
多自由度同期振動を用いた
高自由度・三次元テクスチャの製作

研究課題番号：15360073

平成 15 年度～平成 17 年度科学研究費補助金
(基盤研究(B) (2))
研究成果報告書

平成 18 年 3 月

研究代表者 諸貫 信行
首都大学東京 システムデザイン学部 教授

研究題目 多自由度同期振動を用いた高自由度・三次元テクスチャの製作

研究組織

研究代表者： 諸貫 信行（首都大学東京システムデザイン学部・教授）
研究分担者： 楊 明（首都大学東京システムデザイン学部・助教授）
吉村 卓也（首都大学東京都市教養学部・助教授）
角田 陽（首都大学東京システムデザイン学部・助手）
金子 新（首都大学東京システムデザイン学部・助手）

交付決定額

	直接経費	間接経費	合計
平成 15 年度	8,000,000	0	8,000,000
平成 16 年度	3,100,000	0	3,100,000
平成 17 年度	3,100,000	0	3,100,000
総 計	14,200,000	0	14,200,000

成果発表

（１）学会誌等

1. N. Moronuki, F. Yoshida, Y. Sato, and A. Kaneko, Abrasive Micromachining with a Multi-Axes Vibration Tool, Key Engineering Materials, Vol.257-258, 2004, pp.447-452.
2. N. Moronuki, Y. Saito, A. Kaneko Vibration Micromachining of Low-Melting-Temperature Glass, International Journal of Manufacturing Technology and Management, Inderscience, (to be published).

（２）口頭発表

1. 齋藤泰則, 諸貫信行, 金子 新, 多軸振動工具の軌跡転写による表面微細周期構造の製作, 精密工学会春季大会講演論文集, 2006, pp.367-368.
2. Yasunori Saito, Nobuyuki Moronuki, Arata Kaneko, Micromachining with Multi-Axes Vibration Tool and Its Application to Texturing, Proc. of LEM21, JSME, 2005, pp.855-860, Nagoya.
3. 諸貫信行, 齋藤泰則, 金子 新, 多軸振動工具を用いた表面微細構造の製作, 2005 年度砥粒加工学会学術講演会, 2005, pp.213-214.
4. 梶田大毅, 諸貫信行, 金子 新, 岩井 満（日立ハウステック）, 鈴木弥志雄（日立ハウステック）, 床材の表面微細構造がすべり特性に及ぼす影響, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, 2005, pp.249-250.
5. N. Moronuki, S. Saneshima and Y. Saito, Monitoring of Ultrasonic Vibration Micromachining Process, Proc. of ASPE Annual Meeting, 2004, Orlando.
6. N. Moronuki, Y. Saito, A. Kaneko, A. Miura(Alps Electric), C. Aikawa(Alps Electric): Vibration Micromachining of Low-Melting-Temperature Glass, 7th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 2004, pp.489-494.
7. 吉田 史人, 諸貫 信行, 多軸振動工具による表面微細加工とその応用, 精密工学会春季大会, 2005, pp.623-624
8. 館野寿丈, 諸貫信行, 微小部品の自己整列ー物体間力の制御とテクスチャによる摩擦方向性の利用ー, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2005, pp.487-488.
9. 諸貫信行, 吉田史人, 金子 新, 角田 陽, 多軸振動工具を用いた表面テクスチャリング, 日本機械学会第 5 回生産加工・工作機械部門講演会, 2004, 221-222.

10. 崔 暁康（鄭州輕工業学院），諸貫信行，金子 新，角田 陽，振動加工のための微小工具の機上成形，日本機械学会第 5 回生産加工・工作機械部門講演会，2004，223-224.
11. 諸貫信行，高山明典，金子 新，テクスチャによる固体表面の濡れ性制御に関する研究，機械学会年次大会講演論文集，2003，pp.229-230
12. 佐藤祐樹，諸貫信行，金子 新，多自由度同期振動加工による脆性材料の微細加工，精密工学会春季大会，2003，375

（3）研究成果による工業所有権の出願・取得状況

1. 低融点ガラスの加工方法および低融点ガラスの加工装置ならびに低融点ガラス加工材，特願 2004-068851

目 次

第1章 緒論	1
第2章 表面微細構造による機能発現	2
2. 1 テクスチャと表面機能	2
2. 2 本研究で対象とする機能とテクスチャの仕様	5
2. 3 まとめ	5
第3章 超音波振動工具を用いたガラスの微細加工	6
3. 1 実験装置および方法	6
3. 2 遊離砥粒による加工実験	7
3. 3 切削実験と材質の影響	8
3. 4 工具端形状の影響	9
3. 5 輪郭加工	10
3. 6 深溝加工実験	11
3. 7 加工状態と加工力の関係	12
3. 8 プロセスのモニタリングと接触検出精度の向上	13
3. 9 まとめ	19
第4章 多軸振動加工の効果とテクスチャリングへの適用	20
4. 1 実験装置および方法	20
4. 2 単軸振動加工による基礎特性評価	21
4. 3 2軸振動の効果	21
4. 4 3軸振動の効果	23
4. 5 テクスチャリングの試み	25
4. 6 まとめ	30
第5章 高精度化の試み	31
5. 1 実験装置	31
5. 2 AFMチップを用いた加工実験	32
5. 3 誤差要因の検討	34
5. 4 工具の運動精度	35
5. 5 テクスチャ転写実験	36
5. 6 工作物の違いに関する考察	38
5. 7 振動軌跡の三次元化及び大面積化	38
5. 8 研究の総括とテクスチャ設計指針	39
5. 9 まとめ	40
第6章 結論	41
参考文献	42
付録 公表論文の別刷抜粋	43

第1章 緒 論

微細周期構造（以下、テクスチャ）を固体表面に設けることで、光学的機能をはじめとする様々な機能を付与することができ、これらに対する期待が高まりつつある¹⁾。このような応用ではミクロン程度あるいはそれ以下のピッチの微細周期構造の製作が求められている。例えば液晶パネル用無反射面などの光学機能面を想定すると、波長レベルの微細構造が必要となるばかりでなく、メートルオーダーの大規模の領域にわたる加工が求められるため、高度な加工技術の開発が求められている。

これらの機能と加工法の詳細は次章で述べることとして、加工法の概要を表 1.1 に示す。ミクロンオーダーの微細構造を製作する場合、リソグラフィとエッチングを組み合わせた方法が一般的と考えられる。この方法では 100nm 以上のピッチのテクスチャをスループット良く製作できるものの、三次元形状の加工が難しく、マスクが一般的に高価なため、生産量が少ない場合はコスト高になりやすい。

収束イオンビーム加工（FIB）は数 10nm の微細加工を行うことができるものの、大面積へ適用するにはスループットが悪く、また、コストも高くなりやすい。レーザ加工は板金応用などで大面積での応用が進められているが、微細加工への適用時にはビーム収束寸法の制約があり、エキシマなどの紫外線レーザを用いてもサブミクロンの加工は一般的に難しい。三次元化への対応も、フェムト秒レーザ²⁾による以外は難しく、この場合にはコストも高くなりがちである。

一方、機械的な加工方法でも多くの試みがある。例えばこれまでに砥粒の噴流とマスクを組合せて三次元的な形状加工を試みた例³⁾や穴加工での問題解決に振動を適用する試みがある⁴⁾。超音波楕円振動を工具に与えることで工具摩耗を抑制したり難削材の加工を容易に行う方法も提案された^{5,6)}。同様の振動を研削加工^{7,8)}や他の加工に組合せる方法⁹⁾も試みられた。砥粒加工では必ずしも仕上げ面粗さが良好でない場合があるため、これを砥粒の微細化で向上する試みもある¹⁰⁾。

振動加工の工具を微小化することで微細加工が可能になるものの、工具工作物間の接触検出が難しくなりがちであり、工具摩耗も問題となりやすい。そこで、AE センサなどの適用によってこれらを解決しようという試みも行われた¹¹⁾。

これらの成果を活かして微小工具に多軸振動を与えることにより、主題であるテクスチャを加工することが可能と考えられる。すなわち、微小工具の振動と一定速度の送り運動を組合せた加工法（振動速度は送り速度より十分に速い）によれば、最小寸法は工具の制約を受けるものの、概ね 10 μ m 以上の寸法については比較的自由度が高く、かつ単品での加工を想定した場合は高効率に製作することができると考えられる。しかし、原理の検証や 3 軸振動をどのように工具に与えるかといった問題は必ずしも明らかにされていない。

そこで本研究では、振動工具と一定速度の送りを組合せ、工具とその運動軌跡を固体表面上に残すことでミクロンオーダーのテクスチャを加工する方法について以下の点を明らかにすることを目的とする。ただし、加工対象は広範囲のものを対象とし、ガラスのようにそのまま構造物とできるものから、パラフィンのように後の転写を前提としたものまでを含めることとする。

- (1) 原理の検証と適用範囲の明確化
- (2) 高精度化のための課題抽出と解決法の検討を行うこと

表 1.1 各種加工法による微細周期構造製作の特徴比較

加工方法	ピッチ (最小値)	面積	コスト	3D 形状への 適応性
リソグラフィ+エッチング	○ (0.1 μ m-)	△	×	×RIE で円錐状
収束イオンビーム	○ (0.01 μ m-)	×	×	×
レーザ加工	△ (10 μ m-)	○	△	× (fs レーザ除く)
微小工具の振動加工	△ (10 μ m-)	○	○	○

第2章 テクスチャによる機能発現

2.1 テクスチャと表面機能

表 2.1 にはテクスチャによって実現される様々な機能を示している。機械的な応用としては摩擦を制御する機能が多いが、液晶パネルには輝度向上や反射を抑制するための光学機能フィルム材料などが多用されて大きな市場を形成しており、更なる発展も期待されている。また、流体的な機能も表面構造で変えることができ、例えば濡れ性についての試みが既に行われている¹³⁾。

表 2.1 表面機能と応用例

対象	機能	応 用
電磁波	選択	光学素子（フィルタ）、無反射面
	反射	標示板、建材、太陽電池、マウスパッド、自動車部品
	回折、干渉	分光素子、ホログラム
接触摩擦	摩擦の制御	情報機器（HD）、機械の固着防止、福祉機器
	感触、生体適合性	操作ハンドル、インプラント、人工臓器
	表面積増	触媒の効率化
流体	フィルタ	気液分離（ゴアテックス）
	濡れ性	はっ水（ハスの葉）、氷雪の付着防止
	抵抗低減	競泳水着、パイプライン、船の推進

自然界には学ぶべき多数の表面機能がある。図 2.1 はハスの葉の表面構造と、これにより実現される表面浄化作用を示す。葉の表面には同図(a)にみられるような細かな突起が並んでおり、強い撥水性を有するとともに、ゴミなどの固体粒子も付着しにくいことがわかる。同図(b)は、そのような表面テクスチャによる浄化作用の概念を示す¹⁴⁾。同図(b)左側に示すように固体粒子が表面に強く付着した場合は雨の水滴が流れても浄化は行われぬが、同図(b)右側に示すようにテクスチャによる撥水性が与えられた場合は水滴が固体粒子を洗い流している。濡れという観点ではカタツムリの殻も興味深い機能を有しており、強い撥水性を有するだけでなく、水雰囲気下では油もつきにくくなっている¹⁵⁾。

蛾の目は図 2.2 のような特殊な構造をもち、ナノメートルオーダの微細構造により光を反射しない表面になっている¹⁴⁾。一方、モルフォ蝶の青色は色素ではなく図 2.3 に示すような鱗粉の微細構造によって作られている¹⁶⁾。孔雀の羽根や玉虫のような甲虫の色も同様であり、微細構造で発色することから「構造色」と呼ばれる¹⁷⁾。オパールの色が複雑に変化する「遊色現象」も、シリカ粒子構造の内部欠陥に起因する光の多重反射と回折が原因であるとされ、これら構造色の工業的応用も進みつつある。

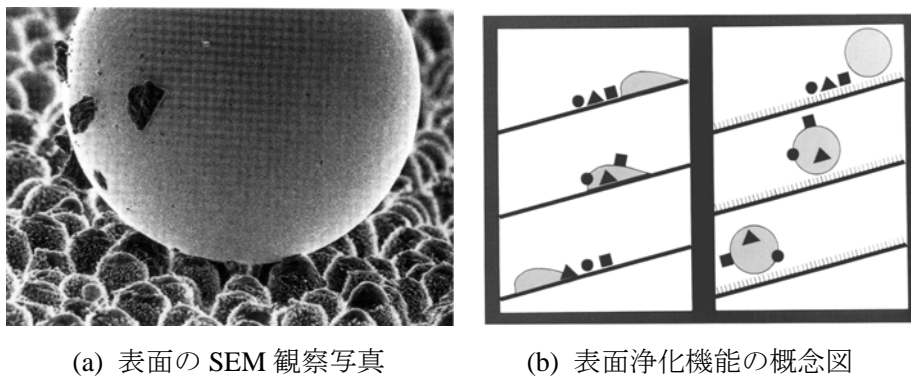


図 2.1 ハスの葉表面の構造と自浄作用¹⁴⁾

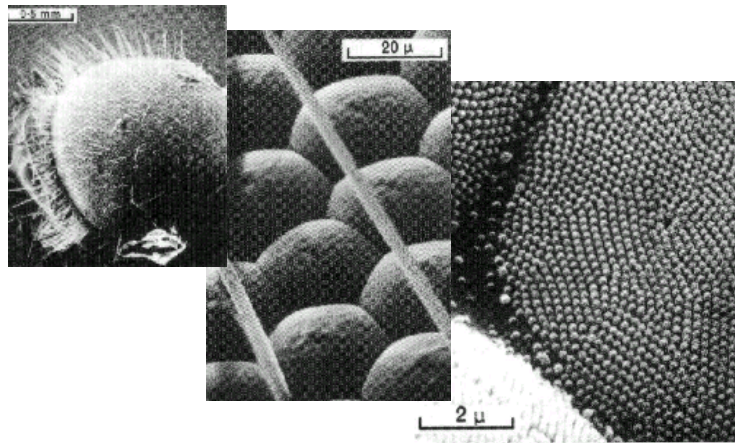


図 2.2 蛾の目の表面構造¹⁴⁾

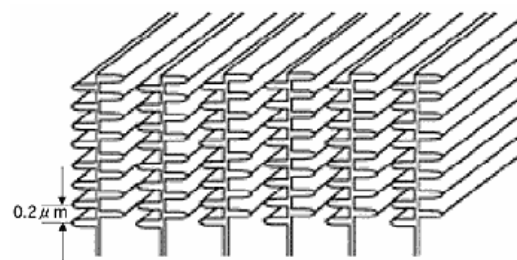


図 2.3 モルフォ蝶の鱗粉 (<http://www.jst.go.jp/kisoken/seika/zensen/08matsui/>より引用)

自然に学んだ機能を工業的に適用した例を示す．図 2.4 は濡れ性を制御した表面上の液滴の形状を示す．同図左は矩形断面溝を設けることで濡れ方向性を与え，これを同心の三角形状あるいは四角形状に配置することで，液滴の形状を自律的に変化させようという試みである．輪郭線に沿った辺から構成される立体が得られ，この例では光硬化性樹脂を用いたため，これをレンズとして用いることもできる．同図右側は酸化膜付きシリコンウェハ（ SiO_2 ）〔親水性〕上に PTFE 〔疎水性〕をスパッタ付着して親水部と疎水部が並んだパターンの例である．液滴が複雑な形を保ちながら斜面上を滑り落ちる様子が分かる．

図 2.5 は蛾の目（moth eye）を模した構造であり，光学的な無反射面となる．この場合は，サブミクロンの三次元形状が周期的な並んだ構造になっており，これはホログラムを用いて製作されている．このような機能表面は前述のような液晶パネルの表面だけでなく，様々な光学工業製品をはじめ，将来的には様々な住宅機器にも求められよう．

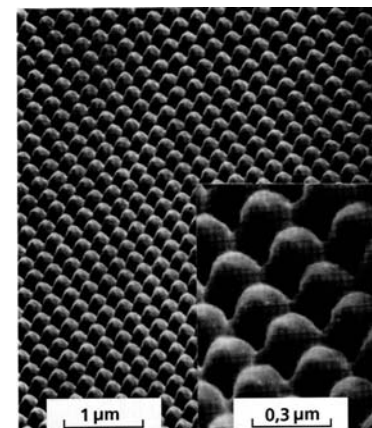
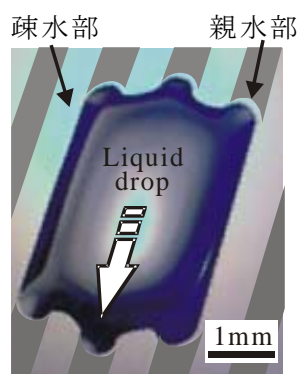
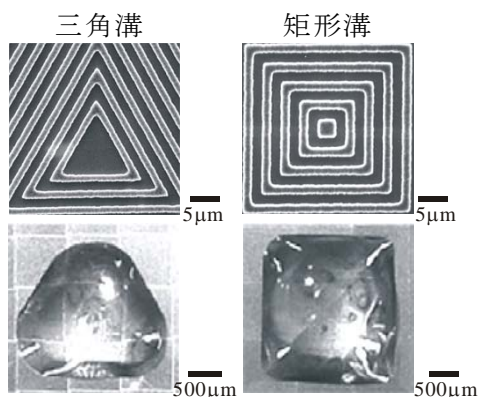


図 2.4 濡れ性を制御した表面上の液滴
(テクスチャ（左）あるいは表面エネルギー制御（右）による）

図 2.5 moth eye 構造のテクスチャ¹⁾

表 2.2 にはテクスチャを加工するための方法を示す。加工法の分類として、除去、変形、付着の 3 種類があるが、どれを用いてもテクスチャは加工できる。ただし、空間分解能や適用面積およびコストは大きく異なる。

古典的な加工法とは異なり、表面の改質も多用される方法である。近年、化学修飾は広い分野で適用されている。ここには、リソグラフィによる露光処理も含めている。現像処理が必要ではあるが、潜像を形成するという点では光による形状形成と捉えることができる。

モルフォ蝶の鱗粉 (図 2.3) のように微小寸法でオーバーハングしたような構造は一般的に製作が難しいが、付着加工を多段化して多層化することができれば実現可能と考えられる。

また、微小構造の製法として、母性原則 (転写の原理) に基づくようなトップダウン的方法では高率などの点で自ずと限界があり、自己組織化プロセスに対する興味が高まっている。表中に示したのは LB (ラングミュア・ブロッジェクト) 法やポリイミドのラビング時にできる規則溝²⁰⁾であるが、微粒子を液中に分散させ、これが乾燥する時に自己整列するメカニズムを利用した方法も着目されている方法のひとつである^{21,22)}。

表 2.2 テクスチャの加工方法

形状	除去	機械加工	ダイヤモンド切削 (延性材料)
			ラッピング, ブラスト加工 (脆性材料)
	変形	特殊加工	ビーム加工 (電子, イオン, レーザ), エッチング, SPM 加工
		機械転写	プレス, エンボス, インプリント
	付着	電気付着	めっき, 電鍍
		物理化学	無電解めっき, CVD, PVD, エピタキシ
改質	コーティング		PTFE (表面エネルギー), 潤滑膜
	表面修飾		化学処理 (ガラス表面をアルキル鎖で修飾等)
	光学転写		リソグラフィ, ホログラム
構造	多層化		付着加工の多段化 (モルフォ蝶鱗粉のような複雑断面)
	自己組織化プロセス		LB 膜, ポリイミドのラビング, 微粒子整列時の最密構造

図 2.6 は濡れ性制御のためのテクスチャ例を示す。この例ではリソグラフィでパターニング後、ドライエッチングにより 2.5 次元形状を得ている。この場合も、オーバーハングする方が濡れ性を強く変える可能性があるため、本来ならば三次元形状が必要なところであるが残念ながら適当な加工法がない。

図 2.7 は単結晶シリコンの結晶構造と異方性エッチングによって得られる規則形状を示す。結晶構造の{111}結晶面はエネルギー的に安定などの理由により、KOH のようなエッチング液に対し強い方向依存性を示し、結果的に{111}面からなる規則形状を容易に得ることができる。図の例では、矩形状のマスクパターンを設けることによって頂角が 109 度の V 溝が得られる。単結晶材料であればこの規則的な溝を並列配置することができ、例えば回折格子と同様の機能を付与することもできる。

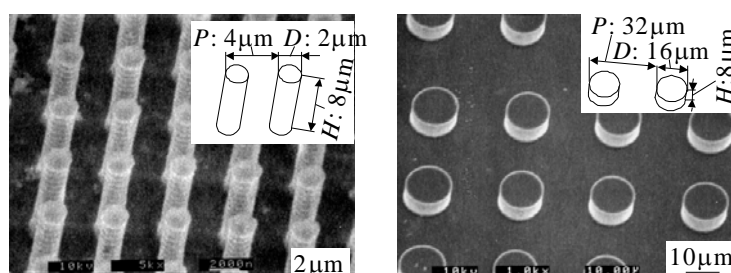


図 2.6 ドライエッチングで製作した濡れ性制御のためのテクスチャ例¹³⁾

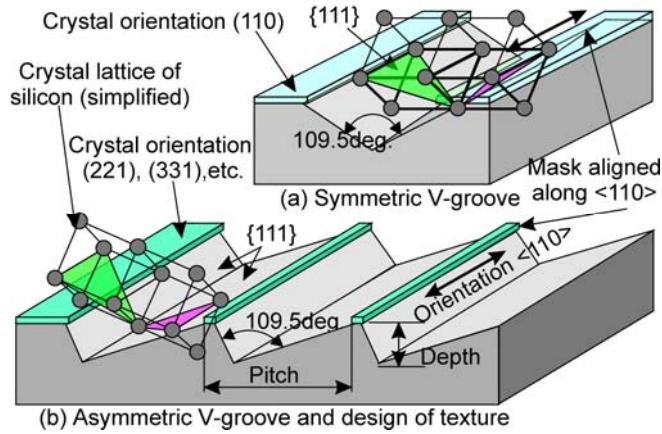


図 2.7 シリコン結晶構造と異方性エッチングでできる規則形状¹⁸⁾

2.2 本研究で対象とする機能とテクスチャの仕様

前節で示したように表面機能を得るためには、形状だけでなく表面エネルギーの操作など、様々な方法がある（図 2.8 参照）。しかし、本研究の以降の議論では表面エネルギーの問題に触れず、寸法・形状の形成のみを議論する。そして、図 2.8 中のピッチおよび深さ h はそれぞれマイクロオーダーで、アスペクト比は 1 程度の微小構造を本研究で扱うこととする。

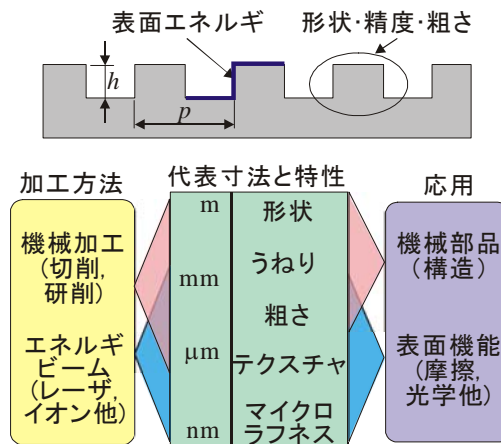


図 2.8 機能を実現するための寸法範囲と本研究で扱う寸法範囲

2.3 まとめ

本章では様々な表面機能と加工法について述べるとともに、本研究で扱うテクスチャの概略仕様を示した。

第3章 超音波振動工具を用いたガラスの微細加工

本章では超音波振動加工による脆性材料の加工特性とテクスチャへの適用可能性を明確化する。

3.1 実験装置および方法

試作した加工装置を図 3.1 に示す。超音波振動子（40kHz）の先端に直径 100 μm の工具が取り付けられており、工作物は 3 軸ステージ上に固定し、工具との相対運動が与えられる。試料台下には力センサが取り付けられ、AC/DC コンバータによって変動する力の RMS 値をコンピュータに取り込めるようになっている。この信号を用いて工具・工作物間の接触検出、加工のモニタリングを行うとともに、工具摩耗補正にも用いる。実験装置は防振台上に設置され、温度 20℃、湿度 50% に保たれたクリーンルームで実験を行った。

実験条件は表 3.1 に示したものであり、一定切込みの溝加工を行った。工作物にはソーダガラス、ホウケイ酸ガラス（ショット：Borofloat[®]、パイレックスと類似）および低融点ガラス（住田ガラス：スーパーヴィドロン[®]）を準備した。これらの機械的特性はあまり大きく変わらないものの、軟化温度が異なるものである。工具には超微粒を焼結した超硬合金工具を用いた。加工条件としては、平均粒径 1 μm のダイヤモンドスラリーを用いた遊離砥粒加工と、水のみを供給した切削の 2 種類とした。

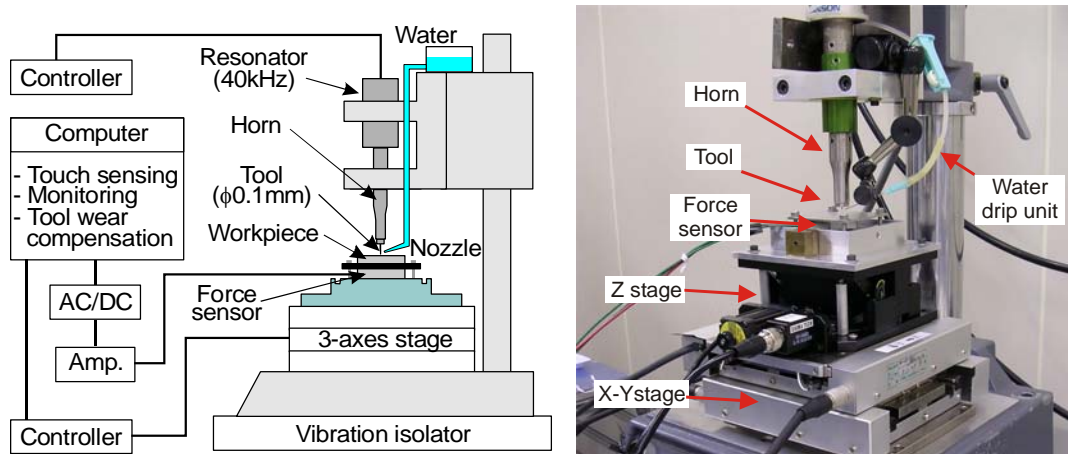
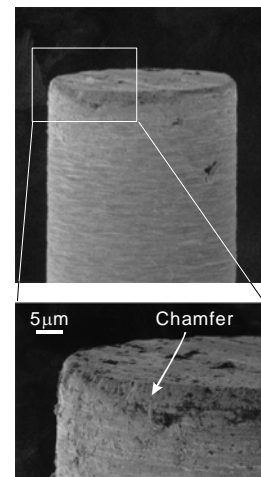


図 3.1 実験装置

表 3.1 加工条件と工作物条件および使用した工具

Ultrasonic vibration	40kHz, 20 $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$		
Positioning resolution	X,Y: 0.1 μm , Z: 0.05 μm		
Tool	Sintered carbide, $\phi 100\mu\text{m}$		
Depth of cut (infeed)	5 μm		
Feed rate, length	50 $\mu\text{m/s}$, 1mm		
Machining fluid	Slurry (diamond $\phi 1\mu\text{m}$) or pure water		
Workpiece	E [GPa]	Hardness [Knoop]	Softening temp.[°C]
Soda glass	71.6	6 (Mohs)	720
Borosilicate glass (Borofloat [®] , Schott)	63	480	560
Low-melting-temp. glass (Super Vidron [®] , Sumita)	64.2	352	285 (T_g)



使用した工具（未使用状態）

図 3.2 は加工時の力センサの測定信号を AC/DC コンバータに通す前（力の生データ）の測定結果である。この結果より、40kHz という高周波領域での力測定が行えていることがわかった。特に、この結果では 1 周期の半分程度の間工具と工作物が接触していることがわかり、残りの時間では測定系の残留振動が認められる。このような測定結果は、リアルタイムでの加工のモニタリングの可能性を示唆しており、後に議論する。

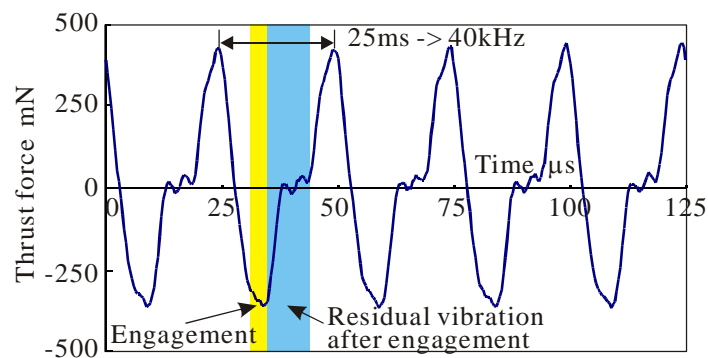


図 3.2 加工力の測定例

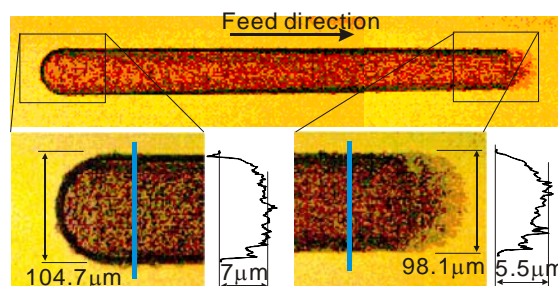
3.2 遊離砥粒による加工実験

図 3.3 はダイヤモンド砥粒 ($\phi 1\mu\text{m}$) を含むスラリを用いた加工結果の顕微鏡観察写真である。図中にはレーザ顕微鏡で測定した断面形状も併せて示す。ソーダガラスの場合（同図(a)），加工が進むにつれ溝が浅くなり、加工終了部では溝ができなかった。これは工具の摩耗によるものと考えられ、この場合には実設定切り込みと同じ $10\mu\text{m}$ 程度（実際は $7-8\mu\text{m}$ ）も摩耗してしまったことになる。ホウケイ酸ガラスの場合（同図(b)）は摩耗が小さかったものの、加工終了部（右側）では断面形状が丸みを帯びていることから、やはり工具角部が激しく摩耗したと考えられる。

低融点ガラス（同図(c)）の場合、工具摩耗はさらに少なかったが、ホウケイ酸ガラスの場合と同様に工具偏摩耗が生じたと考えられる。いずれの場合も加工溝底面には個々の砥粒による加工痕とみられる小さな凹凸が多数ある。また、溝深さは設定切り込みより深くなった。これは工具・工作物の接触検出機能の不調によるものと見られ、改善の余地を残している。

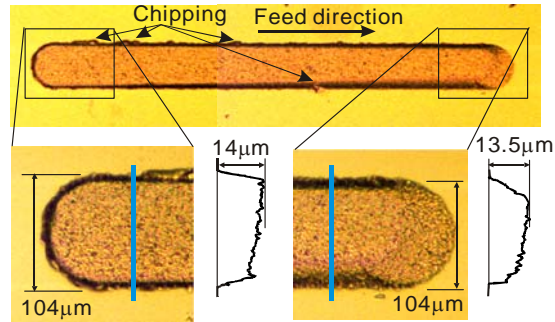


(a) ソーダガラス



(b) ホウケイ酸ガラス

図 3.3 各種ガラスの砥粒加工結果



(c) 低融点ガラス

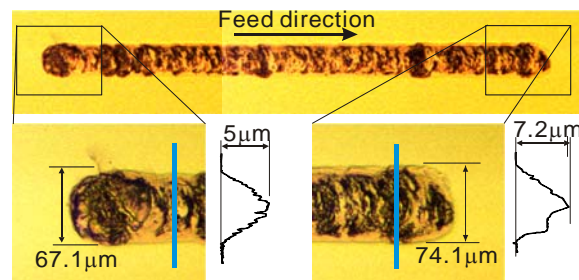
図 3.3 各種ガラスの砥粒加工結果（続き）

3.3 切削実験と材質の影響

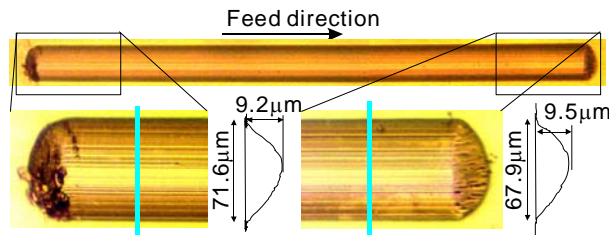
今回使用した工具の材質は超硬であり、砥粒を用いなくとも加工が行えると考えられる．そこでスラリの代わりに水を供給した切削加工を試みた．実験条件は砥粒加工の場合と同様である．図 3.4 に、ソーダガラス、ホウケイ酸ガラスおよび低融点ガラスの加工結果の顕微鏡観察写真を示す．ソーダガラス（同図(a)）では、加工開始時はきれいな工具痕が残る加工が行えていたが、途中から脆性破壊が繰返される結果となった．この実験では工具摩耗の補償を行っていないので、切削では砥粒加工に比べ工具の摩耗が小さくなることがわかる．加工終了点で設定よりも深い加工が行えているのは脆性破壊によるものと見られる．また、底面の平滑部の粗さは $Ry=0.1\mu\text{m}$ と良好であった．ホウケイ酸ガラス（同図(b)）ではきれいな加工が行えず、脆性的な破壊が繰返されたような痕跡が残る、形状精度も十分ではなかった．低融点ガラス（同図(c)）では、加工終了地点まで $Ry=0.1\mu\text{m}$ ほどの平滑な溝ができた．溝深さは設定値よりも大きかったが、これは工具・工作物接触点の検出誤差と考えられる．



(a) ソーダガラス



(b) ホウケイ酸ガラス



(c) 低融点ガラス

図 3.4 各種ガラスを切削加工した結果

溝エッジ部に発生したチッピングの幅と底面の粗さを評価し、砥粒加工と切削加工の比較を行った結果を図 3.5 に示す。切削加工により、形状精度および表面粗さ両方の大幅な改善が見られることがわかった。

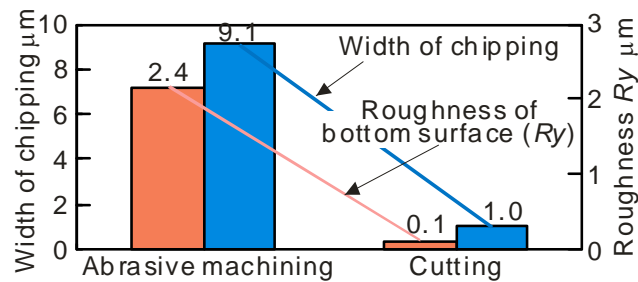
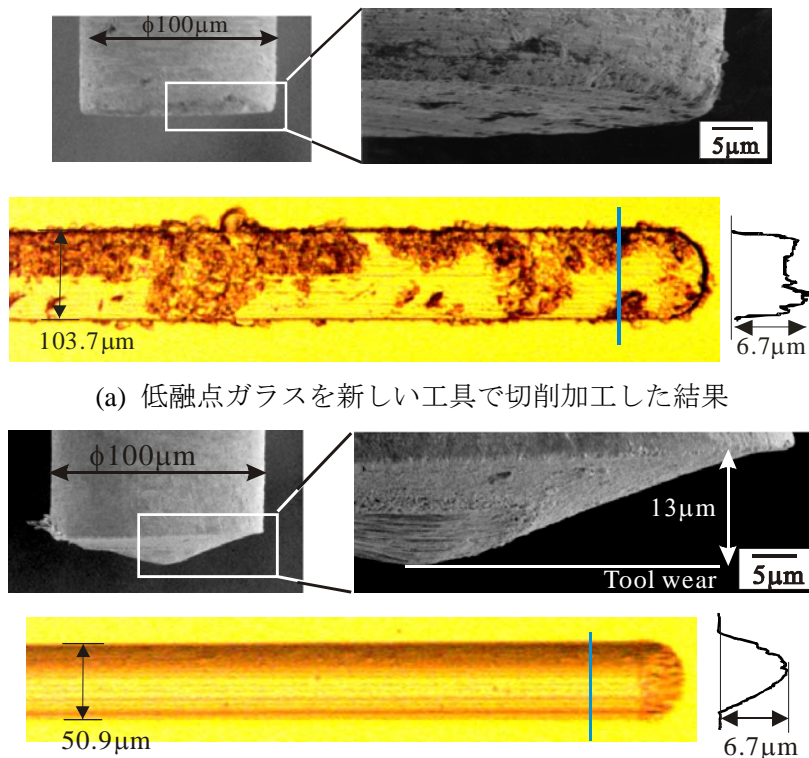


図 3.5 砥粒加工と切削加工の比較

3.4 工具端形状の影響

切削加工において、低融点ガラスでは平滑な溝が多く加工されたが、再現性が必ずしも十分でなかった。すべての平滑溝の幅が工具直径よりも狭いことから、工具の摩耗状態が溝形状に影響を及ぼすと考え、検証実験を行った。摩耗していない工具と摩耗させた工具の両方を用意し、それぞれ溝加工実験を行った。図 3.6 に工具の形状観察写真と得られた溝の顕微鏡観察写真を示す。まったく摩耗していない工具（同図(a)）の場合、溝には多数の凸凹が観察されたのに対し、適度に摩耗させた工具（同図(b)）においては平滑面が加工された。工具の観察結果を見ると、当初は円筒形であった工具先端部は外周部が大きく摩耗していて V 字型になっていることがわかる。外周部の後退量は $13\mu\text{m}$ にも達していた。

図 3.7 には図 3.6 と同様の結果をレーザ顕微鏡（共焦点顕微鏡）で観察した結果を示す。工具に与えた振動は上下方向のみであるにも拘わらず、あたかも切削痕のような筋が横送り方向に観察できる。これは工具端形状が良好に転写された結果と考えられる。



(a) 低融点ガラスを新しい工具で切削加工した結果
(b) 適度に摩耗した工具による加工結果
図 3.6 工具形状が加工結果に及ぼす影響

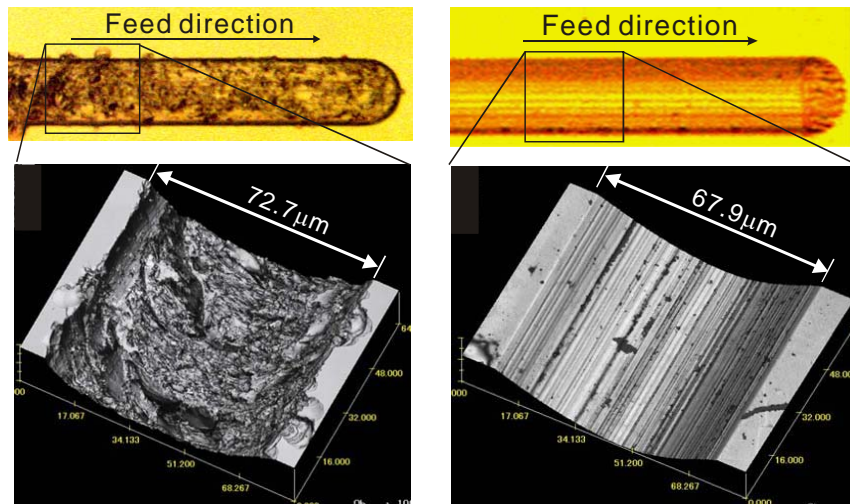


図 3.7 低融点ガラスの切削条件が悪い場合（左）と良い場合（右）

3.5 輪郭加工

輪郭加工の例として螺旋溝の加工を行った．加工条件は水のみを用いた切削であり，設定切込み深さは $5\mu\text{m}$ とした．図 3.8 には，光学顕微鏡により全体を観察した結果を示す．場所によって，正確には工具と工作物の位相角によってチップングや底面の粗さが大きく異なることがわかる．これは前述のように工具先端部に偏摩耗が生じ，適度な摩耗が生じた部分では良好な切削加工が行えたと考えられる．図 3.9 には，干渉計を用いて溝底面の荒れた部分を三次元観察した結果を示す．同図(a)は溝底面が荒れた部分の観察結果であり，同図(b)は平滑な部分の観察結果である．部分的な粗さの評価は難しいものの，同図の平滑部は良好な粗さであるといえる．ただし，断面形状をよく観察すると底面が上面とは平行でなく傾いていることが判る．これはやはり工具の偏摩耗により工具端面が傾いていたためと考えられる．工具を回転させていないため，工具端形状は直接加工結果に影響するが，これを活かした形状創成の可能性もある．

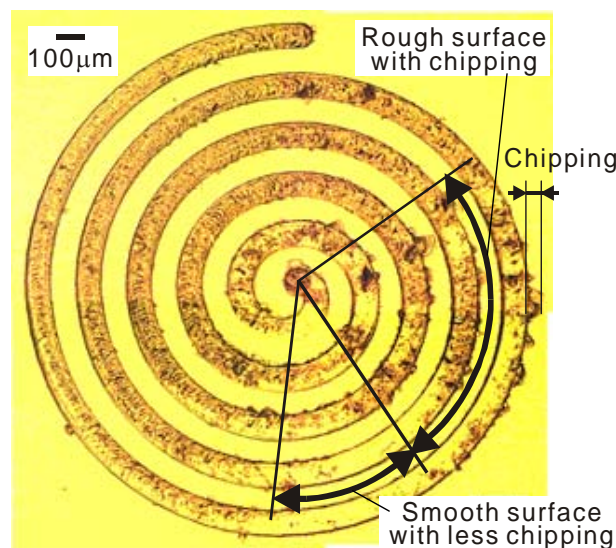
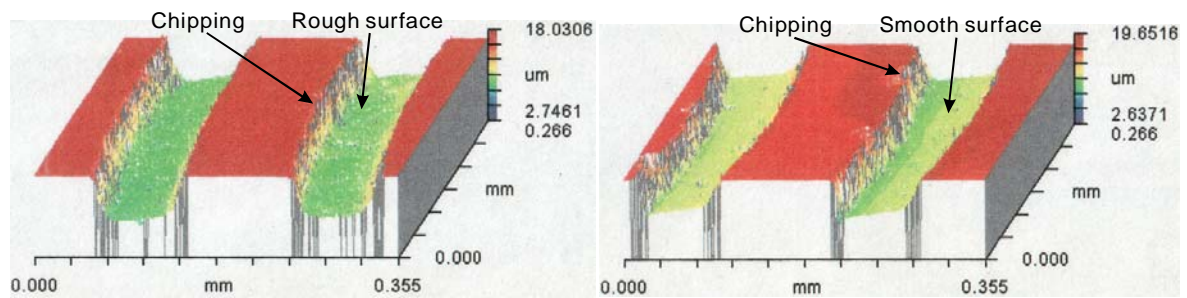


図 3.8 螺旋溝加工結果（光学顕微鏡観察）



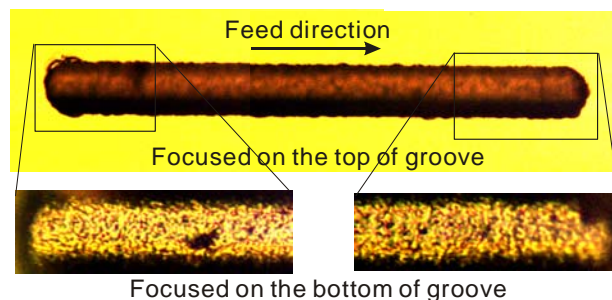
(a) 底面が荒れている箇所

(b) 底面が滑らかな箇所

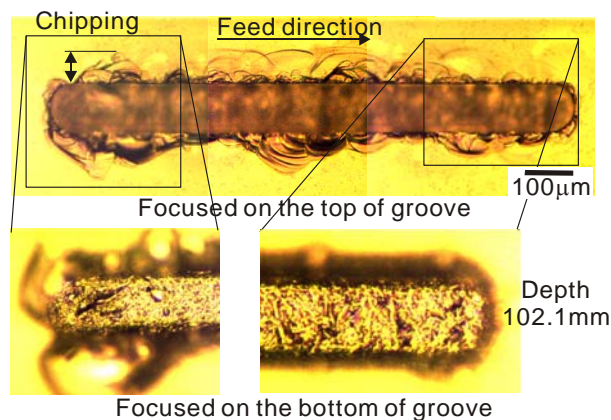
図 3.9 螺旋溝の断面形状と場所による違い

3.6 深溝加工実験

これまでの実験では単純な浅溝加工のみを行ってきたが、本研究で目標としているアスペクト比 1 の加工を試みた。工具直径が $100\mu\text{m}$ であるため、設定切込み深さを $100\mu\text{m}$ とした。一回の切り込み量 $10\mu\text{m}$ を 10 回繰り返し、深さ $100\mu\text{m}$ を達成した。図 3.10 に、砥粒加工および切削加工による深溝加工結果を示す。観察に光学顕微鏡を用いたため焦点深度が浅く、溝上面と溝下面それぞれに焦点を合わせた観察結果を示している。同図(a)の砥粒加工の場合、砥粒加工固有の粗さは残るものの、正確な輪郭ができていることがわかる。ただし、溝上縁部にはチッピングが多く見られる。同図(b)には切削の場合の結果を示す。溝上縁部のチッピングが非常に大きくなってしまった。底面の粗さも悪く、多少規則的な模様が見られる。これは材料の組織的なものが現れたためと考えられる。



(a) 砥粒加工による深溝加工結果



(b) 切削加工による深溝加工結果

図 3.10 低融点ガラスの深溝加工結果

図 3.11 には、密着させた螺旋溝を描くことで深穴を加工した結果を示す。上縁部の一部にチッピングが見られるものの、やはり工具と工作物の位相角の特定の場所においては良好な加工が行えており、同図(b)に示すように、チッピングも非常に少ない部分があることがわかる（図右側拡大図参照）。

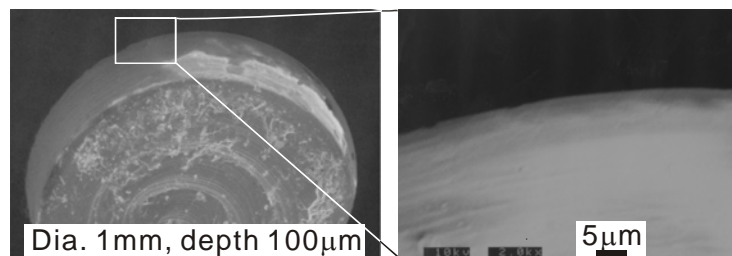


図 3.11 低融点ガラスの止め穴加工結果

3.7 加工状態と加工力の関係

溝加工を行った際の加工力（RMS 値）の推移を図 3.12 に示す。砥粒加工を行った場合、新しい工具を用いて切削加工を行った場合、および適度に摩耗した工具により加工を行った場合のそれぞれについて比較が行えるようになっている。結果を見ると、砥粒加工の場合が最も変動が少ないことがわかる。それに対し、切削の場合は局所的な変動が大きいのが特徴となっている。さらに、新しい工具では切削抵抗が非常に小さいのに対し、摩耗した工具では加工に伴って加工力の平均値が増大・飽和する傾向にあることがわかる。検証はできていないものの、切削の場合の局所の変動は大規模なチッピングの発生と対応している可能性がある。このような加工のモニタリングが行えると、安定して良好な加工が行えるように送り速度を制御するなどの発展が考えられる（適応制御加工）。

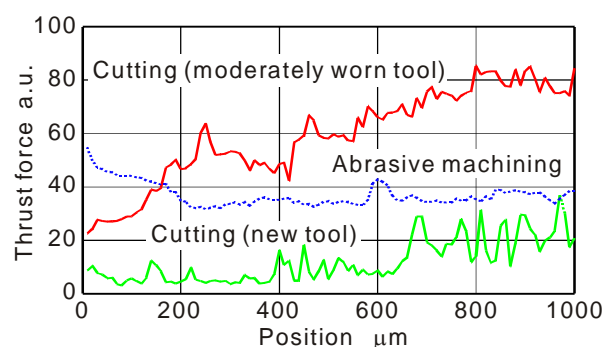


図 3.12 加工力 RMS 値の推移

砥粒加工と切削加工の材料除去メカニズムをモデル化したものを図 3.13 に示す。砥粒加工の場合は、砥粒が側面および底面で工作物を除去するとともに、工具も微小量ずつ破碎し、切りくずと工具摩耗粉は加工部分から砥粒と共に排出されていくと考えられる。一方、切削加工の場合は側面部での除去作用が主となり、切りくずは水の流れに伴って排出されることが考えられる。ここで工具が摩耗した場合には負のすくい角を有するようになり、工作物内の加工部では 3 軸圧縮応力状態になりやすくなると考えられる。その結果、延性的な加工が行えたと考えられる。低融点ガラスの場合にはガラス転移温度が低いことも延性的な加工に寄与すると考えられる。

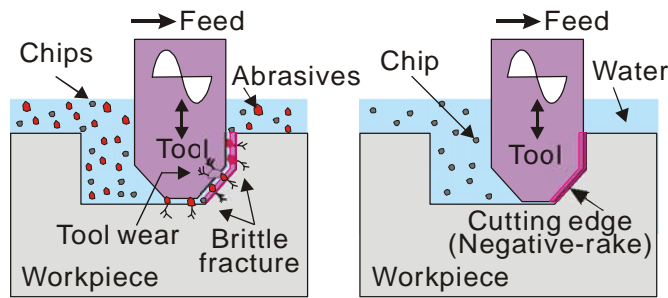


図 3.13 砥粒加工と切削の場合の材料除去メカニズムの違い

図 3.14 は加工形状の違いによって切りくずの排出性がどのように変化するかを示している。「深溝」加工の場合、同図左側に示すように切りくずは工具の送り方向と反対側のみからしか排出されないため、排出の効率が悪い。その結果、切りくずが再び加工部に巻き込まれ、切込みを過大にしてしまい、ひいてはチッピングを起こすことが考えられる。一方、「穴」加工の場合は、同図右側に示すように切りくずが比較的自由に排出されるため、加工部に巻き込まれることも少ないと考えられる。その結果、チッピングも少なく、底面の粗さも良くなると考えられる。

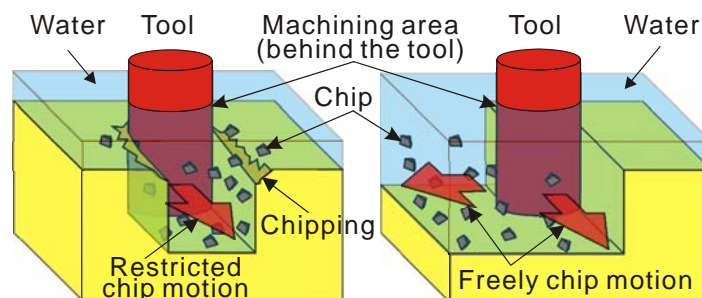


図 3.14 深溝加工における切りくずの排出性

3.8 プロセスのモニタリングと接触検出精度の向上

前節までで低融点ガラスに数ミクロンの切込みを与えて延性加工を行うことに成功したが、加工深さの再現性が低い、あるいは予測の難しい脆性破壊（チッピング）によって加工面の品位が悪化してしまうという問題があった。そこで、加工力のモニタリング技術を検討して精度の向上と加工の高品位化を試みた。実験装置は図 3.1 と同じであるが、検出した信号を FFT 解析することによって周波数成分を分析できるようにした。なお、測定系の固有振動数は 20kHz 程度であるにも拘わらず 80kHz までの高調波の解析を行った。このような周波数範囲での力の大きさのキャリブレーションは正確に行えていないため、力を定量的に議論することはできない。高調波の解析は単に波形のゆがみの尺度と考えるべきであろう。実験条件は表 3.1 に示すとおりである。

(1) 接触検出

接触前後の加工力の時間波形の変化を観察した結果を図 3.15 に示す。超音波振動する工具と工作物の間に水が介在するため、接触していない状態でも力を検出している。工具と工作物が接触し始めると振幅が大きくなるとともに波形が歪み始める。これまでの実験ではこのような波形を AC/DC 変換した結果、すなわち波形の RMS 値が所定の閾値を越えたときに「接触」と判定していた。図 3.15 の信号波形を FFT 解析した結果を図 3.16 に示す。この結果より、基本周波数である 40kHz のパワーが増加とともに高調波の発生も調べることができる。前述のとおり高調波成分は波形の歪みを示すと考えられる。

工具・工作物を近づけていき、接触、加工開始に至るまでの信号の RMS 値と第 1 高調波成分

(80kHz) を調べた結果を図 3.17 に示す。接触後の加工力 RMS 値の増加より $0.65\mu\text{m}$ 離れた位置で高調波成分の変化が現れていた。しかも、加工力 RMS 値では接触前にも水の介在による力の検出があるため SN 比 (signal to noise ratio) は低い。一方、高調波成分では良好な SN 比が得られることがわかる。接触前の水を介した力伝達では波形の歪が少ないため、高調波成分が限りなくゼロに近いのである。

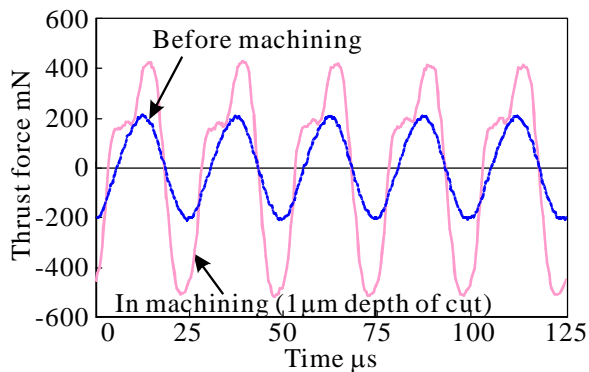


図 3.15 加工前と加工時の加工力の変化

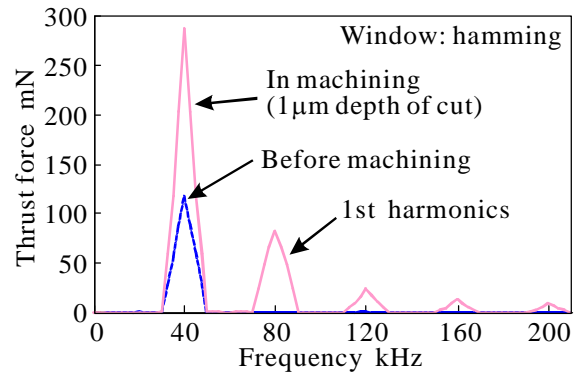


図 3.16 加工力の FFT 解析結果

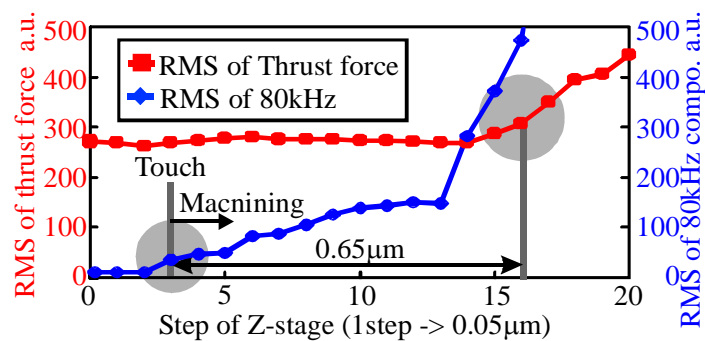


図 3.17 工具・工作物接触点近傍における加工力 RMS 値の変化と高調波の変化

同一箇所での接触検出を 10 回繰り返した場合の検出位置の再現性を調べた結果を図 3.18 に示す。接触点座標の繰り返し誤差は $0.05\mu\text{m}$ (ステージの最小分解能) に収まり、接触点位置検出の高精度化を図ることができた。また、接触検出後、被削材に表面に残った接触痕の深さは $0.2\mu\text{m}$ 程度であった。

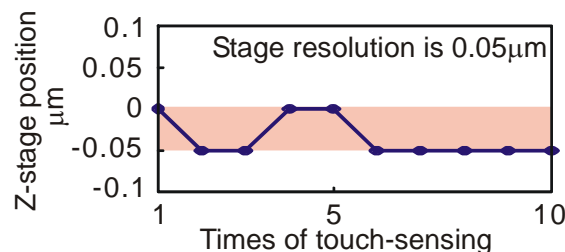


図 3.18 接触検出の再現性

(2) 加工モニタリング

加工中の加工力の変化と加工溝を照らし合わせ、両者の関係を明らかにすることで、力センサによる加工モニタリングの可能性を検証した。なお、力センサのサンプリング速度は 50 sample/sec であった。図 3.19 に延性切削中に突然脆性破壊が生じた場合の実験結果を示す。延性加工時には加工力の変動は小さく、安定して緩やかに推移する。脆性破壊が発生すると加工力が急激に減少

する．ピークが現れる時点で脆性破壊が発生していると判断できる．脆性破壊直前では値が上昇していることから，加工力の変化が加工状態を如実に表していることが分かった．

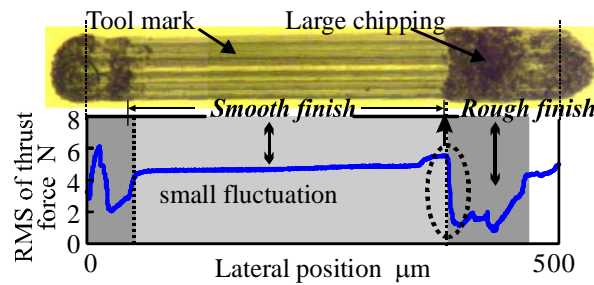


図 3.19 加工力 RMS の変化と加工結果の対応

(3) 適応制御の試み

前節の結果を基に，制御による精度向上が可能かどうか実験を行った．脆性破壊発生原因を切りくずの排出不良であると考え，ある閾値に達した時点で工具を加工進行方向に対して後方に戻すという制御を行った．図 3.20(a)に制御を与える前の加工及びモニタ結果を示す．ピークがチッピングと対応し，その後，値が小さくなっていることが再度確認できる．ほとんどのピークが 1500 以上にあることから，閾値を 1500 として制御を与えた．その結果が同図(b)である．大きな溝側部のチッピングは減少しているものの溝底部には依然として脆性破壊が見られ，十分な改善はできなかった．

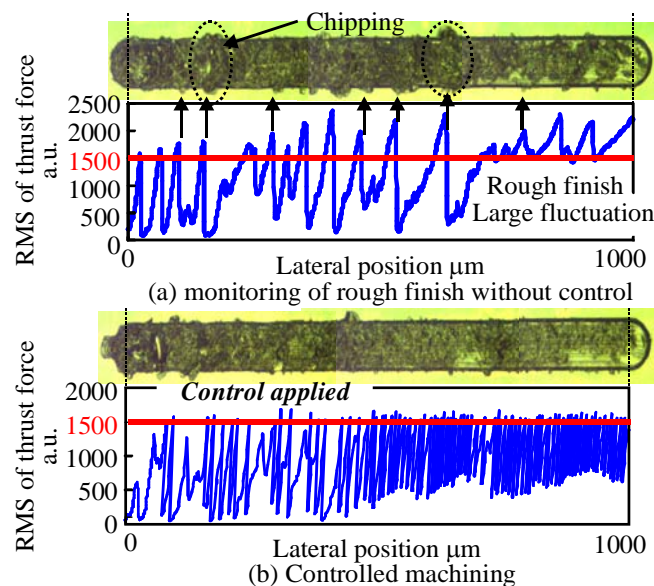


図 3.20 加工力 RMS を利用した適応制御による加工結果

(4) チッピングの防止方法

チッピング発生の原因として切りくずの噛み込みが考えられるため，複数の溝を片側の側面が重なるように加工し，切りくず排出方向を増やし，さらに水流を与えて切りくずを流すという方法で切りくずを積極的に排出させる実験を行った．しかし，チッピングを防止することはできなかった．そこで，工具形状の影響を調べた．

図 3.21 には様々の条件で摩耗させて形状を整えた工具により，特定方位に溝加工を行った結果を示す．同図 (A) は特定方向に曲率を持った形状であり，同図 (B) は先端部に面取りを施した形状であり，同図 (C) は先端がテーパ状になった形状である．それぞれ，特定方位から観察した

工具側面形状を左端に示し，中央部には工具端の正面観察像を中央に示し，そして右端には加工結果を示す．各図において加工方位を番号が示されている．工具には軸方向の振動を与えるだけで回転を与えていないため，方位すなわち工具前縁部形状の違いが明確に現れた．これらの結果より，前縁部には緩やかな曲率と傾斜（大きな負のすくい角状）を与えることでチップングの発生が抑制され，平滑加工が行えることがわかった．

有限要素法を用い，工作物内の応力分布に及ぼす工具端形状の影響を調べた結果を図 3.22 に示す．円柱形状工具の結果を同図(a)に示し，溝側部，底面共にチップングが発生していることがわかり，応力解析結果を見ると，溝側部に引張り応力が集中して作用しており，その結果チップングが発生したと考えられる．一方，球面形状の結果を同図(b)に示し，チップングのない延性加工ができており，この場合，解析結果からもわかるように応力の集中は生じていないことがわかる．

以上の結果から，溝側部のチップング発生原因は引張りの応力集中であると考えられ，工具先端を丸めることでチップングが抑えられることが分かった．また，溝底面の脆性破壊原因は切りくず排出不良が原因であると推測できるが，これも先端を丸めることで解決されることが考えられる．

工具先端を丸めた工具を用いることで，図 3.23 に示すように硬度の高いソーダガラスを延性加工することにも成功した．図 3.24 には低融点ガラスに対して円弧加工を行った結果を示し，方位によらず滑らかな加工が行えることがわかった．

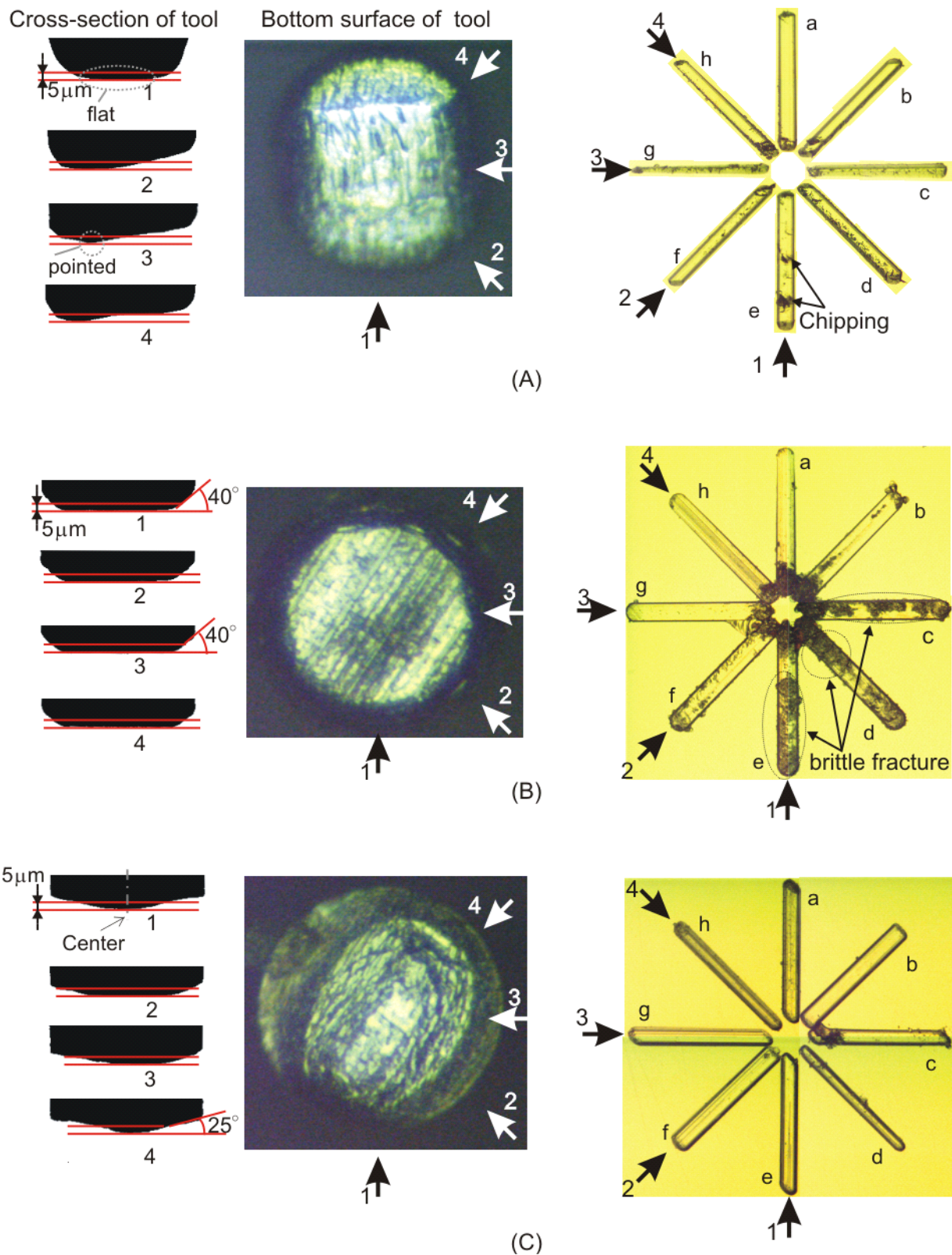


図 3.21 工具先端形状がチップ発生に及ぼす影響

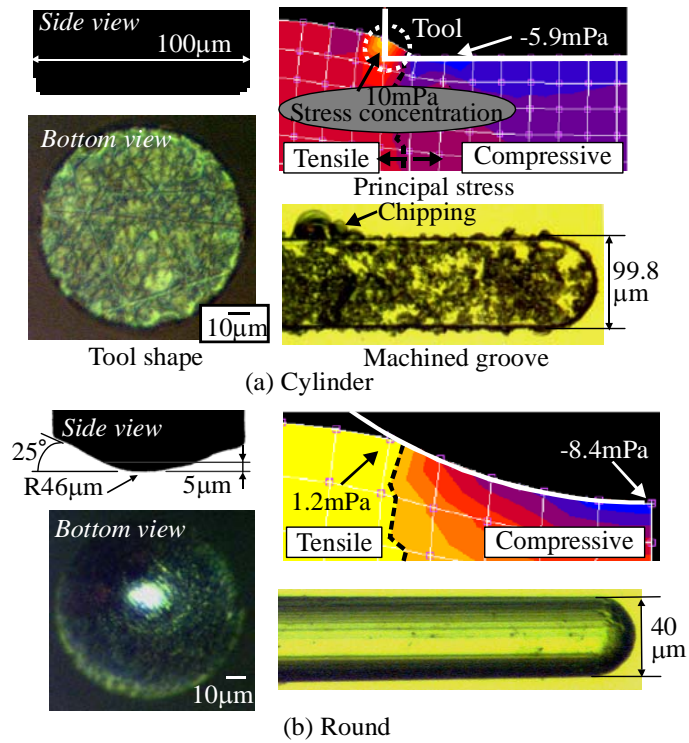


図 3.22 工具端形状と加工点近傍での応力分布の違い

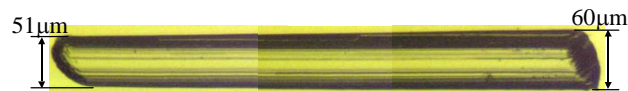


図 3.23 ソーダガラスの平滑加工結果

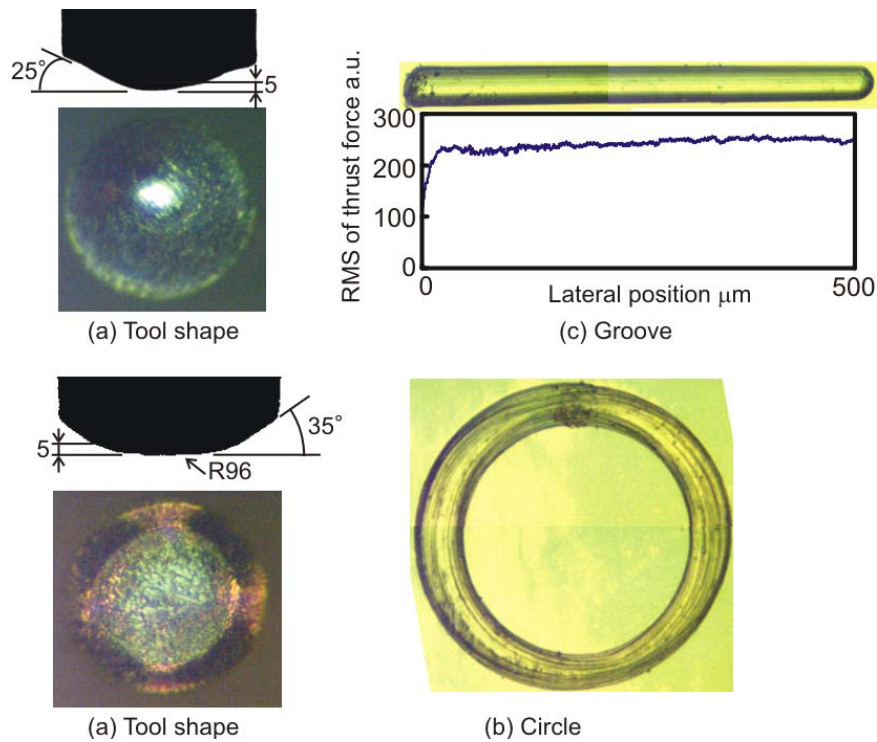


図 3.24 低融点ガラスの平滑加工結果

(5) 工具の機上成型

工具先端形状の重要性がわかったので、成型法についての検討も行った。微小工具を回転させずに超音波振動を与えていることを活かし、工具を単結晶ダイヤモンドバイトに当てることで非対称工具の成型を行った。装置構成は図 3.25 のような構成とし、これまで工作物を設置していた部分に単結晶ダイヤモンドバイトを設置した。バイトの下には力センサを設置してあり、加工力をモニタできるようになっている。この力をほぼ一定に保ちながら切り込みを加えていき、超硬工具に段差を設ける加工を行った。図 3.26 は同装置の写真を示す。

図 3.27 に加工結果の観察結果を示す。直径 $100\mu\text{m}$ の超硬合金製工具の先端に最大幅、高さともに $20\mu\text{m}$ 程度の段差加工を行うことができた。

このような装置構成に回転ステージを組み入れることで微小工具成型の自由度を高めることができれば、前述のような平滑加工に必要な先端形状の加工が可能になると考えられる。

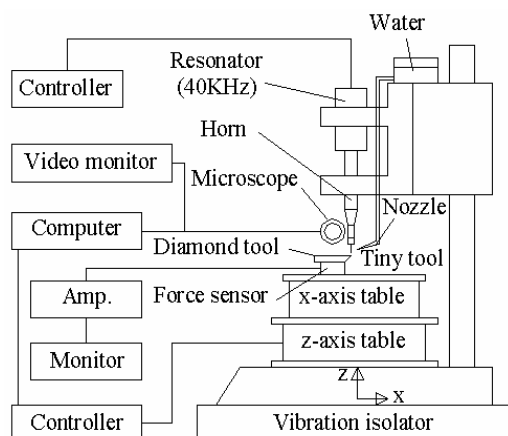


図 3.25 工具成型実験装置

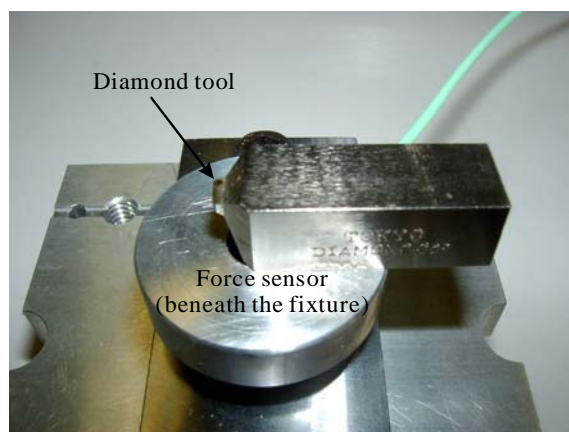


図 3.26 工具成型のための単結晶ダイヤモンド工具

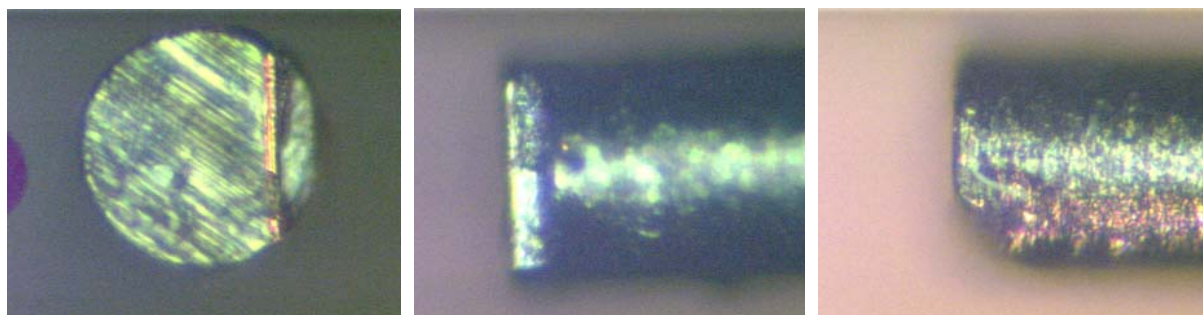


図 3.27 ダイヤモンドバイトにより工具を加工した結果を 3 方向から投影観察した結果

3.9 まとめ

超音波振動加工に関する基礎実験を行い、テクスチャ加工実現のための以下の知見を得た。

- ・ 砥粒加工では仕上げ面粗さの向上が難しく、工具の摩耗も無視できない
- ・ ガラスの材質によっては切削加工によって平滑面が得られ、工具摩耗も少ない
- ・ 切削の場合、工具先端形状の影響を強く受け、先端を丸める方が滑らかな加工を行いやすい
- ・ 深い形状の加工では切りくずの排出性が仕上げ面粗さとチッピングの発生に影響を及ぼす
- ・ 40kHz で変動する加工力をリアルタイムで測定でき、加工力の変化をモニタすることにより、加工状態を把握できる
- ・ 超音波振動を利用することで工具を機上成型できる

第4章 多軸振動加工の効果とテクスチャリングへの適用

4.1 実験装置および方法

前章では切削加工の可能性を確認できたものの工具条件が強く影響することがわかった．多軸振動加工の特徴を明確化するために，まず遊離砥粒を用いた振動加工を試みた．図 4.1 に実験装置概要を示す．超硬製の微小径工具（ $\phi 40\mu\text{m}$ ，長さ 1mm）を，直交配置した 3 つの圧電素子により駆動することで 3 軸方向の微小振動を与えられるようにした．使用した工具の一次の固有振動数は空気中で 38kHz 程度と高く，スラリの粘性による減衰を考慮しても高い周波数で自由な振動軌跡を与えられると考えられる．そこで，ファンクションジェネレータの信号を高電圧アンプで増幅して圧電素子に与えることで，共振を利用せずに自由な振動波形を与えられるようなシステムとした．被加工材（ガラス，シリコン）は XYZ ステージ上に固定され，PC によりその運動が制御される．工作物の下には水晶式力センサが設置されており，工具と被加工材の接触検出や工具摩耗の自動補正等に用いることができる．なお，実験ではアンプ電源容量の制約などから超音波領域での加工は行えず，低い周波数での加工を行った．表 4.1 に典型的な加工条件を示す．

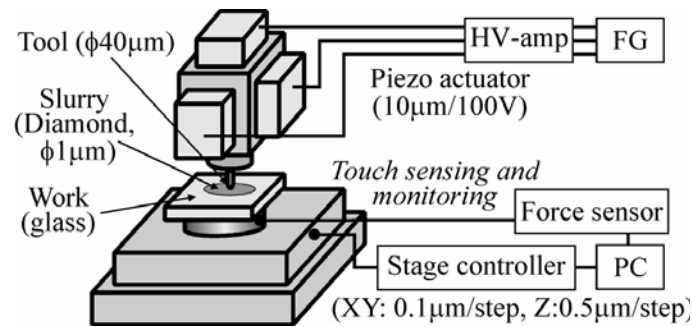


図 4.1 多軸加工装置

表 4.1 多軸加工の条件

Tool	WC, $\phi 40 [\mu\text{m}]$, length 1 [mm]
Workpiece	Glass
Abrasive	Diamond, $\phi 1 [\mu\text{m}]$
Vibration	400 [Hz], 8 [μm_{p-p}]
Depth of cut	2 [μm]
Lateral feed rate	5 [$\mu\text{m}/\text{s}$]
Machining time	500 [s]

図 4.2 に多軸振動を与えたときの加工プロセスの違いを示す．工具軸方向の単軸振動の場合（同図左側）には，振動中に工具が工作物から離れている間にのみ砥粒の入替わりが起これと考えられ，通常，設定切込みは全振幅の半分以下に設定する．一方，工具軸と直角方向の振動が付加されると（同図右側），スラリの攪拌作用が強まるために加工能率が向上すると期待され，さらに横方向の振動による付加的な加工によって加工面粗さの改善も期待できる．

図 4.3 に多軸振動の概要を示す．同図(b)の 2 軸の振動では，見る角度によって単軸の振動と軌跡が同じになる．しかし，3 軸の振動では，あらゆる方向に振動させることが可能で，2 軸と比べてはるかに自由度が高いことが分かる．本研究では，単軸と多軸の違いだけでなく，2 軸と 3 軸による違いも評価する．

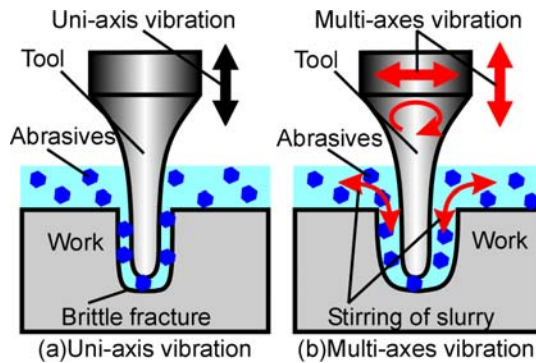


図 4.2 多軸振動の効果

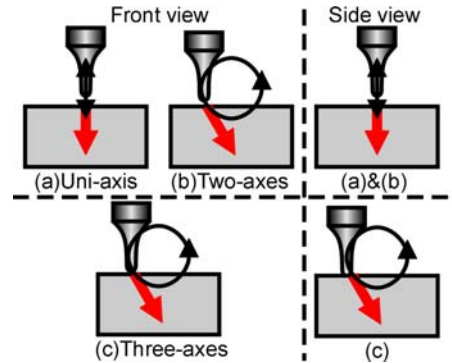


図 4.3 振動軸数と加工メカニズム

4.2 単軸振動加工による基礎特性評価

多軸振動加工に先立って、本実験装置における加工の基礎特性を実験によって評価した。加工条件のパラメータとして振幅と工具切り込みを挙げ、評価項目としては除去速度と加工面粗さを挙げる。除去速度は所定時間内に加工された穴の深さ、加工面粗さは溝加工を行った底面の粗さによって評価している。

はじめに、振幅が除去速度と加工面粗さに及ぼす影響を実験的に調べた。工具は正弦波入力によって振動しているので、切り込みを振幅の $1/2$ とすることでどの振幅でも同じ位相で工具と被加工材が衝突するようにした。図 4.4 に振幅と加工深さおよび加工面粗さの関係を示す。振幅が大きいほど、除去速度および加工面粗さが大きいことが分かった。

次に、工具切り込みが除去速度と加工面粗さに及ぼす影響を実験的に調べた。図 4.5 に工具切り込みと加工深さおよび加工面粗さの関係を示す。振幅と同様に、切り込みが大きいほど、除去速度および加工面粗さが大きいことが分かった。

以上から、本実験装置における加工の基礎特性が明らかになった。振幅と切り込みの増加は工具と被加工材の衝突速度の増加を示す。衝突速度が増加すると工具の運動量が増加し、加工力が大きくなる。その結果、一回の衝撃による破砕量が増加し、高い除去速度と粗い加工面になったと考えられる。以上から、除去速度と加工面粗さとはトレードオフの関係にあり、単軸振動の加工では両方を追及することは困難であることが分かる。以降では、多軸振動を用いることで高い除去速度と良好な加工面の実現を試みる。

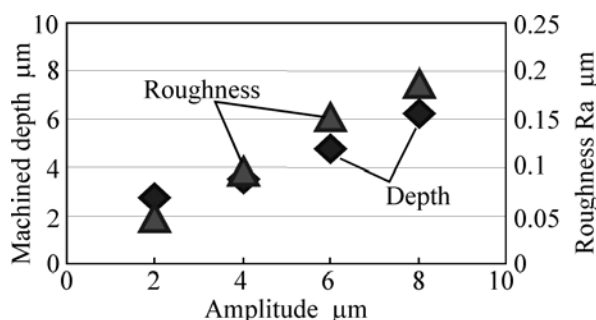


図 4.4 振幅の影響

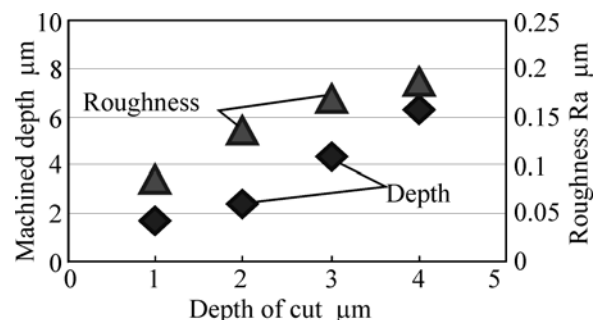


図 4.5 切込み深さの影響

4.3 2 軸振動の効果

図 4.6 のような多軸振動を工具に与えることで、工具の切り込みを部分的に変えることができ、極端に切り込みが小さくなった部分では、脆性材料が延性材料のような挙動を示す「延性モード加工」が行え、その結果、加工面粗さが改善されることが考えられる。

多軸振動である 2 軸振動が加工面粗さに与える影響について調べるために溝加工を行い、加工

された溝の底面の粗さの測定を行った。溝加工における送り方向と同じ方向に工具を円振動もしくは楕円振動をさせて加工を行った。実験は単軸振動、円振動と楕円振動それぞれのアップカット状の軌跡とダウンカット状の振動軌跡について行った。それぞれの振動軌跡の模式図と加工された溝底面の観察を行った結果を図 4.7 に示す。単軸振動の場合は、脆性破壊によるランダムな模様が観察されるのに対し、円振動を与えた場合にはランダムな模様が少なく、部分的にはあるが、平滑な加工面が得られていることがわかる。また、被加工材をなぞるように振動させた楕円振動を与えた場合には、円振動よりもさらに平滑な面が得られた。また、それはアップカット状、ダウンカット状の軌跡で同様であった。

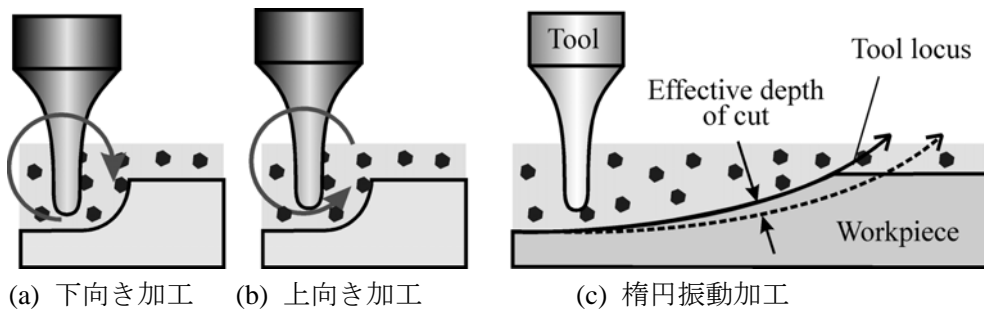


図 4.6 「上向き」および「下向き」振動加工

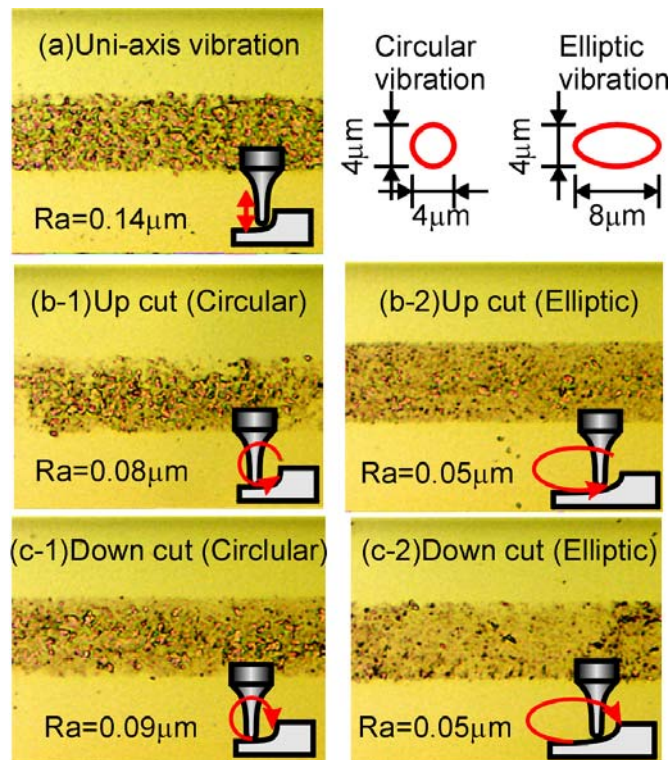


図 4.7 加工条件と仕上げ面粗さの関係

この実験における工具振動と工具と被加工材の衝突方向の模式図を図 4.8 に示す。この図を実験結果と照らし合わせることで、工具と被加工材の衝突角度が小さいほど加工面の粗さが改善されることが分かる。加工面粗さが改善された理由として、上述の延性モード加工が考えられる。特に楕円振動では、工具と被加工材の衝突角度が小さくなり、切り込みの小さい部分が多くなったために、加工面粗さの改善が顕著に現れたと考えられる。

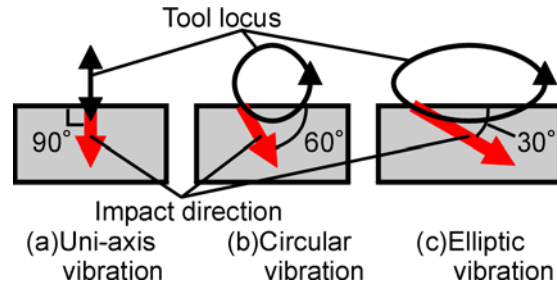


図 4.8 工具軌跡と工作物に対する衝撃方向

2 軸振動によって加工上の問題点である加工面粗さが改善された。しかし、2 軸振動は三次元構造の加工において欠点を持っている。それは 2 軸振動であるがゆえに面内振動であり、方向性を持っていることである。ここで言う振動の方向性とは、図 4.9 のように、同じ溝加工においてもその送り方向によって加工面粗さや形状に違いが生まれることであり、2 軸振動は「方向性を持っている」と表現される。このように、送り方向によって加工面粗さや形状に違いが生まれる 2 軸振動は三次元形状の加工には不適切である。

そこで、2 軸振動よりもさらに振動の自由度があり、方向性の無い振動軌跡を描くことが可能な 3 軸振動を検討する。

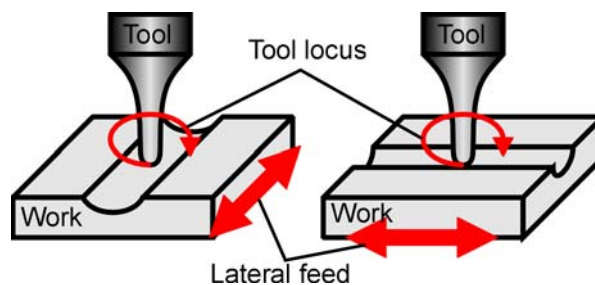


図 4.9 2 軸振動加工の場合の方向性

4.4 3 軸振動の効果

工具の 3 軸振動として、工具軸方向の振動 (1kHz , $4\mu\text{m}_{\text{p-p}}$) と、水平面内での円振動 (400Hz , $8\mu\text{m}_{\text{p-p}}$) を重畳させた軌跡を試みた (図 4.10 参照)。この振動は、水平面内で円振動しているため、先述の 2 軸振動と違い、方向性を持っていない振動軌跡である。図 4.11 には単軸振動、2 軸振動のダウンカット状の軌跡、3 軸振動によって溝加工を行った実験結果を示す。単軸に比べ、2 軸、3 軸共に加工面粗さが改善されているのが分かる。また、特に 3 軸振動によって加工された溝は輪郭がシャープでかつ欠けが少ないことが分かる。また、加工された溝の深さから単軸、2 軸、3 軸共に加工面粗さが改善されているのが分かる。また、特に 3 軸振動によって加工された溝は輪郭がシャープでかつ欠けが少ないことが分かる。また、加工された溝の深さから単軸、2 軸、3 軸の除去速度の違いを知ることができる。単軸と 3 軸を比較すると、3 軸では単軸の 1.5 倍深い溝が加工されており、3 軸の振動によって溝加工における除去速度の向上が明らかになった。

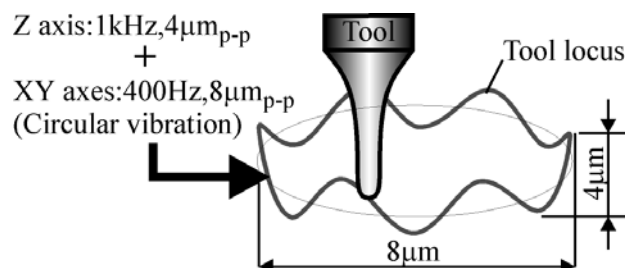


図4.10 本研究で与えた三次元振動

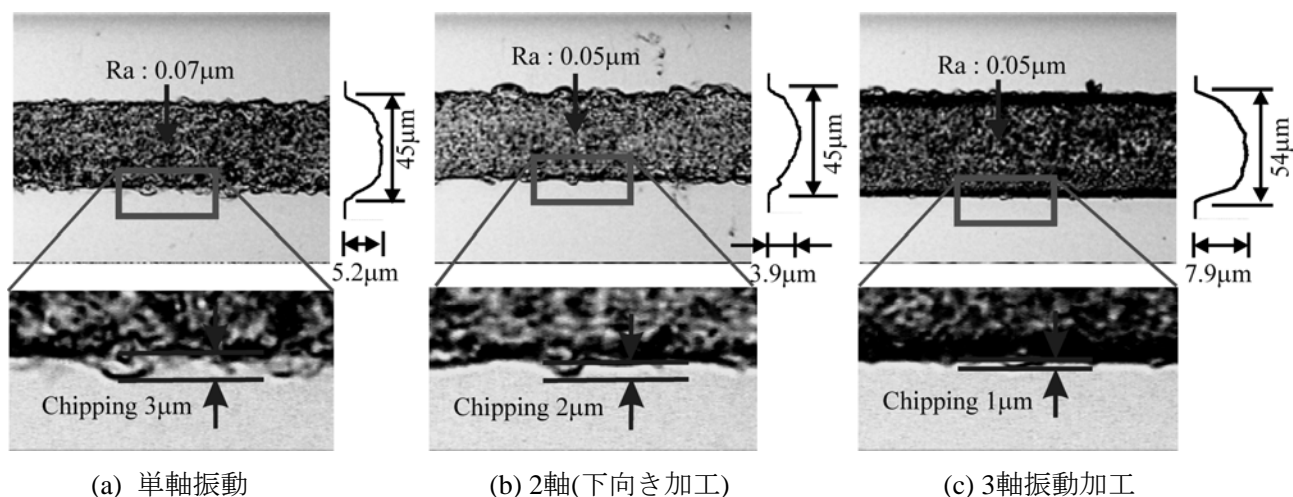


図4.11 工具に与えた振動と加工結果の比較

図 4.12 は単軸と 3 軸振動を用いて穴加工した際の深さの時間的な推移を示しており、3 軸の振動により加工能率が 3 倍まで増加したことがわかる。この実験によって、3 軸の振動によって穴加工においてもまた除去速度が向上されることが明らかになった。この原因として、前述の砥粒の攪拌作用が考えられる。また、図 4.13 に、上述の穴加工の実験で加工された穴の写真を示す。3 軸では単軸に比べ、水平方向の振幅のために、穴の径が大きくなっているが、ここでも溝加工と同様に輪郭がシャープでチッピングの少ない形状が加工されている。表 4.2 に、単軸と比較して 2 軸および 3 軸の振動軌跡によって得られる効果をまとめて示す。

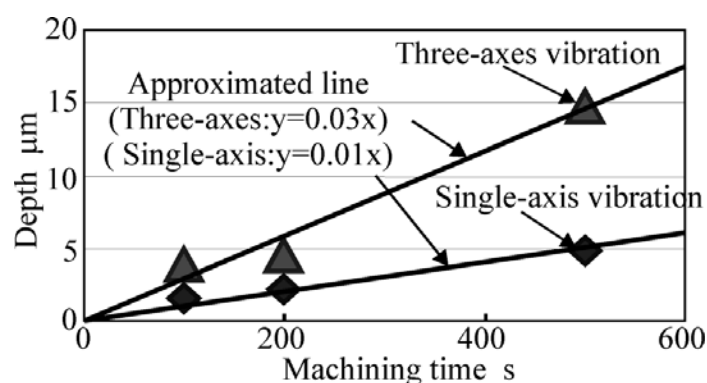


図4.12 振動軸数と穴加工の能率

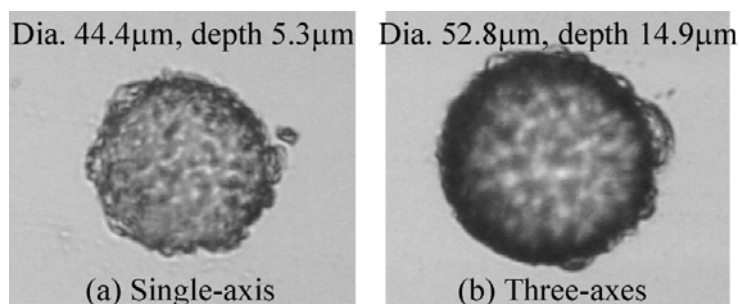


図 4.13 砥粒加工結果の観察写真

表 4.2 振動軸数と加工性状の関係のまとめ

Vibration		Uni-axis	Two-axes(Down cut)	Three-axes
Complexity of locus		Nothing	Middle	Large
Directional character		No	Yes	No
Roughness Ra		0.07 μm	0.05 μm	0.05 μm
Removal rate	Hole	0.01 $\mu\text{m/s}$	—	0.03 $\mu\text{m/s}$
	Groove	5.2 μm	3.9 μm	7.9 μm
Sharpness of profile		NG	Good	Very good

4.5 テクスチャリングの試み

振動軸数を増すことで、加工上のメリットがあることがわかったが、砥粒加工では仕上げ面の粗さに問題を残す。そこで、第3章で示したように多軸切削で良好な仕上げ面を得ることを考えた。そこで、再度、超音波振動を用いた加工実験を試みた。

(1) 実験装置およびその評価

図 4.14 は実験装置の概要を示す。微小工具を超音波振動子の先端に取り付け、20kHz の周波数で駆動される。この振動子の節の部分では縦方向の振動振幅がゼロになる。ここに超音波振動方向と直交するように圧電素子を2つ側方から押し当て、超音波縦振動を三次元状にした。圧電素子に与えられるのは、ファンクションジェネレータで発生した任意の波形および位相差を持つ信号を高電圧アンプで最大100Vまで増幅した電圧信号(2ch)である。このとき、圧電素子は最大10 μm となるが、予荷重を与えた場合はこれよりも小さい振幅となる。なお、周波数の増大に伴って素子部での熱発生があるため、最大で1kHzであった。工作物はPCで制御された3軸テーブルで送り運動が与えられる。工作物下に力センサを備えているのはこれまでの実験と同様である。なお、工具の横振動などを観察するために、CCD顕微鏡を側方に設置した。

典型的な実験条件を表 4.3 に示し、ここでは加工が容易ではない石英ガラスをあえて加工対象とした。

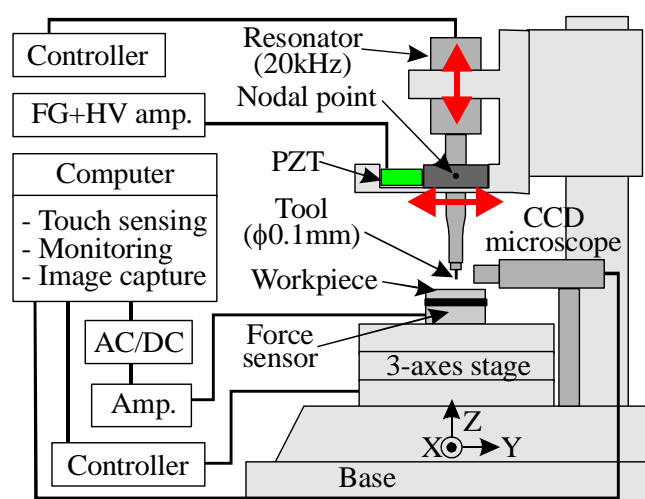


図 4.14 テクスチャ加工のための装置構成

表 4.3 テクスチャ加工装置の仕様

Tool		Sintered carbide, $\phi 100\mu\text{m}$
Stage resolution		X,Y: $0.1\mu\text{m}$, Z: $0.001\mu\text{m}$
Machining fluid		Pure water or dry
Vibration	X,Y	$2\mu\text{m}_{p-p}$, 70, 140, 280Hz
	Z	$20\mu\text{m}_{p-p}$, 20kHz
Workpiece	Material	Quartz glass
	Hardness [Knoop]	560
	Softening temp. [$^{\circ}\text{C}$]	1580
Observation	Camera	CCD with x1050 lens (640x480 pixels)
	Capture	640x480 pixels

図 4.15 は工具の運動を画像で確認した結果を示す。同図(a)は工具振動を与えていない状態であり、工具輪郭が明確に見える。同図(b)は単軸振動を与えた状態の結果を示し、撮像速度より高速で振動しているため、工具の輪郭は上下にぶれて見える。工具寸法が既知 ($100\mu\text{m}$) であるため、これを基準にして工具振動振幅が $20\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。同図(c)は 3 軸振動を与えた場合の観察像である。同図中の模式図に示したとおり、横振動には XY 方向に正弦波と余弦波を加えたため円弧を描くように動き、その間、縦方向には超音波が加えられている。横振動が重畳されているため工具側面の輪郭もぶれて見え、画像から計った寸法は $3\mu\text{m}$ 程度であった。小さな円筒面であるためレーザ変位計等による計測が難しかったが、このような画像観察によっても工具振動を確認できることがわかった。なお、同図(b)で工具側方の輪郭がややぶれて見えることから、単軸振動の場合にも $1\mu\text{m}$ 程度の横振動が加わっていた可能性がある。

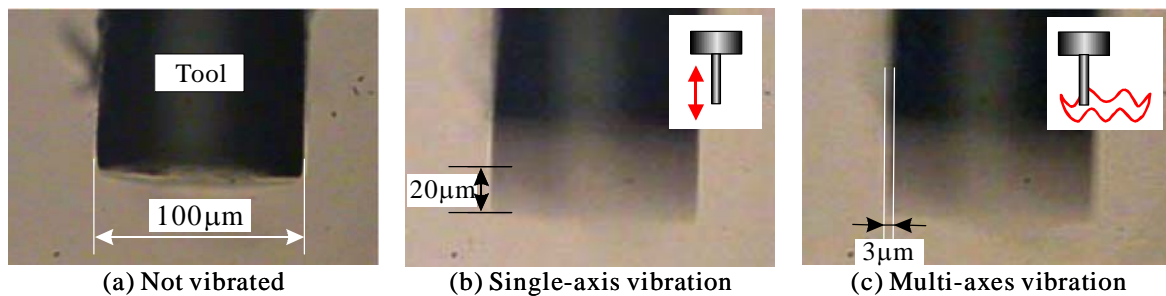


図 4.15 振動状態をカメラで観察した結果

(2) 浅穴加工

多軸振動での材料除去メカニズムを観察するために浅穴のドライ加工を行い、加工結果の観察を行った。図 4.16 は単軸振動加工の結果を示す。同図(a)は加工中の状態をカメラで斜め上方から観察した結果を示す。カメラの撮像 (30 コマ/秒) よりも高速で工具が超音波振動しているため、加工された直後の表面を観察することができる。この結果より、中央部分に荒れた領域があることがわかる。同図(b)は加工後にレーザ顕微鏡で観察した際の観察画像を示す。中央部の荒れた領域が良く観察でき、断面観察結果 (同図(c)) から加工深さは $1.2\mu\text{m}$ 程度で、段差 $0.5\mu\text{m}$ 程度の粗い部分があることがわかる。

図 4.17 は 3 軸振動加工の結果を示す。同図(a)は加工中の観察画像であり、切りくずの排出が良く行われることがわかり、加工面は滑らかに見える。同図(b)の上面からの観察結果を見ても滑らかな加工が行えたことがわかる。同図(c)の断面形状観察結果より、加工深さが 1.4mm で底面も良好な粗さであることがわかった。これらの結果より、3 軸振動により良好な加工が行えることが明らかになった。

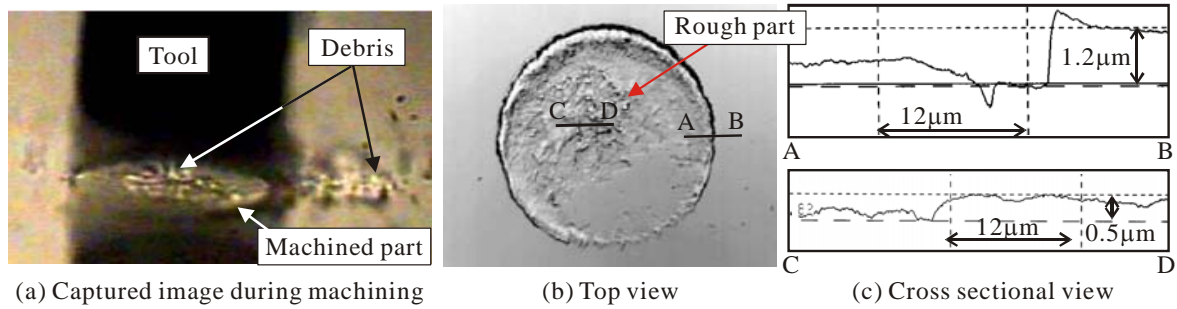


図 4.16 単軸加工の状態観察と加工結果

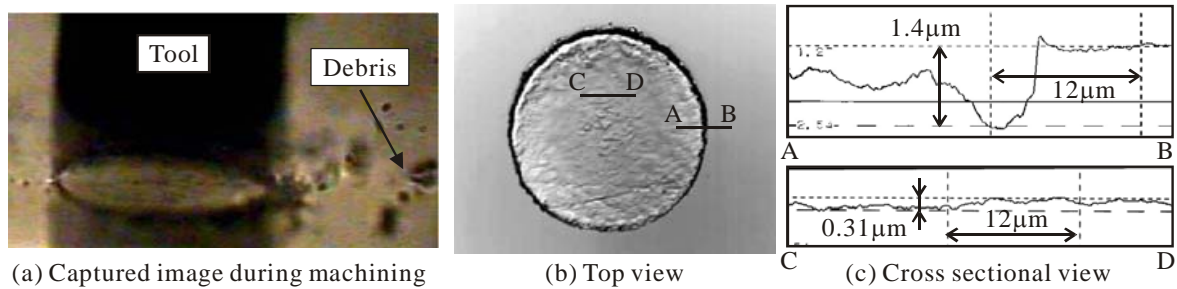


図 4.17 多軸加工の状態観察と加工結果 (X,Y: 140Hz, 2μm)

(3) 深穴加工

浅い溝加工では多軸振動の意義を十分に評価できたといえないため、深穴加工を行った。ここでは切りくずの排出を促すため、ドライではなく純水を供給しながら加工を行った。図 4.18 は単軸振動の場合の加工結果を示す。加工深さが 44μm の段階で既に穴入り口の部分でチッピングが発生していることがわかる。さらに加工深さを増すにつれてチッピングはさらにひどくなった。穴の直径は深さの増大とともに増す傾向があることがわかった。

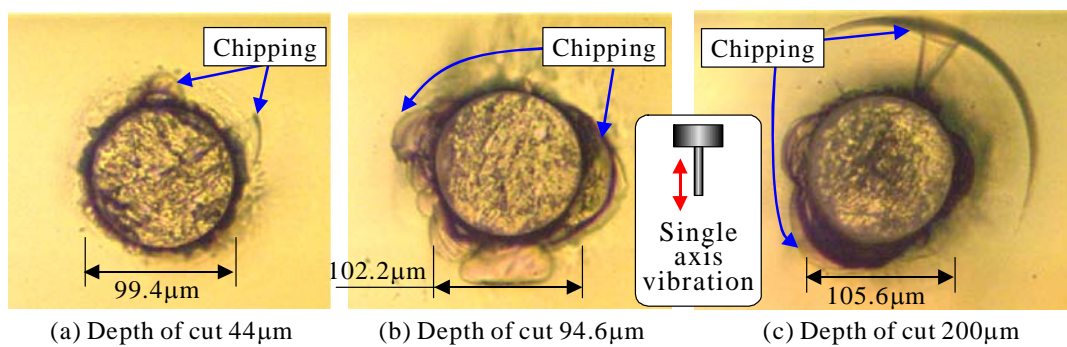


図 4.18 単軸加工での深穴切削結果

図 4.19 は 3 軸振動を加えた場合の穴加工結果を示す。深さ 200μm 程度まで加工した場合にもひどいチッピングは発生せず、良好な加工が行えた。また、穴の直径は横振動を加えた分だけ大きくなっているが、加工深さの増大に伴って直径が増大することは無かった。これも切りくずの排出が適切に行えた結果と考えられる。

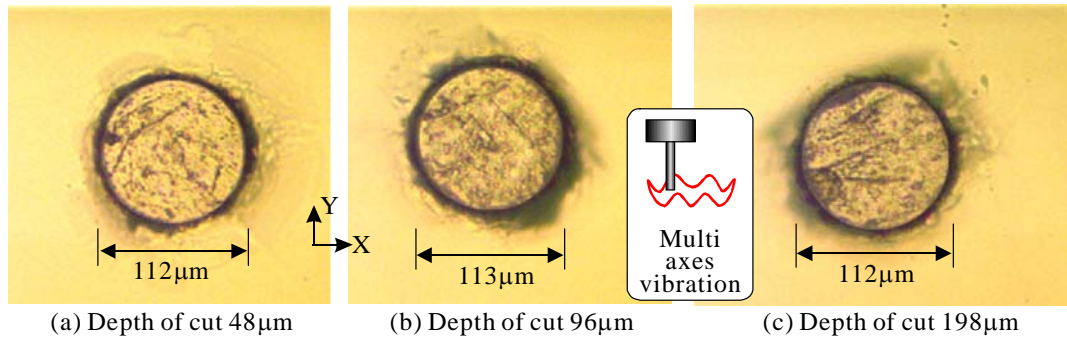


図 4.19 多軸加工での深穴切削結果(X: 140Hz, 2μm, Y: 70Hz, 2μm)

(4) テクスチャ加工

以上の基礎特性評価の結果を踏まえ、テクスチャ加工を試みた。基本的な考え方は図 4.20 に示すようなものであり、微小工具に 3 軸振動を与え、その軌跡と工具形状を工作物に転写しようというものである。これと 1 軸送り運動を組合せれば、広い面積にわたって一様な微細周期構造を製作することができる。

しかし、図 4.14 に示す実験装置では振動の節の部分を押電素子 2 つで押しているものの、機械的に接触する部分が完全に独立しておらず、片方の駆動が他方に影響を及ぼす（クロストーク）結果となった。図 4.21(a)はクロストークの影響のない理想的な軌跡を現す。XY それぞれの方向に振幅の異なる同周波数の振動を与えながら X 軸に一定側送りを与えると図のような軌跡が期待できる。しかし、実際には同図(b)のような歪んだ軌跡となった。

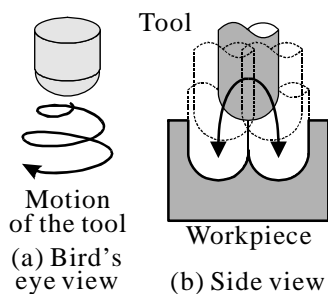


図 4.20 テクスチャリングの方法

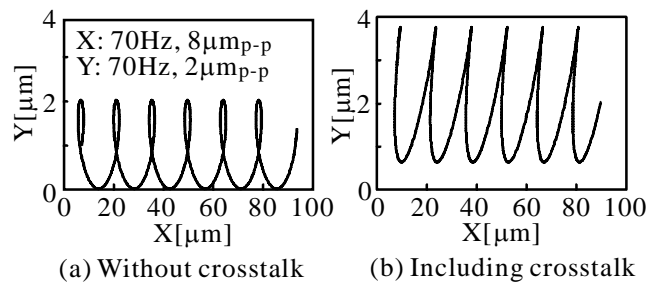


図 4.21 クロストークの影響

このようなクロストークの影響は、予め求めた実験的に影響係数を求めておき、これの逆関数を求めて補正を行うことにより精度を向上することができると考えられる。

精度向上は今後の課題として、多軸振動加工を行って規則形状の創成を試みた。図 4.22 に 2 つの結果を示す。同図(a)は摩耗していない工具を用いた場合の結果を示す。先端に残った研磨痕の粗さがガラス表面に転写され、横振動に対応したピッチの規則形状ができた。工具直径が横方向の振幅に比べ大きなものであったため、工具端形状の影響が強く現れる結果となった。同図(b)は先端部が摩耗し、円錐状になった工具によるか好結果である。加工幅は 22μm と小さくなり、振動軌跡の転写が良く行われたことがわかる。

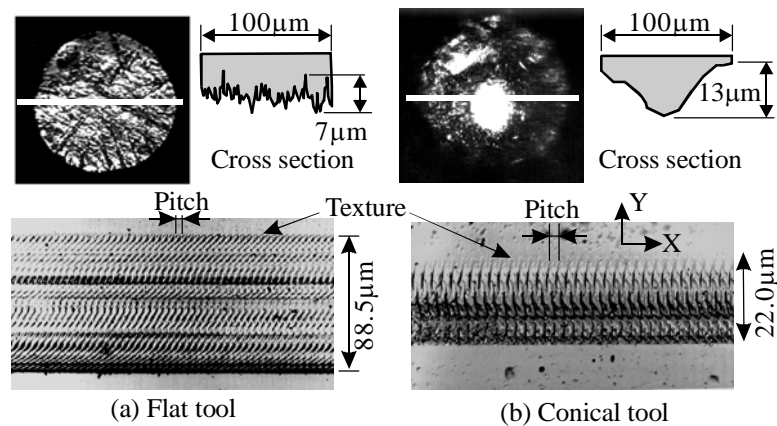


図 4.22 工具端形状とテクスチャリング結果 (X: 140Hz, 2μm, Y: 70Hz, 2μm)

図 4.23 は加工幅全面に着目せず、工具の特定部位が通過した部分について顕微鏡観察を行った結果を示す。同図(a)は X 方向に 140Hz, Y 方向に 70Hz の振動を与えて加工したときの特定部位を調べた結果である。クロストークの影響を含めて理論的に計算される軌跡も図中に示してある。この結果と実験結果は良く対応することがわかる（計算結果の表示縮尺は必ずしも正確でなく縦横比は対応していない）。同図(b)は X 軸の振動周波数を変えた結果であり、やはり、理論的な軌跡と良く対応した形状が観察された。

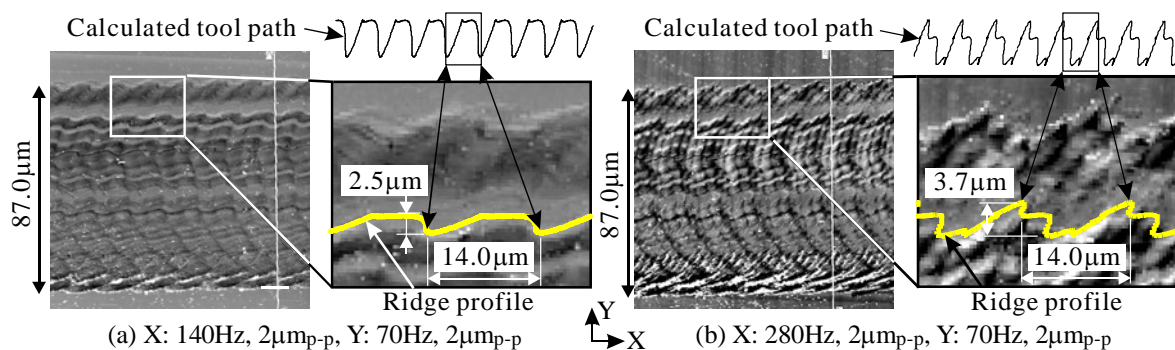


図 4.23 工具軌跡とテクスチャ結果の関係 (lateral feed rate 1mm/s)

図 4.24 にはテクスチャを AFM により観察した結果を示す。一定速送り方向にはピッチに対応した周期構造があるものの、加工対象がガラスであったため十分な加工深さが得られていないことがわかった。

以上の結果より、多軸振動工具によるテクスチャ加工の基本的な考え方は立証することができた。ただし、工具寸法をさらに小さくする必要があること、加工深さを大きくするためには加工性の良い工作物に変更する必要があること等がわかった。

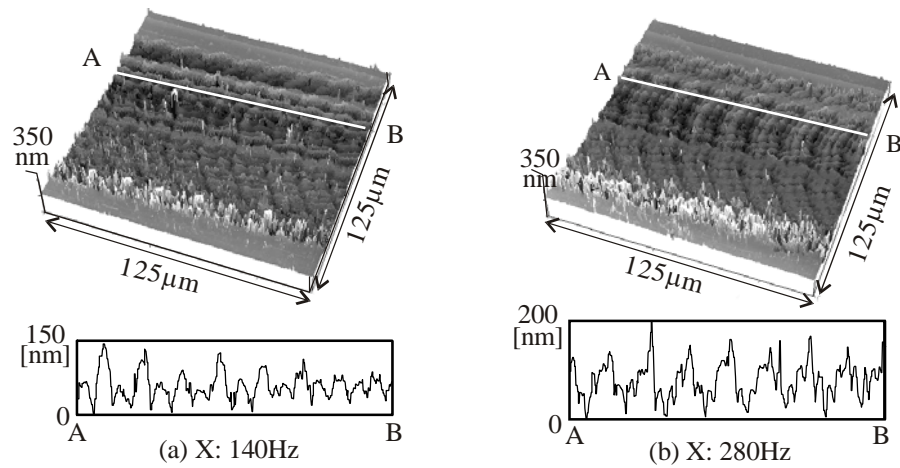


図 4.24 テクスチャの AFM 観察結果 (Y 軸周波数 70Hz)

4.6 まとめ

多軸振動を与えた加工実験を行い、以下の知見を得た。

- ・ 多軸振動の砥粒加工では加工能率の向上と仕上げ面粗さの向上が図ることができる
- ・ 多軸振動の切削加工ではチッピングの発生を抑制し仕上げ面を良好にすることができる
- ・ 多軸振動工具の形状は仕上げ面に良好に転写できる
- ・ 多軸振動のクロストークの影響は無視することはできない
- ・ ただし、工具寸法を微小化するとともに工作物の被削性を良くしないと有意なテクスチャ創成は期待できない

第5章 微細化・高精度化の試み

5.1 実験装置

本章ではテクスチャリングの微細化に併せ、転写精度の誤差要因を調査して改善方法を提案することで、多軸振動加工によるテクスチャ加工の高度化を図るとともに、所望のテクスチャ形状を得る指針を明らかにする。ここで求められる要求仕様として以下の二つが挙げられる。

- ① 加工付加の作用下でも正確な運動軌跡を維持できること（高剛性）
- ② 正確な工具形状を有すること

剛性を高めた振動駆動方法として、再度、圧電素子による振動駆動方法を選択した。用いた圧電素子は電圧 100V の入力に対し $10\mu\text{m}$ の変位を与えることができ、ヒステリシスはあるが微小振動を精度良く得ることができる。なお、静的な駆動ではないため、クリープの影響はないと考えられる。図 5.1 に試作した多軸振動構造を示す。5 つの圧電素子を使用し、工具軸（Z）方向に一本、それと直交（XY）方向に 2 対ずつを対向配置した。対向したねじによって圧電素子の位置調整を行うとともに予荷重をかけ、反転した電圧を印加することでヒステリシスを低減する効果が期待できる。図 5.1 の構造を含めた加工装置の構成図を図 5.2 に示す。圧電素子は振幅 $10\mu\text{m}$ 、周波数 1kHz 程度までの範囲で任意に設定でき、その振幅と位相は 3 軸独立に設定できるようになっている。図 5.3 には全体写真を示す。

実験装置では工具・工作物間の接触検出を精度良く行うために、工作物直下に設置した力センサの出力信号をロックインアンプで増幅している。ここで Z 軸の駆動振動に同調した信号だけを高倍率に増幅している。

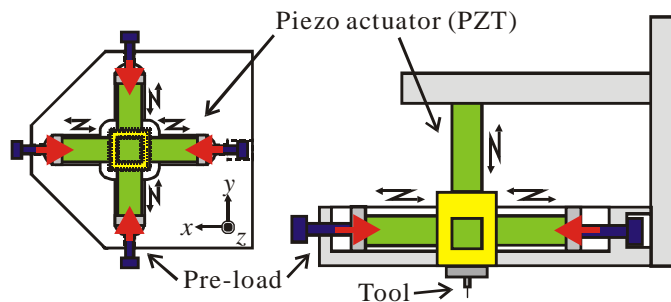


図 5.1 圧電素子の対向駆動構成

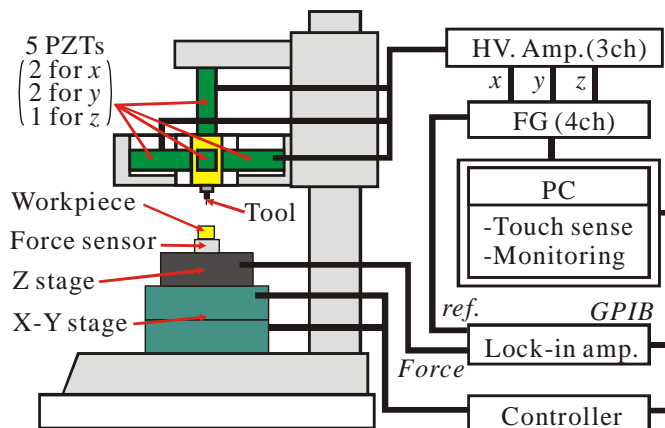


図 5.2 実験装置全体図

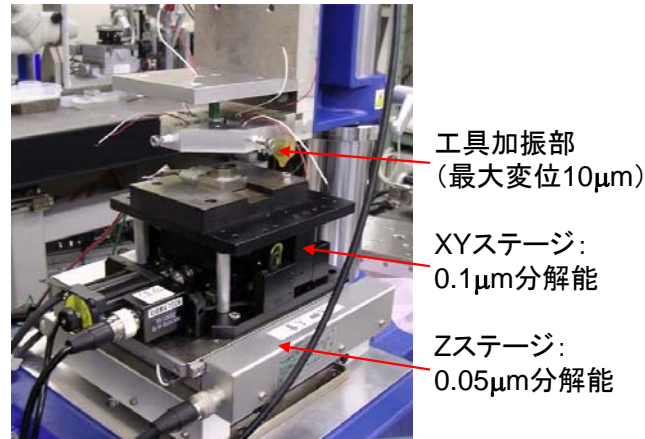


図 5.3 実験装置写真

5.2 AFM チップを用いた加工実験

これまでの実験で用いてきた超硬工具 ($\phi 100\mu\text{m}$) の先端に AFM チップを接着し、これを工具として用いた実験を行った。AFM チップは微小ながら確定的な寸法・形状をもち、硬度の低い工作物であれば工具として用いることができる。図 5.4 は AFM チップ工具の SEM 観察写真を示す。顕微鏡下でチップを位置決めし、チップ背面を接着後、チップ支持部を壊して分離することで工具を製作した。

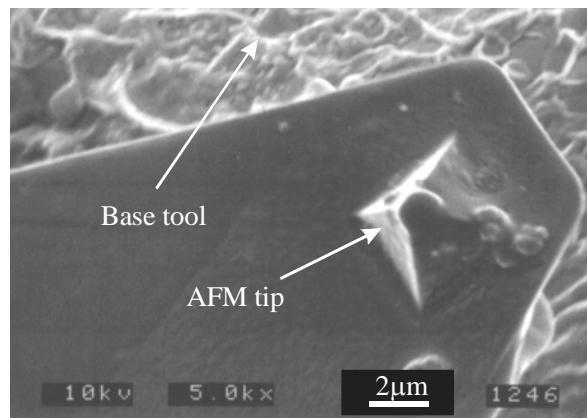


図 5.4 AFM チップ工具

質量が小さくなり慣性力の影響が小さくなった工具には、急激な軌道変化を与えやすくなる。そこで、XY 方向（AFM チップ突起と直交方向）に同期信号を加えて様々な軌跡を与え、可能性を確認する実験を行った。図 5.5 には「矩形」、「円」、「W 字状」、および「たすき掛け状」の各軌跡を与えたときの様子を CCD 顕微鏡で観察した結果を示す。本来は動画であるが、報告書の便宜上、静止画となってしまう、様子を理解することは難しいが、鋭角的な動作にも工具が追従している様子が確認できた。

表 5.1 には今回用いた高電圧アンプなどの装置構成で実現できた波形と周波数範囲をまとめた結果を示す。X および Y 軸に与えた波形および位相差はすべてファンクションジェネレータの機能をそのまま用いた。周波数をさらに高めるためには、工具重量を減少させる、アンプの電源容量を増すといった対策が考えられるが、後者の場合、圧電素子の冷却の工夫をする必要がある。しかし試作した装置では、三角波のように加速度変化の大きい波形を与えた場合に装置から耳障りな音が聞こえるようになり、構造部に不要な振動が発生したことがわかる。つまり、装置剛性を高めることが併せて重要となる。

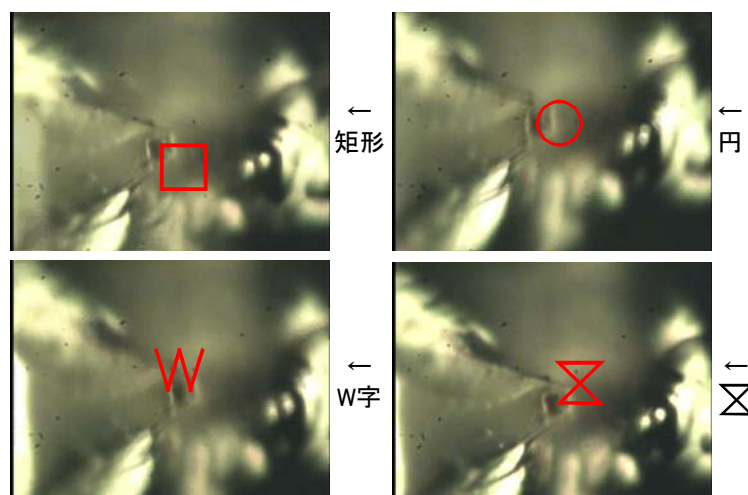


図 5.5 AFM チップ工具に与えた様々な軌跡

表 5.1 様々な工具軌跡と駆動可能な周波数

軸	波形	周波数	位相	工具軌跡
X Y	正弦波 正弦波	100Hz 程度まで 100Hz 程度まで	0 90	○
X Y	矩形波 矩形波	50Hz 程度まで 50Hz 程度まで	0 90	□
X Y	矩形波 矩形波	例えば 25Hz 例えば 50Hz	0 180	✕
X Y	三角波 三角波	例えば 10Hz 例えば 40Hz	0 0	W
X Y	ランプ波 三角波	50Hz 程度まで 50Hz 程度まで	—	△

次いで、AFM チップ工具を用いた加工実験を行った。工具工作物間の接触検出が難しいことに加え、工作物の前仕上げを行って工作物の平面度を高めておく必要がある。そこで、図 5.6 に示すような方法で前仕上げを行った。すなわち、工具加振部分の側方に単結晶ダイヤモンドバイトを固定し、ステージの 3 軸運動を利用してプレーナと同様の切削運動を与え、工作部表面の切削を行った。定量的な評価は行わなかったが、十分な平面度が得られたと考えられる。なお、実験に用いた工作物は良好な転写性が期待できるグラファイトとした。

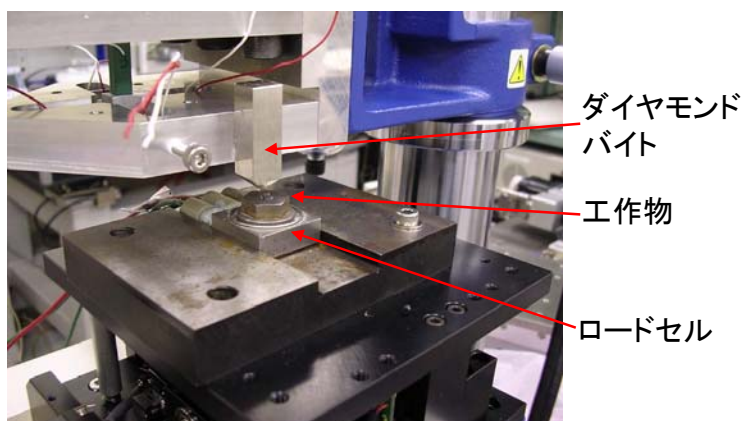


図 5.6 ダイヤモンドバイトを用いた工作物の前仕上げ

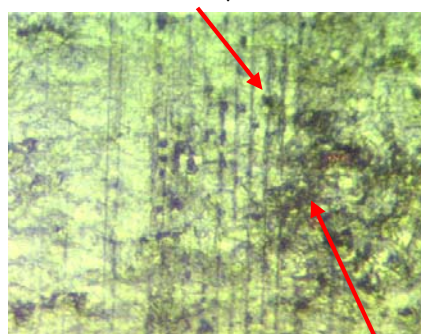
表 5.2 にはテクスチャ加工条件を，図 5.7 に加工結果をそれぞれ示す．ここで水平方向には正弦波を与え，一定速で横送りを与えているだけなので，工作物に残る形状は単純な正弦波形状のはずであるが，加工結果には直線状の溝が残っただけであった．

この結果は機構系の剛性不足による各部の変形や，駆動方法を含めた精度改善のための見直しが必要であることを示唆していると考えられる．また設定切込みを大きくしすぎたため，加工幅はチップ根元の幅と同程度になってしまった．工具・工作物間の接触検出精度に問題があった可能性もある．

表 5.2 AFM チップでのテクスチャ加工条件

Tool material	AFM tip	
Vibration of the tool	Vertical	1kHz, 10 $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$
	Horizontal	1Hz, 10 $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$
Feed rate	100 $\mu\text{m/s}$	
Depth of cut	3 μm (nominal)	
Workpiece material	Graphite (lead in a pencil)	
Fluid	None	

加工部分(溝)，ピッチ10 μm ，設定切込み3 μm



前仕上げ面の粗さが問題

図 5.7 AFM チップを用いたテクスチャ加工結果

5.3 誤差要因の検討

図 5.3 に本研究で用いた軌跡転写法において考えられる誤差要因を列挙する．大別すると，主に以下の 2 つの誤差要因が考えられる．

① 工具の運動誤差

工具に圧電素子を組み合わせて 3 軸振動に駆動するため，この取り付け位置によりアライメント誤差が生じたり，回転振動を含めた不要な振動が発生し，複雑な振動モードとなっている可能性がある．さらに，圧電素子に生じる電圧－変位のヒステリシスが誤差要因となる可能性がある

② 弾性変形による誤差

加工力により工具や支持系（工具シャンク等）が変形する可能性がある．

これらの誤差要因は高精度化の妨げになるため，各因子が転写精度に及ぼす影響を定性的に調べた．

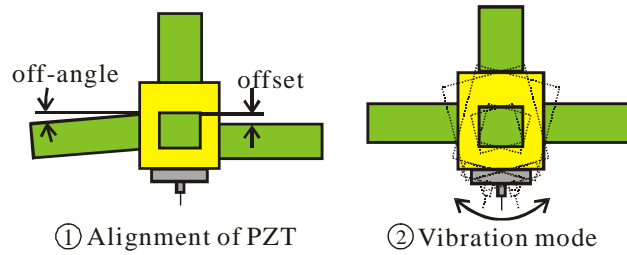


図 5.3 工具駆動系の誤差要因

5.4 工具の運動精度

2 軸以上の圧電素子が同時に駆動する場合、各圧電素子の振動が干渉しあう可能性がある。これらの相関を調べるため、工具側面の変位をレーザ変位計により観察した。図 5.4 は X-Y それぞれに 80V の電圧を位相差 0 度及び 90 度で印加した場合の振動波形を表している。位相差 0 度の場合、振動軌跡は印加電圧と同様に斜線を描くはずであるが(a-1)、実際には楕円型の軌跡になってしまった(a-2)。位相差 90 度の場合においても、印加電圧は円形を描くはずであるが(b-1)、実際の波形は楕円型になった(b-2)。この原因を調査するため、単軸の変位を測定した。

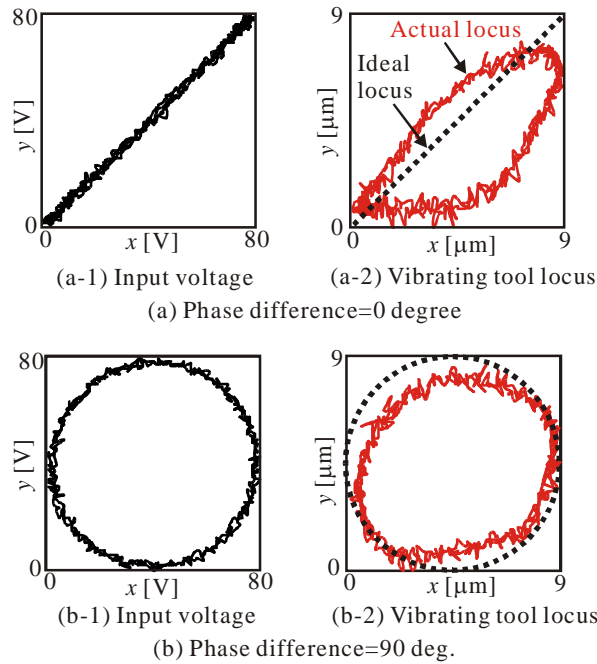


図 5.4 2 軸駆動を行った場合の工具先端の振動変位

図 5.5 は X,Y それぞれ単軸に電圧を印加したときと、X,Y の 2 軸同時に電圧を印加したときの各軸の変位の違いを表している。単軸で電圧を印加する場合、印加電圧に対して(a-1)、位相はちょうど 90 度ずれた(a-2)。一方、同時に駆動させると、Y 方向の変位は X の変位に比べ 0.1 秒ほど遅れた周期で駆動していることがわかる。圧電素子に作用する電圧は直接モニタしていないため、駆動信号と圧電素子の間にある高電圧アンプにも問題があったと見られる。つまり、図 5.4 で見られた軌跡のずれは、増幅回路の位相遅れや、圧電素子の取り付け位置や角度のずれによるクロストーク等の問題が複合的に作用した結果であると考えられる。高精度化のためには、さらに詳細な詰めが必要であるものの、幾つかの課題点を明らかにすることができた。

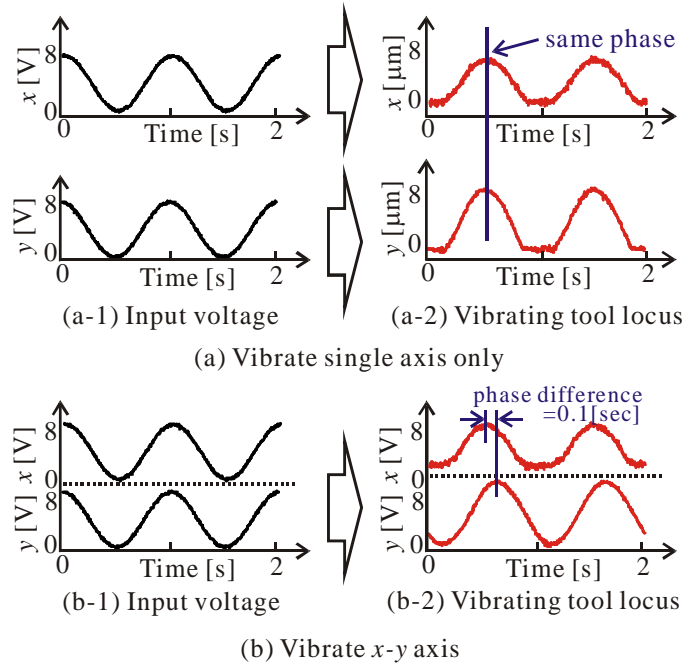


図 5.5 多軸を同時に駆動したときの相互干渉

5.5 テクスチャ転写実験

(1) 工作物及び工具剛性が及ぼす影響

表 5.2 の実験条件において、転写加工実験を行った。テクスチャを精度良く転写するため、工作物として黒鉛やロウを用いた。これらの材料を鋳型として用いることで、他の材料へのパターン転写への応用が期待できる。工具には図 5.6 に示すようなダイヤモンド工具を用いた。本来は微小穴加工のためのドリルとして市販されているものであるが、本研究では縦振動が主たる加工運動であるため、これを転用してテクスチャ加工を試みた。なお、実験に先立ち、機上に設置したダイヤモンドバイトで工作物表面の前仕上げを行い、平面度を高めた後、テクスチャ加工を行った。

図 5.7 はダイヤモンド工具を用いてロウ表面および黒鉛表面に軌跡転写を行った結果である。図の上側が予測される工具先端の軌跡であり、ここでは正弦波状のものである。図の下側は実際に得られたパターン形状を示す。ロウに転写を行った場合(同図(a)), 工具軌跡と同様の傾向を持つ正弦波パターンが転写されていることがわかる。この場合、振動周期(空間波長)は精度良く転写されているが、テクスチャの振幅は予想された工具軌跡よりも小さくなった。黒鉛に軌跡転写を行った場合(同図(b)), 工具軌跡のような形状は得られず、直線形状を成していた。一方でシャンク部に接着剤を付けて肉盛りし、剛性を強化したダイヤモンド工具で黒鉛を加工すると、振動軌跡と同様のパターンが転写された。よって、シャンク部の弾性変形が支配的な要因であったと考えられる。

(2) 工具形状の転写性

工具の先端形状は、テクスチャ形状に大きな影響を及ぼす。図 5.7 で得られたパターンの断面形状と実際の工具形状を比較した。図 5.8 にその結果を示す。ロウの場合(同図(a)), 工具軌跡とほぼ同様の形状が加工されている。一方で黒鉛の場合(同図(b)), 工具形状よりも大きい形状が加工されている。後者の場合、工具振動軌跡が転写できたとはいえず、与えられた振動により加工幅が広がっただけの結果となった。やはり、この場合は工具の支持剛性が支配的であると考えられる。

表 5.2 典型的な加工条件

Tool		Diamond (tip $\phi 2\mu\text{m}$)
Depth of cut		$0.1\sim 1\mu\text{m}$
Vibration (x,y,z)	Amp.	$0\sim 10[\mu\text{m}_{\text{p-p}}]$
	Freq.	$1\sim 100[\text{Hz}]$
Environment		Air, 20°C , 50%RH
Workpiece		Hardness [knoop] E [GPa]
Graphite		16~35 9~14
Paraffin		3

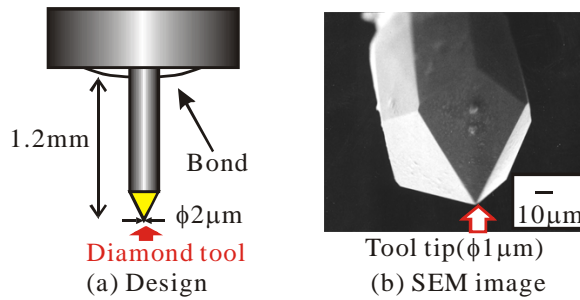


図 5.6 使用したダイヤモンド工具とシャンク寸法

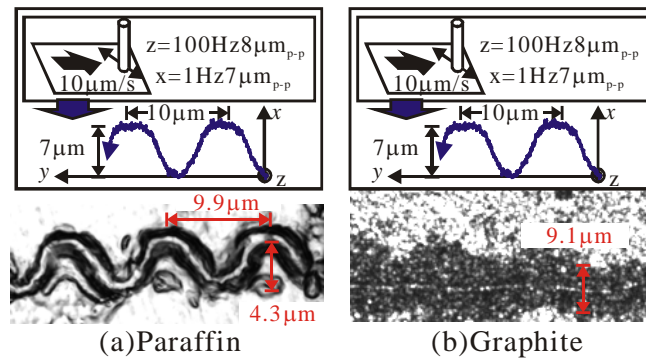


図 5.7 ダイヤモンド工具を用いたテクスチャ加工結果

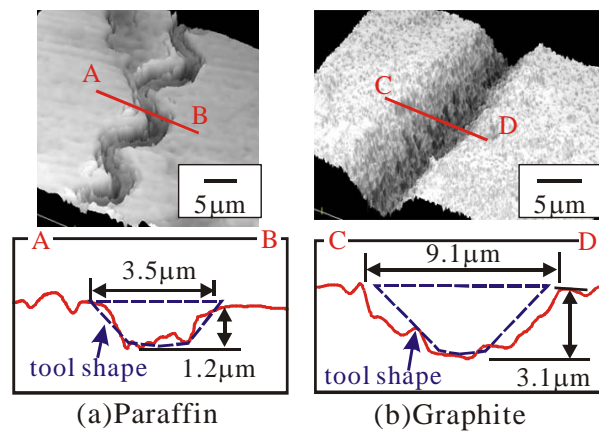


図 5.8 断面形状観察結果

5.6 工作物の違いに関する考察

これらの結果を考察すると、工具の剛性が転写精度に大きく影響することがわかる。図 5.9 は材料が異なる場合の転写プロセスの違いを考察したモデル図である。ロウのように軟らかい材料を加工する場合(同図(a)), 工具の剛性はそれほど重要ではなく、転写精度も良好である。そのため、工具断面形状も精度良く転写される。一方で黒鉛のように硬度が高い材料では(同図(b)), 工具に変形が起こり、十分なパターン転写が行えなくなると考えられる。また、脆性破壊による加工が進むため断面形状は工具先端形状よりも大きくなってしまう。変形を防ぐためにはシャンクを短く、全体の剛性を高くする必要がある。

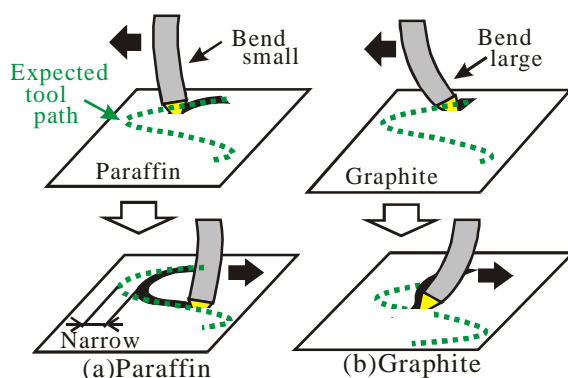


図 5.9 想定される工具の変形

5.7 振動軌跡の三次元化及び大面積化

図 5.10 に Z 軸の周波数を低くした場合のロウ表面のテクスチャ形状を示す。Z 方向の周波数が 100Hz の場合(同図左), 加工底面は平坦になる。一方で Z 方向の周波数を 10Hz にすると (同図右), 水平方向のパターン上に微細な凹凸が加工できていることがわかる。この結果から、Z 軸の振動周波数を低くすることでより複雑なパターンを加工することができる。

これらの加工を繰り返すことで図 5.11 のように大面積にテクスチャを加工することが可能になる。この結果より、 μm オーダピッチのテクスチャを数 100mm にわたり加工できる可能性が示された。

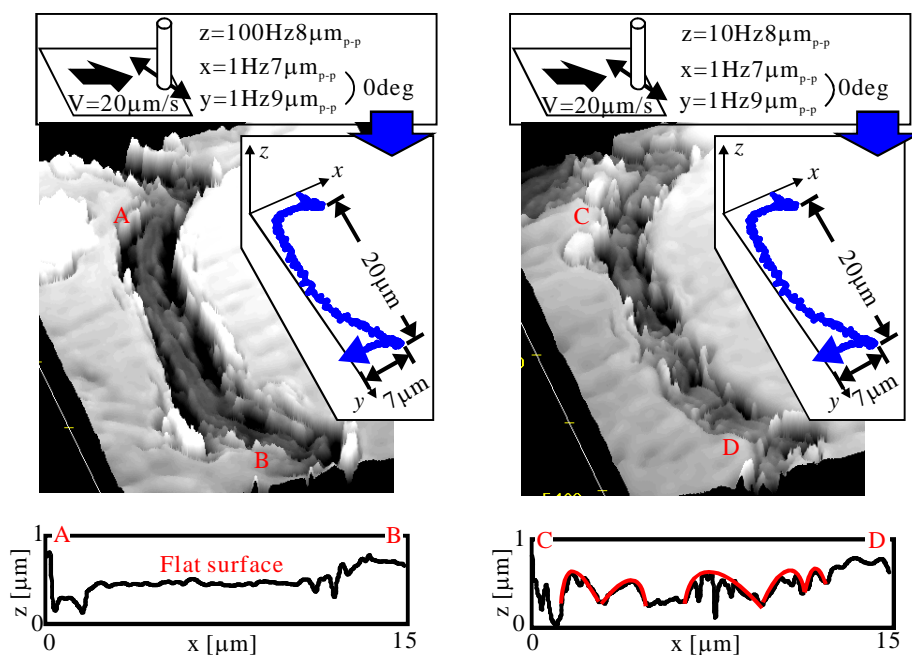


図 5.10 Z 軸周波数の影響

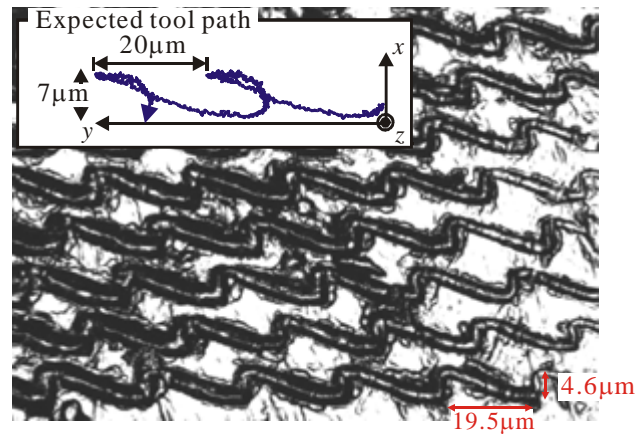


図 5.11 複数列を配置したテクスチャ

5.8 結果の総括とテクスチャ設計指針

前章で示した最小加工寸法は $22\mu\text{m}$ 程度であったのに対し、本章での改善により $2\mu\text{m}$ となり、分解能の高いテクスチャパターンが加工でき、本研究の目標に到達することができた。さらに加工可能な形状も波形状、円形状など多様となり、本研究で目的とする三次元加工が可能になった。

最後に、所望のテクスチャ形状を加工する場合の加工条件選択手順を図 5.12 に示す。精度の良い加工を行うためには加工負荷を考慮して駆動および工具支持系の設計を行うべきであり、その後のテクスチャ形状は幾何学的な関係から最終形状を見積もればよいと考えられる。

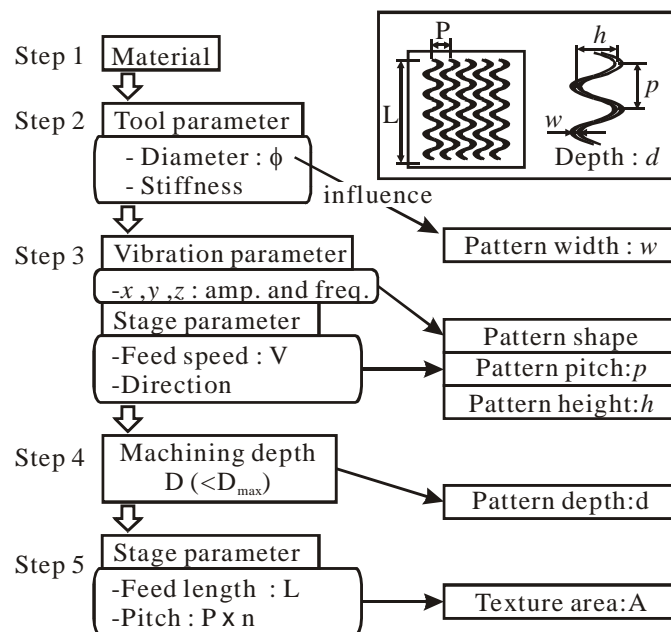


図 5.12 テクスチャ設計の考え方

形状精度については、前述のような方法で高精度化が可能と考えられるが、今後の課題として、加工精度の安定性を向上させる必要がある。例えば、工作物の硬度が変わると工具・工作物接触検出の精度・再現性も変動してしまう。本研究で検討した高調波成分の検出などに加え、さらなる高度化を検討する必要がある。

5.9 まとめ

3 軸振動する加工装置を開発するとともに，ロウ表面と黒鉛表面にテクスチャ加工を試みた結果，以下のことが明らかになった．

- ・ テクスチャ加工の高精度化のための指針を明らかにした
- ・ 工具運動と工具・工作物間の剛性はテクスチャ加工に強い影響を及ぼす
- ・ 工具振動軌跡を転写したテクスチャ（ピッチ $10\mu\text{m}$ ，振幅 $5\mu\text{m}$ ，溝幅 $1\mu\text{m}$ ，深さ $1.7\mu\text{m}$ ）を加工できた

第6章 結 論

本研究では振動加工と一定速度の送りを組合せ、工具とその運動軌跡を固体表面上に残すことでテクスチャを加工する方法について以下の点を明らかにすることを目的とした。

- (1) 原理の検証と適用範囲の明確化
- (2) 更なる高精度化のための課題抽出と解決法の検討を行うこと

各章で得られた知見を総括すると以下ようになる。

第2章では様々な表面機能と加工法について述べるとともに、本研究で扱うテクスチャの概略仕様を示した。

第3章では超音波振動加工に関する基礎実験を行い、以下の知見を得た。

- ・ 砥粒加工では仕上げ面粗さの向上が難しく、工具の摩耗も無視できない
- ・ ガラスの材質によっては切削加工によって平滑面が得られ、工具摩耗も少ない
- ・ 切削の場合、工具先端形状の影響を強く受け、先端を丸める方が滑らかな加工を行いやすい
- ・ 深い形状の加工では切りくずの排出性が仕上げ面粗さとチッピングの発生に影響を及ぼす
- ・ 40kHz で変動する加工力をリアルタイムで測定でき、加工力の変化をモニタすることにより、加工状態を把握できる
- ・ 超音波振動を利用することで工具を機上成型できる

第4章では多軸振動を与えたテクスチャ加工までを行い、以下の知見を得た。

- ・ 多軸振動の砥粒加工では加工能率の向上と仕上げ面粗さの向上が図ることができる
- ・ 多軸振動の切削加工ではチッピングの発生を抑制し仕上げ面を良好にすることができる
- ・ 多軸振動工具の形状は仕上げ面に良好に転写できる
- ・ 多軸振動のクロストークの影響は無視することはできない
- ・ ただし、工具寸法を微小化するとともに工作物の被削性を良くしないと有意なテクスチャ創成は期待できない

第5章では3軸振動する加工装置を開発するとともに、ロウ表面と黒鉛表面にテクスチャ加工を試みた結果、以下のことが明らかになった。

- ・ テクスチャ加工の高精度化のための指針を明らかにした
- ・ 工具運動と工具・工作物間の剛性はテクスチャ加工に強い影響を及ぼす
- ・ 工具振動軌跡を転写したテクスチャ（ピッチ 10 μm 、振幅 5 μm 、幅 1 μm 、深さ 1.7 μm ）を加工できた

今後の課題として、以下を検討する必要がある。

- ・ 多軸運動の精度をさらに向上させること
- ・ 実現可能なテクスチャ形状を一般化すること
- ・ テクスチャによって発現される表面機能の評価を行うこと
- ・ その他

参考文献

- (1) Evans C. J., Bryan J. B., 1999, “Structured”, “Textured” or “Engineered” Surfaces, *Annals of CIRP*, 48, 2, 541.
- (2) Schaffer, C. B., Brodeur, A., Garca, J. F., Mazur, E., 2001, Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy, *Optics Letters*, 26, 2:93-95.
- (3) Bien, D. C. S, Rainey, P. V., Mitchell, S. J. N., Gamble, H. S., 2003, Characterization of masking materials for deep glass micromachining, *J. Micromech. Microeng.* 13:S34-S40.
- (4) Onikura, H., Kanda, T., Ohnishi, O., Aizaki, M., Kumekawa, K., 2000, Effects of Drill Form and Low-Frequency Vibration on Prevention of Exit Burr in Cross-Hole Drilling, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Progress of Machining Technology*:480-485.
- (5) Shamoto, E., Moriwaki T., 1994, Study on elliptical vibration cutting, *Annals of CIRP*, 43, 1:35-38.
- (6) Shamoto, E., Moriwaki T., 1999, Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting, *Annals of CIRP*, 48, 1: 441-444.
- (7) Makizaki, T., Uematsu, T., Suzuki, K., 1999, Study on Ultrasonic Elliptical Vibration Grinding. 3rd report, *Journal of JSAT*, 43, 5: 220-225.
- (8) Kuriyagawa, T., Syoji, K., Shirokawa, T., Saitoh, O. 2002, Development of Micro Ultrasonic Abrasive Machining System. 1st report, *JSME Int. Journal. Ser C. Mech. Systems, Mach Elem. Manuf.*, 45, 2: 593-600.
- (9) Wang, A. C., Yan, B. H., Li, X. T., Huang, F. Y., 2002, Use of micro ultrasonic vibration lapping to enhance the precision of microholes drilled by micro electro-discharge machining, *Int. J Mach. Tools Manuf.*, 42, 8:915-923.
- (10) Rentsch, R., Zhang, C., 2003, Ultrasonic Assisted Lapping for the Manufacture of High Surface Quality Microstructures on Brittle Materials, *Int. Conf. on Leading Edge Manu. in 21st Century*, *JSME*: 5-10.
- (11) Moronuki, N., Brinksmeier, E., 2002, Micromachining of brittle materials by ultrasonic lapping with tool wear compensation, *Proc. of 3rd euspen Int. Conf.*:399-402.
- (12) Moronuki, N., Yoshida, F., Sato, Y., Kaneko, A., 2004, Abrasive Micromachining with a Multi-Axes Vibration Tool, *Key Engineering Materials*, 257-258:447-452.
- (13) 諸貫, 高山, 金子, 2004, 濡れ性制御のためのテクスチャ設計, *日本機械学会論文集 B 編*, 70, 693, pp.1244-1249.
- (14) Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim, Bionik, Siemens Forum, 1998.
- (15) 赤池, 金谷, 2004, *NATURE-TECH カタツムリがおしえてくれる*, *ダイヤモンド社*.
- (16) 科学技術振興機構ホームページ <http://www.jst.go.jp/kisoken/seika/zensen/08matsui/>
- (17) Kinoshita S. and Yoshioka S., 2005, *Structural Colors in Biological Systems Principles and Applications*, Osaka University Press.
- (18) Moronuki N., Furukawa Y., 2003, Frictional Properties of the Micro-Textured Surface of Anisotropically Etched Silicon, *Ann. CIRP*, 52, 1, pp.471-474.
- (19) Furukawa, Y., Moronuki, N., 1988, Effect of Material Properties in Ultra Precise Cutting Processes, *Annals of CIRP*, 37, 1:113-116.
- (20) 藤山, 金子, 諸貫, 川上, 2004, ラビングによるポリイミドの自己組織化ナノパターンに関する研究, *精密工学会春季大会*, pp.1023-1024.
- (21) 茂木, 諸貫, 金子, 2005, テクスチャを利用した微粒子の自己整列テクスチャを利用した微粒子の自己整列, *精密工学会春季大会*, pp.485-486.
- (22) 小木曾, 諸貫, 金子, 2004, ぬれ性パターンニングを援用した微粒子の自己整列(第2報)OTS/SiO₂ぬれ性パターンの利用, *精密工学会春季大会*, pp.721-722.

