 4軸デスクトップ駆動システムは、その軽量化のためにベッドを有さず、また肉盗みを施しているため、強度に対してどのような影響を与えているかを確認するために構造解析を行った.ベース部は、設置ボルトの着座状況により10µm程度の変形を生じることが確認された.そのために、設置ボルトの調整順序などの留意点を確認することができた.
- 5) 軽量化のための肉盗みを有した門型構造は,肉盗みがないときに比べて,左右方向 (X 軸方向)および前後方向(Y 軸方向)の荷重に対しては,3 倍の変位を発生す ることが分かった.しかし,上下方向(Z 軸方向)では,その差は小さいことが分 かった.また,相当応力分布からも肉盗みによる影響は少ないことが分かった.前 述の加工実験結果からも,186Nの軽量化のメリットとフルクローズドループ制御 方式のメリットを活かすことにより,肉盗みによる変位量は,十分補正できる範囲 内であると考えられる.
- 6) 機械特性として固有振動数ならびに剛性を評価したところ、ほぼ、シミュレーション結果と同等であった.特に固有振動数は、1次モード63.53Hz、2次モード209.32Hz、3次モード321.96Hz でシミュレーション結果と同じ周波数でピークを示した.また、剛性面では、各軸ともに20N/µmという剛性を確認した.

7) 開発した4軸デスクトップ駆動システムは小型なため、姿勢変化をさせることがで きる.傾けた状態で通常の姿勢と同等の状態で切削加工を行うことができた.また、 傾けることで加工部に切り屑が残りにくいことを確認した.このことから、開発し たデスクトップ駆動システム上で本実験における重力の及ぼす影響はほとんどな く、システムをクリーンに維持できることや前後の工程の利便性から姿勢を自在に セットすることができるサイズメリットが確認できたと考える.

まとめとして,開発したデスクトップ駆動システムにより創出されるメリットとして, コスト面においては製造作業を基本的に一人で行うことができ,製造環境が大がかりに ならないことから低コスト化が可能であること,機械精度面では短いストロークにより 部品の小型化,軽量化により精度調整や精度維持が容易であること,環境対応面では本 体サイズの小型化,低質量化,小電力化(約2.0kW)により機械専用の特殊環境の部屋を 用意する必要がほとんどないことや駆動時に振動を発生しづらいこと,熱変位により工 具~ワーク間の相対変位が少ないこと,その他,可搬性やPCベースの簡便な操作性によ り,画期的かつ新たな次世代生産コアシステム技術が得られたと考える.

第4章では,第3章で開発した4軸デスクトップ駆動システムをマイクロメカニカル 加工に適用して,その特性について非球面レンズの鏡面研削加工,球面レンズの高能率 鏡面研削,およびマイクロツールを使用した切削溝加工について検証を行った.

1)強いニーズのある直径 50mmの非球面レンズ加工をデスクトップ駆動システムによっ て実現することを目的として、4 軸デスクトップ駆動システムを使用し、ELID 研削により加工実験を行った.その結果、有効径 14mmの時に、形状精度 P-V3.5µm が得られ、非球面レンズの仕様上、表面粗さ、形状誤差ともに十分満足する結果と なった.これらの結果により 4 軸デスクトップ駆動システムは、非球面レンズの開 発ツールとして有効であることが示唆された.そして、ポリッシング工程の省略を 試みるため、仕上げ工程に SD#8000 の酸化セリウムを砥粒とした研削砥石を使用し て、非球面レンズの研削加工試験を行ったところ、144µm×108µm範囲で P-V15.3nm, rms1.49nm、Ra1.18nm となった.ポリッシング後の表面粗さ P-V10nm、RMS1.09nm, Ra0.8nm と比較するとわずかではあるが研削加工の方が 1.5 倍程度粗い結果になっ ているが、数値的には、ELID 研削による仕上げ加工実用の可能性を示唆した.

2) 球面レンズの効率的な加工の実現を目的として、4 軸デスクトップ駆動システムに CG ユニットを搭載して、球面レンズ加工を行った.酸化セリウム#8000 超微粒砥石

255

を使用しても,焼けを発生させずに表面粗さ Ra0.79nm を有する球面形状の加工が可 能であることを確認した.また,砥粒選択による工程が及ぼす表面性状への影響が 大きいことがわかった.また,効率的な球面レンズ加工を実現するためには,ワー クの中心付近と外周付近との周速度の違いを少なくし,曲率精度を向上させるため には,砥石内径の測定誤差を少なくすることと,砥石とワークの傾斜角度の精度を 向上させることが重要であることが示唆された.

3) マイクロツールによる溝切削加工実験では,被削材の無酸素銅に対して,直径100µm に内接する四角形で,工具長は600µmのマイクロツールによる溝切削加工において, 一刃当たりの送り量 6µm(送り速度1000mm/min時)でもマイクロツールによる切削 加工が可能であることが分かった.また,最大 80µmの切り込み量による切削加工 が可能であることが確認された.そして,被削材として無酸素銅のみならず,金型 材に使用される鋼材に対しても,良好な切削加工を行うことができ,さらにはマイ クロ彫刻による微細加工が可能であることを実証した.

第5章では、4軸デスクトップ駆動システムにおいて、最適な鏡面研削プロセスの確 立を目指して、まず導電性被加工物に直接通電する電極レス ELID 研削(ELIDIII)法を適 用し、その基本的効果を確認した.次に、砥石に電極を対設させずに、研削液ノズルに 電極を組み込み、砥石側に陽極を設置したノズル式 ELIDIII研削法を考案し、その基本的 効果を確認した.さらに、砥石側に陽極を設置せずに、研削液ノズルに一対の電極を対 設させ、研削液ノズル先端で電解された研削液を砥石に照射することにより電解ドレッ シングを行うイオンショットドレッシング法を考案・開発し、4軸デスクトップ駆動シ ステムに組み込むことによりシステム化を果たした.また、イオンショットドレッシン グにおける最適な電解条件、電解の環境などの検討を行い、その適用上の特性を明らか にした.

デスクトップ駆動システムの用途として小径砥石による小型部品を意識した場合,従 来の ELID 研削では対処が困難である電極の干渉や電食などの問題を解決するとともに, 開発されたイオンショットドレッシング研削システムは φ 75mm 程度以下のサイズの砥石 に対して,従来の ELID 研削法と同様の鏡面研削効果が得られることを実証した.特に, 4 軸デスクトップ駆動システムとのマッチングにより,超精密非球面レンズ金型の鏡面 研削において,ナノレベルの表面品質とサブミクロンレベルの形状精度の両立を果たし た.さらに,イオンショットドレッシング法のメカニズムについて解析を行い,直流に よりツイン電極化するノズル先端部と砥石間における電気化学反応として,次亜塩素酸 イオン(塩素成分は研削液中に含まれる)による鉄系メタルボンドに対するアニオン効 果(孔食の発生)の後,水の電気分解によって発生した水酸イオンや酸素イオンとメタ ルボンドとの反応により不導体被膜が生成し,電解ドレッシング効果が実現するという メカニズムを明らかにした.最後に,イオンショットドレッシングにおける電極の消耗 について,複数種の電極材における状態の差異を調査するとともに,極性を一定時間毎 に切り替えることにより,著しく電極寿命を伸ばす手法を考案しその効果を示した.以 上により,本章で述べたイオンショットドレッシング法によるマイクログラインディン グ技術は,4 軸デスクトップ駆動システムとシステム化することにより,他に類を見な い,独自かつ新しい生産プロセス・システムとして構築できたものと考える.

第6章では,第2章~第4章で開発した4軸デスクトップ駆動システムと第5章で開 発したマイクロかつ複雑形状の加工に適したイオンショットドレッシング法の先端科学 への応用として,放射線科学,先端光科学と生体工学で使用されるデバイスへの適用を 検討し,次にマイクロマニュファクチャリングシステムへの応用として,4軸デスクト ップ駆動システムと相補的に機能するデスクトップ駆動システムの開発事例ならびに加 工効果について述べた.以下に結論についてまとめる.

1) 放射線科学への応用については、中性子光学系ユニットのためのフッ化マグネシウ ム材のフレネルレンズの加工検討を行い、表面粗さ 10nmのフレネルレンズを実現した. また、そのフレネルレンズをユニットに組み込み、ビームラインで中性子線の集光試験 を行った結果として、加工したフレネルレンズによる集光効果が確認され、表面粗さが 散乱に影響を与えることが示唆された. 今後、建設が進められるJ-Parkにおける実用が 予測されている.

2) 先端光科学への応用については、X線用ミラーとして期待されているCVD-SiCミラー について加工検討を行った.その結果、研削加工では、形状精度 0.179µm、表面粗さ Ra3.5nmを達成した.さらに研削痕の除去を目的として、オスカー式研磨機により仕上 げ加工を行い、形状精度 0.055µm、表面粗さ 0.9nmを実現した.これらの工程の連携に より、超精密な軟X線用CVD-SiCミラーの開発に成功した.本ミラーは、現在、理化学 研究所を中心に進められているエクストリームフォトニクス研究に寄与することが期 待される.

257

- 3)生体工学への応用については、人工股関節骨頭の加工に対して、画像データの取り込みから、NCデータの作成までのソフトウェアの開発を行い、実際に切削加工を行った.具体的には、V-Catで生成された VCADデータを取り扱うことのできる V-Camを開発し、十数分の所要時間で NC データの作成を実現し、アルミニウム製人工股関節骨頭モデルの切削加工を行い、形状データの微細な凹凸の再現に成功した.本成果は、今後も VCAD システム研究における応用が期待される.
- 4)マイクロマニュファクチャリングへの応用について、「マイクロワークショップ」において4軸デスクトップ駆動システムの応用を最終工程に据えた場合、相補的な役割を担う切断工程、平坦化工程を担うデスクトップ駆動システムの開発事例および適用効果について紹介した.また、4軸デスクトップ駆動システムにより最終的に実現した生産工程として、鏡面研削ならびに切削加工の実現形態について改めて述べた.次世代のマイクロマニュファクチャリングのコアテクノロジーとしての応用が期待される.

以上をもって、本論文の結論とする.

7-2 今後の展望

今後,さらなる高分解能デスクトップ駆動システムの発展を目指し,要素技術の研究 や複合化,専用化,オンライン化を実現するシステム構築などの開発を行うと同時に次 世代につながるマイクロマニュファクチャリング研究の追及を行っていく. 図のリスト

- 図 1-1 小型軽量,高性能,高機能部品開発ニーズの変化
- 図 1-2 小型部品製作における現状の加工環境の例
- 図 1-3 小型部品のフレキシブル,オンデマンド生産化のコンセプト
- 図 1-4 我が国におけるマイクロ加工およびマイクロ駆動システムの主たる動向
- 図 1-5 求められるデスクトップ駆動システムに関わるサイズにおける決定要因
- 図 1-6 デスクトップ加工との複合化を目指した ELID 研削法
- 図 1-7 本論文における研究の骨子
- 図 1-8 本論文における各章の関係

- 図 2-1 加工機全体写真
- 図 2-2 砥石部周辺写真
- 図 2-3 コントローラ
- 図 2-4 表面粗さプロファイル
- 図 2-5 電解電流値変動グラフ
- 図 2-6 加工後ワーク外観
- 図 2-7 ツルーイング時の様子
- 図 2-8 工具の軌道
- 図 2-9 加工中の様子
- 図 2-10 DB#400 加工後ワーク
- 図 2-11 DB#400 表面粗さプロファイル
- 図 2-12 SD#2000 加工後ワーク
- 図 2-13 SD#2000 表面粗さプロファイル
- 図 2-14 DB#400 ワーク形状
- 図 2-15 DB#400 形状誤差
- 図 2-16 SD#2000 ワーク形状
- 図 2-17 SD#2000 形状誤差
- 図 2-18 マイクロツール加工に適用した3軸デスクトップ駆動システムの外観
- 図 2-19 加工機の構造
- 図 2-20 加工イメージ図
- 図 2-21 旋回電極式 ELID の加工方法

- 図 2-22 旋回電極式 ELID 研削システム
- 図 2-23 旋回電極式 ELID 研削システムの構造
- 図 2-24 ミストクーラント供給方式
- 図 2-25 不導体被膜厚さと研削液量の関係
- 図 2-26 電解ドレッシング特性に及ぼす研削液量の影響
- 図 2-27 砥石回転数と電解被膜厚さの関係の影響
- 図 2-28 電解ドレッシング特性に及ぼす回転数の影響
- 図 2-29 ツルーイングシステム
- 図 2-30 角柱形状の測定個所
- 図 2-31 角柱形状のマイクロツール
- 図 2-32 加工後の彫刻文字
- 図 2-33 加工後のマイクロツール先端部
- 図 2-34 被削材固定方法の模式図
- 図 2-35 マイクロギア加工の様子
- 図 2-36 加工後のマイクロギア
- 図 2-37 マイクロツール加工の様子
- 図 2-38 マイクロツール
- 図 2-39 マイクロツールの表面性状 (AFM)
- 図 2-40 切り込み量による表面性状 (New View)
- 図 2-41 砥石粒度によるエッジ部の状態 (SEM)
- 図 2-42 マイクロツールの表面状態 (SEM)
- 図 2-43 マイクロツールの先端部拡大 (SEM)
- 図 2-44 超微小硬度試験機 (NHT)
- 図 2-45 破壊強度測定の様子
- 図 2-46 破壊強度測定結果
- 図 2-47 マイクロツールの破断面 (SEM)
- 図 2-48 目標達成項目
- 図 3-1 4 軸デスクトップ駆動システム開発の推移
- 図 3-2 測定の様子と測定結果
- 図 3-3 独自設計されたC軸の構造
- 図 3-4 独自設計された C 軸の外観
- 図 3-5 工具スピンドルの取り付け方法

- 図 3-6 横方向取付時の加工イメージ
- 図 3-7 縦方向取付時の加工イメージ
- 図 3-8 独自開発の工具スピンドルの構造
- 図 3-9 独自開発の工具スピンドルの外観
- 図 3-10 クーラントタンク
- 図 3-11 ELID 電極関係
- 図 3-12 加工原理
- 図 3-13 加工サンプルの様子
- 図 3-14 研削面の性状
- 図 3-15 エンドミル加工後の様子
- 図 3-16 加工寸法測定個所と測定結果
- 図 3-17 加工サンプルの様子
- 図 3-18 各制御方式による形状精度の比較
- 図 3-19 鏡面切削実験に使用した4軸デスクトップ駆動システム
- 図 3-20 X 軸構成
- 図 3-21 加工原理図
- 図 3-22 加工の様子
- 図 3-23 加工方向 X 軸での加工結果
- 図 3-24 加工方向 Y 軸での加工結果
- 図 3-25 加工方向 X 軸, Z 軸切込み補正での加工結果
- 図 3-26 加工方向 Y 軸, Z 軸切込み補正での加工結果
- 図 3-27 加工方向 Y 軸の表面粗さ
- 図 3-28 加工後の被削材
- 図 3-29 一般的な工作機械が有するベッド
- 図 3-30 開発した4軸デスクトップ駆動システム構造図
- 図 3-31 ベース部の寸法
- 図 3-32 4 軸デスクトップ駆動システムの構造・ベースと設置ボルトの様子
- 図 3-33 奥側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いた条件の解析結果
- 図 3-34 手前側の設置ボルト1箇所が接地面に対して浮いた条件の解析結果
- 図 3-35 門型構造の支柱部(八方向の梁)
- 図 3-36 門型構造の梁部
- 図 3-37 対角線方向の梁
- 図 3-38 十字線方向の梁
- 図 3-39 解析モデル
- 図 3-40 解析モデル
- 図 3-41 X 軸プラス方向荷重の時の変位量比較 (mm)

- 図 3-42 X 軸プラス方向荷重の時の相当応力分布比較 (N/mm²)
- 図 3-43 Y 軸マイナス方向荷重の時の変位量比較 (mm)
- 図 3-44 Y 軸マイナス方向荷重の時の相当応力分布比較 (N/mm²)
- 図 3-45 Z 軸マイナス方向荷重の時の変位量比較 (mm)
- 図 3-46 Z 軸マイナス方向荷重の時の相当応力分布比較 (N/mm²)
- 図 3-47 解析モデル
- 図 3-48 1 次モード
- 図 3-49 2 次モード
- 図 3-50 3 次モード
- 図 3-51 実際に想定される変位
- 図 3-52 固有振動数の測定結果
- 図 3-53 各軸の剛性の測定結果
- 図 3-54 回転式デスクトップ駆動システム
- 図 3-55 切削加工における重力の影響
- 図 4-1 ツルーイングの様子
- 図 4-2 非球面加工の様子
- 図 4-3 機上計測の様子
- 図 4-4 芯ずれ量補正無しの解析結果
- 図 4-5 芯ずれ量補正有りの解析結果
- 図 4-6 加工前のレンズの様子
- 図 4-7 加工後のレンズ
- 図 4-8 SD#1200の表面粗さ
- 図 4-9 ポリッシング後の表面粗さ
- 図 4-10 有効径 17mmの時の形状精度
- 図 4-11 #8000 酸化セリウム砥石による加工表面粗さ
- 図 4-12 ガラスレンズの製造工程
- 図 4-13 CG 方式ユニットの模式図
- 図 4-14 CG 方式ユニット搭載の様子
- 図 4-15 コレットチャック
- 図 4-16 コレットナット
- 図 4-17 レンズ形状
- 図 4-18 CG 方式の模式図

- 図 4-19 加工前のガラス材
- 図 4-20 加工後のレンズ
- 図 4-21 加工工程による表面性状
- 図 4-22 有効径 21mmの時の形状精度
- 図 4-23 有効径 14mmの時の形状精度
- 図 4-24 表面粗さ (Zygo 社 New View)
- 図 4-25 四角形状マイクロツール
- 図 4-26 加工方式
- 図 4-27 送り速度 1mm/min の場合の性状
- 図 4-28 送り速度 1000mm/min の場合の性状
- 図 4-29 送り速度と表面性状の関係
- 図 4-30 切り込み量 12.5 µm の時の加工状態
- 図 4-31 切り込み量 80 µm の時の加工状態
- 図 4-32 加工後のマイクロツール
- 図 4-33 マイクロ彫刻文字
- 図 4-34 特殊ダイス鋼加工溝の三次元形状(New View)
- 図 4-35 SKD-11 の加工状態
- 図 4-36 特殊ダイス鋼の加工状態
- 図 5-1 電極レス ELID 研削(ELIDⅢ)法の概略図
- 図 5-2 イオンショットドレッシング法の発明に至る方式の推移
- 図 5-3 加工の様子
- 図 5-4 砥石ワークギャップの違いによる不導体被膜厚さ
- 図 5-5 加工前,加工後の表面性状
- 図 5-6 各条件における研削比
- 図 5-7 各条件における表面粗さ
- 図 5-8 電流値,電圧値変化による研削比
- 図 5-9 電流値, 電圧値変化による表面粗さ Ra
- 図 5-10 電流値, 電圧値変化による表面性状
- 図 5-11 ノズル式 ELID III 研削法の配線図
- 図 5-12 試作したノズル式電極
- 図 5-13 加工の様子
- 図 5-14 実験2の砥石ドレッシング前後の表面性状

図 5-15 加工結果

- 図 5-16 比較した電極レス電解ドレッシング方式
- 図 5-17 加工表面粗さ
- 図 5-18 方式 B における電極の消耗(左:陰極、右:陽極)
- 図 5-19 ELIDⅢ法とイオンショットドレッシング法の加工原理
- 図 5-20 イオンショットドレッシング法におけるノズル電極
- 図 5-21 ELIDⅢによる初期電解ドレッシング後の砥石性状
- 図 5-22 イオンショット方式による初期電解ドレッシング後の砥石性状
- 図 5-23 加工後の表面性状 (SEM)
- 図 5-24 加工後のワーク表面性状
- 図 5-25 加工後の研削比比較
- 図 5-26 ツイン電極式交流電解ドレッシングの原理図
- 図 5-27 イオンショットドレッシング法における電流の流れの模式図
- 図 5-28 小径砥石を使用した場合の問題
- 図 5-29 陰極電極がワークに近づきすぎて電食を起こした様子(材質:SUS316)
- 図 5-30 イオンショットドレッシングシステム
- 図 5-31 イオンショットドレッシングによる砥石色の変化
- 図 5-32 イオンショットドレッシング後の電極の表面状態
- 図 5-33 電解条件と不導体被膜厚さの関係
- 図 5-34 研削液濃度と不導体被膜厚さの関係
- 図 5-35 電解条件の加工への影響
- 図 5-36 電解条件と研削液の状態
- 図 5-37 電圧測定の模式図
- 図 5-38 ノズルと砥石の距離と電圧の関係
- 図 5-39 ノズルと砥石の距離と不導体被膜厚さの関係
- 図 5-40 電極間距離によるノズルと砥石の距離と電圧の関係
- 図 5-41 鉄系材料の水溶液中での腐食図
- 図 5-42 研削液条件と被膜厚さの関係
- 図 5-43 研削液条件によるノズルと砥石の距離と被膜厚さの関係
- 図 5-44 イオンショットドレッシング法のメカニズム
- 図 5-45 レンズ金型加工の様子
- 図 5-46 加工の様子
- 図 5-47 加工後のレンズ金型
- 図 5-48 表面粗さ (Zygo 社 New View)
- 図 5-49 イオンショットドレッシング法で加工した形状精度(UA3P)
- 図 5-50 従来の ELID 研削法で加工した形状精度(UA3P)

- 図 5-51 中心位置補正前の形状精度(UA3P)
 図 5-52 中心位置補正後の形状精度(UA3P)
 図 5-53 形状誤差 NC 反映補正前の形状精度(UA3P)
 図 5-54 形状誤差 NC 反映補正後の形状精度(UA3P)
 図 5-55 電解後の電極の表面状態
 図 5-56 極性自動切り替え装置
 図 5-56 極性自動切り替え装置
 図 5-58 電解実験後のステンレス材
 図 5-59 電解実験後のグラファイト材
 図 5-60 電解実験後の鋳鉄材
 図 5-61 電解実験後の電極材の板厚の変化量
 図 5-63 不導体被膜の生成が確認された砥石
- 図 6-1 中性子線の透過
- 図 6-2 中性子光学系ユニット
- 図 6-3 被削材 (MgF₂)の透過率
- 図 6-4 フレネルレンズ用マルチ砥石
- 図 6-5 砥石のセットアップ状態
- 図 6-6 加工の模式図
- 図 6-7 加工の様子
- 図 6-8 中性子フレネルレンズ
- 図 6-9 表面粗さ (Zygo 社 New View)
- 図 6-10 集光実験方法
- 図 6-11 フレネルレンズ有無の集光結果
- 図 6-12 散乱強度 2D イメージ
- 図 6-13 オスカー式研磨機
- 図 6-14 ELID 研削後の形状精度
- 図 6-15 ELID 研削後の表面粗さ
- 図 6-16 研磨時間と除去量の関係
- 図 6-17 研磨時間と表面粗さの関係
- 図 6-18 研磨加工後の形状精度
- 図 6-19 研磨加工後の表面粗さ

- 図 6-20 X 線用 CVD-SiC ミラー
- 図 6-21 CT (Computed TopologRaphy) スキャン装置
- 図 6-22 CT で取得して V-Cat で生成した形状データイメージ
- 図 6-23 大腿骨骨頭部分の模式図
- 図 6-24 STL データ
- 図 6-25 IGES データ
- 図 6-26 CAM ソフトウェア
- 図 6-27 加工パスシミュレーション
- ⊠ 6-28 V-Cam
- 図 6-29 骨頭形状と被削素材との位置決め作業
- 図 6-30 加工パス作成シミュレーション
- 図 6-31 加工パス生成コンソール
- 図 6-32 加工パス生成コンソールの説明
- 図 6-33 加工パス生成後の NC データ
- 図 6-34 骨頭モデル加工の様子
- 図 6-35 加工されたアルミニウム製人工股関節骨頭モデル
- 図 6-36 マイクロマニュファクチャリングシステムの事例
- 図 6-37 デスクトップ研削切断加工機
- 図 6-38 通常切断加工結果
- 図 6-39 ELID 研削加工結果
- 図 6-40 デスクトップ鏡面研削切断の例
- 図 6-41 デスクトップラップ研削加工機
- 図 6-42 加工結果
- 図 6-43 切断工程,平坦化工程,形状創成工程を経て製作された金型の例
- 図 6-44 4 軸デスクトップ駆動システムの生産における利用形態

表のリスト

- 表 1-1 開発された卓上型工作機械サイズと報告されている加工原理
- 表 1-2 機械サイズと普及状況
- 表 2-1 3軸デスクトップ駆動システムの仕様
- 表 2-2 実験システムの仕様
- 表 2-3 超硬合金材の平面研削加工条件
- 表 2-4 実験システムの仕様
- 表 2-5 超硬合金材の非球面レンズ加工条件
- 表 2-6 マイクロツール加工専用 3 軸デスクトップ駆動システムの仕様
- 表 2-7 ツルーイング条件
- 表 2-8 角柱形状マイクロツール ELID 研削条件
- 表 2-9 角柱形状の測定結果
- 表 2-10 SUS420J2 材の ELID 彫刻文字切削条件
- 表 2-11 マイクロギア切削条件
- 表 2-12 マイクロギアの諸元
- 表 2-13 四角錐形状マイクロツール ELID 研削条件
- 表 3-1 4 軸デスクトップ駆動システムの使用要素の比較
- 表 3-2 4 軸デスクトップ駆動システムの仕様
- 表 3-3 超硬合金材の平面 ELID 研削条件
- 表 3-4 SKD11 材のポケット加工実験条件
- 表 3-5 実験システム構成
- 表 3-6 適用した超精密 4 軸デスクトップ駆動システムの仕様
- 表 3-7 単結晶ダイヤモンドバイトを使用した鏡面切削条件
- 表 3-8 構造解析シミュレーション結果と重量

- 表 4-1 ツルーイング条件
- 表 4-2 石英ガラスの非球面レンズ研削条件
- 表 4-3 酸化セリウム砥石による鏡面研削条件
- 表 4-4 CG 方式による球面レンズ研削条件
- 表 4-5 酸化セリウム砥石による研削条件
- 表 4-6 マイクロツールによる溝切削実験条件
- 表 4-7 マイクロツールの一刃当たりの送り量
- 表 5-1 ELIDⅢ加工実験条件
- 表 5-2 電解条件による ELIDⅢ実験条件
- 表 5-3 使用機器およびノズル式 ELID 加工実験条件
- 表 5-4 正負配線時の接点
- 表 5-5 使用機器およびノズル式 ELID 方式による実験条件
- 表 5-6 使用機器とイオンショットドレッシング法による実験条件
- 表 5-7 イオンショットドレッシング法による加工実験条件
- 表 5-8 電源設定値による実験条件
- 表 5-9 研削液濃度による電解実験条件
- 表 5-10 電解条件による加工実験条件
- 表 5-11 研削液における電解実験条件
- 表 5-12 ノズルと砥石の距離における電解実験条件
- 表 5-13 電極間距離における電解実験条件
- 表 5-14 研削液の種類における電解実験条件
- 表 5-15 レンズ金型加工実験条件
- 表 5-16 使用機器および電極材質における電解実験条件
- 表 5-17 長寿命化を目的とした電極材質による電解実験条件
- 表 6-1 フレネルレンズ加工条件
- 表 6-2 CVD-Sic 材の ELID 研削実験条件
- 表 6-3 研磨加工条件
- 表 6-4 骨頭モデル加工条件

ELID: Electrolytic In-process Dressing ELID II : Electrolytic Interval Dressing ELIDII : Electrodeless Electrolytic Dressing CD: Compact Disc, コンパクトディスク MD: MiniDisc, ミニディスク DVD: Digital Versatile Disk, ディーブイディー HD-DVD: High Definition DVD, エイチディーディーブイディー cm:Centi Meter, センチメートル mm:Miri Meter, ミリメートル μm: Micro Meter, マイクロメートル nm: Nano Meter, ナノメートル g:gram, グラム kgf:Kilo gram, キログラム N:Newton, $= = - \vdash \vee$ kN:Kilo Newton, キロニュートン mN: Miri Newton, ミリニュートン MPa: Mega Pascal, メガパスカル min:minute. ミニッツ, 分 s:second, セコンド, 秒 ns:nano second, ナノセコンド min⁻¹: means per minute, 毎分, 回転数 mm/min:miri per minute, 送り速度 mL/min:miri Litle per minute, 吐出量 N/mm²: Newton per Square miri, 応力(相当応力) μm/step:Micro Meter per step, 最小移動量 Palus/rev: Palus per revolution, 1回転あたりのパルス量 μm/pass: Micro Meter per pass, 1パスあたりの切り込み量 L:Litle, リットル, 容量 mg/L:miri gram per Litle, 溶存酸素量 mS/cm:miri simens per centi meter, 電気伝導率 pH:potential Hydrogen, power of Hydrogen, ペーハー, 水素イオン濃度指数 ℃:Celsius temperature, 摂氏温度, セルシウス度 [°]:degree,度(角度) Hz:Helz, ヘルツ, 周波数

- φ:fai, 直径
- HRC: hardness Rockwell 'c' scale, ロックウェル硬さ Cスケール、硬度
- IT: Information Technology, インフォメーションテクノロジー, 情報技術関連
- PC: Personal Computer, パーソナルコンピュータ, 情報技術関連
- OA: Office Automation, オフィスオートメーション, 情報技術関連
- LAN: Local Area Network, 構内通信網, 情報技術関連
- GB-IB: General Purpose Interface Bus, 情報技術関連
- NC: Numerical Control, 加工機コントローラ
- CNC: computer numerical control, 加工機コントローラ
- PCNC: Personal computer numerical control, 加工機コントローラ
- CAM : Computer Aided Manufacturing, ソフトウェア
- CAT: Computer Aided Testing, ソフトウェア
- 3D: Three dimension, 三次元
- STL: Stereo lithography, ファイル形式
- AFM: Atomic Force Microscope, 測定器
- SEM: scanning electron microscope, 測定器
- SD: single crystalline diamond, 単結晶ダイヤモンド, 工具
- cBN: cubic Boron Nitride, 立方晶窒化ホウ素, 工具
- DB:single crystalline diamond+cubic Boron Nitride hybrid, 工具
- AC: Alternating Current, 交流
- V:Volt, ボルト, 電圧
- A:Ampere, アンペア, 電流
- VA: Volt Ampere, ボルトアンペア, 電力 (皮相電力)
- W: Watt, ワット, 電力(消費電力)
- kW:Kilo Watt, キロワット, 電力(消費電力)
- Ra: Roughness Average, 平均粗さ, 表面粗さ
- Ry: Maximum Roughness, 最大高さ, 表面粗さ
- rms: root mean square Roughness, 二乗平均粗さ, 表面粗さ
- P-V: Peak-to-valley roughness or Peak-to-valley, 最大誤差, 形状精度
- SUS: Steel Use Stainless, ステンレス, 材料
- SK4:高速度工具鋼,材料
- SKD11:ダイス鋼,材料
- S45C:炭素鋼,材料
- BK-7:Borosilicate Crown Glass, ホウケイ酸塩クラウンガラス, 材料
- SiC: Silicon carbide, 炭化ケイ素, 材料
- MgF₂: Magnesium Fluoride, フッ化マグネシウム, 材料

- CVD: Chemical Vapor Deposition, コーティング
- LM:liner motion, エルエムガイド, ガイドの種類
- X:, エクス, X軸
- Y:ワイ,Y軸
- Z:ゼット,Z軸
- C:シー, C軸
- R:Radius, 半径
- x:半径方向座標,非球面式
- z:光軸方向座標,非球面式
- c: 光軸近傍におけるレンズ面の近軸曲率半径 r の逆数(1/r),非球面式
- k:円錐係数,非球面式
- e:離心率,非球面式
- r:中心部基準球面の曲率半径,非球面式
- t:Thickness, 厚さ
- θ :seta, シータ, 角度
- γ:gamma, ガンマ, ガンマ粒子, ガンマ線
- β : beta, ベータ, ベータ粒子, ベータ線

本研究の遂行と論文作成にあたり,常に貴重なご助言を与え,熱心に指導して下さった理化学 研究所大森素形材工学研究室主任研究員 大森 整博士に謹んで感謝の意を表します.また,論文 を御査読頂き,ご教授頂いた埼玉大学工学部教授 三島 健稔博士,埼玉大学工学部准教授 池野 順一博士,九州大学大学院工学研究院教授(埼玉大学客員教授) 土肥 俊郎博士,理化学研究所 緑川レーザー物理工学研究室主任研究員(埼玉大学客員教授) 緑川 克美博士に深く感謝の意を表 します.

本論文は,理化学研究所で1999年10月から2007年11月に至って行った研究をまとめたものである.この間,本研究を遂行する上でELID研削の基本原理から実験装置の開発に至るまでご指導,ご助言を賜った新世代加工システム株式会社 深谷 易史氏に深く感謝いたします.

特に理化学研究所のテクニカルサイエンティストに採用され,研究を始めてからお世話になっ た,理化学研究所 丸山 瑛一博士,斉藤 茂和氏,牧野内 昭武博士,片平 和俊博士,林 偉民博 士,森田 晋也氏,山形 豊博士,守安 精博士,渡邉 裕博士,小野 照子博士,梅津 信二郎博士, 成瀬 哲也氏,水谷 正義博士,郭 建強博士,郭 泰洙博士,加瀬 究博士,横田 秀夫博士,神田 敦子氏,佐々木 慶子氏,上野 嘉之氏,新世代加工システム株式会社 三石 憲英氏,浅見 宗明 氏,吉川 研一氏,福原 茂夫氏,武安 初一氏,大森 宮次郎博士,竹田 直日氏,森山 奈央子氏, 大井 豊氏,池上金型工業株式会社 池上 恵蔵氏,松澤 隆氏,茨城大学工学部 伊藤 伸英博士, 日本工業大学工学部 根本 昭彦氏,埼玉県産業技術総合センター 進藤 久宜氏,慶応大学理工学 部 小茂鳥 潤博士,東北大学 厨川 常元博士,ものつくり大学准教授 平井 聖児博士に感謝いた します.

また,装置開発,実験に際してご指導,ご協力賜りました,池上精工株式会社 三浦 隆寛氏, 須磨 裕二氏,今井 圭介氏,池上 正智氏,有限会社ユアサ 湯浅 重夫氏,池上金型工業株式会 社 折原 茂氏,大友 誠氏,東洋工学株式会社 竹内 秀喜氏,高寺 明氏,有限会社システック・ エス 反町 政幸氏,株式会社マルト- 仁平 正三氏,田島 琢二氏,石井 毅志氏,有限会社タケ ナカ・テクノネット 竹中 三朗氏,ヴァ-デン販売株式会社 宮澤 伸年氏,コスモデザイン株式 会社 小沢 和男氏,有限会社チューブシステムズ 山本 幸治氏,冨士ダイス株式会社 宮澤 哲二 氏,清水 智行氏,井出 雅之氏,株式会社クマクラ 熊倉 賢一氏,門間 晃氏,有限会社勗友製 作所 上田 十九年氏,AUX Design 善如寺 守氏,ゴーショー株式会社 天野 輝夫氏,木村 攻氏, 株式会社イースタンオプティカルコーポレーション 金子俊幸氏,株式会社清原光学 清原 元輔氏, 株式会社サン精密化工研究所 鷲尾 政男氏,田中 昭治氏,新井 廣久氏,佐々木 哲夫博士,鈴 木 亭氏,八須 洋輔氏,中越 洋平氏,長野 千春氏に心から感謝いたします.

また,ドレッシングメカニズムに際してご指導,ご協力賜りました,茨城大学名誉教授 久保 田 護博士,ユシロ化学工業株式会社横山 健三氏に心から感謝いたします.

また,中性子フレネルレンズの開発に際してご指導ならびにデータおよび資料をご提供いただ

272

きました高エネルギー加速器研究機構 清水 裕彦博士,理化学研究所 安達 智宏博士,奥 隆 之博士,池田 一昭博士に心から感謝いたします.

最後に研究の機会を与えていただき,懇切丁寧なご指導と終始変わらぬ温かい激励を賜 った恩師である理化学研究所大森素形材工学研究室主任研究員 大森 整博士に心より御礼 申し上げます.

2007年11月 上原 嘉宏

論文リスト

原著論文

- 林 偉民,大森 整,山形 豊,守安 精,上原 嘉宏,伊藤 伸英,林 漢錫,片平 和俊, 森田 晋也,牧野内 昭武: "ELID研削における砥石のマイクロツル-イング法",砥粒 加工学会誌,45,5 (2001) 221-226
- <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, Ken-Ichi Kumakura, Shin-Ya Morita, Tomoyuki Shimizu, and Tetsuo Sasaki: "Development of Small Tool by Micro Fabrication System Applying ELID Grinding Technique", Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, (2001)491-495
- Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, and Akitake Makinouchi: "Grinding Characteristics of CVD-SiC Cylindrical Mirror with ELID Grinding Method (2nd Report: Effect of ELID Truing Method)", Advances in Abrasive Technology 4, (2001) 89-94
- <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, and Weimin Lin: "Grinding Chracteristics of Micro Tool by Desk Top 3-Axes Machine with ELID System", Advances in Abrasive Technology 4, (2001) 105-110
- 5. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 伊藤 伸英, 斉藤 考治, 佐々木 哲夫: "ELIDマイク ロファブリケ-ションシステムにおけるマイクロツールの開発--(第1報:マイクロツー ルの加工特性について)", 砥粒加工学会誌, 46, 1 (2002) 38-43
- Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, <u>Yoshihiro Uehara</u>, and Weimin Lin: "ELID-Grnding of Microtool and Applications to Fabrication of Microcomponents", Int. J. Nano Technology (IJNT), 41, 2 (2002) 193-204
- Yan Pan, Tetsuo Sasaki, Nobuhide Ito, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, <u>Yoshihiro</u> <u>Uehara</u>, and Weimin Lin: "An ELID Grinding System with a Minimum Quantity of Liquid", Advances in Abrasive Technology 5, (2002) 105-110
- Muneaki Asami, Kenichi Yoshikawa, Yutaka Ohi, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, <u>Yoshihiro Uehara</u>, and Wimin Lin:" Development of a Desktop Micro Injection Molding Machine", Advances in Abrasive Technology 5, (2002) 389-394
- 9. Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Watanabe, and Weimin Lin: "Improvement of Mechanical Strength of Micro Tools by Controlling Surface Characteristics", Annals of the CIRP, 52 (2003) 467-470
- 10. Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Jianqiang Guo, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Shin-ya Morita, Norihide Mitsuishi, Kenichi Yoshikawa, Miyajiro Ohmori, Kazuaki Ikeda, Takayuki Oku, Tomohiro Adachi and Hirohiko Shimizu: "Fabrication process and system for neutron refractive optics", Int. J. Nuclear Instruments & methods in Physics

Research (ELSEVIER), Section A, 529 (2004) 106-111

- 上原 嘉宏,大森 整,片平 和俊,林 偉民,渡邉 裕,清水 智行,三石 憲英,伊藤 伸英,佐々木 哲夫: "ELIDマイクロファブリケーションシステムにおけるマイクロツールの開発-(第2報:マイクロツールの評価について)",砥粒加工学会誌,48,5 (2004) 269-274
- 大森 整,鈴木 亨,森田 晋也,林偉 民,渡邉 裕, 上原 嘉宏: VCAD/VCAMを利用した 非球面金型加工の試み,砥粒加工学会誌,48,12 (2004) 714-715
- 13. 石川 惣一, 上原 嘉宏, 渡邉 裕, 片平 和俊, 林 偉民, 大森 整, 三石 憲英, 山本 幸
 治: "ELIDマイクロファブリケ-ションシステムにおけるマイクロツールの開発--(第3 報:マイクロツールの高能率加工について)", 砥粒加工学会誌, 49, 3 (2005) 157-162
- 14. 上原 嘉宏, 大森 整, 石川 惣一, 片平 和俊, 林 偉民, 渡邉 裕, 三石 憲英, 伊藤 伸英, 山本 幸治: "ELIDマイクロファブリケーションシステムにおけるマイクロツールの 開発--(第4報:マイクロツールの切削特性評価)", 砥粒加工学会誌, 49, 4 (2005) 219-224
- 15. 三石 憲英, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 石川 惣一, 三浦 隆寛: "デスクトップ マシンツールにおける球面レンズ高能率ELID研削システムの開発", 砥粒加工学会誌, 49, 5 (2005) 269-272
- 16. Shaohui Yin, Shin-ya Morita, Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Weimin Lin, Qing Liu, Maihara Toshinori, Iwamuro Fumihide, Mochida Daisaku, "ELID precision grinding of large special Schmidtplate for fibre multi-object spectrograph for 8 Subaru telescope", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45 (2005) 1598-1604
- 17. Hitoshi Ohmori, Shaohui Yin, Weimin Lin, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Shin-ya Morita, Muneaki Asami, Miyajiro Ohmori "Development on Micro Precision Truing Method of ELID-Grinding Wheel (1st Report: Principle and Fundamental Experiments)", Key Engineering Materials, 291/292 (2005) 207-212
- 18. Shaohui Yin, Weimin Lin, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Shin-ya Morita, Hitoshi Ohmori, Muneaki Asami, Miyajiro Ohmori "Development on Micro Precision Truing Method of ELID-Grinding Wheel (2nd Report: Application to Edge Sharpening of Large Wheel)", Key Engineering Materials, 291/292 (2005) 213-218
- Weimin Lin , Hitoshi Ohmori , Toru Suzuki, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Shin-ya Morita, "Polishing Characteristics of ELID-Ground Surface of Nano Precision Optical Elements" , Key Engineering Materials, 291/292 (2005) 365-370
- 20. Kwak Tae Soo, Toru Suzuki, Bae W. B, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, "Applacation of neural network and computersimulation to improve surface profile of injection molding optic lens", Journal of Materials Processing Technology,

170 (2005) 24-31

- 21. Tetsuya Naruse, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Yutaka Watanabe, Kazutoshi Katahira, Soichi Ishikawa, Koji Yamamoto, "Development of the Micro Tool by the Desk-top ELIDGrinding System", 3rd International Conference on Leading EdgeManufacturing in 21st Century (LEM21), (2005) 237-242
- 22. <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Yoshiyuki Ueno, Testsuya Naruse, Norihide Mitsuishi, Ishikawa Soichi, TakahiroMiura, "Development of spherical lens ELID grinding systemby Desk-top 4-axes machine tool", 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2005) 247-252
- 23. Jianqiang Guo, Hitoshi Ohmori, Shin-ya Morita, Yutaka Watanabe, Weimin Lin, Toru Suzuki, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Kazuaki Ikeda, Hirohiko Shimizu, "ELID Grinding on a Symmetric Paraboloidal Quartz Mirror", 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2005) 253-256
- 24. Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Weimin Lin, Yutaka Watanabe, Kazutoshi Katahira , Testsuya Naruse , Norihide Mitsuishi, Soichi Ishikawa "New ELID Grinding Technique for Desk-top Grinding System Based on VCAD Concept", 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2005) 703-708
- 25. Shaohui Yin, Hitoshi Ohmori , Weimin Lin , <u>Yoshihiro Uehara</u> , "Study of Nano-precision Synergistic FinishingProcess of ELID-grinding and MRF for Glass Lens", 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2005) 727-732
- 26. 林 偉民, 尹 韶輝, 大森 整, 上原 嘉宏, 鈴木 亨 "ELID研削と磁性流体研磨 (MRF) を相乗した超精密仕上げ加工プロセスによるシリコンミラーの製作", 砥粒加工学会 誌, 49, 12 (2005) 701-702
- 27. Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Kazutoshi Katahira, Yutaka Watanabe, Toru Suzuki, Weimin Lin, Norihide Mitsuishi, "Advanced Desktop Manufacturing System for Micro-Mechanical Fabrication", Laser Metrology and Machine Performance VII, (2005) 16-29
- 大森 整, 尹 韶輝, 林 偉民, <u>上原 嘉宏</u>, "ELID研削と磁性流体研磨(MRF)を相乗した超精密仕上げ加工プロセスの研究 第一報:ガラスレンズ加工への試み", 砥粒加工学会誌, 50,1 (2005) 39-44
- 29. 上原 嘉宏,三石 憲英,成瀬哲也,厨川常元,大森 整,林 偉民,三浦 隆寛: "ELID 研削システム搭載デスクトップマシンツールにおける非球面レンズの開発",砥粒加 工学会誌,50,3 (2006) 154-157
- 30. 林 偉民, 大森 整, 鈴木 亨, <u>上原 嘉宏</u>, 渡邉 裕, 森田 晋也: "V-CAM援用による自
由曲面の仕上げ加工効果",砥粒加工学会誌 51,9 (2007) 514-517

- 大森 整,林 偉民,<u>上原 嘉宏</u>:磁性流体研磨(MRF)の効果と適用,機械の研究 59, №4, (2007) 437-444
- 32. 渡邉 裕,林 偉民, <u>上原 嘉宏</u>, 片平 和俊, 大森 整, 郭 泰珠: ガラスプレス用レン ズ金型の超精密研削加工,型技術 22, No.8, (2007) 164-165
- **33.** 林 偉民, 大森 整, 鈴木 亨, <u>上原 嘉宏</u>, 渡邉 裕, 森田 晋也: V-CAM援用による自由 局面の仕上げ加工効果, 砥粒加工学会誌 51, No.9, (2007) 514-517
- 34. Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, Tetuya Naruse, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Nakao Ando, and Masayoshi Mizutani, "Microscopic Grinding Effects on Fabrication of Ultra-fine Micro-Tools", Annals of the CIRP, 56 (2007) 569-572
- 35. <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Yutaka Watanabe, Kazutoshi Katahira, Tetsuya Naruse, Norihide Mitsuishi, Takahiro Miura : "Ion shot dressing grinding for desk-top machine tools with V-Cam system", /The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21) [The Japan Society of Mechanical Engineers], Fukuoka, Japan, November (Nov 7-9, 2007) 601-604
- 36. Tetsuya Naruse, Kazu Ando, Yutaka Kameyama, Masayoshi Mizutani, <u>Yoshihiro</u> <u>Uehara</u>, Kazutoshi Katahira, Weimin Lin, Sasaki Chikako, Hitoshi Ohmori, : "Consistent Processing and Measurement Procedure on Micro Cutting", /The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21) [The Japan Society of Mechanical Engineers], Fukuoka, Japan, November (Nov 7-9, 2007) 149-152
- 37. Jianqiang Guo, Hitoshi Ohmori, Yutaka Watanabe, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Muneaki Asami M:" Experiment and Theoretical Analyses on the ELID Grinding Force", /The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21) [The Japan Society of Mechanical Engineers], Fukuoka, Japan, November (Nov 7-9, 2007) 571-576

・国際会議プロシーディングス

- 38. <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, Akitake Makinouchi, and Kazutoshi Katahira: "Grinding Characteristics of CVD-SiC Cylindrical Mirror with ELID Grinding Method", 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Micro-Fabrication, Seoul, Korea, (Feb 20, 2001) 65-70
- 39. <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, Shin-Ya Morita, Toshiro Higuchi, Muneaki Asami, and Ken-Ichi Yoshikawa: "Development of "Micro-Workshop" by RIKEN~Microfabrication Using Desktop Machine with ELID System~", 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Micro-Fabrication,

Seoul, Korea, (Feb 20, 2001) 97-106

- 40. <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin, Ken-Ichi Kumakura, Shin-Ya Morita, Tomoyuki Shimizu, and Tetsuo Sasaki: "Development of Small Tool by Micro Fabrication System Applying ELID Grinding Technique", 2nd Korea-Japan Joint Symposium on Micro-Fabrication, Seoul, Korea, (Feb 20, 2001) 107-114
- 41. Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Weimin Lin, Kazutoshi Katahira, Muneaki Asami, and Ken-Ichi Yoshikawa: "Development of Desktop Micro-Fabrication System", Proceedings of The 4th Tunisian Interdisciplinary Workshop on Science and Society TIWSS' 2001, Tokyo, Japan, (October 27, 2001) 110-114
- 42. Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, <u>Yoshihiro Uehara</u>, and Weimin Lin:
 "ELID-Grnding of Microtool and Applications to Fabrication of Microcomponents", 2002 CIRP design seminar, Hong Kong, (May 16-18, 2002) MF02 (CD-ROM)
- <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Yutaka Yamagata, Sei Moriyasu, Weimin Lin: "Development of "micro-workshop" ~microfabrication using desktop machine with elid system~", 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation Conference, Hiroshima, Japan, (July 14-17, 2002) 357-362
- 44. Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Shin-ya Morita, Kazutoshi Katahira, Yutaka Watanabe, Toru Suzuki, Tae Soo Kwak, "Nanoprecision Mechanical Fabrication Technologies", 22nd NC Machine Tools Seminar, Seoul, Korea, (November, 2004) 30-32
- 45. Hitoshi Ohmori , Shaohui Yin , Weimin Lin , <u>Yoshihiro Uehara ,</u> Shin-ya Morita, Muneaki Asami, Miyajiro Ohmori "Development on Micro Precision Truing Method ofELID-Grinding Wheel (1st Report: Principle andFundamental Experiments)", 8th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT 2005) , <u>St.</u>Petersburg, Russia, (June, 2005)207-212
- 46. Shaohui Yin , Weimin Lin , <u>Yoshihiro Uehara ,</u> Shin-ya Morita, Hitoshi Ohmori , Muneaki Asami, Miyajiro Ohmori "Development on Micro Precision Truing Method ofELID-Grinding Wheel (2nd Report: Application to Edge Sharpening of Large Wheel)", 8th International Symposium on Advances inAbrasive Technology (ISAAT 2005), <u>St.</u>Petersburg, Russia, (June, 2005)213-218
- Weimin Lin , Hitoshi Ohmori , Toru Suzuki , <u>Yoshihiro Uehara</u> , Shin-ya Morita, "Polishing Characteristics of ELID-Ground Surfaceof Nano Precision Optical Elements" , 8th International Symposium on Advances inAbrasive Technology (ISAAT 2005), <u>St.</u>Petersburg, Russia, (June, 2005)365-370
- 48. <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori ,Katahira Kazutoshi ,Weimin Lin , Yutaka

Watanabe, Muneaki Asami, Norihide Mitsuishi, "Advanced Desktop Manufacturing System for Micro-Mechanical Fabrication", International Conference on PrecisionEngineering and Micro/Nano Technology in Asia (ASPEN2005), Shenzhen, China, (November, 2005)309-314

- 49. Hitoshi Ohmori , <u>Yoshihiro Uehara</u> , Weimin Lin , Katahira Kazutoshi , Naruse Testsuya, Norihide Mitsuishi ," Development of a New ELID Grinding Method for Desk-Top Fabrication System" , International Conference on PrecisionEngineering and Micro/Nano Technology in Asia (ASPEN2005) , Shenzhen, China , (November , 2005) 640-643
- 50. Guo Jianqiang, Hitoshi Ohmori, Shin-ya Morita, Yutaka Watanabe, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Weimin Lin, Toru Suzuki, Kazuaki Ikeda, Hirohiko Shimizu, "Fine ELID Grinding on the Symmetric ParaboloidalMirror of Quartz", International Conference on Precision Engineering and Micro/Nano Technology in Asia (ASPEN2005), Shenzhen, China, (November, 2005)19-23
- 51. Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Toru Suzuki, Weimin Lin, Shin-ya Morita, Hatsuichi Takeyasu, Muneaki Asami, Norihide Mitsuishi, Tae Soo Kwak, "Research on Micro-mechanical Fabrication Processesand Development of Micro-molding Systems", 6th Workshop on Milli-Structure Manufacturing Technology, Gwacheon, Korea, (May, 2005)
- 52. Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Watanabe, Weimin Lin, "Micro-manufacturing System Research and Microsensorfor Measuring Micro-Parts", 1st Intelligent Microfactory System International Workshop, Jeju, Korea, (July, 2005)
- 53. Hitoshi Ohmori , Kazutoshi Katahira , <u>Yoshihiro Uehara</u>, Masayoshi Mizutani, "Surface and Interface Functional Modification with Nanometeric Substantial Transformation", Nanoengineering Symposium 2005 (NANO 2005), Daejeon, Korea, (October , 2005)82-87
- 54. Hitoshi Ohmori , <u>Yoshihiro Uehara</u>, Watanabe Yutaka, Suzuki Toru, Lin Weimin, Katahira Kazutoshi, Mitsuishi Norihide, Muneaki Asami, "Micro-mechanical Fabrication on Desktop Machine-Tools", 1st Topical Meeting on Microfactories ``Desktop MEMS and Nano Factories" (TMMF2005), Tsukuba, Japan, (2005)
- 55. Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, Weimin Lin, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Watanabe, Nakao A, Yatagai F, Iwaki M, Masayoshi Mizutani, Muneaki Asami . and Norihide Mitsuishi: "Recearch and Development of Advacned Analyzer components with Ultraprecision", 11th International Conference on Precision Engineering (ICPE), Tokyo, Japan, (Aug , 2006)

- 56. Weimin Lin, Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Watanabe, Toru Suzuki and Shaohui Yin: "Development of Optical Elements with ELID-grinding and MRF Synergistics Finishing Process", 11th International Conference on Precision Engineering (ICPE), Tokyo, Japan, (Aug , 2006) 291-294
- 57. Gou J, Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Watanabe and Muneaki Asami : "Study on the ELID grinding forces of ceramics and steels", 11th International Conference on Precision Engineering (ICPE), Tokyo, Japan, (Aug, 2006)349-350
- 58. Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, <u>Yoshihiro Uehara,</u> Weimin Lin, Watanabe Yutaka, Tetsuya Naruse, Muneaki Asami. And Norihide Mitsuishi : "Nanoprecision Mechanical Fabrication Technologies Applying ELID", International 21st Century COE Symposium on Atomistic Fabrication Technology [JSPE], Osaka, Japan, (Oct, 2006)21-22
- 59. Weimin Lin, Hitoshi Ohmori, Toru Suzuki, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Watanabe, and Shin-ya Morita: "Characteristics of Free Form Finishing Applying V-CAM System ", The ninth International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2006), Dalian, China, (Sep , 2006)273-278
- 60. Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara,</u> Tetsuya Naruse, Kazutoshi Katahira, Weimin Lin, Yutaka Watanabe. : "The Advqnced Micro-mechanical Fabrication for Ultrafine Micro-tools with On-machine Measurement and its applications", 6th Korea-Japan Joint Symposium on Micro-Fabrication, Ansan, Korea, (July, 2006)71-75
- 61. Hitoshi Ohmori, Shin-ya Morita, Yutaka Watanabe, Masayoshi Mizutani, Weimin Lin, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Tetsuya Naruse, MuneakiAsami, Kazutoshi Katahira: "Synergetic sensing and measurement during series of manufacturing processes", Symposium on Advanced Techniques of Sensing-based Manufacturing [Pusan National University], Pusan, Korea, June (Jun 4, 2007) 1-6
- 62. Shin-ya Morita, Ryou Kobayashi, Yutaka Watanabe, Hitoshi Ohmori, Masayoshi Mizutani, Weimin Lin, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Tetsuya Naruse, Muneaki Asami : "Measuring Probe unit for Ultra/nanoprecision machining and its Applications", Symposium on Advanced Techniques of Sensing-based Manufacturing [Pusan National University], Pusan, Korea, June (Jun 4, 2007) 17-21
- 63. <u>Yoshihiro Uehara</u>, Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Yutaka Watanabe, Kazutoshi Katahira, Tetsuya Naruse, Norihide Mitsuishi, TakahiroMiura : "Ion shot dressing grinding for desk-top machine tools with V-Cam system", /The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21) [The Japan Society of Mechanical Engineers], Fukuoka, Japan, November (Nov 7-9, 2007) 601-604

- 64. Tetsuya Naruse, Kazu Ando, Yutaka Kameyama , Masayoshi Mizutani, <u>Yoshihiro</u> <u>Uehara</u>, Kazutoshi Katahira, Weimin Lin, Chikako Sasaki , Hitoshi Ohmori : "Consistent Processing and Measurement Procedure on Micro Cutting", /The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21) [The Japan Society of Mechanical Engineers], Fukuoka, Japan, November (Nov 7-9, 2007) 149-152
- 65. Jianqiang Guo, Hitoshi Ohmori, Yutaka Watanabe, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Muneaki Asami : "Experiment and Theoretical Analyses on the ELID Grinding Force", /The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21) [The Japan Society of Mechanical Engineers], Fukuoka, Japan, November (Nov 7-9, 2007) 571-576
- 66. Hitoshi Ohmori, Yutaka Watanabe, Weimin Lin, <u>Yoshihiro Uehara,</u> Kazutoshi Katahira, Nobuhide Itoh, and Masayoshi Mizutani: "The Ultra/nanoprecision Finishing Processes for Ceramics Together with Efficient Grinding", 6th Korea-Japan Interactiv Workshop on Precision and Efficient Ceramic Machining, (May 29, 2007) 1-7
- 67. Hitoshi Ohmori, Kazutoshi Katahira, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Yutaka Watanabe, Weimin Lin, and Tetsuya Naruse: "Development of Desk-top Cutting/Grinding and Injection Molding Machines for Producing Advanced Microcomponents", Proceedings of 1st MIRAI Joint Workshop on Micro Fabrication (The 7th Japan-Korea-US Joint Symposium on Micro Fabrication), (June 28-29, 2007) 44-48
- 68. Hitoshi Ohmori, <u>Yoshihiro Uehara</u>, Tetsuya Naruse, Muneaki Asami, and NorihideMitsuishi: "Micro-machining and measurement combination processes on desktop systems", 3rd International Workshop on Microfactory Technology, (August 23-24, 2007) 35-36

総説等

- **69**. 上原 嘉宏, 大森 整, 山形 豊, 林 偉民: "高精度な金型加工を目的としたマイクロ ジェネレータにおけるELID研削システムの構築",型技術, 15, 7 (2000) 152-153
- 70. 大森 整, 上原 嘉宏, 山形 豊, 林 偉民, 森田 晋也, 守安 精, 伊藤 伸英: "マイク ロメカニカルファブリケーションにおけるELID法の適用とファブリケーションツールの 開発", 機械技術, 45, 5 (2001) 10-14
- 71. 上原 嘉宏, 大森 整, 山形 豊, 林 偉民 浅見 宗明, 佐々木 哲夫, 清水 智行:
 "ELID研削用メタルレジンスティック砥石の開発",型技術, 16, 7 (2001) 112-113
- 72. 林 偉民, 大森 整, 山形 豊, 守安 精, <u>上原 嘉宏</u>, 片平 和俊: "鋳鉄ボンド砥石の放 電ツルーイング技術",型技術, 16, 7 (2001) 114-115

- 73. 大森 整, 上原 嘉宏, 林 偉民, 片平 和俊, 浅見 宗明: "マイクロメカニカルファブ リケーション",機械技術 2001 年 11 月臨時増刊号「工作機械 50 年 [進化と未来] ー マザーマシンは逞しく成長し、そして変貌する--」, 49, 12 (2001) 52-53
- 74. 大森 整, 片平 和俊, 林 偉民, 上原 嘉宏, 守安 精: "ナノレベル超精密鏡面加工シ ステム",新材料技術研究会講習会テキスト,「最近の鏡面加工、球面レンズ最近の 動向と非球面の応用、精密成形への展開」,(2001) 1-9
- 75. 大森 整, 上原 嘉宏, 片平 和俊, 林 偉民, 海老塚 昇, 森田 晋也, 山形 豊: "機械 的微細加工とその応用について", 第 54 回レーザ加工学会論文集, (2001) 35-41
- 76. 大森 整, 片平 和俊, 林 偉民, 上原 嘉宏, 小茂鳥 潤, 渡邊 裕, 大森 宮次郎: "マ イクロ加工に対応したナノ表面品質と機能を実現するELID研削の効果", 機械と工具, 46, 2 (2002) 61-64
- 77. 大森 整,山形 豊,守安 精,上原 嘉宏,片平 和俊,林 偉民: "マイクロ研削加工",精密工学会誌,68,2 (2002) 171-174
- 78. 大森 整, 片平 和俊, 林 偉民, 上原 嘉宏, 鈴木 亨, 小茂鳥 潤: "ナノレベル表面 機能を実現する超精密金型のマイクロ研削技術",型技術, 17, 3 (2002) 24-29
- 79. 潘 燕, 佐々木 哲夫, 伊藤 伸英, 大森 整, <u>上原 嘉宏</u>, 林 偉民, 大森 宮次郎, 大井
 豊: "微小量研削液供給によるELID研削特性",型技術, 17, 7 (2002) 122-123
- 80. 上原 嘉宏, 大森 整, 山形 豊, 鈴木 亨, 佐々木哲夫, 潘 燕: "微細成形品に対応した金型製作のためのデスクトップマシンツールの開発", 型技術, 17, 7 (2002) 34-35.
- 81. 浅見 宗明, 大森 整, 池 浩, <u>上原 嘉宏</u>: "低粒度砥石のツル-イング技術に関する研究", 型技術, 17, 7(2002) 124-125
- 82. <u>上原 嘉宏</u>, 大森 整, 林 偉民, 片平 和俊, 佐々木哲夫, 潘 燕: "ELID研削による異 形状マイクロコアピン加工",型技術, 17, 7 (2003) 28-29
- 83. 鈴木 亨, 大森 整, 林 偉民, 戴 玉堂, <u>上原 嘉宏</u>, 清水 智行, 牧野内昭武: "ELID研 削法によるZERODUR放物面ミラ-加工", 型技術, 17, 7 (2003) 128-129
- 84. 大森 整, <u>上原 嘉宏</u>, 林 偉民, 武安初一, 三石憲英, 佐々木哲夫: "デスクトップマ シンツールによる超精密マイクロ加工", 機械技術, 52,1 (2004) 26-30
- 85. 大森 整,林 偉民,森田晋也,上原 嘉宏,渡邉 裕,片平和俊: "究極のELIDファブ リケ-ションを目指して-ナノプレシジョン化とマルチプロセス技術-",機械技術, 52,9 (2004) 22-25
- 86. 大森 整,林 偉民,渡邉 裕,上原 嘉宏,鈴木 亨,尹 韶輝: "磁性流体研磨法によるレンズ金型材の仕上加工",ツールエンジニア,45,9 (2004) 172-178
- 87. 大森 整,林 偉民,渡邉 裕, 上原 嘉宏, 尹 韶輝: "磁性流体研磨法によるレンズ金型材の仕上げ加工",機械と工具,48,8 (2004) 38-41
- 88. 大森 整,林 偉民,上原 嘉宏,武安初一,安藤知明,鷲尾政男,池上恵蔵: "マイク ロ圧縮成形システムによる精密樹脂部品の加工技術の開発",型技術,19,8 (2004)

128-129

- 89. 大森 整, <u>上原 嘉宏</u>, 林 偉民, 森田晋也, 劉 慶: "超精密切削による電鋳金型加工 と光学素子の開発",型技術, 19,13 (2004) 14-15
- 90. 大森整, 上原 嘉宏, 森田晋也, 郭泰洙, 石川惣一, 金井茂: "ナノマイクロストラク チャーを作り込む金型加工",成形転写技術, プラスチック成形加工学会誌「成形加工」, 16, 9 (2004) 567-573
- 91. 大森 整, 上原 嘉宏, 森田 晋也, 片平 和俊, 林 偉民, 郭 泰洙: "ELID研削技術と その新たなる展開-ナノプレシジョン加工とマイクロ化がELIDを変える-", 月刊トラ イボロジ-, 2, 198 (2004) 42-43
- 92. 大森 整, 森田晋也, 上原 嘉宏, 林 偉民, 鈴木 亨, 郭 泰洙: "ナノ精密加工=デス クトップ加工システムで取組む", ツールエンジニア, 45, 5 (2004) 32-37
- 93. <u>上原 嘉宏</u>, 片平 和俊, 大森 整, 石川 惣一, 村上 淳: "セラミックスの微細加工の ためのデスクトップ加工システム", セラミックス, 39, 12 (2004) 990-993
- 94. 大森 整, <u>上原 嘉宏</u>, 三浦 隆寛, 岩満 直志, "卓上サッシ加工機:「SASH-IN (刷新)!」 開発と実用化",型技術, 20, 15 (2005) 72-73
- 95. 大森 整,林 偉民,渡邊 裕, 上原 嘉宏,鈴木 亨,尹 韶輝 "磁性流体研磨法による レンズ金型材の仕上加工",でか版技能ブックス 16「金型製作の基本とノウハ ウ」,(2005) 144-150
- 96. 大森 整,林 偉民,渡邊 裕, 上原 嘉宏,"サイエンスにおけるものつくり研究と砥粒 加工技術",砥粒加工学会誌,49,9,(2005),14-17
- 97. 大森 整, 上原 嘉宏, 林 偉民, 武安 初一, 三石 憲英, "デスクトップ加工システム によるマイクロメカニカルファブリケ-ション", ここまで進んだ超精密マイクロ加 工技術, (2005) 9-12
- 98. 大森 整, 上原 嘉宏, 渡邊 裕, 浅見 宗明, 三石 憲英, 石川 惣一, "新世代のELID研削法の開発とその応用・実用:砥石に電極を用いない新ELID法と傾斜屈折率レンズ加工",機械技術, 53, 5 (2005) 64-68
- 99. 大森 整,林 偉民,渡邊 裕,森田 晋也,<u>上原 嘉宏</u>,鈴木 亨, "光学素子のELID鏡 面研削技術",光学素子加工技術研修会セッションII テキスト,(2005)
- **100**. 大森整,林偉民,<u>上原嘉宏</u>: "磁性流体研磨(MRF)の効果と適用",機械の研究59, No.4 (2007), 437-444
- **101**. <u>上原 嘉宏</u>, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 森田 晋也: "V-Cam対応卓上加工機における ノズル式ELID研削システム", 型技術者会議2007講演論集, 東京, (2007, 6) 236-237

・学術講演(口頭発表)

102. 大森 整,山形 豊,林 偉民,牧野内 昭武, 上原 嘉宏,浅見 宗明,牧本 良夫,石橋 浩之: "マイクロジェネレータによるELID研削システム",1999 年度精密工学会九州支 部沖縄地方学術講演会講演論文集,(1999,12)59-60

- 103. 大森 整,山形 豊,守安 精,加藤 照子,劉 長嶺,森田 晋也,樋口 俊郎,上原 嘉 <u>宏</u>,林 漢錫,林 偉民,牧野内 昭武: "ELID研削法の適用効果とシステム",2000 年 度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2000,3)334
- 104. 大森 整,山形 豊,林 偉民,牧野内 昭武,上原 嘉宏,伊藤 伸英,牧本 良夫,浅見 宗明,石橋 浩之: "マイクロジェネレータによるELID研削システム",2000 年度精密 工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2000,3)341
- 105. 上原 嘉宏, 大森 整, 山形 豊, 林 偉民: "高精度な金型加工を目的としたマイクロジェネレータにおけるELID研削システムの構築",型技術者会議 2000 講演論文集, (2000, 6) 224-225
- **106**. 大森 整, <u>上原 嘉宏</u>, 林 偉民, 新井 尚機, 野口 清隆: "マイクロ穴のバリ取り法", 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集, Vol. 3 (2000, 8) 529-530
- 107. 大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,<u>上原 嘉宏</u>,牧野内 昭武: "X線用CVD-SiCミラーの超精密ELID研削",2000 年度日本機械学会東北支部多賀城地方講演会講演論文集,(2000,9)123-124
- 108. 林 偉民, 大森 整, 山形 豊, 守安 精, 上原 嘉宏, 伊藤 伸英, 林 漢錫, 片平 和俊, 森田 晋也, 牧野内 昭武: "ELID研削における砥石のマイクロツルーイング法", 2000 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2000)講演論文集, (2000, 9) 129-132
- 109. 大森 整, 上原 嘉宏, 林 偉民, 伊藤 伸英, 中越 洋平, 浅見 宗明, 松澤 隆, 佐々木 哲夫: "ELIDマイクロファブリケーションシステムにおけるマイクロツールの開発", 2000 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2000)講演論文集, (2000, 9) 195-198
- 110. 大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,上原 嘉宏,牧野内 昭武: "CVD-SiCミラーの 超精密ELID研削",2000 年度日本機械学会第2回生産加工・工作機械部門講演会講演論 文集,(2000,11)105-106
- 111. <u>上原 嘉宏</u>, 大森 整, 山形 豊, 守安 精, 林 偉民, 森田 晋也: "マイクロELID研削 によるCVD-SiC非球面ミラーの製作--第2報ELIDを付与したツルーイングの効果", 2001 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2001, 3) 143
- 112. 大森 整, 上原 嘉宏, 守安 精,山形 豊,林 偉民,清水 智行,佐々木 哲夫,熊倉 賢一: "マイクロツール開発のためのELIDマイクロファブリケーションシステムー(第2 報)旋回電極式ELID研削システムの開発",2001 年度精密工学会春季大会学術講演会 講演論文集,(2001,3)240
- 113. 上原 嘉宏, 大森 整, 山形 豊, 林 偉民 浅見 宗明, 佐々木 哲夫, 清水 智行:
 "ELID研削用メタルレジンスティック砥石の開発",型技術者会議 2001 講演論文集, (2001, 6) 112-113
- 114. 林 偉民, 大森 整, 山形 豊, 守安 精, 上原 嘉宏, 片平和俊: "鋳鉄ボンド砥石の放 電ツルーイング技術",型技術者会議 2001 講演論文集, (2001, 6) 114-115

- 115. 上原 嘉宏,大森 整,守安 精,山形 豊,林 偉民,清水智行,熊倉 賢一: "マイク ロファブリケーションシステムによる小径ツールの開発(第2報:小径ツールの加工特性 について)",日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集, Vol. 3 (2001, 8) 281-282
- 116. 大森 整,伊藤 伸英,林 偉民,守安 精,片平 和俊, 上原 嘉宏,山形 豊,松澤 隆, 森田 晋也: "ELID加工統合加工システム "マイクロワークショップ"の構築",2001
 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2001)講演論文集,(2001,9)107-108
- 117. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 伊藤 伸英, 斉藤 考治, 佐々木 哲夫: "ELIDマイク ロファブリケ-ションシステムにおけるマイクロツールの開発---(第2報:マイクロツー ルの加工特性について)", 2001 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2001)講演論文集, (2001, 9) 133-138
- 118. 斉藤 考治,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,上原 嘉宏,三浦 隆寛: "テーブ ルトップ 4 軸加工機TRIDER-Xによるマイクロメカニカルファブリケーション---(第 2 報:光学素子の加工特性)",2001 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2001)講演論文 集,(2001,9)139-140
- 119. 大森 整,林 偉民,守安 精,山形 豊, 上原 嘉宏,森田 晋也,松澤 隆,伊藤 伸英:
 "ナノテクノロジーのためのELID研削技術",2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会 講演論文集,(2001,9)337-338
- 120. 大森 整, 戴 玉堂, 上原 嘉宏, 林 偉民, 鈴木 亨, 上野 嘉之, 山形 豊, 森田 晋也, 清水 裕彦, 海老塚 昇, 戎崎 俊一, 田代 英夫, 牧野内 昭武: "大型軽量化ミラ-, 特殊光学素子の超精密加工ならびに成形技術開発のための基礎研究", 理研シンポジ ウムテキスト「ものつくり情報技術統合化研究(第1回)」, (2001, 12) 129-135
- 121. 大森 整,山形 豊,上原 嘉宏,片平 和俊,林 偉民,森田 晋也,上野 嘉之,鈴木
 亨: "マイクロメカニカルファブリケーション",日本塑性加工学会マイクロ加工研究
 委員会第3回研究委員会(和光)「各種の手法による表面の微細加工へのアプローチ」,(2002,2)
- 122. 潘 燕,大森 整,上原 嘉宏,鈴木 亨,林 偉民,片平 和俊,吉川 研一,大井 豊: "卓上切削加工・計測機の開発とマイクロ卓上型射出成形機特性に関する研究",第3 回日韓合同マイクロ加工シンポジウム(和光)「マイクロファブリケーション研究の最 新動向」~ミリストラクチャー製造技術・マイクロファブリケーションからナノテクノ ロジー~~」,(2002,2)
- 123. 大森 整, 上原 嘉宏, 鈴木 亨, 片平 和俊, 林 偉民, 潘 燕, 佐々木 哲夫, 浅見 宗明, 吉川 研一, 三石 憲英,大井 豊: "デスクトップファブリケーションシステム/ツールの研究", 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2002, 3) 91
- 124. 郭 建強, 大森 整, 林 偉民, 守安 精, <u>上原 嘉宏</u>, 鈴木 亨: "Study on Mirror ELID Grinding of Ceramics and Metals", 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論 文集, (2002, 3) 534

- 125. 鈴木 亨,大森 整,上原 嘉宏,守安 精,戴 玉堂,山形 豊,林 偉民,田代 英夫, 戎崎 俊一,牧野内 昭武,横田 秀夫,鈴木 正治,阿部 俊一: "放物面ミラーの超精 密ELID研削",2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2002,3)537
- 126. 伊藤 伸英,大森 整,上原 嘉宏,林 偉民,潘 燕,大森 宮次郎,大井 豊: "ELID研 削における研削液供給方法に関する研究,第2報:小径工具への適用",2002 年度精 密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2002,3)539
- 127. 上原 嘉宏,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,三浦 隆寛,浅見 宗明,大井 豊, 潘 燕,石川 惣一,佐々木 哲夫: "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発,第2報: フルクローズドループ制御の効果",2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文 集,(2002,3)579
- 128. 上原 嘉宏,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,三浦 隆寛,阿部 勝幸,浅見 宗明,大井 豊,潘 燕,石川 惣一,佐々木 哲夫: "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発,第3報:単結晶ダイヤモンドツールを使用した微細形状加工の試み",2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2002,3)580
- 129. 潘 燕,佐々木 哲夫,大森 整,上原 嘉宏,林 偉民,山形 豊,鈴木 亨,浅見 宗明, 吉川 研一,大井 豊,: "超精密卓上型射出成形機の開発における基礎的研究",2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2002,3)581
- 130. 潘 燕, 佐々木 哲夫, 伊藤 伸英, 大森 整, 上原 嘉宏, 林 偉民, 大森 宮次郎, 大井 豊: "微小量研削液供給によるELID研削特性", 型技術者会議 2002 講演論文集, (2002, 6) 142-143
- 131. 大森 整, 片平 和俊, 林 偉民, <u>上原 嘉宏</u>, 鈴木 亨, 小茂鳥 潤: "ナノレベル表面 機能を実現する超精密金型のマイクロ研削技術",型技術者会議 2002 講演論文集, (2002, 6)
- 132. 上原 嘉宏, 大森 整, 山形 豊, 鈴木 亨, 佐々木哲夫, 潘 燕: "微細成形品に対応した金型製作のためのデスクトップマシンツールの開発",型技術者会議 2002 講演論文集, (2002, 6)
- 133. 浅見 宗明, 大森 整, 池 浩, 上原 嘉宏: "低粒度砥石のツル-イング技術に関する研究", 型技術者会議 2002 講演論文集, (2002, 6)
- 134. 上原 嘉宏, 大森 整, 守安 精, 林 偉民, 浅見 宗明, 大井 豊, 阿部 勝幸, 三浦 隆 寛, 潘 燕, 石川 惣一, 佐々木哲夫: "テーブルトップマシンツールにおける単結晶ダ イヤモンドツールを使用した微細加工の研究", 2002 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2002)講演論文集, (2002, 9) 193-194
- 135. 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,鈴木 亨,三浦 隆寛,浅見 宗明: "デスクトップマシンツールにおける微細砥粒砥石を使用したELID研削システムの開発",2002 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2002)講演論文集,(2002,9)197-202
- 136. 上原 嘉宏, 大森 整, 浅見 宗明, 池 浩, 三石 憲英: "ELID研削における砥石のマイ

クロツールイング 第二報 ブロンズボンドツルアー砥石によるマイクロツルーイング特性",2002 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2002)講演論文集,(2002,9)203-204

- 137. 上原 嘉宏,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,三浦隆寛,阿部勝幸,浅見宗明, 大井 豊,潘 燕,石川惣一,佐々木哲夫:"テーブルトップ超精密4軸加工機の開発 第 4報:単結晶ダイヤモンドツールを使用した微細形状加工の試みその2",2002年度精 密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2002,10)365
- 138. 上原 嘉宏,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,三浦隆寛,浅見宗明,大井 豊, 潘 燕,石川惣一,佐々木哲夫:"テーブルトップ超精密4軸加工機の開発 第5報:微 小砥粒砥石を使用した定圧テーブルの効果",2002年度精密工学会秋季大会学術講演会 講演論文集,(2002, 10)395
- 139. 上原 嘉宏,大森 整,山形 豊,守安 精,林 偉民,三浦隆寛,阿部勝幸,浅見宗明, 大井 豊,潘 燕,石川惣一,佐々木哲夫:"テーブルトップ超精密4軸加工機の開発 第 6報:単結晶ダイヤモンドツールを使用した微細形状加工の試みその3", 2003年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2003,3)278
- 140. 鈴木 亨,大森 整,上原 嘉宏,清水 智行,林 偉民,牧野内昭武,横田 秀夫,鈴木 正治,阿部 俊一:"放物面ミラーの超精密ELID研削(第2報)~砥石断面を有効に利用した加工手法の効果~",2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2003, 3) 265
- 141. <u>上原 嘉宏</u>, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 片平 和俊, 潘 燕, 佐々木哲夫:"ELID研削 における研削液供給方法に関する研究(第3報: 微細ピンの加工)", 2003 年度精密 工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2003, 3) 269
- 142. 清水 智行,大森 整,上原 嘉宏,鈴木 亨,林 偉民,上柳 喜一,若林 公宏,鈴木 貞 一,足立 幸男:"ソリッドイマ-ジョンミラ-の超精密ELID研削(第4報)~砥石断面 を有効に利用した超精密ELID研削の試み~",2003 年度精密工学会春季大会学術講演 会講演論文集,(2003,3)272
- 143. 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,武安 初一,三石 憲英,三浦 隆寛:"卓上型射出成形機における成形技術に関する研究(第2報:卓上化への問題点とのその試み)",2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2003,3)652
- 144. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 片平 和俊, 佐々木哲夫, 潘 燕: "ELID研削による異 形状マイクロコアピン加工",型技術者会議 2003 講演論文集, (2003, 6) 142-143
- 145. 鈴木 亨, 大森 整, 林 偉民, 戴 玉堂, 上原 嘉宏, 清水 智行, 牧野内昭武: "ELID研 削法によるZERODUR放物面ミラ-加工",型技術者会議 2003 講演論文集, (2003, 6) 142-143
- 146. 上原 嘉宏,大森 整,片平 和俊,林 偉民,渡邉 裕,清水 智行,三石 憲英,伊藤 伸英,佐々木哲夫: "ELIDマイクロファブリケーションシステムにおけるマイクロツールの開発(第2報:マイクロツールの評価について)",2003年度砥粒加工学会学術講演

会(ABTEC2003)講演論文集,(2003,9)31-36

- 147. 清水 智行,大森 整, 上原 嘉宏,林 偉民,浅見 宗明,佐々木哲夫,山本 幸治: "ELID マイクロファブリケ-ションシステムにおけるマイクロツールの開発(第3報:マイク ロツールの高能率加工について)",2003 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2003)講 演論文集,(2003,9)37-42
- 148. 上原 嘉宏, 今井 圭介, 清水 智行, 大森 整, 林 偉民, 浅見 宗明, 佐々木哲夫, 三浦 隆 寛, 山本 幸治: "デスクトップマシンツールにおけるCUP型微細砥粒砥石を使用した ELID研削システムの開発", 2003 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2003)講演論文 集, (2003, 9) 5-10
- 149. 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,清水 智行,三浦 隆寛,浅見宗明,大井 豊,今井圭介,佐々木哲夫:"テーブルトップ超精密4軸加工機の開発 第8報:微小砥粒砥石を使用した定圧テーブルの効果 その2",2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2003,10)198
- 150. 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,渡邉 裕,片平 和俊,浅見 宗明,大井 豊,今井 圭介,佐々木 哲夫: "ELID研削における研削液供給方法に関する研究-第4報:加工した微細ピンの評価-",2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2003,10) 199
- 151. 清水 智行, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 浅見 宗明, 大井 豊, 三石 憲英, 岡田 真行, 佐々木 哲夫: "ELID研削における研削液供給方法に関する研究-第5報:加工効 率の向上を目的とした微細ピン加工技術-", 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会 講演論文集, (2003, 10) 200
- 152. 浅見 宗明, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 清水 智行, 三浦 隆寛, 阿部 勝幸, 大井 豊, 今井 圭介, 佐々木 哲夫, "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発-第7報:単結 晶ダイヤモンドツールを使用した微細形状加工の試み その 4-", 2003 年度精密工学会 秋季大会学術講演会講演論文集, (2003, 10) 345
- 153. 岡田 真行,佐々木 哲夫,大森 整,上原 嘉宏,林 偉民,清水 智行,鈴木 亨,浅見 宗明,吉川 研一,大井 豊, "超精密卓上型射出成形機の開発にける基礎的研究-第3 報:光学素子を目的とした成形技術への試み-",2003 年度精密工学会秋季大会学術講 演会講演論文集,(2003, 10)346
- 154. 大森 整,林 偉民,片平 和俊, 上原 嘉宏,渡邉 裕,戴 玉堂,伊藤 伸英: "ELID研 削をベースにしたナノプレシジョンファブリケーションプロセスの開発",2004 年度精密 工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2004,3)173-174
- 155. 鈴木 亨,大森 整, 上原 嘉宏,林 偉民,上柳 喜一,若林 公宏,鈴木 貞一,足立 幸男: "ソリッドイマ-ジョンミラーの超精密ELID研削(第5報) ~表面粗さの向上による集光特性の向上~",2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2004,3) 177-178

- 156. 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,渡邉 裕,片平 和俊,浅見 宗明,大井 豊,今井 圭介,佐々木哲夫: "ELID研削における研削液供給方法に関する研究-第6報:加工に使用した微細ピンの評価-",2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2004,3)201-202
- 157. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 片平 和俊, 三石 憲英, 浅見 宗明, 大井 豊, 岡田 真行, 佐々木 哲夫, 山本 幸治: "ELID研削における研削液供給方法に関する研 究-第7報:加工効率の向上を目的とした微細ピン加工技術その2-", 2004 年度精密工 学会春季大会学術講演会講演論文集, (2004, 3) 203-204
- 158. 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,三浦 隆寛,浅見 宗明,大井 豊,今井 圭介,佐々木 哲夫:"テーブルトップ超精密4軸加工機の開発~第10報:超精密4軸加工機を使用 した鏡面加工におけるNC動作の追従性の検証実験",2004年度精密工学会春季大会学術 講演会講演論文集,(2004,3)205-206
- 159. 大森 整,林 偉民,上原 嘉宏,鈴木 亨,武安 初一,芦田 極,佐々木 哲夫,原田 奏 男,進藤 久宣,安藤 知明,鷲尾 政男,池上 恵蔵: "マイクロ圧縮成形システムによ る細密樹脂部品の新加工技術開発",2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文 集,(2004,3) 795-796
- 160. 浅見 宗明,大井豊,大森 整,上原 嘉宏,林 偉民,今井 圭介,佐々木 哲夫,三浦 隆寛,阿部 勝幸: "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発~第9報:単結晶ダイヤモ ンドツールを使用した微細形状加工の試み その4",2004年度精密工学会春季大会学術 講演会講演論文集,(2004,3)1087-1088
- 161. 岡田 真行,佐々木 哲夫,大森 整,上原 嘉宏,林 偉民,鈴木 亨,浅見 宗明,吉川 研一,大井 豊, "超精密卓上型射出成形機の開発にける基礎的研究-第3報:光学素子 を目的とした成形技術への試み その2-",2004年度精密工学会春季大会学術講演会講 演論文集,(2004,3)1089-1090
- 162. 大森 整,林 偉民,森田晋也,<u>上原 嘉宏</u>,渡邉 裕,片平和俊: "ナノプレシジョンELID 鏡面加工プロセスの構築",2004 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2004)講演論文集, (2004,9) 1-2
- 163. 浅見 宗明,三石 憲英, 上原 嘉宏, 上野 嘉之,石川 惣一,林 偉民,大森 整,三浦隆寛: "デスクトップマシンツールにおける電極レスELID研削システムの開発",2004 年度砥 粒加工学会学術講演会(ABTEC2004)講演論文集,(2004,9)3-4
- 164. 三石 憲英, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 石川 惣一, 三浦 隆寛: "デスクトップマシンツールにおける球面レンズ高能率ELID研削システムの開発", 2004 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2004)講演論文集, (2004, 9) 5-8
- 165. 石川 惣一, 上原 嘉宏, 渡邉 裕, 片平 和俊, 林 偉民, 大森 整, 三石 憲英, 山本幸治: "ELID マイクロファブリケーションシステムにおけるマイクロツールの開発 (第3報:マイク ロツールの高能率加工について)", 2004 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2004)講

演論文集, (2004, 9) 9-14

- 166. 森田 晋也,鈴木 亨,劉慶,林 偉民,渡邉 裕,<u>上原 嘉宏</u>,大森 整: "小径レンズ金型の超精密ELIDマイクロ研削加工",2004 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2004)講演論文集,(2004,9)31-32
- 167. 尹 韶輝, 森田 晋也, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 舞原 俊憲, 持田 大作, 岩室 史英:
 "ELID研削による非軸対称非球面特殊シュミットレンズの加工", 2004 年度砥粒加工 学会学術講演会(ABTEC2004)講演論文集, (2004, 9) 35-36
- 168. 大森 整,鈴木 亨,森田晋也,林 偉民,渡邉 裕, 上原 嘉宏: "VCAD/VCAMを利用した非 球面金型加工の試み",2004 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2004)講演論文集, (2004,9)295-296
- 169. 上原 嘉宏, 大森 整, 石川 惣一, 片平 和俊, 林 偉民, 渡邉 裕, 三石 憲英, 伊藤伸英, 山本幸治: "ELIDマイクロファブリケ-ションシステムにおけるマイクロツ-ルの開発 (第 4報:マイクロツ-ルの切削特性評価)", 2004 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2004) 講演論文集, (2004, 9) 317-322
- 170. 大森 整,林 偉民,郭奏洙,李 龍哲, 上原 嘉宏, 片平 和俊, 安斎正 博: "新しいフ ァインファブリケ-ションプロセスの研究開発", 2004 年度精密工学会秋季大会学術講 演会講演論文集, (2004, 10) 753-754
- 171.林 偉民,大森 整,鈴木 亨,森田 晋也,<u>上原 嘉宏</u>,上野 嘉之: "ELID研削面の粗さ に及ぼすポリッシング精度",2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2004, 10) 755-756
- 172. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邊 裕, 片平 和俊, 三石 憲英, 石川 惣一, 山本 幸治: "ELID研削における研削液供給方法に関する研究(第8報:加工に使用した微細ピンの評価 その2)", 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2004, 10) 761-762
- 173. 石川 惣一, 三石 憲英, <u>上原 嘉宏</u>, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 片平 和俊, 山本 幸 治, 伊藤 伸英: "ELID研削における研削液供給方法に関する研究(第9報:高能率研 削加工におけるCYLIN円筒研削方法特性)", 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講 演論文集, (2004, 10) 763-764
- 174. 浅見 宗明,三石 憲英,石川 惣一,上原 嘉宏,上野 嘉之,林 偉民,大森 整,三浦 隆寛: "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発 第11報:小径砥石におけるELIDⅢで の研削液濃度変化による加工面評価)",2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演 論文集,(2004,10)765-766
- 175. 三石 憲英,石川 惣一, 上原 嘉宏, 大森 整,林 偉民,三浦 隆寛: "テーブルトップ 超精密4軸加工機の開発 第12報 カーブジェネレータ方式による球面レンズ加工の試 み)",2004年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2004, 10)767-768
- 176. 尹 韶輝, 森田 晋也, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 舞原俊典, 持田 大作, 岩室史

英: "大型非軸対称非球面レンズのELID研削加工", 2004 年度精密工学会秋季大会学術 講演会講演論文集, (2004, 10) 783-784

- 177. 郭 泰洙, 鈴木 亨, 上原 嘉宏, 林 偉民, 大森 整, 牧野内 昭武, 金井茂: "射出成形 光学レンズのシミュレーション及び光学性能の実験的検証", 2004 年度精密工学会秋季 大会学術講演会講演論文集, (2004, 10) 956-960
- 178. 林 偉民,大森 整,鈴木 亨,森田晋 也,<u>上原 嘉宏</u>,上野 嘉之: "ELID研削面の超精密ポ リッシングの検討",日本機械学会 [No04-3] 第5回生産加工・工作機械部門講演会講演 論文集,(2004, 11) 323-324
- 179. 上原 嘉宏,大森 整,林 偉民,渡邉 裕,石川惣一,三石憲英: "デスクトップマシンツールによる微細加工の試み",日本機械学会 [No04-3] 第5回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集,(2004,11)345-346
- 180. 大森 整,林 偉民,片平 和俊,<u>上原 嘉宏</u>: "ナノ表面研削, プロセシングの可能性", 2005 年 度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2005, 3) 895-896
- 181. 前浜 文人, 片平 和俊, 水谷 正義, 小茂鳥 潤, 大森 整, 上原 嘉宏, 岩木 正哉: "ステンレス 鋼の高温酸化挙動に及ぼすELID研削の影響", 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講 演論文集, (2005, 3) 905-906
- 182. 石川 惣一, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 片平和俊, 三石 憲英, 伊藤 伸英, 山本 幸治: "ELID搭載テーブルトップ超精密加工機の開発 -第 1 報:マイクロツールの開発 その 1-", 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 911-912
- 183. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 片平 和俊, 三石 憲英, 石川 惣一, 山本 幸治: "ELID 搭載テーブルトップ超精密加工機の開発 -第2報:マイクロツールの開発 その2- "2005 年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 913-914
- 184. 浅見 宗明, 三石 憲英, 上原 嘉宏, 上野 嘉之), 石川 惣一, 林 偉民, 大森 整, 三浦 隆寛: " テーブルトップ超精密 4 軸加工機の開発 -第 13 報:小径砥石におけるELID Ⅲでの研削液濃 度変化による加工面評価 その 2-", 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 913-914
- 185. 三石 憲英, 上原 嘉宏, 石川 惣一, 林 偉民, 大森 整, 三浦 隆寛: "テーブルトップ超精密 4 軸加工機の開発 -第 14 報 カーブジェネレータ方式による球面レンズ加工の試み その 2-", 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 917-918
- 186. 鈴木 亨, 森田 晋也, 林 偉民, 渡邊 裕, 上原 嘉宏, 劉 慶, 大森 整: "超精密ELID研削による マイクロ研削加工", 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 923-924
- 187. 村上 淳, 平井 聖児, 鈴木 亨, 大森 整, 林 偉民, 上原 嘉宏, 渡邉 裕, 尹 昭輝: "超精密ELID 研削による単結晶Si球面ミラーの加工", 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文 集, (2005, 3) 925-926
- 188. 尹 韶輝,林 偉民,大森 整, 上原 嘉宏, 浅見 宗明: "ELID研削とMRF磁性流体研磨を併用す

る超精密複合プロセスの開発", 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 1251-1252

- 189. 林 偉民, 尹 韶輝, 大森 整, 上原 嘉宏, 鈴木 亨, 村上 淳: "ELID研削とMRF磁性流体研磨を 併用した超精密複合加工プロセスの開発 -第1報:シリコンレーザー反射ミラーの高精度, 高品 位加工- "2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 1253-1254
- **190**. 林 偉民, 劉 慶, 森田 晋也, <u>上原 嘉宏</u>, 大森 整: "光学樹脂材料の超精密切削加工の試み", 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005, 3) 1273-1274
- **191.** 大森 整,林 偉民,<u>上原 嘉宏</u>,森田 晋也,劉 慶,浅見 宗明:"超精密切削によるX線光学素 子の開発",2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,(2005,3)1287-1288
- 192. 片平 和俊, 大森 整, 岩木 正哉, 上原 嘉宏, 林 偉民, 渡邊 裕, 小茂鳥 潤, 水谷 正義, 前濱 文人, 秋濃 裕香子, 西口 晃, 進藤 久宜, 島崎 景正: "DLC膜と金型の密 着性に及ぼすELID研削の効果", 理研シンポジウム「第7回トライボコ-ティングの現状 と将来」: 21世紀科学技術者の務め, (2005, 3)
- 193. 成瀬 哲也, 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邊 裕, 片平 和俊, 伊藤 伸英, 根本 昭彦, 三石 憲英, 山本 幸治: "ナノ表面を実現する極小径ツールの先端ファブリケー ション技術の開発", 理研シンポジウム「第16回マイクロファブリケーション研究の最 新動向」: 新マイクロ加工技術の実用事例, (2005, 5) 68-72
- **194.** 林 偉民, 大森 整, 渡邊 裕, <u>上原 嘉宏</u>, 尹 韶輝, "磁性流体研磨によるナノ精度表面の創成", ナノ学会第3回大会, (2005, 5)
- 195. 大森 整,林 偉民,片平 和俊,渡邊 裕,鈴木 亨,上原 嘉宏,"ナノCAMによるナノ 精度ものつくりプロセスの開発",ナノ学会第3回大会,(2005,5)
- **196.** 林 偉民, 大森 整, 鈴木 亨, 森田 晋也, <u>上原 嘉宏</u>, 渡邊 裕: "3DCAMの開発とその 加工効果", 理研シンポジウム「ものつくり情報技術統合化研究(第5回), (2005, 6)
- 197. 上原 嘉宏, 森田 晋也, 渡邊 裕, 鈴木 亨, 林 偉民, 大森 整: "卓上加工機による 複雑形状加工物の加工", 理研シンポジウム「ものつくり情報技術統合化研究(第5回), (2005, 6)
- **198**. 鈴木 亨, 大森 整, 林 偉民, 渡邊 裕, <u>上原 嘉宏</u>, 牧野内 昭武: "マイクロレンズ アレイ金型の超精密切削加工", 型技術者会議2005講演論集, (2005, 6), 172-173
- 199. 大森 整,林 偉民,鈴木 亨,渡邊 裕,<u>上原 嘉宏</u>,牧野内 昭武:"小径レンズ金型の 超精密ELID研削加工",型技術者会議2005講演論集,(2005,6)194-195
- 200. 林 偉民, 大森 整, 鈴木 亨, 渡邊 裕, 上原 嘉宏, 牧野内 昭武: "ナノCAMを利用したELID研削によるF-θレンズ金型加工の試み",型技術者会議2005講演論集, (2005, 6) 196-197
- 201. 林 偉民, 渡邊 裕, 大森 整, 上原 嘉宏, 鈴木 亨, 牧野内 昭武: "ELID研削法による GRINレンズの超精密非球面加工",型技術者会議2005講演論集,(2005, 6) 198-199
 202. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邊 裕: "小径レンズ金型のための電極レスELID研

削システム",型技術者会議2005講演論集,(2005,6)200-201

- 203. 尹 韶輝,林 偉民,大森 整,上原 嘉宏,浅見宗明,劉 慶,鈴木 亨,渡邉 裕,森田 晋也:
 "ELID 研削とMRF 磁性流体研磨を併用した超精密複合加工プロセスの開発 -第4報:シリコンウエハのMRF特性-",2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2005,9)261-262
- 204. 大森 整,林 偉民,鈴木 亨,渡邉 裕,上原 嘉宏, 尹 韶輝,浅見宗明,三石憲英: "IT援用によるナノ鏡面研削のシステム化",2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2005,9) 825-826
- 205. 郭 建強,大森 整,上原 嘉宏,浅見宗明,渡邉 裕,林 偉民,安達智宏,清水裕彦: "Key Technology of ELID Grinding for Neutron Fresnel Lens with Forming", 2005 年度精密 工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2005, 9) 833-834
- 206. 三石憲英, 上原 嘉宏, 成瀬哲也, 上野嘉之, 林 偉民, 大森 整, 三浦隆寛, 浅見宗明: "デスクト ップマシンツールにおけるノズル方式電極レスELID研削システムの開発" 2005 年度精密工 学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005, 9) 835-836
- 207. 岡田 真行,山本 幸治,上原 嘉宏,成瀬 哲也,渡邉 裕,林 偉民,大森 整,三石 憲英: "ELID 研削システム搭載卓上型平面研削加工機の開発", 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会 講演論文集, (2005, 9) 841-842
- 208. 三石 憲英, 上原 嘉宏, 成瀬 哲也, 林 偉民, 大森 整, 三浦 隆寛: "テーブルトップ超精密4軸 加工機の開発 -第2報 球面レンズ高能率ELID研削システムの試み-", 2005 年度精密工学会 秋季大会学術講演会講演論文集, (2005, 9) 843-844
- 209. 上原 嘉宏, 成瀬 哲也, 三石 憲英, 厨川 常元, 林 偉民, 大森 整, 三浦隆寛: "テーブルトップ 超精密4軸加工機の開発 -第15報 非球面ガラスレンズの試み-", 2005年度精密工学会秋 季大会学術講演会講演論文集, (2005, 9)845-846
- 210. 林 偉民, 尹 韶輝, 大森 整, 鈴木 亨, 渡邉 裕, 上原 嘉宏: "ELID 研削とMRF 磁性流体研磨を 併用した超精密複合加工プロセスの開発 -第3報:レーザー反射用CVD-SiCミラーの高精度, 高 品位加工-", 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005, 9) 849-850
- 211. 片平和俊,水谷正義,齋藤智之,小茂鳥 潤,上原 嘉宏,大森 整: "ELID研削,高温酸化複合プロセスによる新しい表面改質法の開発", 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論 文集,(2005,9)851-852
- 212. 成瀬 哲也, 上原 嘉弘, 渡邉 裕, 片平 和俊, 林 偉民, 大森 整, 三石 憲英, 伊藤 伸英, 山本幸治: "ELID搭載テーブルトップ超精密加工機の開発 -第3報 マイクロツールの開発 その3-", 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005, 9) 847-848
- **213**. 大森 整,林 偉民, 上原 嘉宏, 片平 和俊,伊藤 伸英: "ELID研削の新しいアプリケ-ション",2005 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集,(2005,9)267-268
- 214. 大森 整,林 偉民, 上原 嘉宏, 片平 和俊,伊藤 伸英: "ELID研削システム搭載デスクト ップ",2005 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集,(2005,9)267-268

- 215. 齋藤 智之,水谷 正義,小茂鳥 潤,片平 和俊,大森 整,上原 嘉宏,山本 幸治,岡田 真行:"表面改質加工における拡散層形成に及ぼす加工温度の影響",2005 年度砥粒加工 学会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集,(2005,9)269-270
- 216. 片平 和俊,水谷 正義,齋藤 智之,小茂鳥 潤,上原 嘉宏,大森 整: "耐食金属材料の高温酸化挙動に及ぼす表面改質加工の効果",2005 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2005)講演論文集,(2005,9)273-278
- 217. 伊藤 伸英, 根本 昭彦, 加藤 照子, 大森 整, 渡邊 裕, 上原 嘉宏, 成瀬 哲也, 三石 憲英, 吉川 研一: "SPSによるELID研削用砥石の試作", 2005 年度砥粒加工学会学術講 演会(ABTEC2005)講演論文集, (2005, 9) 279-280
- 218. 林 偉民, 尹 韶輝, 大森 整, 上原 嘉宏, 鈴木 亨: "ELID研削と磁性流体研磨(MRF)
 を相乗した超精密仕上げ加工プロセスの研究(第2報:シリコンミラ-加工の試み)"2005
 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集, (2005, 9) 291-292
- 219. 尹 韶輝,林 偉民,大森 整, 上原 嘉宏,鈴木 亨,浅見 宗明: "ELID研削と磁性流体研磨(MRF)を相乗した超精密仕上げ加工プロセスの研究(第3報:CVD-SiC加工への試み)",
 2005 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集,(2005,9) 293-296
- 220. 浅見 宗明, 三石 憲英, 上原 嘉宏, 上野 嘉之, 成瀬 哲也, 林 偉民, 大森 整, 三浦 隆 寛, "デスクトップマシンツールにおけるノズル方式電極レスELID研削システムの開 発", 2005 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集, (2005, 9), 297-298
- 221. 岡田 真行,山本 幸治,大森 整,上原 嘉宏,成瀬 哲也,三石 憲英,吉川 研ー: "ELID研削システム搭載卓上型平面研削加工機の開発(第5報:マイクロツールの高能率加工)" 2005 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2005)講演論文集,(2005,9) 299-300
- 222. 上原 嘉宏, 三石 憲英, 成瀬 哲也, 大森 整, 厨川 常元, 林 偉民, 三浦 隆
 寛: "ELID研削システム搭載デスクトップマシンツールにおける非球面レンズの開発"
 2005 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2005) 講演論文集, (2005, 9) 303-304
- 223. 成瀬 哲也, 上原 嘉宏, 渡邊 裕, 片平 和俊, 林 偉民, 大森 整, 三石 憲英, 伊藤 伸英, 山本 幸治: "ELIDマイクロファブリケ-ションシステムにおけるマイクロツールの開発(第5報:マイクロツールの高能率加工", 2005年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2005)講演論文集, (2005, 9) 307-312
- 224. 林 偉民, 大森 整, 加藤 照子, 鈴木 亨, 渡邊 裕, 上野 嘉之, <u>上原 嘉宏</u>, 大澤 英 二, "ナノダイヤモンドコロイドの研磨特性の検討", 2005 年度砥粒加工学会学術講 演会(ABTEC2005)講演論文集, (2005, 9) 67-68
- **225**. 大森 整, <u>上原 嘉宏</u>, 三浦 隆寛, 岩満 直志, "卓上サッシ加工機:「SASH-IN (刷新)!」 開発と実用化",型技術ワークショップ2005 in 中部 講演論文集, (2005, 11)
- 226. 上原 嘉宏, 成瀬 哲也, 上野 嘉之, 林 偉民, 大森 整, 浅見宗明, 三石憲英, 三浦隆 寛: "テーブルトップ超精密4軸加工機の開発 第18報: ノズル方式電極レスELIDシステ

ムの実用化の試み",2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,野田,(2006, 3) 411-412

- 227. 成瀬 哲也, 上原 嘉宏, 渡邉 裕, 片平 和俊, 林 偉民, 大森 整, 三石 憲英, 伊藤伸 英, 山本幸治: "ELID搭載テーブルトップ超精密加工機の開発 -第4報:機上計測による マイクロツールの高精度化の試み-", 2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論 文集, 野田, (2006, 3) 421-422
- 228. 林 偉民, 大森 整, 鈴木 亨, <u>上原 嘉宏</u>, 渡邉 裕, 森田晋也, 井出雅之: "V-CAMによ る自由曲面仕上げ加工効果", 2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 野田, (2006, 3) 419-420
- 229. 鈴木 亨,井出雅之,平井聖児,森田晋也,林 偉民,渡邉 裕,<u>上原 嘉宏</u>,成瀬哲也, 大森 整: "CVD-SiC球面ミラ-のELID研削と仕上げ加工法の検討", 2006年度精密工学 会春季大会学術講演会講演論文集, 野田, (2006, 3) 413-414
- 230. 大森 整,林 偉民,上原 嘉宏,片平和俊,成瀬哲也,鈴木 亨,渡邉 裕,加藤照子, 上野嘉之,浅見宗明,三石憲英,岡田真行,小茂鳥 潤,水谷正義,秋濃裕香子:"ナ ノ表面研削/ELID研削における新プロセステクノロジー", 2006年度精密工学会春 季大会学術講演会講演論文集,野田,(2006,3)397-398
- 231. 上原 嘉宏, 浅見宗明, 三石憲英, 成瀬哲也, 上野嘉之, 林 偉民, 大森 整, 三浦隆寛: "デスクトップマシンツールにおけるノズル方式電極レスELID研削システムの開発 第 2報:ノズル方式の効果の検証", 2006年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2006)講演論 文集, 横須賀, (2006, 8) 91-92
- 232. 成瀬 哲也, 上原 嘉宏, 渡邉 裕, 片平 和俊, 林 偉民, 大森 整, 三石憲英, 三浦隆 寛: "ELIDマイクロファブリケ-ションシステムにおけるマイクロツ-ルの開発-第六 報:機上測定装置によるマイクロツ-ルの高精度化の試み", 2006年度砥粒加工学会学 術講演会(ABTEC2006)講演論文集, 横須賀, (2006, 8) 93-94
- 233. 林 偉民,渡邉 裕,森田 晋也,上原 嘉宏,大森 整: "V-CAMの開発及びそのものつくり加工への応用-第二報:V-CAMによる自由形状曲面の加工効果",2006年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2006)講演論文集,横須賀,(2006,8)81-82
- 234. 林 偉民,渡邉 裕,森田 晋也,上原 嘉宏,大森 整: "V-CAMの開発及びそのものつくり加工への応用-第一報:V-CAM及びナノ精度V-CAMの開発-", 2006年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2006)講演論文集, 横須賀,(2006,8)77-78
- 235. 林 偉民,渡邉 裕,森田 晋也,上原 嘉宏,大森 整,牧野内昭武: "VCADものつくり プロセスのためのV-CAM開発", 2006年度精密工学会秋季大会学術講演会, 宇都宮, (2006,9) 395-396
- 236. 大森 整,林 偉民,片平 和俊, 上原 嘉宏, 渡邉 裕,森田 晋也,加藤 照子,上野 嘉 之,水谷正義,伊藤伸英,松澤隆: "ナノ研削と量産加工に対応するELID 法の原理お よび応用の拡大", 2006年度精密工学会秋季大会学術講演会, 宇都宮, (2006,

9)387-388

- 237. 上原 嘉宏,林 偉民,片平 和俊,三石 憲英,大森 整,渡邉 裕,成瀬 哲也:"デス クトップ研削システムのための新しいELID研削技術",日本機械学会2006年度年次大会 ワークショップ講演論文集, 熊本, (2006,9)25-26
- 238. 惠藤 浩朗,大森 整,林 偉民,渡邉 裕,上原 嘉宏,森田 晋也:"不均質構造体の変 形シミュレーションとその超精密加工",日本機械学会2006年度年次大会ワークショッ プ講演論文集,熊本,(2006,9)
- 239. 大森 整,林 偉民, 上原 嘉宏, 森田 晋也, 渡邉 裕, 惠藤 浩朗, 片平 和俊, 水谷 正義: "V-Camファブリケ-ションシステムが拓く新しい超精密・超精緻加工", 日本機械 学会2006年度年次大会ワ-クショップ講演論文集, 熊本, (2006, 9)
- 240. 大森 整, 上原 嘉宏, 林 偉民, 渡邉 裕, 片平 和俊, 成瀬 哲也, 三石 憲英: "普及版セル型ELID鏡面研削盤の開発", 日本機械学会2006年度年次大会講演論文集, 熊本, (2006, 9) 27-28
- 241. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 片平 和俊, 成瀬 哲也, 三石 憲英: "デス クトップ研削システムのための新しいELID研削技術", 日本機械学会2006年度年次大 会講演論文集, 熊本, (2006, 9) 25-26
- 242. 大森 整, 成瀬 哲也, 上原 嘉宏, 渡邉 裕, 片平 和俊, 林 偉民, 三石憲英: "ELID研 削システム搭載卓上型マイクロツール加工システムの開発", 日本機械学会2006年度年 次大会講演論文集, 熊本, (2006, 9) 21-22
- 243. 林 偉民,渡邉 裕,上原 嘉宏,森田 晋也,大森 整,伊藤 伸英:"複合・連携加工プロセスによる光学素子の超精密・高品位加工",2006年度茨城講演会[日本機械学会関東支部/精密工学会]講演論文集,日立,(2006,9)
- 244. <u>上原 嘉宏</u>, 森田 晋也, 渡邉 裕, 惠藤 浩朗, 林 偉民, 大森 整:" V-Cam専用テーブル トップ加工機の開発", 理研シンポジウム「VCADシステム研究2006」, 和光, (2006, 10) 168.
- 245. 惠藤 浩朗, 渡邉 裕, 上原 嘉宏, 森田 晋也, 林 偉民, 大森 整:"不均質構造成形金型へのVCADシステムの応用",理研シンポジウム「VCADシステム研究 2006」,和光, (2006, 10) 166
- 246. 惠藤浩朗, 渡邉 裕, 上原 嘉宏, 森田晋也, 林 偉民, 大森 整:"不均質構造成形金型
 へのVCADシステムの応用", 理研シンポジウム「VCADシステム研究2006」, 和光, (2006, 10) 166
- 247. 大森 整, 上原 嘉宏, 林 偉民, 渡邉裕, 片平和俊, 成瀬 哲也, 三石 憲英: "デスクトップ研削システムのための新しいELID研削技術の開発", 日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会2006講演論文集, 葉山, (2006, 11).
- 248. 林偉民,渡邉裕,<u>上原嘉宏</u>,森田晋也,大森整: "ELID 研削と磁性流体研磨(MRF) 連携加工プロセスの効果", 日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会2006

講演論文集, 葉山, (2006, 11)

- 249. 大森 整,水谷 正義,片平 和俊,成瀬 哲也,小野 照子,上原 嘉宏,渡邉 裕,林 偉 民,森田 晋也,安藤 嘉珠,伊藤 伸英,小茂 鳥潤,浅見 宗明,三石 憲英:"人工物 と自然物とをつなぐ高機能融合型加工とその応用",2007年度精密工学会春季大会学術 講演会講演論文集,東京,(2007,3) 361-362
- 250. 猪谷 宜彦,三島 健稔,渡邉 裕,大森 整,林 偉民,上原 嘉宏,森田 晋也,惠藤 浩 朗,牧野内 昭武: "屈折率傾斜 (GRIN) レンズの超精密非球面ELID研削加工と光学シ ミュレーション",2007年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集,東京,(2007,3) 367-368
- 251. 上原 嘉宏, 成瀬 哲也, 上野 嘉之, 林 偉民, 渡邉 裕, 大森 整, 三石憲英, 三浦隆 寛: "ノズル方式電極レスELID研削システムの実用化の試み", 2007精密工学会春季大 会学術講演会講演論文集, 東京, (2007, 3) 385-386
- **252**. 上原 嘉宏, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 森田 晋也: "V-Cam対応卓上加工機における ノズル式ELID研削システム",型技術者会議2007講演論集, 東京, (2007, 6) 236-237
- 253. 渡邉 裕, 上原 嘉宏, 林 偉民, 水谷 正義, 片平 和俊, 加藤 照子, 郭 建強, 大森 整, 田島琢二, 岡本友孝, 大野修平, 仁平正三: "マイクロハードディスク用超精密フラット・チャンファリングシステムの研究開発", 日本機械学会2007年度年次大会講演論文 集, 大阪, (2007, 9) 283-284
- 254. <u>上原 嘉宏</u>, 大森 整, 林 偉民, 渡邉 裕, 成瀬 哲也, 三石憲英, 浅見宗明, 牧野内昭 武: "V-Cam専用卓上加工機のためのノズル式ELID研削システムの開発", 日本機械学会 2007年度年次大会講演論文集, 大阪, (2007, 9) 28-282
- 255. 上原 嘉宏, 森田 晋也, 水谷 正義, 渡邉 裕, 林偉 民, 大森 整, 大竹 豊, 加瀬 究, 三石 憲英, 高橋 豊, 石田 智, 小 泉仁, 三村 秀和, 山内和人, 金井崇: "XFEL用Si ミラーの鏡面加工の研究 -第一報: V-Camを援用した粗さ改善手法の検討-", 2007精密 工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 旭川, (2007, 9) 285-286
- 256. 森田 晋也,高橋 豊,上原 嘉宏,渡邉 裕,大森 整,古坂 道弘,鎌田久 仁彦,広田 克也,池田 一昭,大竹 豊,林 偉民,加瀬 究,金井 崇:"中性子ミラ-開発技術の研 究-第1報: V-Camを援用した評価手法の考察-",2007精密工学会秋季大会学術講演会 講演論文集,旭川,(2007,9)287-288
- 257. 渡邉 裕, 吉田 香織, 平井 聖児, 林 偉民, <u>上原 嘉宏</u>, 片平 和俊, 大森 整, 郭 泰 洙: "ガラスレンズプレス用金型の超精密研削加工", 2007精密工学会秋季大会学術講 演会講演論文集, 旭川, (2007, 9) 293-294
- **258**. Guo Jiianqiang, 大森 整, 渡邉 裕, <u>上原 嘉宏</u>, 浅見 宗明: "パイレックスガラスELID 研削の研究" 2007精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 旭川, (2007, 9) 283-284
- 259. 上原 嘉宏, 渡邉 裕, 林 偉民, 森田 晋也, 片平 和俊, 成瀬哲也, 大森整, 三石憲英, 井出雅之, 三浦隆寛: "V-Cam援用卓上加工機のためのイオンショットドレッシング研

削システムの開発",2007年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2007)講演論文集,東京, (2007,9)223-224

・特許申請

- 発明者:大森整,<u>上原嘉宏</u>,発明の名称:微細形状加工用ELID研削装置,出願番号: 特願 2000-184259,出願日:平成12年6月20日,公開番号:特開 2002-1657,公開日:平成14年1月8日
- 2. 発明者:大森 整, 上原 嘉宏, 発明の名称:微細形状加工用ELID研削装置, 出願番号: 韓国特許出願番号 10-2001-0033469, 出願日:平成13年6月14日
- 発明者:大森 整, 上原 嘉宏, 発明の名称:微小溝ELID研削装置及び方法,出願番号: 特願 2000-184295,出願日:平成12年6月20日,公開番号:特開 2002-1658,公開日:平成14年1月8日
- 4.発明者:大森 整, 上原 嘉宏, 片平和俊, 森田 晋也, 山形 豊, 発明の名称:非球面 セグメントの加工装置及び方法, 出願番号:特願 2000-396445, 出願日:平成12年1 2月27日, 公開番号:特開 2002-192432, 公開日:平成14年7月10日
- 5.発明者:大森 整,山形 豊,守安 精,上原 嘉宏,辻川 茂男,篠原 正,浅見 宗明, 発明の名称:ACMセンサとその製造方法,出願番号:特願 2000-11147,出願日:平成1 2年1月20日,公開番号:特開 2001-201451,公開日:平成13年7月27日
- 6.発明者:大森 整, 上原 嘉宏, 吉川研一, 三浦隆寛, 発明の名称:細密部品の製造方法および装置,出願番号:特願 2002-225264,出願日:平成14年8月1日,公開番号:
 特開 2004-66486,公開日:平成16年3月4日
- 7.発明者:大森 整, 上原 嘉宏, 三石憲英, 発明の名称:電解ドレッシング用自在電極 とこれを用いた電解ドレッシング方法,出願番号:特願 2003-322948
- 8.発明者:大森 整, 上原 嘉宏, 片平 和俊, 浅見 宗明, 三石 憲英, 石川 惣一, 発明の名称:マイクロツール研削装置及び方法, 特開 2006-175528, 公開日:平成18年7月6日.
- 9.発明者:大森 整,上原 嘉宏,林 偉民,武安 初一,鷲尾 政男,池上 恵蔵,東海林 武弥,安藤 知明,白滝 之博,発明の名称:マイクロ成形加工装置及び方法,出願番 号:特願 2004-302356,出願日:平成16年10月18日
- 10.発明者:大森整,上原嘉宏,林偉民,武安初一,鷲尾政男,池上恵蔵,東海林武弥,安藤知明,白滝之博,発明の名称:マイクロ成形加工装置及び方法,独国特許出願番号:112005002554.3,出願日:平成17年10月18日,公開番号: 112005002554.3
- 発明者:大森 整, 上原 嘉宏,林 偉民,武安 初一,鷲尾 政男,池上 恵蔵,東海 林 武弥,安藤 知明,白滝 之博,発明の名称:マイクロ成形加工装置及び方法,米

国特許出願番号:11/577214,出願日:平成17年10月18日

- 12.発明者:大森整,上原嘉宏,林偉民,武安初一,鷲尾政男,池上恵蔵,東海林武 弥,安藤知明,白滝之博,発明の名称:マイクロ成形加工装置及び方法,国際公開 特許出願番号:JP2005/019100,出願日:平成17年10月18日,公開番号: Wo/2006/043537A1
- 13.発明者:大森整,上原嘉宏,三石憲英,石川惣一,山本幸治,発明の名称:ノズル式ELID研削方法及び装置,特開2006-159369,公開日:平成18年6月22日
- 14.発明者:大森 整,上原 嘉宏,三石 憲英,石川 惣一,山本 幸治,発明の名称:ノズル式ELID研削方法及び装置,独国特許出願番号:102005058934,出願日:平成17年12月9日,公開番号:DE102005058934A1
- 15.発明者:大森 整,上原 嘉宏,三石 憲英,石川 惣一,山本 幸治,発明の名称:ノズル式ELID研削方法及び装置,米国特許出願番号:11/297437,出願日:平成17年 12月9日,公開番号:US2006/0124473A1
- 16.発明者:大森 整,渡邉 裕,森田 晋也,上原 嘉宏,林 偉民,片平 和俊,発明の 名称:微小力測定装置,微小力測定方法及び微小表面形状測定プローブ,出願番号: 2005-349468,出願日:平成17年12月2日,公開番号:2007-155440

受賞

1.2004年度精密工学会春季大会学術講演会ベストプレゼンテーション賞;<u>上原 嘉宏</u>:ELID 研削における研削液供給方法に関する研究-第6報:加工に使用した微細ピンの評価-,(社) 精密工学会,(2004,3)

2.第16回型技術協会賞「奨励賞」 共同受賞;渡邉 裕,大森 整,林 偉民,森田晋也,
 上原 嘉宏: "機上計測用レーザープローブの開発およびその性能評価",型技術協会, (2006,
 6)

299