

3D_machining によるマイクロプリズムアレイ金型の加工

Machining of Micro Prism Array Die Using 3D machining Unit

高橋 正行
Masayuki Takahashi

田代 功
Isao Tashiro

和田 紀彦
Toshihiko Wada

要 旨

著者らは、“3D_machining”ユニットによる加工技術を開発している。3D_machining ユニットは、直交する3軸の圧電素子の交点に工具を配置することで、3次的に工具を高速駆動することができる。この3D_machining ユニットは、3軸制御可能な Fast Tool Servo に加えて、振動切削との併用も可能な世界初の加工ユニットである。本技術をマイクロプリズムアレイ金型に適用し、加工時間 従来比1/7 (33時間) を実現した。

Abstract

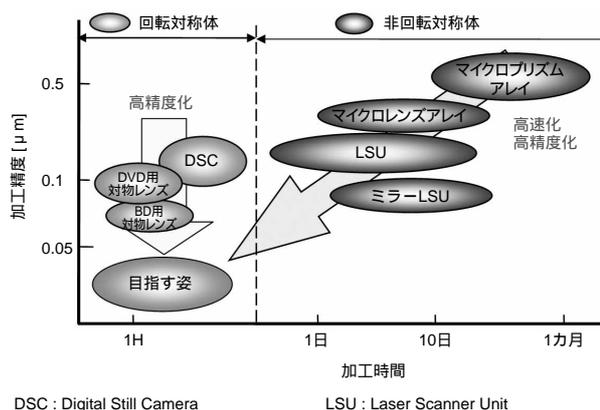
We have developed machining technology using a 3-axis Fast Tool Servo unit (We called "3D machining"). The 3D machining unit can drive the cutting tool freely in 3D space by controlling the motion of the three piezoelectric actuators arranged along the three axes of the orthogonal coordinates. The 3D machining unit can use vibration cutting as well as the functions of the 3-axis Fast Tool Servo. In this report, high-speed machining of dies has been studied by employing the high speed 3-axis motion of the 3D machining unit. The dies for a micro-prism array could be machined by using the developed 3D machining system. As a result, machining time was decreased to 1/7 the time by conventional methods.

1. はじめに

光学デバイスの小型化、高機能化に伴い、要求される形状も軸対称非球面から非軸対称自由曲面へと変化し、バックライトパネルや回折格子などの微細溝形状を有する光学素子のニーズも増加している。その中で、マイクロレンズアレイなどの光学デバイスの製作方法の1つに、超精密機械加工がある。しかし、超精密機械加工は、加工形状の自由度が高く良好な加工面あらかさが得られる一方で、各パターン形状を順次位置決めしながら加工するため、加工に長時間を要する。この加工法は、単に生産性が低いと言うに留まらず、加工時間の長さが精度の悪化を招く問題をかかえている。

第1図に、光学デバイスの加工時間と精度の関係を示す。たとえば、BD (Blu-ray Disc) 用対物レンズ金型は非常に高精度に製作されるが、1回の加工に要する時間は1時間以内である。それに対してマイクロレンズアレイに代表される非回転対称形状を有する光学デバイスは、加工時間が数日に及ぶことも頻繁に生じる。これらのデバイスを高精度化するためには、加工機や工具、加工環境の高精度化も必要であるが、加工時間を大幅に短縮することが最も重要であると考えられる。

著者らは、非回転対称形状を有する光学デバイスの加工時間短縮および高精度化を目的として、ナノメータオーダーで制御できる超精密3軸制御ファストツールサーボ(以下、FTSと記す)加工システムを開発している^{1)~3)}。特に、FTSに加えて、振動切削⁴⁾も同時に実施することができる独自の加工システムであり、ここでは



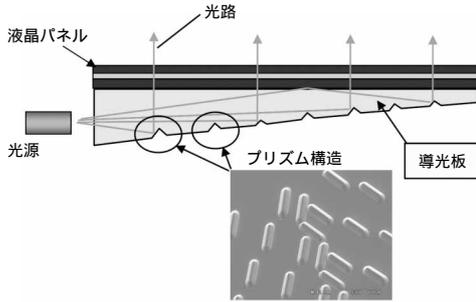
第1図 光学デバイスの加工時間と精度

Fig. 1 Accuracy-machining time for optical device

“3D_machining”と呼ぶ。本報では、振動切削に適した3D_machining ユニットの開発を新たに開発し、マイクロプリズムアレイ金型の加工に適用した結果、従来法に比べて大幅に加工時間を短縮できたので、その内容について報告する。

2. マイクロプリズムアレイ金型と新加工法

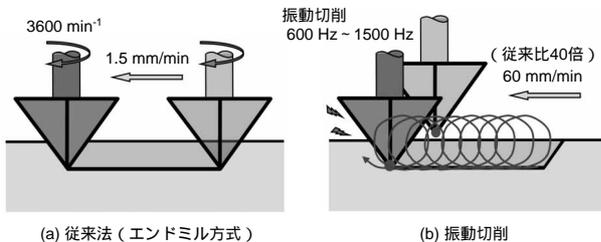
液晶パネルに使用される導光板の一例を、第2図に示す。第2図の導光板では、表面に長さが10 μm ~ 500 μm、深さ5 μmのV字型の断面形状を有するマイクロプリズムが多数配置され、光を折り曲げて液晶パネルを背面側より照らす構造となっている。この導光板は、樹脂の射出成形により製作される。その射出成形時に使用する金型のマ



第2図 マイクロプリズムアレイ導光板
Fig. 2 Light-guiding plate with micro prism array

マイクロプリズムアレイの加工方法を、第3図に示す。加工するマスタ金型表面には無電解ニッケルめっきが施してあり、そのめっき層のみを機械的に除去加工する。第3図(a)の従来法(エンドミル方式)は、工具となる角錐形のダイヤモンド工具を、エンドミルのごとく軸回転させて加工する。この方式は工具の先端ブレなどにより精度悪化が生じるために、高速回転が困難で、加工時間の短縮が容易でない。そのため、従来法(工具送り速度1.5 mm/min)で、25万点のプリズムアレイを有する2.2インチパネル用金型を加工すると、240時間(10日)を要していた。また、工具摩耗が顕著に生じるため、金型一面加工ごとに工具交換が必要であった。

第3図(b)に、提案する振動切削法を示す。本方式は、工具を円(もしくは楕円)振動させて加工する方式である。たとえば、1500 Hzで振動すれば、工具が毎分90000回転することに相当する。周速度の比較から、従来法に比べて1桁、加工時間の短縮が期待できる。また、工具先端も様な周速度が得られるので、振動切削の特徴である切りくずの引き上げ効果⁴⁾とあいまって、工具寿命の改善にもつながると考えられる。



第3図 マイクロエンドミル方式と振動切削の比較
Fig. 3 a) Micro E/M method vs b) Vibration cutting method

3. 振動切削用3D_machiningユニット

従来開発してきた3軸制御ファストツールサーバは、研究開発用の原型モデル¹⁾であったので、後述するような実用面で問題が多くあった。そこで、今回新たにFTS機能と振動切削が可能な専用の3D_machining ユニットの設計した。

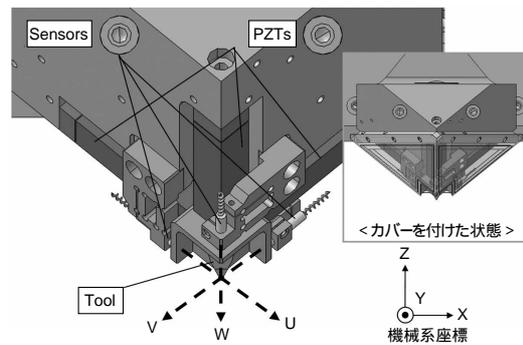
3.1 3D_machining ユニットの設計

加工ユニットとしての高精度化、および信頼性向上のために、以下の点を考慮し設計した。

- (1) アッペの誤差を最小にする構造
- (2) 加工ユニットと被加工物の干渉を回避した設計
- (3) 加工ユニットとして信頼性の向上
- (4) ユニットの固有振動数3 kHz以上(目標値)

第4図に、開発した3D_machining ユニットの模式図を示す。今回の開発では、アクチュエータとして用いた積層型圧電素子の伸縮を測長するための3つの変位センサの延長線が一点で交わるように配置し、その交点部とダイヤモンド工具の先端が一致するようにした。このレイアウトにより、アッペの誤差を最も少なくすることができた。使用した圧電素子の最大ストロークは40 μm、変位センサには1 nmの分解能を有する静電容量センサを用いた。また、圧電素子の駆動軸(u-v-w軸)が、機械系の動作軸を示すX-Y-Z軸に対して、傾いて設置してある。この配置により、加工ユニットの工具と加工物との干渉を容易に避けることが可能となり、実用性が増した。加えて、同図中に示すように駆動部を覆うことで、加工液供給時の液の飛散からセンサやアクチュエータを保護することが可能となり、信頼性の向上が図れる。また、ユニットは可能な限り対称構造とし、すべて低熱膨張材を使用した。

今回開発したユニットの最小固有振動数は、4.7 kHz(解析値)であった。また、圧電素子の一軸が伸縮動作す



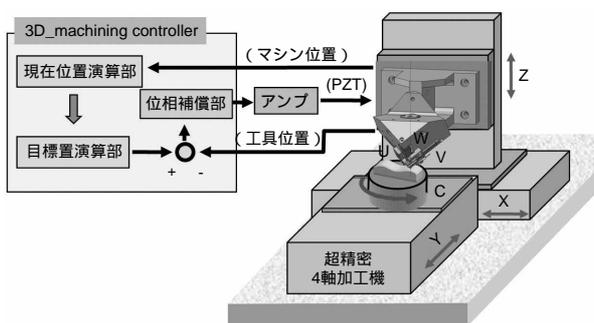
PZT: チタン酸ジルコン酸鉛(圧電素子)

第4図 開発した3D_machiningユニット

Fig. 4 Developed 3D_machining unit

ると、他の2軸にはせん断力が発生するので圧電素子の破損が心配されたが、1週間におよぶ連続駆動においても故障はしなかった。

第5図に、3D_machining ユニートを搭載した加工システムを示す。搭載した超精密加工機側から4軸（X, Y, Z, C）の位置情報が、開発した3D_machining ユニートの制御装置に入力される。その制御装置内部で現在位置と目標位置の差分をリアルタイムに演算し、圧電素子を三次元的に駆動することで位置補償するシステムである。また、工具に振動を与える制御システムも有している。



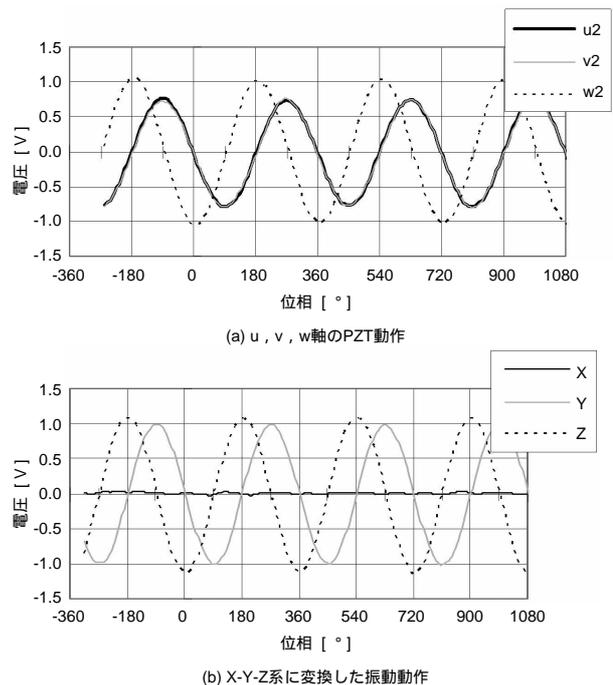
第5図 3D_machining ユニートを搭載した加工システム
Fig. 5 Schematic view of machining system

3.2 加工ユニットの評価

圧電素子の動作する直交軸（u-v-w）と、ユニットを搭載した加工機側の加工軸（X-Y-Z）は、次の（1）式によって定義される。振動切削時の圧電素子への指令は、加工機座標Y-Z面で振動動作するように操作する。同様に、開発した3D_machining ユニートの振動状態を測定した。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \dots\dots (1)$$

第6図に、1500 Hz, ±2.5 μm（同図中の縦軸 ±1 V）の振動切削動作結果を示す。第6図（a）は、圧電素子のu-v-w軸上での動作結果である。本例の場合、w軸の圧電素子が最も大きく動作している。この結果をデータロギに取り込んで、X-Y-Z座標に変換した結果を、第6図（b）に示す。この結果から、Y-Z面内で±2.5 μm（±1 V）の円振動していることが確認できる。加工ユニットは160時間連続駆動させたが、工具の振動軌跡はもちろんのこと、その位置が変化することもなかった。この条件ではw軸が動作開始から約30分で40 に達し、以後安定した。圧電素子の消費電力、発熱などを考慮して、本ユニットの振動動作の上限値を1500 Hz, ±2.5 μmとした。

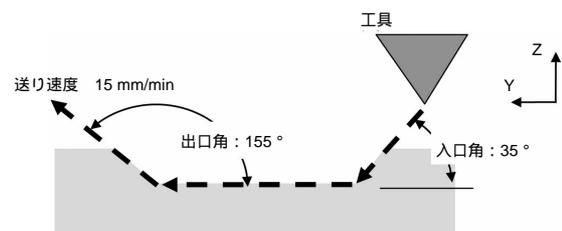


第6図 PZTの振動動作
Fig. 6 Measured loci of vibration

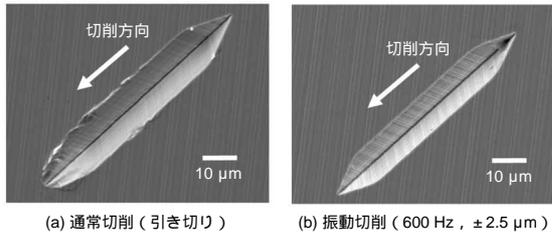
3.3 振動切削による基礎検討

次に、振動切削により、マイクロプリズムアレイ金型の加工が可能か、本ユニットを使って基礎検討した。

第7図に、金型のプリズム部となるV溝を加工する工具軌跡を示す。四角錐状の工具は、Y-Z面内で走査するように取り付けてある。同図中に示すように、加工面に対して35°の角度で進入し、所定のプリズム長さぶんY軸に沿って移動し、155°の角度で退避するように走査する。一連の送り速度は15 mm/minである。第8図に、a) 通常切削と、b) 振動切削（600 Hz, ±2.5 μm）で実験した加工痕のSEM（Scanning Electron Microscope）像を示す。第8図（a）の場合、加工痕の周辺にバリが生じている。対して第8図（b）ではバリの発生は無くシャープであるが、プリズム部（V溝の左右の斜面部）に工具の振動の痕跡が生じている。この工具振動の痕跡は振動切削特有のもの

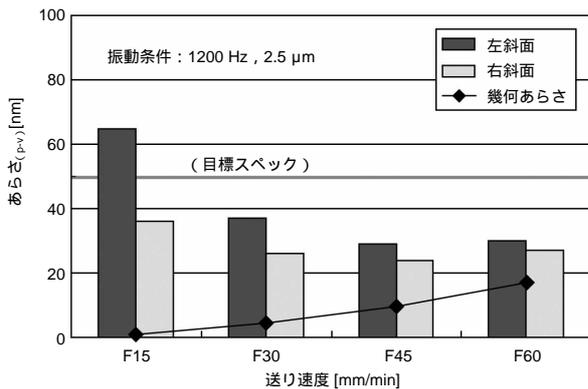


第7図 プリズムアレイ部の加工方法跡
Fig. 7 Cutting method of micro prism part



第8図 振動切削の効果
Fig. 8 Effect of vibration cutting

であり、周期的に生じた凹凸の高さは数ナノメートルオーダーである。第9図に、1200 Hz, ±2.5 μmで振動切削したときの、送り速度と加工面あらかさの関係を示す。実験条件内で最も速い60 mm/minで走査した場合でも、面あらかさの目標仕様であるp-v値50 nm以下である。従来法による工具の送り速度1.5 mm/minに比べて、40倍高速に加工できた。



第9図 プリズムアレイ金型のV溝側面あらかさ
Fig. 9 Roughness of prism part

4. マイクロプリズムアレイ金型への適用

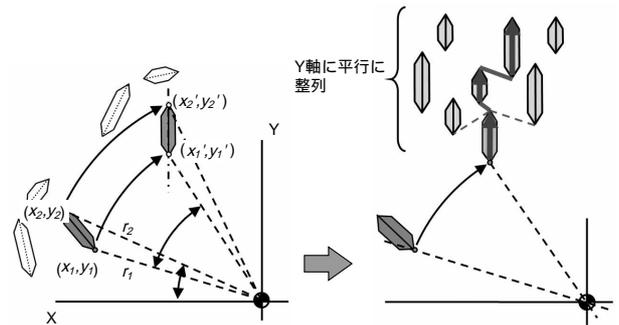
4.1 NC (Numerical Control) データの作成と加工条件

第2図に示したとおり、加工対象とするマイクロプリズムアレイ金型は、プリズム部となるV溝がさまざまな角度に配置されている。各V溝の加工は、工具の進行方向となるY軸とV溝の角度が一致するようにC軸を回転させ、回転後の加工始点位置へ加工機を位置決めした後に行う。光学設計に基づいて配置されたV溝を順次加工すると、膨大な加工時間となる。そこで、次のようなアルゴリズムに基づいて、加工用NCデータを生成するプログラムを開発した。

第10図³⁾に、プリズム部となるV溝の加工順を示す。まず始めにV溝をY軸と平行に整列し、次に1つのV溝加工

終点から、次の開始点までのベクトルが最小となるV溝を次の加工開始点となるように並べ直して(同図中

の順に加工), NCデータを作成した。加工機の動作条件は、C軸回転速度1800°/min, X, Y軸の移動速度240 mm/min, V溝加工速度60 mm/minとした。25万点の加工時間をシミュレートすると、総加工時間が24時間となり、1つのV溝を移動時間含めて0.34秒で加工する必要があった。また、第1表に加工条件をまとめて記す。



第10図 ランダムなプリズムアレイ金型の加工手順
Fig. 10 Machining method of micro prism array

第1表 加工条件

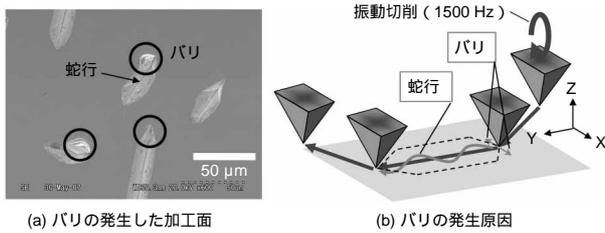
Table 1 Machining condition

工具	ダイヤモンド工具 (四角錐) すくい角-24.3°, 逃げ角48°	
被削材 (サイズ)	アレイ数 Ni-Pめっき	250000ドット (2.2 inch) 100 μm (厚み)
加工条件	加工速度 切込み深さ 加工液	60 mm/min (V溝加工時) 5 μm オイルミスト
振動条件	振動数 振幅	1500 Hz (p-p) 5 μm

4.2 バリの発生原因

次に、上記のアルゴリズムによって製作したNCデータに基づいて、最初に加工した結果を、第11図(a)に示す。第11図より、多くのV溝部の加工始点側でバリが発生していることが判明した(第11図中 印)。また、蛇行と思われる加工痕跡も観察された。第11図(b)に示すようにV溝加工中に工具が、進行方向と異なるX軸方向に相対運動していることが原因と推定される。

3D_machining ユニットに取り付けられた工具は、加工スタートと同時に1500 Hzで振動し、加工が終了まで止まることがない。本金型を加工するためのNCデータによる加工機の動作は、1) X-Y面内で移動, 2) C軸回転, 3) Y-Z面内でV溝加工動作, をプリズム点数分繰り返している。そこで加工機側の動特性を測定した結果、100 msオーダーで次々と加工点が移動する動作を機械の有する最高

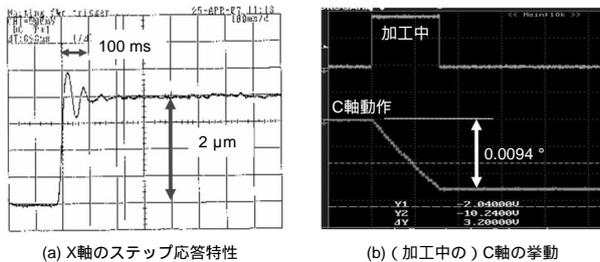


第11図 加工動作とバリの発生原因
Fig. 11 Machined V-groove with burr

速度で行った場合、過渡応答が収束する前に次の動作に移っていることがわかった。

第12図に、3D_machining ユニットの搭載している超精密加工機の動特性の一例を示す。第12図(a)にX軸のステップ応答を示す。2 μmのステップ動作においても、振動が収束するのに数100 ms要している。高速度で移動した後の位置決め動作には、第12図の例以上に収束時間を要することが想像される。第12図(b)にはC軸旋回後、V溝加工動作中のC軸の挙動を示した。C軸は本来加工中には静止するべきにもかかわらず、動作している。特にC軸の挙動は、旋回直後に加工動作が始まるので、X軸の挙動以上に影響が大きい。C軸旋回中心より遠くに離れたV溝を加工する場合、わずかな旋回動作でも大きなバリが生じる可能性があり、またV溝の加工位置の誤差としても大きく現れる。

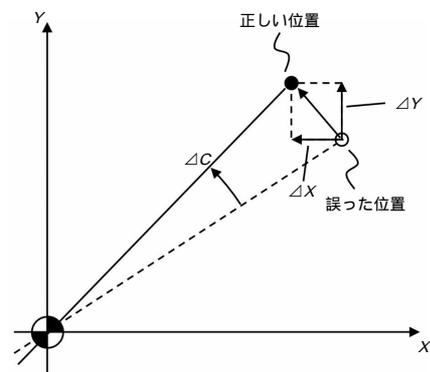
そこで、以上の2点が本当にV溝のバリ、蛇行の発生原因であるか確かめるために、先程のNCデータの位置決め動作ごとに0.5秒のタイム(ドウェル)を入れて加工した。すなわち、位置決め動作ごとに過渡応答が収束した後、次の動作に移るようにNCデータを作り変えた。その結果、バリ、蛇行が生じないことが確認できた。しかしながら、加工に120時間(5日)を要する結果となった。



第12図 X軸、C軸の動特性
Fig. 12 Dynamic characteristics of machine

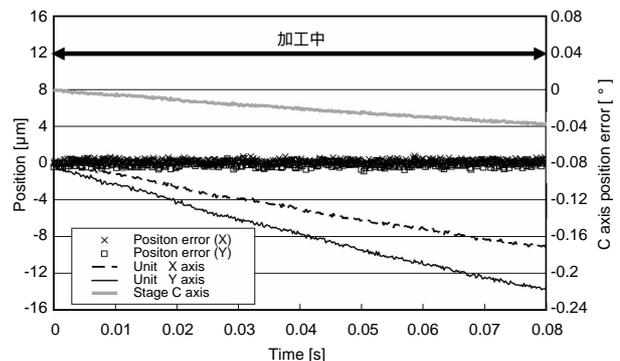
4.3 3軸制御FTSによる動作補償

3D_machining ユニットの本来3軸制御FTSとして開発された。そこで、FTSの機能を使って動作補償を試みた。一例として、先述したC軸の回転誤差の補償について説明する。第13図³⁾に示すように、C軸に回転誤差 ΔC が生じた場合、直交座標系に分解して ΔX 、 ΔY だけ補正すれば回転誤差を補償できる。これは、開発した加工システムが、リアルタイムに加工機側の位置情報から誤差を演算し、3D_machining ユニットの圧電素子を伸縮制御することで可能となる。



第13図 C軸動作のFast Tool Servo による補正
Fig. 13 Error motion of C axis

第14図³⁾に、C軸の誤差補償した一例を示す。第14図には、1つのプリズムアレイを加工中のC軸の動作と、加工ユニットの挙動と、工具位置誤差の演算結果を重ね書きしてある。第12図(b)の例と同様に、加工開始に至ってもC軸は動作し続け、直交座標系でみた誤差 ΔX 、 ΔY が最大14 μm生じるが、その誤差と逆方向に加工ユニットの圧電素子をX、Y方向にリアルタイムに駆動することで、工具位置誤差(Position error X, Y)を解消している。本図では、C軸の誤差補償の例を説明したが、X軸、Y軸単独で



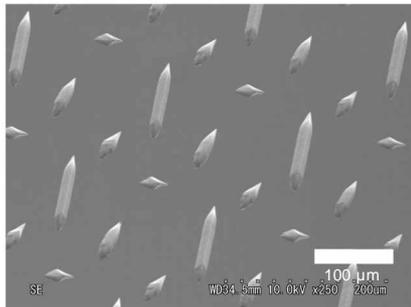
第14図 C軸の補正結果
Fig. 14 Compensation of C axis

生じる偏差も同様にして補償するシステムになっている。

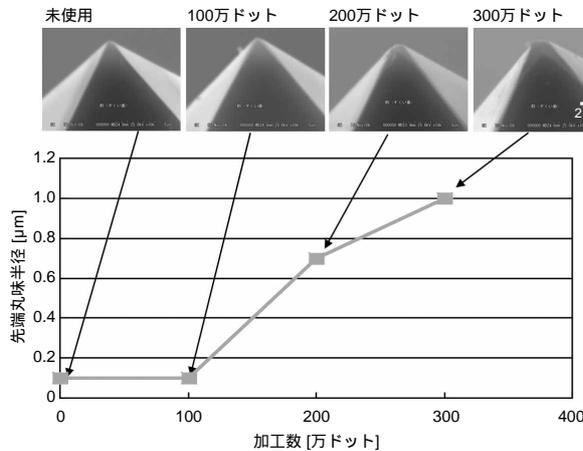
5. 金型の加工結果

前述した取り組み後、マイクロプリズムアレイ金型の加工後のSEM写真を、第15図³⁾に示す。25万点あるマイクロプリズムアレイ部には、まったくバリや蛇行が生じていない。総加工時間は33時間となり、各プリズム部の平均加工時間は0.2秒、平均移動時間は0.3秒であった。総加工時間は従来法より1/7に短縮できたが、NCデータ作成時の加工予定時間より長くなった。原因は、加工機が定速で移動する時間より、移動点が近いために加減速に要する時間の割合が多くなり、所定の速度に達していないためと考えられる。

第16図に、本金型を合計12面加工し、4面加工ごとに工具をSEM観察して、先端の丸味を測定した結果を示す。金型4面（プリズムアレイ100万点）加工した段階では、顕著な摩耗は認められなかった。従来工法に比べて4倍以上工具寿命が伸びている。



第15図 プリズムアレイ金型の加工結果
Fig. 15 Machined micro prism array die



第16図 工具寿命
Fig. 16 Wear of diamond tool

6. まとめ

著者らは、大幅な加工時間の短縮が高精度化につながると考えて、FTSと振動切削が同時に実施可能な3D_machining ユニットの開発した。25万点のマイクロプリズムアレイを有する導光板の金型に適用した結果、加工時間が従来比1/7となる33時間で製作でき、工具寿命も4倍以上改善した。

今後、3D_machining による加工技術は、ミクロンからサブミクロンオーダの微細構造が加工できる特長を生かして、光学部品や外装部品の機能表面を加工できるように開発を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成17年度に神戸大学工学部との共同研究の中で実施しました。今日まで終始変わらぬ御指導いただいた森脇俊道教授（現在、摂南大学）、中本圭一助教（現在、大阪大学）に謝意を表します。

参考文献

- 1) 和田紀彦 他：超精密加工用3軸制御ファストツールサーボの開発（第1報） - ファストツールサーボユニットの試作と基本性能の評価 - 精密工学会誌 73, No.12, pp.1345-1349 (2007).
- 2) 和田紀彦 他：超精密加工用3軸制御ファストツールサーボの開発（第2報） - 工具振動による微細溝加工の検討 - 精密工学会誌 74, No.5, pp.486-490 (2008).
- 3) 和田紀彦 他：超精密加工用3軸制御ファストツールサーボの開発（第3報） - 工具振動による微細溝加工の検討 - 精密工学会誌 74, No.9, pp.971-975 (2008).
- 4) 社本英二 他：楕円振動切削加工法（第1報） - 加工原理と基本特性 - 精密工学会誌 62, No.8, pp.1127-1131 (1996).

著者紹介

 高橋正行 Masayuki Takahashi
生産革新本部 生産技術研究所
Production Engineering Lab.,
Corporate Manufacturing Innovation Div.
博士（工学）

 田代 功 Isao Tashiro
生産革新本部 生産技術研究所
Production Engineering Lab.,
Corporate Manufacturing Innovation Div.

 和田紀彦 Toshihiko Wada
生産革新本部 生産技術研究所
Production Engineering Lab.,
Corporate Manufacturing Innovation Div.
博士（工学）