

## (5) シンクロトロン光・高輝度 X 線を利用する深刻 X 線リソグラフィによる LIGA 微細精密めっき加工の技術開発研究

経済産業省 平成 21 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業（補正）

経済産業省 平成 22 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業（2 年間）

日高昌則、常業信正、河崎将市、田口英信 田口電機工業株式会社

### 1. 平成 21 年度 概要

シンクロトロン光からの高輝度 X 線を利用する深刻 X 線リソグラフィーの技法を応用して、LIGA 微細加工によるマイクロスケールのマイクロパーツおよびこのマイクロパーツを内蔵するマイクロシステム製作に関する技術を確立するのが本開発研究の主目的である。本研究では、厚さ 30~500 $\mu\text{m}$ 、サイズ 20~500 $\mu\text{m}$  のマイクロパーツ製作を目標とする。最近までは、韓国・ポハン加速器研究所のシンクロトロン光施設で LIGA 微細加工の開発研究を実施してきたが、九州シンクロトロン光研究センター（佐賀 LS）の光特性が LIGA 微細加工の技術開発および実用化研究に適するかの検証も行った。

### 2. 平成 21 年度 研究内容

本研究で使用する高輝度 X 線専用の X 線フォトマスクは、各種のテスト用マイクロパーツをもつ UV マスクから自作された。佐賀 LS の白色ポート B L09A で照射実験を行ったが、これらの実験では独自に製作した専用 X 線チャンバーを 9A 実験ポートエリアに仮設した（図 1）。



図 1 専用 X 線チャンバー

この低真空型チャンバーは多目的 X 線スキャナー（図 2）を内蔵している。高輝度 X 線を照射する X 線フォトマスクおよびフォトレジス

ト基板は、この X 線スキャナー上の試料ホルダーに搭載されている。



図 2 X 線スキャナー

また、照射 X 線によるフォトレジスト基板の温度上昇を抑制するために、この試料ホルダーには、ペルチエ素子配列による電子冷却器も装備されている。

また、図 3 の様に、高輝度 X 線の入射を Y 軸方向とすると、試料ホルダーは X 線スキャナーの垂直移動（Z 軸）に加えて水平面での回転（ $\Theta$  軸回転）と試料ホルダー面内で回転（ $\Phi$  軸回転）する機能を持たせている。

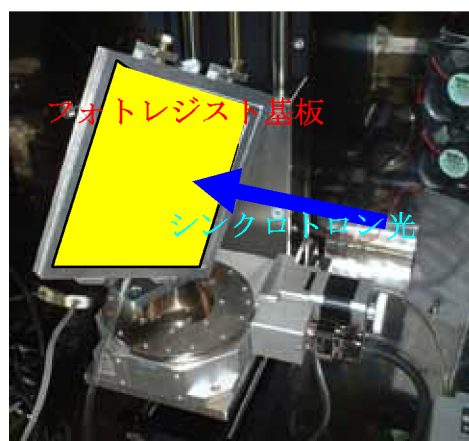


図 3 3次元照射駆動

LIGA 微細加工では、高輝度 X 線照射により X 線フォトマスク上の各種のマイクロパターンを照射用フォトレジストに転写する。金属製のマイクロパーツやマイクロ鋳型は、この照射レジストに対する各種の処理工程（主に、現像エッチング—電気めっき—剥離エッチング）を経て製作される。

これらの化学的反応は照射フォトレジストと現像液または剥離液との界面で発生する。従って、高質なマイクロ構造を得るには、これらの反応がスムー

ズに、高性能に起こる必要がある。本開発研究では、将来の実用化を考慮したエッチング装置の開発、製作も行った。図4は現像後の照射フォトレジストを示しているが、各種のテスト用マイクロパーツ配列がレジスト基板上に観測される。

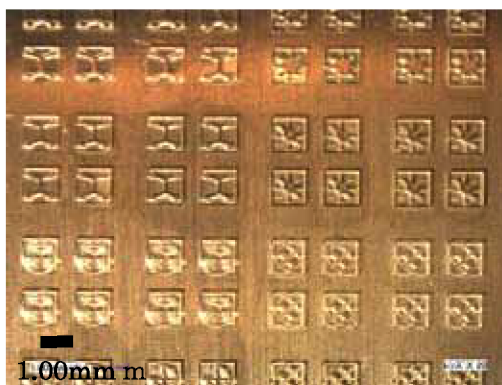


図4 マイクロパーツ配列

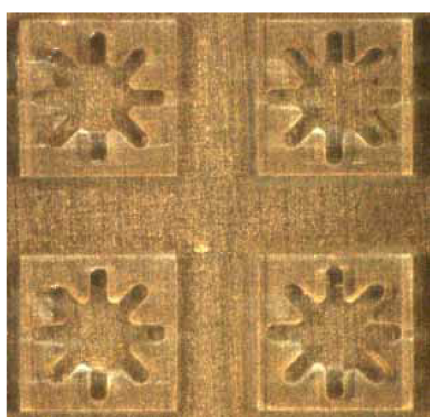


図5 マイクロ構造

図5はこれらのレジスト構造体に電鍍めっきを行い製作した高精度の微小マイクロ構造体を示す。本研究では、製作したマイクロ構造の評価を行うのに、高性能のレーザー顕微鏡(キーエンス・VK9700型;光源・バイオレットレーザー、倍率・200~18000倍、分解能・1nm、上下方向のセクション撮像・0.01 $\mu$ mステップ)を使用した。図6はPMMA製マイクロ構造のマイクロスコープ撮像である。図7は、図6を0.01 $\mu$ mステップで上下方向に撮影されたレーザー解析像(赤色部)である。この図の青斜線部の断面が図8に示されている。

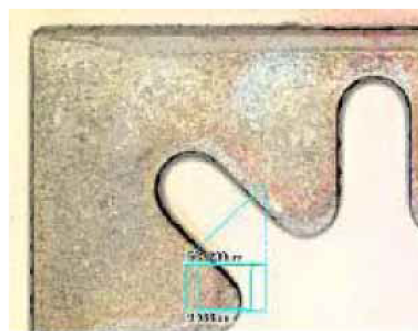


図6 マイクロ構造(図4)

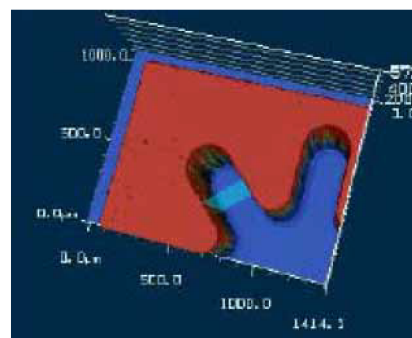


図7 レーザー顕微鏡撮

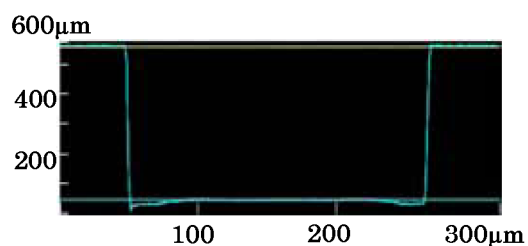


図8 レーザー撮像解析

このレーザー撮像の解析により、PMMA製マイクロ構造の壁面が高精度に形成されていることが確認される。このマイクロ構造の細孔底は電気めっき用の陰電極として使用する基板下地である。

本研究により LIGA 微細加工の基礎的な工法の確立に成功し、9A 実験ポートの光特性は LIGA 微細加工の開発に非常に最適であることが検証できた。

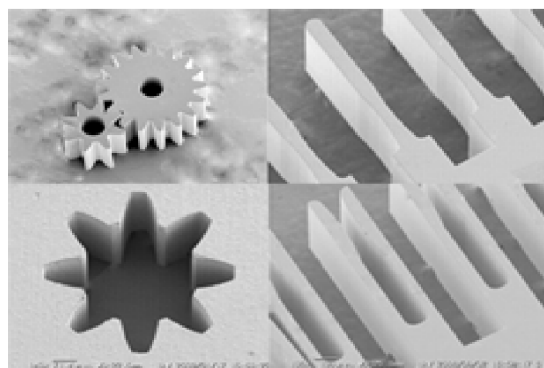


図9 電鍍めっきによるマイクロパーツ構造体

### 3. 平成 22 年度 概要

これまで行ってきたシンクロtron光・高輝度 X 線を利用する深刻 X 線リソグラフィーによる LIGA 微細加工の技術開発研究で、各種のマイクロパーツやマイクロ鋳型などの製造技術の基礎的な技術を確認することが出来た。

しかし、電気めっきで製作された金属製マイクロ構造体には、これらのマイクロ細孔のフォトレジスト基板界面付近で R 形状やこの細孔壁の斜傾化が観測された。特に、これらのマイクロ構造変形はフォトレジストの厚さの増加に伴い顕著に観測された。この様な現象の発生原因を解明して、より高精度のマイクロ構造体を製作する技術開発を行っていく。

### 4. 平成 22 年度 研究内容

マイクロ構造変形の発現要因の一つには、フォトレジストに照射される高輝度 X 線によるレジストの熱劣化が推測される。しかし、高輝度 X 線を利用することに利点がある LIGA 微細加工では、この様なマイクロ構造変形の発現メカニズムを系統的に、総合的に調査することが重要である。本研究で使用した自作の X 線フォトマスクを図 1 に示す。このマスク外径は 4 インチである。左側に 3 種類のマイクロギヤ、右側に 2 種類のマイクロコネクターの配列が描かれている。Au 電気めっきは黄色部である。

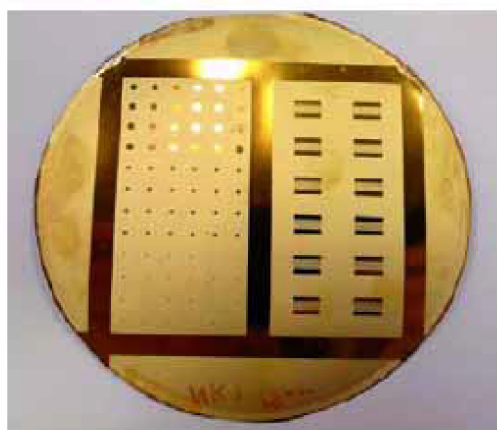
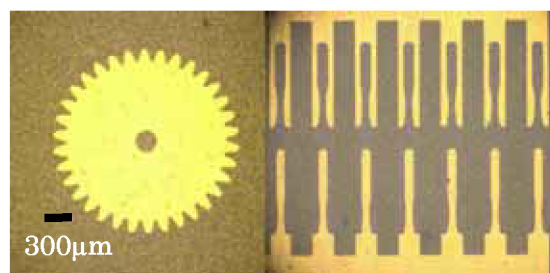


図 1 X 線フォトマスク

フォトマスクにおける照射高輝度 X 線の透過、および 2 次蛍光 X 線の発生を抑制するために、フォトマスクの陰電極基板および各種のマイクロパターンは Au で製作されている。

図 2 はこれらのマイクロパターンを示す。



マイクロギヤ      マイクロコネクター

図 2 マイクロ構造

図 1、2 の X 線フォトマスクを使用して、九州シンクロtron光研究センターの BL09A 白色実験ポートで、当社製作の専用の低真空型 X 線チャンバーを仮設して照射実験を行った。

図 3 の様に、このチャンバー内の X 線スキャナーには、広面積(300x300mm)のフォトレジスト基板、およびこの基板を自動冷却する制御装置を設置できる改造試料ホルダーを搭載した。



図 3 X 線スキャナー

9A の照射 X 線のビームサイズは水平方向に約 100mm、垂直方向に約 20mm であるので、試料ホルダーを水平方向に駆動して広面積レジストの照射実験を行うことができる。

次ページの図 4 は、図 1、2 の X 線マスク上のマイクロパターンを高輝度 X 線によりフォトレジストに転写した後、現像処理して撮られた基板上的 PMMA 製マイクロ構造のマイクロスコープ像である。これらの撮像は基板近傍の PMMA 淵壁部においてマイクロ構造変形を示している。



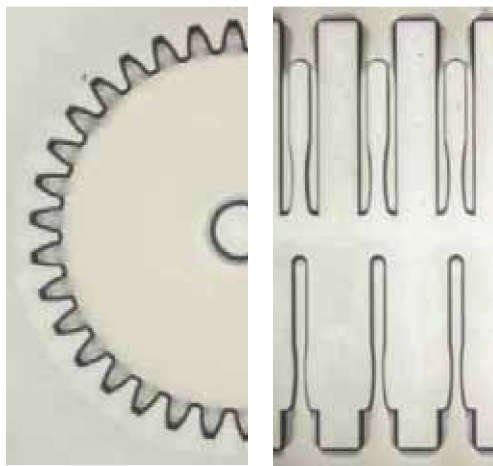
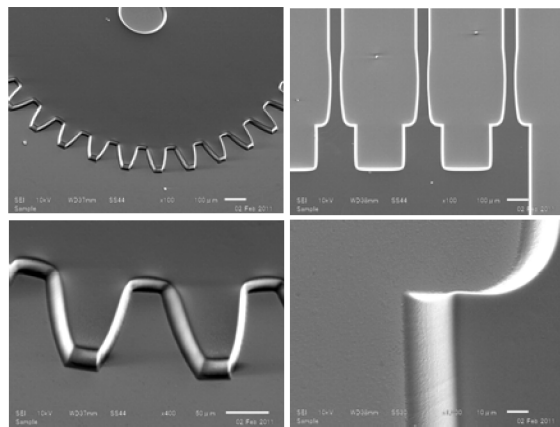


図4 図2のマイクロ構造体

しかし、この変形状態はレーザー顕微鏡のレーザー解析図でも、これらの箇所での画像処理はできなかった。この原因は、淵壁部から反射されたレーザー光が検出部に戻ってこないためである。従って、スパッター装置を用いて、薄い Au 膜を透明な PMMA 製マイクロパターンにコートして、走査電子顕微鏡(SEM)による立体観察を行った。



マイクロギヤ      マイクロコネクタ  
図5 PMMA 製マイクロ構造

図5はマイクロ構造のSEM像である。PMMA 淵壁部の斜形状の壁面がこれらの撮像から確認される。

従って、本年度の研究ではこのようなマイクロ構造変形の発現機構を系統的、総合的に調べた。

マイクロ構造変形の発現は、照射フォトリソグリの熱劣化が直接的にも、間接的にも関与すると思われる各原因に関して様々な検証を行った。

これらの研究により、以下の事象がマイクロ構造変形に影響を与えることが明らかになった。

- ① レジストシートの製作工程
- ② 照射レジストの現像処理工程
- ③ 照射 X 線によるレジストの熱劣化
- ④ X 線マスクによるレジストの熱劣化

①に関しては、照射用フォトリソグリのシートを作製する際の条件（レジスト膜厚、基板コーティング状態、レジストの硬化条件）、低真空高温乾燥器中での排気真空度、排気速度、熱処理条件(加熱上昇時間、到達温度・加熱時間)などが寄与する。

②に関しては、照射フォトリソグリの現像条件（現像液温度、現像時間、現像液の攪拌、現像後の洗浄方法）などが寄与する。

③に関しては、照射実験での高輝度 X 線により加熱されるフォトリソグリ基板の冷却条件（レジスト基板の上下往復運動の駆動速度、レジスト基板のペルチェ電子素子配列による冷却効率）などが寄与する。

④に関しては、X 線マスク基板の作製条件（基板シート厚さ、コーティング、硬化）、X 線マスクを作製する電気めっき条件（金属 Au 製マスクのマイクロ構造体の厚さ、均一性など）が寄与する。

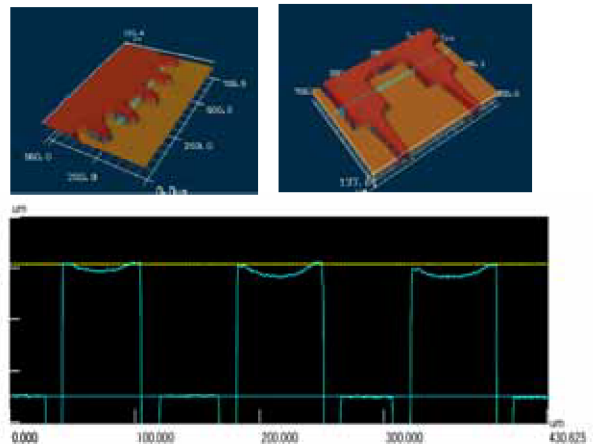


図6 R状の欠けや傾きのない壁面像

本研究では、“R 状”の形状を含むマイクロ構造変形は、これらの要因が複合的に絡んでいることが確認された。従って、高質なマイクロ構造をもつマイクロパーツを製作するためには、これらの諸条件を段階的に解明していくことが重要である。

次年度以降には、これらの諸問題点を解決し、高精密度めっき装置や前処理工程の照射レジスト現像装置の開発などを行い、マイクロ構造体の変形などのない高精密度 LIGA 微細精密マイクロパーツ、マイクロ金型の試作開発を行っていく。