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

大 森 整^{*1}・上 原 嘉 宏^{*1}・森 田 晋 也^{*1}
郭 泰 洙^{*2}・石 川 惣 一^{*3}・金 井 茂^{*4}

1. はじめに

近年、携帯音響機器、携帯映像機器、小型記録装置などの急速な小型化および軽量化に伴い、それらを構成する精密電子部品、光学部品、機構部品なども、より一層の小型化、そしてさらなる超微細化・超精密化が要求されている。筆者らは、こうした時代的ニーズの強い新加工技術の確立を目指して、ナノプレシジョン・マイクロメカニカルファブリケーションの研究を進めている。

まず、超精密切削法や超精密研削法などの機械加工法と、超精密機械要素からなるナノプレシジョン加工システム^{1),2)}を組み合わせ、金型加工精度のナノレベル化を狙う。また、デスクトップタイプの加工機群からなるマイクロ加工システム”マイクロワークショップ”³⁾を援用して、一層簡便かつ新しいマイクロファブリケーションを目指している。そしてさらに、その金型の細密樹脂部品への転写成形として、射出成形法^{4)~6)}および圧縮成形法を適用して、マイクロパーツの量産化技術の検討を進めている。具体的には、こうした技術の用途として、導光板やリフレクタ、反射防止表面構造⁷⁾、そしてピックアップレンズなどの回折格子⁸⁾などがある。より超微細な表面構造の実現には、金型加工とともに、成形転写性の技術的検討が大きな課題となってくる。

このようなマイクロ光学素子とともに、デジタルカメラ、プロジェクターレンズなどの結像光学部品の多くは、射出成形により生産されているが、一層の精度向上、光学特性・機能向上を目指す場合、金型内への熔融樹脂の射出、冷却・固化の一連のプロセスによる歪みの残留が課題となる。光

学樹脂材料は高分子構造を持つため、射出成形により充填方向へ配列し、レンズの光学的性能は金型内部の表面近傍で生ずる樹脂のせん断流動による残留応力と不均一な温度分布による熱応力の和で予測可能と考えられる。また、設計された光学系への組み込み・調整が必要であることから、射出成形されたレンズには前述の屈折光学特性^{9),10)}以外に、寸法精度、形状精度を要する。

そこで本稿では、ナノプレシジョン・マイクロメカニカルファブリケーションによる金型の作り込みと、それを用いたマイクロ射出成形技術、および結像光学素子の射出成形シミュレーションに基づく超精密化、高性能化に関わる実験的な検証¹¹⁾について一連の研究活動を紹介する。

2. ナノプレシジョン・マイクロファブリケーション^{1),2),7)}

2.1 加工システム

ナノレベルの加工精度により、マイクロサイズの三次元形状を持つ金型の加工を実現するためには、分解能、運動精度ともにナノレベルの精度を実現するナノプレシジョン加工システムが必須となる。ここでは、超精密マイクロ5軸空気静圧駆動システム(図1)を適用した。本システムは5軸同時制御が可能な駆動システムであり、分解能は、直動軸3軸が1nm、回転2軸が1/100,000degとなっている。直動軸は、空気静圧軸受によって完全非接触で支持されており非接触サーボモータによって駆動される。ストロークは280(X)×20(Y)×150(Z)mm、真直度0.2μm/

図1 超精密マイクロ5軸空気静圧駆動システム

^{*1} Ohmori Hitoshi, Uehara Yoshihiro, Morita Shin-ya
(独)理化学研究所中央研究所 大森素形材工学研究室
和光市広沢 2-1 (〒351-0198)

^{*2} Kwak Taesoo
(独)理化学研究所ものづくり情報技術統合化研究プログラム
和光市広沢 2-1 (〒351-0198)

^{*3} Ishikawa Soichi
新世代加工システム(株)
東京都千代田区神田錦町 3-17 (〒101-0054)

^{*4} Kanai Shigeru
(株)先端力学シミュレーション研究所
和光市丸山台 1-10-5 (〒351-0112)
2004.8.9 受理

表 1 代表的な加工条件 (A)

加工工具	単結晶ダイヤモンド工具刃先： 4.5 μm ，矩形
工具傾け角	90 度
切り込み量	1 μm ×5 回
総切り込み量	5 μm
格子間隔	10 μm
工具送り速度	10 mm/min
工具スピンドル回転数	30,000 rpm
加工方法 A	溝を垂直な 2 方向から加工する

(a) 単結晶ダイヤモンドバイト (b) 単結晶ダイヤモンドエンドミル

図 2 単結晶ダイヤモンド工具

表 2 加工条件 (B,C)

加工工具	単結晶ダイヤモンドエンドミル 工具刃先：R 0.03 mm，加工幅 45 μm ，角度 25 度
工具傾け角	0 度
切り込み量	1 μm ×10 回
総切り込み量	10 μm
格子間隔	200 μm
工具送り速度	10 mm/min
工具スピンドル回転数	30,000 rpm
加工方法 B	溝を垂直な 2 方向から加工する 方法
加工方法 C	四角の形にミーリング加工する 方法

280 mm(X)および 0.2 μm /150 mm(Z)以下を達成している。ワーク主軸と工具スピンドルはエアースピンドルで保持されており最大回転数はそれぞれ、100 rpm、70,000 rpm となっている。NC ユニットは FANUC 社 FANUC 15i を採用している。加工プロセスとして、ターニングやシェーバ加工などの超精密切削，および硬脆材料に対しては小径砥石による ELID 研削加工の適用が可能である。また加工雰囲気は、エンクロージャによる恒温制御がなされている。

2.2 加工方法

まず、マイクロ構造のナノプレジジョン加工の事例について紹介する。前述の超精密マイクロ 5 軸空気静圧駆動システムを用いて、被加工材料としてステンレスの母材に無電解ニッケルメッキを施した素材を使用し、工具として単結晶ダイヤモンドバイトを使用して加工を行った。工具を

(a) 加工方法A

(b) 加工方法B

(c) 加工方法C

図 3 ナノプレジジョン加工によるマイクロ構造

走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した画像を図 2(a) に示す。主な加工条件を表 1 に挙げる。加工は切り込み量 1 μm を 5 回繰り返す，溝深さ 5 μm まで加工を行った後，被加工材料を加工機により 90 度回転させ溝を交差させるように格子間隔 10 μm で加工を行った矩形交差溝を SEM により形状を観察したものを A 方式とした。加工された結果を図 3(a) に示す。

次にマイクロエンドミル(図 2(b)) を使用して，矩形状の加工を行った条件を表 2 に挙げる。マイクロエンドミルの加工方法には B, C, 2 方法で行い，B 方法は表 1 の加工形態をマイクロエンドミルで加工し，C 方法は四角の形にマイクロエンドミルでミーリング加工を行った。加工結果を SEM により観察したものを図 3(b)および(c)に示す。

2.3 加工結果

前述の条件，方法に基づき，3 種類の加工方法でマイクロ矩形溝の加工を行った。

SEM 観察の結果，加工方法 A (図 3(a)) ではエッジにバリが発生があったが，バリが発生していない面状態としては良好であることが確認できる。

加工方法 B (図 3(b)) は加工方法 A と同じくエッジに

図4 溝断面形状及び成形品（成形転写実験用）

図5 1 μm 溝断面形状（測定範囲 40 μm）

表3 サブミクロンV溝加工条件

加工工具	単結晶ダイヤモンド工具 (刃先角度 90 度)
工具傾け角	30 度
切り込み深さ	1 μm
格子間隔	0.25~1 μm
工具送り速度	10 mm/min
工具スピンドル回転数	60,000 rpm

バリが発生した。一方、加工方法C（図3(c)）はエッジにバリもなく、スムーズに加工ができていることがSEM画像から確認された。したがって、溝の交差溝を加工するにあたり、エンドミル工具によって四角形状にミリング加工する加工パスを取る手法が望ましいと考えられる。

3. 超微細形状の加工と成形転写^{4)~6), 8)}

3.1 サブミクロンV溝加工

次に、マイクロ光学素子に用いられるサブミクロン回折格子を対象として、その金型形状の加工とともに、その微細形状の射出成形による転写実験を行った。3種類の1 μm以下のV溝の切削加工実験を行った。加工装置には前述の超精密マイクロ5軸空気静圧駆動システムを用い、工具には刃先角90度の単結晶ダイヤモンド工具を用いた。加工材料には無酸素銅を用いた。図4に示すような溝形状を、工具回転軸を加工面の法線に対して30度傾けて加工を行った（サブミクロンV溝加工の場合は格子間隔が1000 nm, 500 nm, 250 nmであるが、次節の成形転写実験用の型製作では2 μm, 1.5 μm, 1 μmとする）。実験時の主な加工条件を表3に挙げる。加工を行った溝の断面形状と表面性状を原子間力顕微鏡（AFM）および電子顕微鏡

図6 500 nm 溝断面形状（測定範囲 10 μm）

図7 250 nm 溝断面形状（測定範囲 10 μm）

図8 卓上型射出成形機 MICRO-MOLDER

（SEM）により測定した。図5～7に、加工されたV溝形状の画像を示す。

加工実験の結果として、表3の加工条件においていずれの溝もバリの発生はなく、1 μm以下の間隔で非対称の3角形溝の形状加工ができていることが確認できた。同様の実験を無電解ニッケルめっきについて行ったところほぼ同等の結果が得られている。

3.2 成形ユニットと実験方法

次に、加工された微細V溝の成形転写実験を試みた。

図9 カセット金型（左：可動側金型，右：固定側金型）

図10 ピッチ1 μm の金型表面の溝形状 (AFM)

図11 ピッチ1 μm の成形品表面の溝形状 (AFM)

成形ユニットとして実験に使用した卓上型射出成形機の外観を図8に示す。サイズは1100 mm×500 mm×1450 mmで、金型はカセットタイプを使用した。図9に、可動側金型と固定側金型の各様子を示す。

卓上型射出成形機による転写率を確認するために、前述のV溝形状の金型のうち、3種類のピッチの違うV溝加工を施した金型を製作し、その金型を用いて射出成形を行った。深さはそれぞれ1 μm 、1.5 μm 、2 μm の3種類である。図10～15に、金型の溝形状及び成形品を示す。射出成形条件は、金型温度140℃、プランジャー温度280℃、プロープ温度300℃、チャンバー温度280℃、スクリュ温度260℃、射出圧力80%、射出時間5s、冷却時間7s、成形材料はゼオネックスを使用した。成形後、成形品からランダムに10個抜き取り、金型と成形品を原子間力顕微鏡 (AFM) により計測し、転写精度の評価を行った。

3.3 成形結果

図10に1 μm ピッチ金型表面の溝形状 (AFM) を示す。図11に1 μm ピッチ成形品転写面の溝形状 (AFM) を示す。図12に1.5 μm ピッチ金型表面の溝形状 (AFM) を示す。図13に1.5 μm ピッチ成形品転写面の溝形状 (AFM) を示す。図14に2 μm ピッチ金型表面の溝形状 (AFM) を示す。図15に2 μm ピッチ成形品転写面の溝

図12 ピッチ1.5 μm の金型表面の溝形状 (AFM)

図13 ピッチ1.5 μm の成形品表面の溝形状 (AFM)

図14 ピッチ2 μm の金型表面の溝形状 (AFM)

図15 ピッチ2 μm の成形品表面の溝形状 (AFM)

図16 転写率

形状 (AFM) を示す。図 16 に転写率の結果を示す。

実験の結果、ピッチ $1\text{ }\mu\text{m}$ の時は、金型の溝の最大高さ：P-V 値 327.28 nm 、成形品の溝の P-V 値 223.80 nm となり、このときの転写率 68.4% となる。ピッチ $1.5\text{ }\mu\text{m}$ の時は、金型の溝の P-V 値 350.47 nm 、成形品の溝 P-V 値 324.95 nm となり、このときの転写率 92.7% となる。 $2\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの時は、金型の溝の P-V 値 709.06 nm 、成形品の溝の P-V 値 469.90 nm となり、このときの転写率 66.3% となる。この結果から、 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの場合は、成形転写実験に用いた卓上型射出成形機によっても、ナノメートルレベルの型表面構造に対して、十分転写率の高い成形品を得られることが確認できた。しかし、 $1\text{ }\mu\text{m}$ ピッチと $2\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの溝に関しては $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの溝に比べ低い転写率となった。これらの結果から、同一面上にピッチの違う溝形状を有する成形品の場合、それぞれの溝に対して同じ転写率が得られないという現象が示唆される。これは、今回加工した金型の設計上、ゲートからそれぞれの溝の位置関係が影響しているのではないかと考えている。また、ゲートの大きさが成形品に対して小さい事も影響していると考えられる。今後は、同一面上にある $1\text{ }\mu\text{m}$ および $2\text{ }\mu\text{m}$ のときの転写率を、 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ のときの転写率と同様に得られるような成形条件の見極めと、スプール、ゲート、金型温度配管などの最適化を検討していく。

4. 超精密射出成形シミュレーション¹¹⁾

4.1 シミュレーションツール

次に、結像用光学素子の射出成形における高精度化、高性能化を狙って、射出成形シミュレーションを援用した解析検討事例を紹介する。ここで使用したシミュレーションソフトウェアは、ASU/MOLDTM および 3D TIMONTM である。ASU/MOLDTM は有限要素定式化によって樹脂の流動解析を行っており、3D TIMONTM は有限差分法で計算している。解析対象としては直径 13.4 mm の非球面ビデオカメラ用の光学樹脂レンズである。光学製品の品質は成形歪みにより左右されるが、熱収縮、残留応力や異方性、密度分布と関係がある。特に成形品に残留している複屈折は、成形プロセス中に発生する残留応力・高分子配向などの履歴の結果である。複屈折低減のためには、ゲート形状や成形条件の変更などの対策が必要になる。薄いものの方が流動によるせん断応力の影響が大きく、厚いもの場合は熱応力の影響が大きいことが知られている。今回対象としたレンズは厚く、熱応力の影響が大きいと考えられる。本稿では、残留応力分布は ASU/MOLDTM を用いて予測し、複屈折および偏光解析は 3D TIMONTM ソフトを用いて計算を行った。

4.2 流動解析と残留応力の予測

表 4 はレンズ内部の残留応力分布を予測するために使用した成形条件である。図 17 に、流動時のメルトフロントの計算結果と実験結果を示す。実際の樹脂の流れとメルトフロント計算結果はよく一致していることがわかる。

図 18 はレンズ内部の残留応力分布の計算結果である。レンズ内部より枠に応力が集中していることがわかる。これはレンズ周りの枠に残留応力が集まるので、レンズ性能の劣化を抑えるためには枠の設計が重要であることを示唆

表 4 解析条件

樹脂	射出温度	金型温度	充填時間	保圧力
PMMA	250°C	105°C	0.5 s	20 MPa

図 17 メルトフロント計算と実験結果

図 18 レンズ内部の残留応力分布

図 19 射出条件による複屈折および偏光の解析結果

するものと考えられる。

4.3 偏光および複屈折の予測

成形過程において、樹脂は高温高压の状態で強制的に金型内へ充填され、同時に金型により急冷される成形履歴を経るため、その内部には流動配向や熱収縮による歪みが凍結され残留応力が生じる。これらのためにレンズ内の密度が不均一となり屈折率が変化することが知られている。本節では解析対象としたレンズに対して複屈折および偏光解析を行い、その結果を実験結果と比較した。図 19 に成形

図 20 射出条件によるレンズの収縮量

図 22 射出成形条件によるレンズ球面 R の測定結果

らは除外した)。これより、レンズ中心部の収縮量が少ない場合、球面半径も減少することが分かる。この結果から得た射出条件は、金型設計に応用できると考えられる。

5. ま と め

以上、ナノプレジジョン・マイクロメカニカルファブリケーションとして、超精密マイクロ 5 軸空気静圧駆動システムを用いて、単結晶ダイヤモンド工具により実施したミクロン、サブミクロンレベルの構造を持つ金型の加工事例、および卓上型射出成形機を用いた成形転写加工実験について紹介した。微細構造の超精密切削加工においては、

- ・単結晶ダイヤモンド工具と単結晶ダイヤモンドエンドミルで溝を垂直な 2 方向から加工する方法ではエッジにバリが発生すること、また
 - ・単結晶ダイヤモンドエンドミルで溝を四角の形にミリーング加工する方法ではバリが発生しないこと、
- などの知見が得られている。また、加工された微細形状に対してエレクトロフォーミングを施すことで、それを金型として微細矩形状の射出成形も可能と考えられる。

また、卓上型射出成形機による V 溝の成形転写実験により、良好な転写率が得られることが確認された。ただし、同一面に深さの違う溝形状が施されている場合は、それぞれの溝の転写率について留意する必要があることを示唆する結果が得られた。

最後に、光学樹脂レンズの射出成形において、シミュレーション技術を活用して、成形時の残留応力と偏光および複屈折を予測した。また、解析結果と射出成形の実験結果と比較することで、実際の光学樹脂部品の製造への応用についても検証できたと考える。結果をまとめると、

- ・対象になった光学レンズをモデリングしてシミュレーションした結果、レンズの周りに残留応力が集中することが確認でき、レンズ周りの枠はレンズ性能の劣化を抑える機能を示唆すること、
- ・実験から得られたサンプルの偏光写真を比較することによってシミュレーションから偏光を予測できることが分かったこと、
- ・光学性能を評価するための複屈折解析を施して実験結果と比較した結果、レンズ中心部の収縮量が高いほど複屈折および偏光の原因になる熱応力と残留応力も発生しや

図 21 偏光解析結果と実験写真

条件による複屈折および偏光解析結果を示す。図 20 は射出条件でのレンズの中心部の収縮量を測定した結果である。ここで提示している各射出条件は、充填温度と充填時間、保圧時間を成形パラメータとして射出成形解析とニューラルネットワークを用いた射出成形条件の最適化により求めた成形条件である。図 20 で、横軸の射出条件の番号は最適化によって収縮率の増加が予測された条件の順番を意味している。複屈折解析で使用される緩和係数は樹脂の物性値であるが、今回の解析では図 21 のように実物の偏光写真と比較して決定した。

前述のように、図 20 は射出条件（図 19 の各条件を最適化）によるレンズ中心部の収縮率を意味するものであるから、図 19 と図 20 とから、射出条件による収縮率と複屈折の対応を考察すると、レンズ中心の収縮率が高くなるのに伴い、樹脂内部の主応力差が大きくなり複屈折および偏光が増加することを意味すると考えられる。図 22 に、射出成形条件によるレンズサンプルの球面半径 R を測定した結果を示す（ここで、図 20 の射出条件 6 と 7 の場合、レンズ内部に気泡が現れたサンプルがあったため、本測定か

すいと予想されること、
・射出成形したレンズサンプル球面の測定結果はレンズ金型の球面設計値の補正加工に応用できると思われる、などの知見が得られている。

これらのように、ナノ精度でマイクロ構造を持つ金型を作り込む機械加工技術とともに、射出成形による超精密光学部品の成形技術において、最終的な光学性能の評価は寸法精度や形状精度と共に極めて重要と考えられ、製品の目的や仕様に応じた加工とシミュレーション技術の連携が重要と考えられる。今後、一連の研究の実用化を目指して、活動を進めて行きたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 大森 整他：非球面の ELID 研削とナノプレジジョン加工システム，精密工学会第 285 回講習会テキスト，9，1（2002）
- 2) 大森 整他：理研シンポジウムテキスト—ものづくり情報技術統合化研究，2，189（2002）
- 3) 大森 整他：“MICRO-WORK-SHOP（マイクロワークショップ）”の開発状況マイクロワークショップ」，理研シンポジウムテキスト，15，56（1999）
- 4) 潘 燕他：2002 年度精密工学会春季大会講演論文集，581（2002）
- 5) 大森 整他：砥粒加工学会誌，46（7），334（2002）
- 6) 上原嘉宏他：超精密卓上型射出成形機の開発における基礎的研究（第 3 報），2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集（2004），CD-ROM
- 7) 森田晋也他：超精密マイクロ加工による誘電体アンテナ微細構造形成の試み（第一報），2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集（2004），CD-ROM
- 8) 森田晋也他：2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演，精密工学会誌，70（5），593（2004）
- 10) 野崎昭俊：精密工学会誌，70（5），610（2004）
- 11) 郭 泰洙他：第 16 回計算力学講演会講演論文集，日本機械学会，03-26，585（2003）

メカニズム

竹 村 憲 二

今，ポリオレフィン成形体の二次結晶化問題で頭が痛い。成形直後のモルフォロジーが固定化されず変化してくる。強度，寸法，長期寿命特性などが変化し制御できない。生まれながらの性能（触媒の性能）で定められておりモルフォロジー変化は避けられない，といわれればそれまでだが，二次結晶化を防止する方法があるのかなのか，と悩んでいる。温度変化により二次結晶化が進行するところまではいいが，どのような結晶であれば二次結晶化が誘発されるのか，どのような分子が二次結晶化を誘発するのか，例えば，分子の長さか分子量分布なのか，特定の分岐なのか，ある分岐度度分布もつ分子なのかなど，二次結晶化のメカニズムがわからない。メカニズムがわからないと防止対策を講じることが出来るのかできないのかかわからない。

メカニズムといえば，人体の種々の機能に関するメカニズムが，遺伝子を始めとするいろんな分野の発展により徐々に明らかになりつつある。その結果として難病といわれていた病気の治療薬も副作用がない形で開発され，

我々に多くの恩恵をもたらしている。しかもピンポイントで患部に作用するドラッグデリバリーシステムも機能メカニズム解明をもとに開発されている。メカニズムが解明され理解できるようになるといろいろな対策ができるようになる。

ところで，いろいろなメカニズム解明のための天才が出現させるためのメカニズムはあるのだろうか，など思ふかなことを考えてみる。天才には生まれながらの天分のようなものがあるのだろうか。本当はないのかもしれない。遺伝子は外力により変化するのだそう。だとしたら，ある時期にある外力が加われば眠れる遺伝子を活性化させ天才となる可能性があるのかもしれない。倦まずたゆまず継続する，情熱や熱意，好奇心といったものを外力とするのか，などとも考えてみる。峠はとっくに過ぎており，浮気心の旺盛な我が身を省みると自らに課する外力としては不可能である。二次結晶化メカニズムを解明し防止手法を開発するには天才を探し，教を乞うしかないな，と考える今日この頃である。