LIGA プロセスを用いた射出成形金型の開発

黒川 正也*

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いてマイクロメータあるいはナノメータレベルの微細な構造をシリコン基板上に加工する研究開発^{1)~3)}が、バイオ、医療、通信、ならびに光分野への応用展開を目指して、1990年代頃から急速に行われるようになった。これらの研究を通してマイクロメータからナノメータレベルの微細な構造をシリコン基板上に形成できるようになり、製作したシリコン加工品による性能評価、あるいは製作したシリコン加工品を鋳型としてシリコン樹脂 (Polydimethyl siloxane: PDMS) 製のレプリカ品による性能評価が行えるようになってきた。しかし、これらの評価では、評価に使える加工品が1枚あるいは数枚程度であり、将来の三次元構造体の量産化には繋がらない。このような状況下、基礎研究から得られた結果を基に、三次元構造体を大量生産するプロセスの開発機運が高まりつつあり、製造コストの低減およびマイクロメータからナノメータレベルの再現精度などの量産対応要求を解決できる製造プロセスの開発が進められている。

このような開発機運の中、三次元構造体の量産プロセスの1手法として、1982年にドイツのカールスルーエ研究センターに在籍していた Ehrfeld らが提案した LIGA プロセス⁴⁾が着目されている。LIGA プロセスは、シンクロトロン放射光 (Synchrotron Radiation: SR) の X 線用いたリソグラフィ (Lithographie), 電気メッキ (Galvanofarming), 成形 (Abformung) の頭文字から称したプロセスで、射出成形で三次元構造体を大量生産することを特徴としたプロセスである。

射出成形プロセスという生産プロセスでは、所望する成形品の微細パターン形状を反転させた形状の金型を作ることができれば、成形条件の最適化検討により三次元微細構造体を、マイクロメータあるいはナノメータレベルの形状再現性で大量生産できることから、上述したようなバイオ、医療、通信、ならびに光分野への製品を高精度の形状再現性で大量生産が可能となる。しかし、数十 μm から数百 μm といった三次元構造を有する製品を射出成形で成形するた

図1 LIGA プロセスの説明

めには、通常の金型製作で用いられている機械加工で金型を製作することは非常に難しいため、LIGA プロセスが着目されている。

そこで、本報ではバイオ、医療、通信、ならびに光などの各分野に用いられるディスポーサブルな化学マイクロデバイス（以下、マイクロデバイスと称す）を、射出成形で生産するための LIGA プロセスならびに金型製作に関して解説する。LIGA プロセスの各工程を図1に示す。

2. LIGA プロセス

DNA チップ、プロテインチップ、ならびに環境ガス測定チップなどに代表される、数十 μm から数百 μm 程度の微細な三次元構造体を有するディスポーサブルなマイクロデバイスを射出成形で製作後、そのデバイスの性能を評価する研究が進んでいる^{5)~7)}。射出成形でマイクロデバイスを製作する手法は、デバイスの微細な三次元形状を反転させた金型入子を製作できれば、マイクロメータからナノメータレベルの形状再現性で大量生産できるという特徴がある。そこで、(1)金型鋼材へ直接加工する金型製作方法、(2)MEMS 技術でシリコン基板上に微細形状を加工した後、この加工基板をマスター型として電鍍金型を製作する方法、(3)リソグラフィを用いてレジスト基板上に微細形状を露光した後、この基板をマスター型として電鍍金型を製作す

* Kurokawa, Masaya
スターライト工業(株) 精密製品事業本部 MD Project
滋賀県栗東市上砥山 2222 (〒520-3004)
2007.3.5 受理

図2 機械加工による金型製作

図3 SR露光工程におけるX線移動マスク法

る方法など、射出成形金型の製作方法が検討されている。(1)の金型鋼材への直接加工に関しては、超極細の切削バイトによる切削加工、ならびに超極細ワイヤーによる放電加工などで行われるが、加工面の表面粗度、および加工面のコーナールの存在(図2)などにより、数十 μm から数百 μm 程度の微細形状の加工には用いられない場合が多い。また、単結晶ダイヤモンドを用いた先進加工機による機械加工が検討されているが、マイクロあるいはナノレベルの三次元自由曲面の加工が困難なことや加工エリアが制限されること等の問題がある。(2)のMEMS技術を用いたシリコン基板への微細加工に関しては、加工深さのバラツキおよび加工部のアスペクト比が1を超えると、加工断面の側壁が逆テーパ(アンダーカット)になる危険性が高くなるという問題から、金型が製作できたとしても射出成形工程で成形品が金型から取り出しにくい、あるいは取り出せなくなる等の問題が懸念される。一方、(3)のリソグラフィを用いたレジスト基板への微細加工では、SRから出るサブナノメートルの波長を用いるため、紫外線露光と比べて光線の直線性が高く、数百 μm の深さの露光が一度にできる。さらに、図3に示すように露光時にX線マスクとレジスト基板(PMMA: Polymethylmethacrylate)とを相対的に移動させる(移動マスク法)⁸⁾ことで、PMMA基板上に照射されるX線エネルギー(Dose)を制御し、露光断面の側壁に任意の傾斜を付けることが可能となる。この露光断面の側壁に順テーパの任意の傾斜角

図4 X線マスクによるPMMA基板の露光状態

表1 現像液

Solvent	Concentration, wt%
2-(2-n-butoxy ethoxy) ethanol	60
Morpholine	20
2-amino ethanol	5
H ₂ O	15

を設定できることは、SRを用いたLIGAプロセスの大きな特徴である。即ち、射出成形時に微細パターン形状の転写性を高めれば高めるほど、成形品が金型から離型しにくくなるという現象を、可能な限り微細形状の断面側壁に傾斜を付けることでスムーズな離型が可能となり、離型工程で成形品の形状を損ないにくくなる。さらに、スムーズな離型により金型の寿命が延びる可能性もある。

LIGAプロセスでは、X線マスクの製作が、マイクロデバイスの製造コスト、品質などに大きく寄与しており、極めて重要な要素である。一般的に、X線マスクはX線透過能力が高い材料である炭化ケイ素、窒化ケイ素、カーボン、シリコン、あるいは高分子フィルムなどの薄膜基板上に、X線透過能力が低い材料である金、タンタル、あるいはタングステンで微細パターンが形成される。スターライト工業(株)では、マイクロデバイスの製造コストを下げる目的で、このX線マスクの開発を進めている。多数の試作X線マスクを製作検討した結果、図4に示すレベルのスムーズな露光表面粗度(R_a が $0.1\mu\text{m}$ ~ $0.05\mu\text{m}$)に仕上げられるX線マスクを製作できるようになった⁹⁾。

X線マスクを図1に示すようにポジ型レジストであるPMMA基板の上に置き(露光時にX線マスクとPMMA基板とを相対的に移動させるため、X線マスクとPMMA基板との間に移動クリアランスを設けてある)、所定量のX線エネルギーをPMMA基板に照射させた後、表1に示す現像液に露光基板を浸析させることで、PMMA基板上に微細三次元構造体を形成させることができる。このPMMA基板の微細パターン面に無電解メッキ、あるいはスパッタリングなどで導電化層を形成させた後、ニッケル

(Ni) 電鍍工程に入る。Ni 電鍍工程では、浴温度、電流密度、pH などを詳細に制御して内部応力の少ない Ni 電鍍金型を製作する¹⁰⁾。電鍍工程では電鍍の硬度を高める目的で、純 Ni 以外に Ni-Fe、Ni-Co などの Ni 系合金製の電鍍工程が検討される場合があるが、合金系の電鍍は内部応力の制御が純 Ni の場合より難しい。Ni 電鍍金型が完成後、この金型を射出成形用のモールドベースに組み込んで、成形材料、微細パターン形状、成形品肉厚などから最適な射出成形条件を設定する。射出成形では、射出成形金型が製作でき、さらに最適成形条件を設定できれば、マイクロメータからナノメートルレベルの高い形状再現性で、マイクロデバイスを 1 枚/分から数枚/分のスループットで大量生産することが可能となる。なお、スターライト工業㈱では図 5 に示す立命館大学の SR 装置 (Aurora) を用いて SR 露光を行っている。

同装置で微細パターンを PMMA 基板に露光後、Ni 電

図 5 立命館大学 SR 施設 (Aurora)

鍍金型を製作して、射出成形で PMMA を用いて 32 流路電気泳動デバイスを成形した一例を図 6 に示す。同図より、 $30\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ の流路が交差している箇所が直角になっている様子が観察される。このように流路交差部を直角に仕上げる成形条件で、32 流路電気泳動デバイスを金型からスムーズに離型させるには、流路の断面側壁に設けた傾斜が重要となる。

3. SR 露光における X 線回折の影響

射出成形でマイクロデバイスを成形する場合、マイクロデバイス上に形成される微細形状が複雑になればなるほど、さらに転写性の高い製品を成形しようとすればするほど、微細形状の断面側壁に抜き勾配に相当する傾斜を設けることが必要であることを前項で述べた。その断面の側壁傾斜角は、微細形状に依存するが、おおよそ 10 度から 20 度程度が必要と思われる。この断面に任意の傾斜角を設けるには図 3 に示したように SR 露光プロセスで、PMMA 基板に照射される X 線エネルギーを制御するため、X 線マスクと PMMA 基板とを相対移動させるための X 線マスクと PMMA 基板との間に移動クリアランスが必要となる。

しかし、この移動クリアランスを大きく設定すると、サブナノメートルの波長の X 線を用いても SR 露光工程で X 線回折現象が生じることが確認された¹¹⁾。以下に X 線回折の影響に関して検討した一例を簡潔にまとめた。

図 7 に X 線マスクに形成した微細パターンレイアウトを示す。微細パターンは、5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, および $150\text{ }\mu\text{m}$ の凸パターン露光用、凹パターン露光用、ならびにライン&スペースパターン露光用である。

X 線回折の影響を調べるため、図 7 に示す微細パターン

図 6 32 流路電気泳動デバイス (PMMA 製)

図7 X線回折検討用の微細パターンレイアウト

表2 SR露光条件

No	1	2	3	4
Distance (μm)	0	500	1000	5000

Distance is a moving clearance between an X-ray mask and a PMMA plate.

図8 X線回折シミュレーション解析結果

を表2のSR露光条件でPMMA基板上に露光した後、最もパターンが微細である5 μmパターンに限定して、5 μmパターンエリア内の5 μmライン&スペースパターンと5 μm凸パターンそれぞれの形状を、走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。なお、露光深さは20 μmとした。

また、サブナノメートルのX線波長で、表2のSR露光条件で5 μmライン&スペースパターンを露光する場合のX線回折のシミュレーション解析を、京都大学の田畑研究室にて実施した。図8に同条件において5 μmライン&スペースパターンをX線マスクを動かさずに(移動マスク

図9 PMMA基板上に露光した5 μmライン&スペースパターンのSEM写真

法を使用しないで)、PMMA基板上に露光する場合のX線回折シミュレーション結果を示す。同図は縦軸がX線マスクを通過する際のX線強度、横軸をマスク開口部の大きさ(5 μm)で整理した。X線回折現象が生じなければ、図8のNo.1に示したようにX線解析線図は、X線強度が1を示す矩形形状となり、X線回折現象が大きくなるに従って、解析線図が矩形形状から崩れる結果となる。従って、X線回折現象は、No.1<No.2<No.3<No.4の順に大きくなり、特にNo.4で回折現象が最も大きくなることが明らかとなった。

表2のSR露光条件でPMMA基板上に露光した5 μmライン&スペースパターンならびに5 μm凸パターン、それぞれのSEM観察結果を図9、図10に示す。5 μmライン&スペースパターンおよび5 μm凸パターンの露光深さは共に20 μmである。図9の5 μmライン&スペースパター

ンでは、X線マスクとPMMA基板との距離が長くなるにつれて回折現象が生じていることが判りにくい結果となったが、図10に示した5 μ m凸パターンのSEM写真からは、X線回折シミュレーション解析の結果どおりにX線マスクとPMMA基板との距離が長くなるにつれてX線回折現象が大きくなっていることが確認される。特に、5 μ mパターンをPMMA基板に露光する場合、X線マスクとPMMA基板との距離が5000 μ mになるとX線回折の影響を大きく受けることが判る。以上のことから、5 μ mレベルの微細な形状をSR露光する場合は、移動クリアラ

図10 PMMA基板に露光した5 μ m凸パターンのSEM写真

ンスを1000 μ m以下に設定する必要がある。

さらに、紫外線露光と比べて直線性ははるかに高いX線を用いたSR露光の深掘り露光について説明する。PMMAレジストに露光する形状を図11に示す。露光する形状は、6.05 mm $\times$ 4.20 mmエリアに六角形の対辺距離が104 μ m、六角形のパターン間隔が20 μ mの連続パターンを形成したクラスターの集合体からなっている（1クラスター内のハニカム数：60個）。このクラスターを横方向150 μ m、縦方向100 μ mのクラスター間隔で5 $\times$ 5配列してある。このパターンのX線マスクを製作して

図11 深掘り露光用のパターンレイアウト

図12 Ni電鍍金型の微細形状観察結果

PMMA 基板に $100\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, および $250\ \mu\text{m}$ の深さまで露光できるよう X 線を照射した。なお, X 線の直線性を検討するため, 断面側壁に傾斜を設けない条件で PMMA 基板に図 11 のハニカム形状を露光した。各露光深さのハニカム構造を PMMA 基板に露光した後, Ni 電鍍工程を経て Ni 電鍍金型を製作した。この Ni 電鍍金型における各ハニカム構造パターンをレーザ顕微鏡と SEM で観察した結果を図 12 に示す。図 12 の $250\ \mu\text{m}$ の高さの Ni 電鍍金型のハニカム構造から, X 線回折の影響を十分に考慮すれば, $250\ \mu\text{m}$ のほぼ垂直の深掘り露光が可能であることが判る。

図 13 に $250\ \mu\text{m}$ 高さの Ni 電鍍の六角形の天面部の SEM 写真を示す (PMMA 基板では露光底面に相当する)。同図より, 六角形の外周部が若干盛り上がった形状になっている。この結果は $250\ \mu\text{m}$ の場合のみの現象ではなく, $100\ \mu\text{m}$, あるいは $200\ \mu\text{m}$ の場合にも確認された。露光パターンの外周部が深く露光される原因は, X 線マスクのパターンエッジ部で X 線が強調されることにありと推察される。この現象を防止するには, シリコン基板あるいは金属基板上に PMMA レジストを所定膜厚に成膜したレジスト基板を用いて, 基板面まで露光をする (貫通露光法) 必

図 13 $250\ \mu\text{m}$ 高さのハニカム構造 Ni 電鍍金型

1st step

SR conditions :

Dose : $0.4\text{A} \cdot \text{h}$
Scan length : 80mm

2nd step

SR conditions :

Dose : $0.1\text{A} \cdot \text{h}$
Scan length : 80mm

Cross section of micro structures

図 14 2 段階露光プロセス

要がある。しかし, シリコン基板あるいは金属基板上への PMMA レジストの成膜は, 成膜エリアが広がるほど, また厚膜になるほど均一な成膜が難しくなる。そこで, スタート工業㈱では, 上述した貫通露光法に加えて, SR 露光時に X 線マスクを移動させる移動マスク法が, 露光外周部の盛り上がり防止対策に効果があることを明らかにした。

4. 多段階露光プロセス

図 1 に示した LIGA プロセスでは, SR を用いて PMMA 基板に数百 μm の微細パターンを露光することができることを示したが, 露光エリア内にパターンの位置を制御しながら複数の露光深さを形成させることは困難である。そこで, SR 露光プロセスで, X 線マスクにアライメントマークを数カ所設けて数枚の X 線マスクを組み合わせる, 所定の Dose に達した毎に X 線マスクを取り外すという多段階露光プロセスについて説明する。図 14 に X 線マスクを 2 枚組み合わせた場合の SR 露光プロセスを示す¹²⁾。X 線マスクを組み合わせた状態でマスクパターンに位置ずれがあると, PMMA 基板にその位置ずれに相当したパターンが露光されることになるため, この多段階露光プロセスでは, X 線マスク上に形成したパターンの位置合わせが非常に重要である。

微細パターンの断面傾斜角を 10 度になるように, 2 枚の X 線マスクを組み合わせて SR 露光することで, 図 15 に示すような流路系マイクロデバイスのマイクロ流路の両側にカバープレートの接合を担うマイクロリブを形成することが可能となる。

X 線マスクの微細パターンの位置ずれをアライメントマークで制御することで, SR 露光プロセスにおける多段階の SR 露光が可能となり, 露光エリア内で露光深さが異なる複数のパターンを露光できる。また, PMMA 基板に作製する複数の深さの異なるパターンは, X 線マスク上のアライメントマークを, PMMA 基板に形成したアライメントマークと合わせることで可能である。

図 15 2 段階露光プロセスで製作した PMMA 製のリブ付きマイクロデバイス。
2 段階露光プロセスにより露光深さを変えることでリブ部を形成

5. ま と め

バイオ，医療，通信ならびに光分野への応用展開を目指して，1990 年代頃から急速に開発検討が行われてきたマイクロデバイスを，高い形状再現性と低価格で生産するプロセスの 1 つとして LIGA プロセスがあることを説明した。射出成形という成形手法は，金型が製作でき，成形材料，微細パターン形状ならびに成形品厚みなどを考慮して最適な成形条件が設定できれば，マイクロメータからナノメータの形状再現性で，1 枚/分から数枚/分の成形サイクルでマイクロデバイスを生産できる。しかし，射出成形でスムーズにマイクロデバイスを金型から離型させるには，微細パターンの断面側壁に 10 度から 20 度程度の傾斜が必要であり，マイクロデバイスのパターンが微細になればなるほど，この微細断面の傾斜角がたいへん重要となる。Ni 電鍍工程で使用するマスター型は，LIGA プロセスで製作した PMMA 基板以外に，冒頭で述べたシリコン基板を用いる場合がある。シリコン基板での深掘り加工法の一例として，Bosch プロセスを用いた ICP (inductively coupled plasma) エッチング装置による加工法がある。この加工法では，側壁部にわずかに順テーパの傾斜を付けた深掘り加工が可能となるものの，加工条件を最適化できなければ，加工深さ方向に平行の筋模様が入り，この筋模様が射出成形でマイクロデバイスを離型する方向に対して直行しているため，離型抵抗が大きくなる危険性がある。一方，微細形状の断面側壁に任意の傾斜角を付けられる LIGA プロセスは，SR 露光工程で X 線マスクを組み合わせることで露光深さが異なるパターンを PMMA 基板に形成することも相まって，射出成形でマイクロデバイスを生産するための魅力的な手法の 1 つである。

X 線露光を行う SR 施設はたいへん限られているが，三

次元微細構造体を大量生産するための金型製作の 1 手法として，今後，広く利用させることを期待したい。本報が，LIGA プロセスの普及の一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Chujo, H. et al.: The 16th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 351 (2003)
- 2) Min, K. et al.: The 16th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 379 (2003)
- 3) Kim, S. et al.: The 16th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 435 (2003)
- 4) Becker, E. W. et al.: *Naturwissenschaften*, **69**, 520 (1982)
- 5) Jurischka, R. et al.: Proceedings of μ TAS 2006 conference, 146 (2006)
- 6) Melin, J. et al.: Proceedings of μ TAS 2006 conference, 422 (2006)
- 7) Ekstrom, S. et al.: Proceedings of μ TAS 2006 conference, 1468 (2006)
- 8) 田畑 修：成形加工, **15**(4), 246 (2003)
- 9) Kurokawa, M. et al.: Nanotechnology Researchers Network Project, Technical Reports 2005 in the SR CENTER of Ritsumeikan University, 85 (2005)
- 10) Kitadani, T. et al.: Proceedings of the 19th Sensor Symposium, 327 (2002)
- 11) 黒川正也ら：日本機械学会年次大会予稿集, 489 (2004)
- 12) 黒川正也ら：日本機械学会年次大会予稿集, 169 (2006)