微細金型製作技術とマイクロモールドディング

HARMs (High Aspect Ratio Microstructures) のマイクロモールド技術を含んだ微細加工技術である LIGA プロセスは、高アスペクト比の微細金型をベースにした、マイクロモールド技術の上に成立しており、HARMs を高精度に大量生産することが可能である。すでに、医療用超音波診断の分解能を飛躍的に向上させる超微細セラミックス複合振動子に採用され実用化されており、今後もさまざまな用途の微細部品への展開が期待されている。

依 田 潤
沼 澤 稔 之
平 田 嘉 裕

1. はじめに

近年、半導体検査分野や医療分野などで使用する検査素子、センサー、トランスデューサーの微細化が盛んになってきている。とくに、センサーやトランスデューサーの高性能化などが期待できる高アスペクト比の微細構造体 (HARMs: High Aspect Ratio Microstructures) が求められている。HARMs を高精度で生産でき、かつ量産性に優れている製造方法として LIGA プロセスがある。LIGA プロセスは、指向性の高い SR (Synchrotron Radiation) 放射光を光源とした X 線ディープリソグラフィーと電鋳を組合せた微細加工技術であるため、HARMs をサブミクロン精度で製造することができ、かつきわめて高い側壁垂直性を有する¹⁾。本技術を用いて、他のプロセスでは類を見ない、高精度・高アスペクト比の微細金型が実現されている。本金型を用いたマイクロモールドディングにより、金属、プラスチック、セラミックスと広範囲の材料に対して、高精度 HARMs の量産が可能となった。

2. LIGA プロセス

LIGA プロセスを図 1 に示す。SR に含まれる X 線を用いたディープリソグラフィーによって、レジスト (感光性樹脂) をパターンニングし、電鋳で金型を製作、モールドによって各種材料の微細部品などを製造する方法であり、

1980 年初頭にドイツのカールスルーエ研究所 (FzK) で開発された^{2), 3)}。SR 光を用いたリソグラフィーの特徴は、透過性・指向性の高い X 線を光源としているため、高さ数百 μm の HARMs を、サブミクロン精度で製造することができ、かつきわめて高い側壁垂直性を有する¹⁾。製作する構造体の面内寸法精度を決定する X 線マスクパターンの精度は $\pm 0.4 \mu\text{m}$ (3σ) を実現している。

微細金型は、導電性基板上に SR リソグラフィーによりレジスト構造体を形成し、この構造体に、基板から給電し電鋳をすることで製作する。電鋳材には、高硬度・高じん性、かつ低応力のスルファミン酸 Ni を採用している。製作した金型の例を図 2 に示す。底面が 30 μm 角、高さ 300 μm と、高精度・高アスペクト比の微細金型を実現している。表 1 に LIGA で製作した金型のスペックを示す。

3. 樹脂のマイクロモールド技術

上述のプロセスで製作した微細金型を用い、樹脂のマイクロモールドを行えば、高精度なマイクロ樹脂構造体を大量かつ安価に作製することができる。現在、LIGA プロセスで適用されている樹脂のマイクロモールド技術として、RIM、ホットエンボシング、射出成形の 3 種について紹介する。

YORITA, Jun (左) 住友電気工業(株)エレクトロニクス・材料研究所 (678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-12-1)・主査。1994年 京都大学大学院工学研究科修了 (分子工学)。専門はマイクロマシン技術の研究開発。
NUMAZAWA, Toshiyuki (中央) 同上・主査。1992年 東京工業大学理学部化学科卒業。専門は X 線レジストならびに微細樹脂成形技術の研究開発。
HIRATA, Yoshihiro (右) 同上・主席。1988年 東京大学大学院工学研究科修了 (原子力工学)。専門はマイクロマシン技術の研究開発。

Manufacturing Technology of Micromold Insert and Micromolding

図1 LIGA プロセス

図2 LIGA 金型 (30 μm 角, 高さ 300 μm)

表1 LIGA 金型のスペック

最小線幅	2 μm (3σ: 0.4 μm)
高さ	~500 μm
側壁の垂直性	89.9°
側壁の表面粗さ	R _a 30 nm
弾性限界	1,100~1,250 MPa

3.1 RIM (Reactive Injection Molding)

高アスペクト比の微細樹脂モールドでは、樹脂注入の容易性を考慮して、硬化前は低粘度シロップ状である RIM を採用している。RIM とは元来、金型内で重合反応によって樹脂を硬化させる成形方法であり、アクリル、エポキシ系のオリゴマー、硬化剤および離型剤などの成分からなり、これを反応硬化型溶媒で希釈し、数十~数千 cP の粘度に調整する。硬化剤は、重合開始反応のきっかけを与える手段により、熱硬化型と光硬化型に分類される。

FzK では熱可塑製樹脂である PMMA をモノマーに溶解し、硬化剤 (BPO) を 1.25%, 離型剤 (Wurz 社製 PAT-665) を 3% 添加した樹脂を使用している。金型との離型性が良好で、かつ反応硬化型溶液を調整することで、最小パターン寸法が 3 μm、構造厚 300 μm の高アスペクト比の微細ノズル成形を実現している。

当社でも、図2に示す微細金型を用い、予備重合したアクリル樹脂シロップに架橋剤、離型剤を添加し、熱硬化型

図3 熱 RIM 成形した微細構造体⁵⁾
(30 μm 角, 高さ 300 μm)

図4 ホットエンボスプロセス⁷⁾

RIM によりマイクロモールドを行った。成形されたマイクロ樹脂構造体を図3に示す。この樹脂構造体は、30 μm 角、深さ 300 μm の孔が 55 μm ピッチで並んだものであり、高アスペクト比の微細金型の転写を実現した⁵⁾。

この成形方法は微細金型への樹脂充填が容易である反面、シロップ中の残存ガス分が硬化時に加熱・発熱により膨張し、大きな気泡を形成するため、金型の真空引き、樹脂の脱ガス、成形時の加圧が必須となる。FzK では、あらかじめ 100 hPa まで排気し脱ガスを行った成形材料を真空に保持したキャビティへ樹脂充填を行い、約 10 MPa の保圧をかけて硬化させる。硬化後、残留応力を低下させるため、ガラス転移温度付近の 105℃にて熱処理される。その後、室温に冷却され、離型される。

しかし、この成形方法は成形サイクルタイムが数十分~数時間と長く、かつ反応温度~常温の温度差に起因する熱収縮が避けられないため、サブミクロン精度を求める上では最適な量産成形方法とは言えない。

ところで、成形時に加熱を必要としない光硬化型 RIM

は、サブミクロン精度を有するマイクロフレネルレンズなどで量産化されているが、HARMsについての報告事例は少ない。そこで、図2の微細金型を用い、アクリルモノマー、オリゴマーに、光重合開始剤、離型剤を添加し、光硬化によりマイクロモールドを行った。成形サイクルタイムは十分以内と熱硬化に比べて短く得られた樹脂構造体の寸法精度（面内寸法ばらつき、転写性）が高く、もっとも高精度 HARMs 形成を実現できる。

3.2 ホットエンボシング

センサーを製作するマイクロモルディングでは、センサー構造体と電子回路との電気的な接点を設けるため、金型と電子回路基板とのアライメントを行い、樹脂成形を行う必要がある。高い面精度やアライメント精度が要求されるため、成形収縮の抑制が容易な熱可塑性樹脂へのホットエンボシングを行っている^{6),7)}。この成形方法の概要を図4に示す。Bothらは、金型との離型性向上のために材料に添加する離型剤が、基板と樹脂のはく離にも作用するため、2層に塗り分けた樹脂を使用した。基板側の樹脂層は、基板との密着性を向上するためにシランカップリング剤などの密着助剤を添加した高分子量の薄膜 PMMA を配し、上層には離型剤を添加し、かつ成形性の良い比較的低分子量の PMMA を配している。

まず、金型および基板のアライメントマークを用いてアライメントを行い、樹脂をガラス転移温度 (T_g) 以上に加熱し、あらかじめ真空引きしておいた微細金型を樹脂に押し当てて成形する。成形後、 T_g 以下まで冷却し、脱型を行う。最後に金型と基板間に残る薄膜樹脂層（約 $30\mu\text{m}$ ）を RIE (Reactive Ion Etching) にて除去して基板上の金属層を露出させ、電鍍で金属構造体を形成する。

図5は当成形方法により成形された容量型加速度センサー用の樹脂構造体である。 $50\mu\text{m}$ の PMMA 構造体へ、 $20\mu\text{m}$ 幅のパターンを形成しており、アライメント精度は $5\mu\text{m}$ (95%信頼度) を達成している。しかし、RIE にて金型と基板間に残る薄膜樹脂層除去する工程で、樹脂側壁も同時にエッチングされてパターンが後退するため、得られた電鍍構造体のパターン精度は大きく低下する。

3.3 射出成形

量産性や低コスト化、樹脂の種類を拡大するために射出成形の検討も行われている。

ドイツの The Institute for Plastics Processing (IKV) では、Ferromatik Milacron 25-ton 射出成形機をもとにモールドシステムを開発した⁸⁾。本装置は最大加圧力 300MPa 、最大射出速度 250mm s^{-1} である。ショットウェイト $0.1\sim 0.5\text{g}$ で最大偏差は $0.1\sim 0.5\text{mg}$ という高い再現性を得るために、プランジャー径を 9mm と小型化している。微細金型を壊さずに樹脂を充填するために必要な金型

図5 ホットエンボス成形例⁷⁾

図6 射出成形例⁸⁾ ($80\mu\text{m}$ 高さ $200\mu\text{m}$)

図7 樹脂のマイクロモルディング技術の比較

加熱を、キャビティー、ランナーのみに行うことで、サイクルタイム2分を達成している。さらに、欠陥を防止するために、真空中で成形が行われる。上記条件下、ヘキスト社製の低粘度 POM を使用し、射出速度 10mm s^{-1} 、射出圧力 $20\sim 25\text{MPa}$ で成形した径 $80\mu\text{m}$ 、高さ $200\mu\text{m}$ 、ピッチ $88\mu\text{m}$ の六角柱を実現している（図6）。

3.4 マイクロモルディング技術の比較

図7に各マイクロモルディング技術で作製された樹脂型の成形精度とアスペクト比との関係を示す。

射出成形はアスペクト比10以下の領域で、成形精度 $10\mu\text{m}$ 以上での高速成形に適する。ホットエンボシングはアスペクト比10以下の領域で射出成形より高精度な成形に適する。一方、低粘度シロップを金型注入する RIM 成形は高アスペクト比微細成形に適しており、中でも光硬化型

図8 微細PZTアレイ⁵⁾ (25 μ m角, 高さ250 μ m)

図9 セラミックス複合圧電振動子⁵⁾

RIM成形は高アスペクト比と高精度とを両立する成形方法である。要求される成形精度、樹脂物性などから、成形方法を選択する必要がある。

4. セラミックスのマイクロモールド技術

マイクロモールド技術を応用し、当社では圧電セラミックスであるPZT (Lead Zirconate Titanate) の高アスペクト比の微細柱を形成している⁵⁾。製作方法は、熱硬化型RIMで製作した樹脂型にPZTスラリーを注入し、乾燥・固化させた後に、樹脂型をプラズマエッチングにより除去

する。その後、本焼成などを行い、高アスペクト比の微細PZT柱を倒壊することなく形成している。その結果、図8に示す25 μ m角、高さ250 μ mのPZT柱列を実現した。本方法の採用により、従来ダイシングにより加工していたセラミックス微細PZT柱列の加工幅を100 μ m前後から25 μ m微細化することに成功した。

この微細PZT柱列は、その後エポキシ含浸、厚さ調整、電極形成することで複合圧電材料となる(図9)。これは、医療用の超音波診断装置における超音波送受波素子に採用され、画像分解を飛躍的に向上した⁹⁾。

5. ま と め

HARMsのマイクロモールド技術を含んだ微細加工技術であるLIGAプロセスを紹介した。本製造方法は、高アスペクト比の微細金型をベースにした、マイクロモールド技術の上に成立しており、HARMsを高精度に大量生産することが可能である。すでに、医療用超音波診断の分解能を飛躍的に向上させる超微細セラミックス複合振動子に採用され実用化されている。今後さまざまな用途の微細部品への展開が期待されている。

文 献

- 1) H. Takada, *et al.*: *Trans. IEE of Japan*, 116-C(12), 1334 (1996)
- 2) A. Roger, *et al.*: *J. Micromech. Microeng.*, 2(133) (1992)
- 3) P. Bley, *et al.*: *FED ジャーナル*, 5(20) (1994)
- 4) H. Vollmer, *et al.*: *KfK-Bericht*, Nr. 4859 (1987)
- 5) Y. Hirata, *et al.*: *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, p. 877 (1997)
- 6) A. Both, *et al.*: *Proc. IEEE MEMS '95*, p. 186 (1995)
- 7) O. Roetting, *et al.*: *Proc. Symp. on Design, Test, and Micro-fabrication of MEMS and MOEMS*, p. 1038 (1999)
- 8) W. Michaeli, *et al.*: *Eur. Plast. News*, 23(4) (1996)
- 9) Y. Hirata, *et al.*: *SEI Technical Review*, 151, 180 (1997)