プロジェクト名:ガラス等の最先端材料用次世代超精密金型の高精度・高能率加工 ・計測システムの開発(18131402019)

1. はじめに

光通信用マイクロレンズ, 青紫色レーザ光を用いた次世代光ディスクのピックアップ光学系, デジ タルカメラなどの高機能なデバイスにおいて, 従来のプラスチックレンズよりも光学特性が優れ, 高 温強度が高く, 耐候性があるガラスあるいはシリコン系樹脂等の最先端材料による超高精度なレンズ 成形が求められている. そのために, 形状精度, 面粗度, 高速加工の向上を果たす次世代超精密金型 が必要である. これらの要求を満たすためには, 金型の機上測定法の高精度化, より微小で高精度な マイクロ研磨法の開発, 微細形状の高能率加工システムの開発, より微細なマイクロ工具の開発, 高 精度の高硬度膜の蒸着技術の開発が不可欠である.

そこで本研究プロジェクトでは図1に示すように、これらの要求を満たすことが可能となるように、 金型の超高精度化のために(1)機上測定システム、(2)マイクロ研磨システム、(3)スローツールサーボ システム、(4)高機能工具の開発を行った.さらに、金型の耐久性向上のための(5)コーティング技術 の開発を実施した.最後に、超高精度なガラス成形金型の形成に必要な技術を充足させるため、マイ クロチャンネル微細基板の成形実験を行い、以上の個々の技術を総合的に評価した.

デジタル情報家電・カメラ等の精密機具だけでなく、自動車等あらゆる川下製造業で、光学素 子の有効利用が進められており、以下を研究目標とした.

(高精度化・微細化)あらゆる産業で、光学素子の高性能化、高機能化、高耐久性が求められている.高性能、高機能化には、高精度・微細な金型が必要である.

(複雑形状化)光学素子の高性能,高機能化には,複雑形状に対応しなければならない.具体的には,レーザープリンターに使用されるf θ レンズ,リアプロジェクション用の光学素子等は自由曲面であり,次世代DVD 用のピックアップレンズもレーザ光が真円でないため,レンズ形状を 非軸対称にする等,大容量化にともないその対応が必要となる.

光通信用マイクロレンズ,青紫色レーザ光を用いた次世代光ディスクのピックアップ光学系, デジタルカメラなどの高機能なデバイスにおいて,従来のプラスチックレンズよりも光学特性が 優れ,高温強度が高く,耐候性があるガラスあるいはシリコン系樹脂等の材料による超高精度な



図1 研究開発概念図

レンズ成形が求められている.ガラスレンズの場合は、400~800度という高温にてプレス成形を 行うため、金型の耐久性が求められ、材料には超硬合金やセラミックなどの耐熱性高硬度難加工 材料を使用する必要があり、さらに耐久性向上のためのコーティングが不可欠となる.ピック アップ光学素子等においては、100nm以下の形状精度および1nm近い表面粗さが求められており、 より高度な金型製造技術が要求されている.

また、シリコン系樹脂等は、紫外線に近い領域まで使用可能であることや、耐候性にすぐれていることから、自動車用をはじめとした各種の光学素子への応用が検討されているが、 粘度が低く、転写性が極めて高いため、金型には極めて高い精度が必要とされ、かつ離型性 を高めるためのコーティングも不可欠となっている.

さらに、近年の高度な医用機器やポイントオブケアのためのバイオチップ・バイオ分析機 器等では、耐薬品性や清浄性に優れておりかつ低コストなマイクロ流体チップなどの部品が 求められている.これらの部品は、従来のプラスチック以上に耐薬品性の高いガラスやシリ コン系樹脂等による微細な構造を持つ成形品が必要とされている.

研究組織および管理体制を図2に示す.



2. 新型機上測定機の開発

近年,急速に普及しつつあるデジタル機器において,高傾斜角をもつ光学レンズの使用が増大 している.それらのデバイスや金型に,接触式形状測定装置を用いる場合,傾斜角の変化にとも なう接触力の分力変化により超精密形状測定が困難である.また,プローブやエアスライドの熱 変形,温度変化や空気流動によるドリフトにより測定精度が悪化する.そこで本研究では,傾斜 角の変化を防止するために,新たなプローブの走査方法,法線一定制御を提案し,軽量,高剛性 かつ低熱膨張性のセラミックスで,エアスライドと空気静圧軸受を作製し,その特性を評価した.

2.1 接触角一定走査法の提案

接触角一定走査法では図3に示すようにプローブをZ軸からX軸方向に45°傾けて固定し、プローブの軸と測定物の法線のなす角度が常に45°に保たれるようにプローブを同時3軸制御(X, Y,Z)により走査し、傾斜角の変化にともなう分力の変化を防止する、プローブの軸方向ベクト ルをp,測定物の接触点における法線ベクトルをnとし、両ベクトルのなす角が常に45°となる ような軌跡を求めプローブを走査する、このようにすることで、プローブの変形を一定にする、





(a) 測定物表面における接触点の軌跡 (b) プローブ先端球における接触点の軌跡 図3 接触角一定走査法における接触点の軌跡

2.2 サイアロン製機上測定ユニット

前述の通り、従来の測定器においては測定器の熱変形や変位センサのドリフトによる測定誤差 が生じる.また、傾斜角の変化によるプローブやエアスライドの傾斜を抑制するためにはエアス ライドの剛性や軸受における支持剛性を高めること、さらにはプローブと測定物の接触力を小さ くすることが必要とされる. 図4に本研究で開発した機上測定ユニットの模式図を示す.図中の 濃色部分に SIALON を用いた.サイアロンセラミックスは、従来材料のスチールに比べて、比重が 2.5分の1、剛性が1.5倍、熱膨張係数が約10分の1である.



図 4 開発した機上測定ユニット

2.3 従来の走査方法と接触角一定走査法による形状測定 実験結果

開発した機上測定システムの妥当性が確認されたため、 提案した接触角一定走査法による形状測定を行った.基準 球を従来の走査方法および接触角一定走査法により測定し その結果を比較する.曲率半径 3mmの基準球(鋼)を用い た.0°と45°に固定することで従来法と接触角一定走査 法による測定を行った.図5に各走査方法における機上測 定ユニットの設置状態を示す.測定条件は表1の通りで接 触力は0.3mNという微小なものである.

表 1	測定条件
測定プローブ	
材料	ルビー
曲率半径	r _p =0. 5009mm
測定物	
材料	鋼球
曲率半径	<i>R</i> w=3.171mm(凸面)
接触圧	<i>F</i> _c =0.3 mN
走査速度	1∕ =0.2 mm/min

図6(a)および(b)に測定結果を示す.それぞれ従来の走査方法,接触角一定走査法(提案法)で測定した結果である.従来の走査方法では,測定物の傾斜角が45°を超えると形状誤差が大きくなっている.一方,提案法においては測定物の傾斜角が50°付近においても形状誤差が急激に増大することはない.これは従来法ではプローブやエアスライドに作用する分力が変化し,それらの弾性変形が増加したのに対して,提案法では作用する分力の大きさが傾斜角に関係なく一定であるため,測定ユニットの可動部の傾きが大きく変化しなかったためだと思われる.よって,高傾斜角を有する測定物の形状測定において,接触角一定走査法は測定誤差の抑制に有効であることが確認された.

最後に,最終目標の70度の最大傾斜角のワークを測定し評価したときの形状誤差曲線を図7に示す.外周部で形状精度が悪くなっているものの,最大傾斜角71度にワークに対して±0.05μm (0.1μmP-V)が得られているのがわかる.





(a) 従来の走査方法 (b) 接触角一定走査法 図5 各走査方法における機上測定ユニットと測定物の位置関係



3. 円(2軸)振動マイクロ研磨システムの開発

近年, Blu-ray Disc 用のピックアップレンズ等を対象に高 NA 化が進んでおり,大きな傾斜角を もつ金型に対する高精度な加工の需要が高まっている.しかしながらこのような高NAマイクロ 非球面金型に対して高精度な研磨加工の自動化は困難であり高い技術と労力が必要とされてきた. 本研究では,最終目的は高NAマイクロ非球面金型に対して高精度な研磨加工の自動化を実現し, 高能率化を図るため、シミュレーションに基づいて超音波2軸振動子の試作を行い、実際の金型 の研磨において表面粗さおよび加工能率の向上を行った.

3.1 ランジュバン型 2 軸振動子の原理

振動子の目標値として共振周波数は 20~30 kHz,振幅は 20 µm以上となるようにシミュレー ションを用いて設計を行った.図8にランジュバン型2軸振動子の模式図を示す.ドーナツ型の 圧電素子2枚は厚さ方向に伸縮し振動子に直線振動を発生させる.2枚は反転させ組み込んでいる ため極性が逆になり交互に伸縮を繰り返し振動子にたわみ振動を発生させる。ランジュバン型振 動子の特徴としては機械的強度が大きいという点と大電圧を印加することが可能である点がある. そのため印加電圧を大きくすることで振動振幅を増大させることができる.



3.2 同時4軸制御の超音波2軸振動援用研磨装置

開発した同時4軸(X,Y,Z,B軸)制御の超音波援用研磨装置の概略図を図9に示す。本研磨 装置は従来の同時3軸(X,Y,Z軸)制御の超音波援用研磨装置にB軸チルトテーブルを搭載してい る. B 軸チルトテーブルは-10~100°の範囲で可動し金型の形状に応じて自由に傾斜させること ができる. 実際には B 軸の回転中心と金型の原点は一致しないため. 金型原点から B 軸の回転中 心までの距離を事前に測定し加工点の補正を行う。加工点において金型の曲面に対しポリシャが 常に垂直に接するようにNCプログラムによりB軸チルトテーブルを制御している.



3.3 高NA軸対称非球面形状金型の研磨加工実験結果

研削によって前加工した金型に対し研磨加工実験を行った. 最大で 38°の傾斜面を持つ超硬合 金の球面形状金型に対して B 軸チルトテーブルを使用した場合と使用しなかった場合で均等研磨 実験を行い、本研磨装置に搭載した 2 軸振動子と B 軸チルトテーブルの効果を確認した、砥粒は |粒径 0.5 mm のダイヤモンド砥粒を使用し, ポリシャは先端径が 1 mm のポリウレタン製ポリシャ を使用した.研磨荷重は2gfとした.超音波2軸振動子に印加する電圧は軸方向,たわみ方向と もに 100 V とした.

図 10 に研磨量の分布を示す. B 軸チルトテーブルを使用しない場合には図 10(a)に示す金型の 外周部において加工面に対し超音波振動が十分に付加できないため研磨量が減少している. また 金型の半径位置によって研磨量が不安定化している. これはポリシャの形状精度が加工面に転写 されていると考えられる. それに対し図 10(b)に示すように B 軸チルトテーブルを使用している場 合は研磨前の形状を保ちワーク全面をほぼ均等に研磨できていることがわかる.

図 11 に金型の外周部における研磨前後の表面性状を示す. B 軸チルトテーブルが無い場合には 金型の外周ほど傾斜角が大きくなり研磨効率が下がってしまうため研削痕を完全に除去すること ができなかった. しかしながら B 軸チルトテーブルの搭載により外周部においても研磨効率が下 がらないため表面粗さは 45 nmRz から 7 nmRz まで改善した. 以上の結果よりワーク傾斜テーブル の搭載によって加工面の傾斜角が変化しても研磨効率を減少させること無く安定して研磨加工を 行うことが可能となり本研磨装置は 60°以上の傾斜角を持つ高 NA レンズ用のマイクロ非球面金型 に対する研磨加工にも適用ができると考えられる.





(a) 研削後



(b) 研磨後 図 11 金型外周部における表面粗さの変化

最後に、ゴムボンドダイヤモンド砥石(#10000ダイヤ)を工具として用いて、超微粒子超硬合 金を均等研磨した時の表面粗さを図 12 に示す. 遊離研磨砥粒として 0.5 µm のダイヤモンドを用 いた. 5nmRz (1nmRa)の表面粗さが得られている.



図12 ゴムボンドダイヤモンド砥石を用いた場合の表面粗さ(ワーク:超微粒子超硬合金)

4. リニア駆動超精密加工機械(テーブル)の開発

近年の,情報画像機器の技術開発の進展に伴い,超精密かつ微細な構造を有し,かつ平面や球 面などの単純な形状ではない複雑な形状を有する光学・精密機械部品に対する要求が高まってい る.こうした部品には、非軸対称な形状を有し、レーザーダイオードの非点収差補正機能と対物 レンズの機能を併せ持つレンズや、微細な凹凸を有し、白色 LED 等を光源として均一なバックラ イト照明を実現する導光板、プロジェクター照明やデジタルカメラのオートフォーカス光学系、 光通信デバイスの結合に使用されるマイクロレンズアレイなどが上げられる.こうした光学素子 等は、形状が単純でないため、従来の旋盤型加工やフライス盤型 XYZ 軸の3次元のスキャンによ る加工では、極めて加工時間が長くなるなどの問題があった.

こうした問題を解決するために、ファストツールサーボ(FastToolServo:FTS)システムが 開発されたが、通常の超精密工作機械に比較して数百~kHz 程度と非常に大きな応答速度を有し ている.しかし、圧電アクチュエータを使用するシステムがほとんどであり、駆動可能なストロ ークは 100 µ m程度と非常に小さい領域に留まっているため、FTSシステムの適応範囲が限定的 であった.そこで、より大きなストロークを有し、かつ高速な応答が可能であり、さらに超精密 な加工に耐えうる精度を有した駆動システムを開発するために、案内機構として軽量かつ高精度 なセラミックスを用いた静圧空気案内を利用し、高トルクモータとしてボイスコイル型モータを 使用することにより数mmのストロークと十数nmの精度を実現するシステムの開発を行った. こうしたシステムは、前記の圧電アクチュエータを用いたFTSシステムよりも若干応答速度に て劣るものの、ストロークが大きいことからその適応範囲は大幅に拡大されるため、スローツー ルサーボシステム (Slow Tool Servo System: STS)と呼称しているが、通常の工作機械と比較 した場合は、はるかに高速な駆動が可能なシステムである.

4.1 STS駆動装置

スライダ部分は、高精度かつ大ストロークを得るためエアスライド方式とし、熱膨張係数が低 く、比重の小さいサイアロンセラミックスとした. 駆動用アクチュエータは、リニアモータが適 当と考えられるが、応答速度を高めるためにスライダの質量を抑えるためボイスコイル型モータ (VCM)を用いた. また、変位検出機構は、ナノメータレベルの分解能と数mmのストロークを考 え、貼り付け式のリニアスケールを使用しスライダ部の質量増加を最小限にとどめた.

全体の組み立て図と写真を図 13 に示す. リニアスライドは、断熱板を介してモータの可動子と 接続されており、同時に駆動ストロークを±1.5mm に制限している. エアスライドのエアーは スライドの左より供給する. スケールは、4.5×9mm 厚さ 0.55mm の貼り付け型スケールを使用 しており、極めて軽量となっている. スケールのベースピッチは 250nm であり、インターポレ ータを用いることで最大で最大 0.5nm の分解能を実現可能である. スケールユニットの仕様を 表2に示す. サブモータは、メインモータの駆動による振動をキャンセルし、超精密加工装置へ の振動の影響を低減するために設けられている.



図13 リニア駆動テーブルの組立図および外観写真

4.2 STS制御システム

スケール信号をデジタルでキャプチャーするシステムを構築し、これを用いてサーボ系のチュ ーニングを実施した.スケール信号は、図 14 に示すようにスケールアンプで 40bit のパラレル信号 としてPCへ入力され 0.5nm 単位で計測される. 停止状態での振動は 120nmP-V 程度と非常に小 さく、安定した制御が行われていた. また、正弦波駆動も主軸回転数 600rpm 程度まで追従して いることがわかる. 主軸回転数 600rpm でアスレンズ等の非軸対称非球面を加工した場合, 主軸 1回転につき2回の変位が発生し, 駆動周波数は約 20Hz となる.

図 14 制御系ブロック図

4.3 非軸対称非球面形状の切削加工実験

開発したリニア駆動テーブル(SYS)を超精密加工装置(ULG-100DH3)の Y 軸コラム上に 搭載し,切削加工試験を実施した(図 15). 被加工物の形状は,次式に示されるような非点収差 補正機能を持ったレンズ(通称:アスレンズ)を想定した. 被加工物は無酸素銅で直径は 6mmで ある.

$$z = \frac{\frac{1}{r}\rho^{2}}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)(\frac{1}{r})^{2}\rho^{2}}} + c\rho^{2} + d\rho^{4} + e\rho^{6} + w_{22}(y^{2} - x^{2})$$
(1)

加工に必要な形状データは、軸対称な部分を通常の通り NC コントローラへ送信し、非軸対称 成分をマップテーブルコントローラへ送信し、リニア駆動テーブルの制御指令値とした.切削工 具は単結晶ダイヤモンド工具 (r=0.5mm)、主軸回転数は 300rpm、切込み量は、荒加工 5 μ m、 仕上げ加工 2 μ m、送り速度は荒加工 5mm/min、仕上げ加工 2mm/min とした. 荒加工も含めた 総加工時間は約 30 分となっており、1パスあたりの時間は約 1.5 分と非常に高速化された.

加工後の形状は、超精密3次元形状測定装置(パナソニック社製 UA3P)にて形状を測定し、3次元的に設計形状とアライメントした.

その後, 誤差形状を抽出して精度を算出 した.加工結果を図 16 に示す.アライ メントの結果、4方向の断面を抽出し、 誤差を測定したところ約±0.4µm であっ た.この値は当初目標値より大きいが、 補正加工を実施することで目標値を達成 できる.以上のように、テーブルの駆動 状態をリニアスケールの変位をモニタリ ングすることで観測し、サーボパラメー タのチューニングを実施し安定した動作 条件を見出した.最後に、非軸対称切削 加工試験を超精密加工装置上で実施し、 その性能を検証した.



図15 超精密加工装置に搭載した写真



0

(a) 3次元アライメントの結果

(b)4方向断面誤差形状 図 16 加工結果

(c)加工したワーク

5. マイクロフライス工具の開発

ガラスレンズは超硬合金やSiCなどのセラミック型を用いてプレス成形されており、その金型 はダイヤモンドホイール(砥石)により研削加工が行われている.しかしながら、研削では砥石 のツルーイング・ドレッシング(機上成形)が不可欠であり、非加工時間が長くなるうえ、工具 の摩耗による形状精度の悪化が生じるなど加工効率が高くないのが問題である.そこで本研究で は、 cBNマイクロフライス工具を試作し焼入れ鋼製非球面金型の超精密切削を検討した.また PCDマイクロフライス工具を試作し超硬製非球面金型の超精密切削を検討した.このような多 刃のマイクロフライス工具の特徴は次の通りである.

①工具は回転するため、工具の輪郭精度が工作物には転写されず高精度加工が可能となる.

②通常の旋削加工では切込み量が実切込み量になるのに対して、図4に示すように、回転多刃 (多数の切れ刃)工具の場合、1つの刃先当たりの実切込みは小さくなる。

③通常の旋削加工では連続切削であるのに対し、回転工具による加工では断続切削となり、冷却 効果が高く、刃先の寿命が長くなる。

表2

5.1 cBN マイクロフライス工具の試作

cBN (Cubic Boron Nitride, 立方晶窒化 ホウ素)は、ちょう密六方窒化ホウ素を高温 ・超高圧下で人工的に合成した物質である. cBN は表2に示すように工具素材の材料とし て要求される硬度,熱伝導性,熱化学的安定 性を兼ね備えている非常に優れた工具素材で ある. cBN はダイヤモンドに次ぐ硬度を持ち, 超硬合金・セラミックスに対して十分に高い

特性	ダイヤ	cBN	超硬	ア

各種工旦材質の諸性質(代表値)

ф.2m

特性	ダイヤ	cBN	超硬	アル
	モンド		合金	ミナ
硬度 Hv (kg/mm²)	10000	5000	1500	2500
熱伝導率(W/m·K)	210	130	90	17
ヤング率 (GN/m ²)	1020	710	620	375
密度(g/cm ³)	3. 52	3. 48	14.5	4.2

硬度をもつ. またダイヤモンドに次ぐ高熱伝導性を有しており,切削点にて発生した熱を逃がし, 切れ刃における熱影響を最小限に抑えることができる. この cBN 粒子と金属結合材 (バインダ 一) と混合・焼結した cBN 焼結体を,超硬の軸にロウ付けし,エッジに複数の切れ刃を設けて, c BN マイクロフライス工具を試作した. cBN マイクロフライス工具の仕様,外観と工具先端の SEM 写真を図 17 に示す.切れ刃の直径はφ2mm,すくい角は0°,刃数は8枚とした.

		ΨZm
切れ刃の材質	焼結 cBN	
CBN の粒子径	2∼3µm	
切れ刃の直径	2mm	
すくい角	0°	CBN 焼結体
刃数	8枚	30 40 50 500 µm
		<u>σομ</u> σο σο μ σο σο μ σο σο μ σο σο σο μ σο

図 17 cBN マイクロフライス工具

5.2 焼入れ鋼の非球面切削実験

次に cBN マイクロフライス工具により、図 18 に示す焼入れステンレス鋼製レンズ金型(硬さ HR C55)を用いて非球面切削の実験を行った.切削条件を表3に示す.加工面の顕微鏡写真と加工面 の表面粗さを図19に示す.加工面は鏡面となっており、表面粗さは中心部で0.120µmRz、中間部 で 0.119µmRz, 外周部で 0.116µmRz となった.

形状精度の変化を図 20 に示す. 第1次加工では, 工具のセッティング誤差や工具半径のオフ セット誤差により工作物に 1.63 μmP-V の形状誤差が生じている. 補正加工後は 0.26 μmP-V とい う比較的良好な結果が得られた.以上の結果より,開発した cBN マイクロフライス工具を用いる ことにより、難削材である焼入れステンレス鋼の超精密切削が可能であることが示された.



RadialPosition mm (a) 補正加工前



RadialPosition mm (b) 補正加工後

図 20 形状精度の変化

5.3 PCDマイクロフライス工具

本研究では図21に示すようなPCD(多結晶ダイヤモンド)製マイクロフライス工具を開発し た.円柱状の軸のエッジ部に20個の切欠きが設けられ、このエッジ部で工作物を切削する構造 となっている. 外径はφ2mm, 刃数は20枚であり, 全ての切れ刃はすくい角を-20°になるように 研磨した、PCDウエハを超硬にロウ付けし、放電加工により円盤状に切断し、超硬製の軸にロ ウ付けする.その後,研削研磨し、溝加工を施す.



図 21 多結晶ダイヤモンド(PCD)製マイクロフライス工具 5.4 マイクロ軸対称非球面超硬金型の鏡面切削

多結晶ダイヤモンド(PCD) 製マイクロフライス工具を用い,マイクロガラスレンズ成形用の 非球面超硬金型を試作し,その加工特性を評価した.

(a)加工装置 加工の様子を図 22 に示す.切削実験は同時4軸(X,Y,Z,C)制御駆動の超精密加 工機 ULG-100D(SH3)(東芝機械(株製)を用いて行った.位置決め分解能は1nmで,研削スピンド ルは最大回転数6万 min⁻¹の空気静圧軸受けで,マイクロフライス工具を超精密スピンドル用に改 造した焼きばめチャックにより0.5µm以下の同軸度になるように固定した.非球面工作物(微粒 子超硬合金)は真空チャックによりワーク主軸に固定した.ワーク主軸は多孔質の空気静圧軸受 けである.X,Zの同時2軸制御しながら移動させて,斜軸研削加工と同じように円柱状工具の エッジ部で切削することにより非球面形状を創成した.

(b)切削実験結果 切削条件を表4に示す.工作物にはマイクロガラスレンズ成形用の超硬合金 を用いた.フライス工具の回転数は6万 min⁻¹で,加工中は白灯油を噴霧した.非球面のサグ量は 約 100 μ m で,平面形状から同一の工具で加工した.粗加工では切込み 5 μ m/パスとし,仕上げ 加工では 0.5 μ m/パスとした.

New View6200 (Zygo 社) により測定した切削加工面の表面粗さ曲線を図 23 に示す.約15nmRyの表面粗さが得られている.さらに、従来の斜軸研削加工と同様の方法で、工具位置誤差や工具の曲率半径誤差を修正した後に測定した非球面金型の写真および形状誤差曲線を図 24 および図 25 に示す.補正加工を行った結果、0.09 μ mP-V と良好な結果が得られた.



図 22 加工部の拡大写真

表4 非球面切削の実験条件

工作物	超硬合金
工具回転数	$60,000 \text{ min}^{-1}$
工作物回転数	100 min^{-1}
切込み	0.5 μ m
送り	0.4mm/min(ダウンカット)
切削雰囲気	オイルミスト(白灯油)



図 23 New View6200 により測定した超硬の切削加工面の表面粗さ曲線



図 24 切削加工した非球面超硬金型の外観 図 25 超硬の切削加工面の形状誤差曲線

5.5 マイクロアレイ金型の切削加工

マイクロレンズアレイはマイクロレンズをアレイ状に並べたものであり、照明系光学部品など 様々の機器に用いられる. ここでは PCD 工具を用いてマイクロレンズアレイ金型の試作を行った 結果を示す. 凹面のマイクロレンズアレイの加工法を図26に示す. 斜軸高速スピンドルに取り付 けた PCD 工具を工作物の1点に当て、C軸の回転に合わせてその点を保持しながら切込みを与えな がら,4軸(X,Y,Z,C) 同時制御しながら加工を行う.工作物の外観写真を図27に示す.微粒子 超硬合金に外径φ200μmの球面(凹面)を190個加工した.研削加工と同レベルの鏡面が得られ ている.



図 26 同時4軸制御のマイクロレンズアレイ金型の加工法



図 27 工作物の外観およびノマルスキー顕微鏡写真

5.6 フレネルレンズ金型の切削加工

PCD 工具を用いて、図 28 の切削法によりフレネルレンズ金型の試作を行った. 鋭利な段差で構成されるフレネル形状の超精密切削をするために、Y-Z 軸同時 2 軸制御して加工した. フレネル形状加工用に試作した P C D 工具を図 29 に示す. 先端が 45 度と尖った形状に加工した. 切削条件を表 5 に示す. 工具のすくい角を-20 度とし、刃数は 40 個とした. フレネル形状の段差を 6 µ m とした. 切削加工後の超硬合金製フレネルレンズ金型を図 30 に示す. 最後に加工後のフレネル形状金型の加工精度を図 31 に示す. フレネル形状の段差はほぼ設定通りの 6 µ m が得られている. また設計形状からの誤差も、約 0.2 µ mP-V が得られている.



⁽a) 形状誤差曲線(基準形状:球面) (b)形状誤差曲線(基準形状:フレネル形状) 図 31 加工後のフレネル形状金型の加工精度

6. 超精密金型用コーティングの開発

ガラスをはじめとする高機能材料の成形を行う場合、耐熱性と離型性の向上が大きな課題と なっている.このために不可欠なコーティング技術を主に DLC 材料を中心として検討し、その特 性を評価した.従来の DLC 系材料の形成手法(図 32)は、主に RF(高周波)プラズマを利用した CVD 法であるが, 原料ガスからの水素の混入等により硬度が充分でなく, 超精密金型用コーティン グ材として必ずしも充分とは言えなかった.そこで,図 33 に示すようなフィルタード・アーク法 等を中心とした手法により不純物が少なく高い硬度と良好な表面粗さを有する薄膜を形成する手 法を利用することで、一段と高性能なコーティングの実現を目指した.



6.1 膜厚の均等性評価

高傾斜(NA)非球面形状,特に,最大傾斜角70度に対しても,均等な成膜が要求される.そ こで、図34に示すように、凹面形状の円筒面の金型を研削加工により作製し、その後、部分的に マスクを施した後に、DLC薄膜(新手法)を成膜し、マスクを除去し、そのDLC膜の厚さ分 布を接触式の測定器で計測した. その測定結果を図 35 に示す. 0.07 µm の平均成膜厚さに対して, ±0.01µmの誤差で成膜されており、十分に均等に成膜されているといえる.次に、非球面形状の 超硬金型に中心付近で約 90nmの厚さの DLC 膜を成膜した場合の形状誤差曲線の変化 (膜厚の均等 性評価)の測定結果を図 36 に示す.非常に均等性が高いことがわかる.



成膜前後における非球面形状誤差曲線の変化(中心付近の膜厚 約 90nm)

6.2 成膜厚の表面粗さの評価

フィルタード・アーク法により不純物が少なく高い硬度と良好な表面粗さを有する薄膜を形成 する手法を利用し評価を行った結果を図 37 に示す.フィルタード・アーク法の膜厚条件,基盤の 洗浄方法を改善し,Si 基板上に DLC 膜をコーティングして表面粗さの変化を評価した.表面粗さ は、3次元評価で 5nmRz(0.4nmRa),2次元(断面)評価で 3nmRz(0.35nmRa)が得られ、十分 平滑なコーティング面が得られたといえる.



(a) Si 基板の表面粗さ(b) DLC 成膜後図 37 フィルタード・アーク法による成膜前後の Si 基板の表面粗さの変化

6.3 ガラス成形における成形試験

上述の成膜法において、金型の洗浄条件、成膜温度を最適化し、外径φ650μmのマイクロ非球 面金型にDLC膜を成膜した、成膜前後の形状の変化は 50nmP-V 以下であり、均等に成膜されて いた、次にこの金型を用いて、実際にガラス成形実験を行った、成形温度は 650℃であったが、20

ショット成形後において,図 38 のように中心部において良好な表 面粗さが維持されたものの,周辺 部での劣化が認められた.これは, エッジ部の金型摺動面からの剥離 と考えら,非球面成形金型のエッ ジ構造の改善が必要である.



図 38 フィルタード・アーク法による成膜後の マイクロ非球面超硬金型(φ650μm)

7. マイクロチャンネル等の医用バイオ技術への応用開発

医療・生化学分析等に必要とされるバイオチップ、マイクロ流体チップへの応用を目的 として 100 µm 程度の深さを持つ流路の活用により、血液分析等の医用バイオ技術への応 用について金型試作を含めて検討した.前記の2~6の技術を活用して試作を行った.従

来のマイクロチャンネル等は、成形性の高いプラス チック(PMMA, PPなど)であれば射出成形に より量産が可能であったが、その場合は耐薬品性、 光学的特性などに大きな制約があった.また、ガラ スやシリコンゴムなどによるマイクロチャンネルは、 耐薬品性、光学特性に優れているものの、製造法は 化学的エッチングやポッティングによる成形による ものであり、極めて生産性が低く実験室レベルでの 少量の試験的使用に留まっていた.これに対し、本 プロジェクトでは、耐久性を高めるコーティングを 施した微細溝形状を持つ金型によるガラスあるいは シリコン樹脂成形により、優れた性能と生産性の両 立を目指す(図 39).



図 39 微細溝形状を持つ金型による成形

7.1 ポリメチルペンテンにおける微細溝の形成試験

微細構造を持つ金型により、射出成型を行い、その形状を評価した.図 40 にマイクロ流路の全体形状を示す.また図 41 に使用した金型の写真を示す.成形性の高い樹脂としてポリメチルペン

テンを使用した. 図 42 に成型されたマイクロチャンネルの写真, および中央部の走査型電子顕微鏡写 真である. 100 µm 以下の微細な溝が形成されてい ることがわかる.



図 40 マイクロ流路の形状





図 41 金型の写真



(a) 全体写真(b) 中央部のSEM写真図 42 成型されたチャンネル(ポリメチルペンテン)

7.2 シリコン樹脂による形成試験

一般的な熱可塑性プラスチックよりも化学的,光学的特性に優れるシリコン樹脂による成形を 行った.使用した樹脂は2液混合型のシリコン樹脂(LPS-L400 信越シリコーン)で,150℃にて 約1分で硬化させた.図43に示すように,一般的な熱可塑性樹脂で見られるようなウエルドライ ンの発生などは観察されず,高い転写性が示された.



(a) 全体写真 (b) 微細部の電子顕微鏡写真 (b) 微細部の電子顕微鏡写真 図 43 シリコン樹脂成形されたマイクロ流路の成形品

そのマイクロ流路のポート付近の顕微鏡写真の比較を図 44 に示す. (a)はポリメチルペンテン,

(b) はシリコン樹脂にて成形されたものである.いずれもポートの形状, チャンネルの形状共に転写されているが,(a)の従来樹脂ではポートの後方に明瞭なウエルドラインが観察されるが,シリコン樹脂の場合は観察されなかった.シリコン樹脂は,高い転写性と高精度な成形性を同時に可能とする特性を持っているといえる.



(a) ポリメチルペンテン成型品 (b)シリコン樹脂成型品 図 44 成形品のポート付近の顕微鏡写真(穴径:約500 µ m)

7.3 マイクロ流路の特性評価

プラスチックマイクロ流路の特性を評価するため、図 45 に示すような固定ジグを使用し密閉し、 サンプルを送液して実験を実施した.マイクロ流路と基板(125µmPETフィルム)を密着させ、 右側のポートよりサンプルを注入し、左側のポートより吸引した.図 46 は、各チャンネルに蛍光 ナノビーズを含んだ溶液を注入し、これを蛍光顕微鏡にて撮影することで通液状態を確認したも のである.16本のチャンネル全てに正常に通液されていることが示された.



図 45 マイクロ流路固定ジグ

図46 通液試験の結果

マイクロ流体チップの医療・バイオ技術への応用のために、成形されたマイクロ流路にて抗原 抗体反応を用いたイムノアッセイ (ELISA: Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay)を実施した. ELISA には、比較的検出手法が確立されているサイトカインの検出系を使用した (Mouse IL-2). 検出方法は、サンドイッチ型 ELISA であり、基板に固定化された1次抗体にサンプル (IL-2)を キャプチャーさせ、さらに2次抗体で検出を行い、HRP(Horseradissh peroxidase)による化学発 光により検出した.実験結果よりシリコン樹脂は比較的バックグラウンドノイズが低いことが確認 できた(図 47).また、プラスチック(ポリメチルペンテン)製チップでは、酸素プラズマ処理 やシランカップリング剤での処理により非特異的吸着によるバックグランドノイズを大幅に減少 させられることが確認され、シリコン樹脂に適応することで更なる効果が期待できる(図 48).

(a) 0₂プラズマ +
(b) 未処理
シランカップリング剤処理
図 48 表面処理の効果

図 47 ELISA による比較実験

8. おわりに

本研究プロジェクトでは「ガラス等の最先端材料用次世代超精密金型の高精度・高能率加工・ 計測システムの開発」の課題を、平成18年度から20年度までの3年間にわたり研究開発を実施 し、(1)新型機上測定システムの開発、(2)円振動マイクロ研磨システムの開発、(3)リニア駆 動超精密加工機械(テーブル)の開発、(4)マイクロフライス工具の開発、(5)超精密金型用コー ティングの開発、(6)マイクロチャンネル等の医用バイオ技術への応用開発 等の具体的な課題 に取り組み、ほとんどの技術目標を達成することができ、研究開発実施期間終了後における研究 成果の早期の事業化を進めている.

これらの成果にもとづき、精密金型製造企業である㈱長津製作所においては、曲率の大きいガ ラスレンズ用の金型やバイオチップ用マイクロチャンネル作成用金型などの超精密金型の製作と 精度評価の技術を獲得することができ、事業化の展望を得た.本研究プロジェクトで開発したサ イアロン製空気軸受搭載の機上測定システム、圧電素子応用の超音波振動を利用した超精密金型 のマイクロ研磨システム、リニア駆動超精密加エテーブルに対する、工作機械メーカー等の超精 密加工関係企業の関心は極めて高く、協伸産業㈱と㈱ナノコントロールで事業化に取り組んでお り、既に一部は販売を始めている.微細精密工具メーカーの日進工具㈱では本研究プロジェクト で開発したマイクロフライス工具の製造販売体制についての検討が始まっている.このように、 本研究プロジェトで獲得した超精密金型製造に関係する技術と知見に基づき、参画した全ての中 堅中小企業のそれぞれの分野において、確度の高い事業化の見通しを得ることができた.

本プロジェクトの第一の目的である中堅・中小企業の基盤技術力の高度化に加え,超精密加工 分野において学術的価値のある研究成果を多数得ており,精密工学会,型技術者会議,砥粒加工 学会等の学術講演会や工作機械見本市などでの展示会等で積極的に発表を行った.学会や超精密 金型加工技術の講習会で発表した本プロジェクトの革新的な技術開発の成果は,金型加工に関係 する多くの研究者,技術者から極めて高く評価されており,学術の進歩にも貢献したと考える. 9. 本研究に関する主な発表

- (1)鈴木浩文,稲垣彰徳,沖野正,土方祥雄,近藤光男,山形豊,樋口俊郎,牧野俊清,森脇俊道:超音波2軸振動によるマイクロ非球面金型の超精密研磨ー超音波2軸振動子の開発ー,2007年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集(2007), PP.121-122.
- (2)鈴木浩文,大西孝,沖野正,土方祥雄,木下孝彦,福田将彦,菅原潤,山形豊,樋口俊郎, 牧野俊清:非球面形状のオンマシン計測システムの開発(第2報)ーサイアロン製超精密測定ユニットの試作と接触角一定走査法による形状測定精度の評価一,2007年度精密工学会秋季学術 講演会講演論文集(2007), PP.123-124.
- (3) 山形 豊, 鈴木浩文, 樋口俊郎, 飯田克彦, 古田敦, 吉田和史, 牧野俊清, 大森 整:ファス トツールサーボによる非軸対称非球面の加工と形状精度の評価, 2007 年度砥粒加工学会学術講 演会講演論文集(2007), PP. 75-76.
- (4) 山形 豊, 吉田和史, 牧野俊清, 樋口俊郎, 鈴木浩文: 超精密切削加工によるマイクロ流路 チップ金型の加工および成形品の評価, 2007 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集(2007), PP.119-120.
- (5)大西孝,鈴木浩文,木下孝彦,沖野正,土方祥雄,福田将彦,菅原潤,山形豊,樋口俊郎,牧野俊清:非球面形状のオンマシン計測システムの開発(第3報)-接触角一定走査法におけるプローブ走査速度の高速化の検討-,2008年度精密工学会春季学術講演会講演論文集(2008), PP.1091-1092.
- (6) 鈴木浩文,野口崇二郎,土方祥雄,山形 豊,樋口俊郎,牧野俊清:超音波2軸援用マイクロ 非球面研磨法の開発,日本機械学会 [No.08-19] 第7回生産加工・工作機械部門講演会部門講 演会講演論文集(2008), PP.305-304.
- (7)山形 豊,森田晋也,鈴木浩文,樋口俊郎,牧野俊清,吉田和史:超精密加工用高速リニア駆動テーブルの研究開発,2008 年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集(2008), PP.811-812.

専門用語等の解説

【空気静圧スライダ】軸受けと軸との間に微小な隙間を設け、この間に清浄な高圧の空気を流入 させることにより軸を浮かせることにより、低摩擦で高精度に駆動することができる軸受け.

【マイクロエンドミル】マイクロレンズアレイなどの光学部品の金型や、マイクロ流体機械の切 削加工には、必要な直径φ10~200μm程度のの微小工具.

【リニアモータ】軸のない電気モーター(電動機)のこと.通常のモーターが回転運動をするの に対し、基本的に直線運動をする.直線駆動を用いた工作機械は、中間の機械的要素をなくなり、 バッククラッシュや弾性変形がなく、ギヤ部の機械的損失のないメリットが得られる.

【ボイスコイル】動電型振動装置で、スピーカの原理を発展的に応用したもので、現在では立ち 上がりの速いリニアモータとして幅広く使われている、スピーカは、動電型の振動装置の一種で、 永久磁石とコイルを使い、コーン紙に振動を起こし、音声を再生する、このため、スピーカのコ イルはボイスコイルと呼ばれる。

【圧電素子】圧電素子は圧電材料に電界を印加することにより生じる伸縮を利用するアクチュエータであり、高精度、高速応答、省エネルギーの特長を持っている. 圧電材料として圧電セラミックを使用する場合には入力電気エネルギーから伸縮機械エネルギーに変換される効率は 60% 以上に達する.

【コーティング】物体の表面に薄膜を付着させておおうこと. 金型の寿命向上, 離型性向上のた め, TiA1N, TiN などのセラミック皮膜や硬質炭素膜(DLC: Diamond Like Carbon)等を付着させ る. レンズの表面反射を防ぐため, 弗化マグネシウムなどの薄膜でおおう利用法もある. DLC はダ イヤモンドにより近い高硬度, 低摩擦係数, 表面平滑性及び耐溶着性・離型性に優れている. 【マイクロチャンネル】100 µm 位の深さを持つ流路. 今後, マイクロ化学反応糟のための計量手 段, 化粧品等のエマルションの生成, マイクロカプセル化による製薬, 薬液や血液等の計量検査 等へ応用が大きく見込まれる. 耐薬品性からプラスチックに限らずガラスの使用が期待される.