

課題番号：2012132S

BL番号：BL09

(様式第5号)

実施課題名

医療X線画像診断用 Air-Grid マイクロメッシュ製作の LIGA 技術開発(II)

Technical development of the Air-Grid micro-meshes equipped  
at the medical X-ray examining system, by using a LIGA method(II).

日高昌則<sup>1,2</sup>、野上大史<sup>1</sup>、大石 明広<sup>2</sup>、小林 和矢<sup>2</sup>、横尾侑典<sup>2</sup>、田口和樹<sup>2</sup>  
M.Hidaka, H.Nogami, N.Tokiwa, A. Oishi, K.Kobayashi, U.Yokoo,

1;九州大学大学院工学研究院 機械工学部門、2;田口電機工業 技術課

1; Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, 2; Technical Section, Taguchi Plating Industry, Co. Ltd, 3; Department of Health Sciences, Faculty of Medical Sciences, Kyushu University.

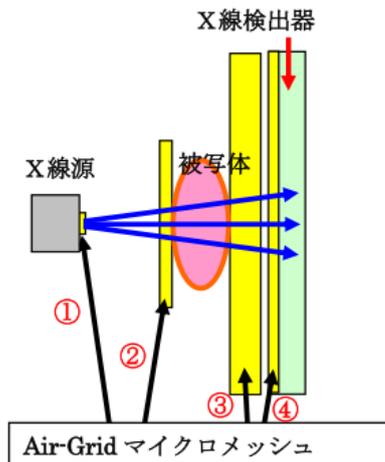
## 1. 概要

本研究は、シンクロトロン光・高輝度X線 (SL) および高出力紫外線 (UV) を利用する微細加工技法(SL-LIGA、UV-LIGA)を使用して、X線画像診断装置に装備する医療用グリッド・Air-Grid マイクロメッシュ (M-AGM) 製作に関する技術開発である。M-AGM は、X線画像診断における被写体の被ばく線量の減少およびX線画像の高質化に寄与できる。本実験では、被写体からの2次散乱X線を抑制するグリッド・M-AGMの試作研究を行なった。このM-AGMのマイクロパターン配列は、Auめっき製部とフォトレジスト材のPMMA製部から形成される。直入射式と角度分散式による露光実験により、SL-LIGAにおける高輝度X線の露光・現像条件が調べられた。

In the present investigations, the technical development of medical grid, Air-Grid micro-meshes (M-AGM), which are used at the X-ray imaging system, were carried out with the LIGA micro-machining(SL-LIGA, UV-LIGA) by using the high-bright X-rays emitted from synchrotron radiations (SL) and the high-power ultraviolet rays (UV). Since the M-AGM reduces the air-scattering of the incident X-rays and the secondary X-rays scattered by the object, the exposure dose of the object is reduced and the quality of X-ray images is increased with the M-AGM. The M-AGM was made with the Au-electroplating parts painting the micro-patterns and the PMMA photo-resist parts. At the present experiments, the irradiating conditions of the incident X-ray beams and the developing ones of the exposed photo-resists for the SL-LIGA were studied by using two kinds of irradiation methods of to be direct and angular-dispersive.

## 2. 背景と目的

田口電機工業と九州大学大学院・理学研究院物理部門は、平成21～23年度に国の支援を受けて、LIGA 微細加工（UV-LIGA、SL-LIGA）に使用する各種の関連装置系を整備し、本格的な微細加工の技術開発研究を実施した。これまで国内外のシンクロトン光研究施設を利用して、シンクロトン光（SL）からの高輝度X線を使用した深刻X線リソグラフィによるSL-LIGAの技術開発を実施してきた。これらの各種のマイクロパーツの試作研究で、Air-Grid 用マイクロメッシュ製作の技術開発も行なってきた。平成28年度から令和元年度では、日本健康倶楽部社・福岡支部とダイトーマイテック社・福岡営業所および九州大学医学部・保健学科の医療用X線画像診断装置を使用して、医療用の Air-Grid マイクロメッシュ（M-AGM）のテスト実験を実施してきた。これらのテスト用 M-AGM は、LIGA 技法（UV-LIGA、SL-LIGA）で作製されている。本実験では、UV-LIGA に関する関連実験は田口電機工業で、SL-LIGA に関する露光実験は佐賀県立・九州シンクロトン光研究センター（佐賀LS）で実施してきている。

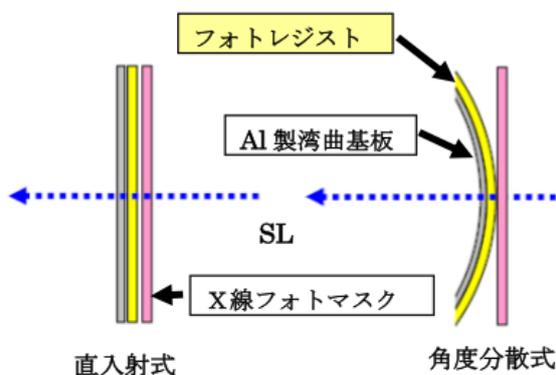


本研究の M-AGM は、4 種類（①～④型）である（左図）。これらの M-AGM は、被写体への照射 X 線の空気散乱および被写体からの 2 次散乱 X 線の影響を低下させる。従って、X 線画像診断における高画質化が向上して、照射被写体の被ばく線量を抑制することが可能である。本実験では、SL の高輝度 X 線をフォトリソに露光する方法として、直入射式と角度分散式を使用する。直入射式では、正方形型マイクロ細孔（正方形細孔；約  $200 \times 200 \mu\text{m}$ 、細孔間壁；約  $40 \mu\text{m}$ ）の平行性細孔配列をもつ Air-Grid マイクロメッシュ（R-AGM）の試作研究を行う。角度分散式では、正方形型

マイクロ細孔の集光性細孔配列をもつ R-AGM の技術開発を行う。

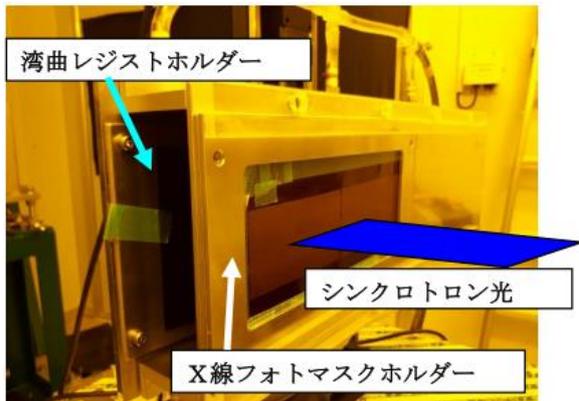
## 3. 実験内容（試料、実験方法、解析方法の説明）

本実験では、自作の簡易型実験ステージおよび X 線スキャナーが、BL09 ビームラインの実験エリアに仮設される。BL09 の水平方向ビームサイズは、直入射式および角度分散式では約  $250 \text{mm}$  を使用した。X 線フォトマスク用の Al 製平板ホルダーおよびフォトリソ用の Al 製湾曲状の基板ホルダー（湾曲レジストホルダー）は、上下駆動式の X 線スキャナーに固定される。ただし、湾曲レジストホルダーの湾曲面は水平面（電子軌道面）内にある。また、現在使用されている市販の X 線画像診断装置では、X 線源から被写体までの距離は約  $60 \text{cm} \sim 200 \text{cm}$  である。本実験では、曲率半径；約  $200 \text{cm}$  の湾曲レジストホルダーを使用する。本実験のフォトリソはドライフィルム（DF レジスト）であり、厚さ；約  $112 \mu\text{m}$  の DF レジストを 2 枚貼り付けた積層 DF レジストを使用した。本実験は、厚さ； $300 \mu\text{m}$  以上で、広面積（約  $200 \times 200 \text{mm}$ ）の M-AGM 作製の試作研究でもあった。



左図は、直入射式（左側）と角度分散式（右側）の露光実験におけるフォトリソ基板ホルダー、X 線フォトマスク、高輝度 X 線（SL）の入射方向の概念図を表す。角度分散式では、フォトリソは Al 製薄板の湾曲基板ホルダー表面に、X 線フォトマスクは平板薄板の X 線マスクホルダーの固定窓にセットされる（下図参照）。

下図は、BL09 実験エリアに仮設された簡易型実験ステージ上の X 線スキャナーを示す。この写真には、X 線フォトマスクホルダー（X 線マスクホルダー）が示されている。直入射式実験では、X 線フォトマスクと DF レジストは Al 製薄板に密着されて、X 線マスクホルダー上に固定される。また、高輝度 X 線による X 線フォトマスクおよび DF レジストの温度上昇を抑えるために、Al 製の X 線マスクホルダーは、水冷式自動温度制御器の基板に設置されて、露光実験中には約 20°C で制御されている。また、垂直方向（Z 軸）のビームサイズは実験エリアで約 10mm であるので、（Y-Z）軸面内を駆動する X 線スキャナーに搭載された X 線マスクホルダーは、露光中には Z 軸に反復運動を行う。ただし、高輝度 X 線の入射方向が X 軸とする。角度分散式実験では Al 製薄板は除かれていて、X 線フォトマスクは X 線マスクホルダーに設置されて、DF レジストは X 線マスクホルダーの背後にある Al 製の湾曲レジストホルダー上に固定される。本実験では、このホルダーの湾曲面は水平面内にあり、X 線フォトマスク & レジストホルダーは Z 軸方向に反復駆動を行う。本実験で使用する湾曲面は、Z 軸に円柱軸をもち、約 200cm の曲率半径をもつ。



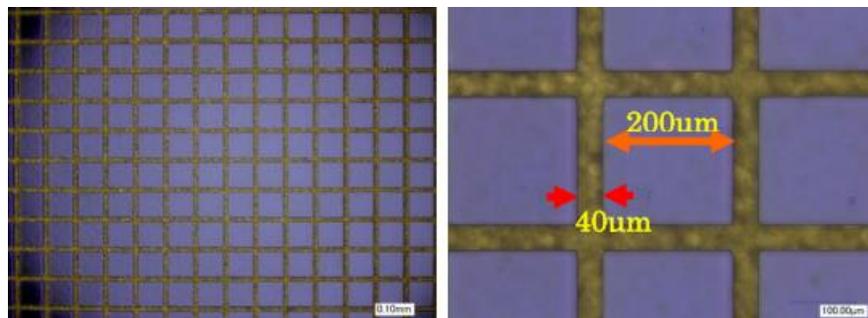
本実験では、このホルダーの湾曲面は水平面内にあり、X 線フォトマスク & レジストホルダーは Z 軸方向に反復駆動を行う。本実験で使用する湾曲面は、Z 軸に円柱軸をもち、約 200cm の曲率半径をもつ。

実験終了直後に、露光済フォトレジストは佐賀 L S のケミカルラボ（ケミラボ）において再熱処理を行う。熱処理済フォトレジストは、田口電機工業の LIGA 微細加工実験室に運び、LIGA 処理工程（現像、電気めっき、剥離等）を行う。これらの一連の作業を経て試作された M-AGM は、各種計測装置（マイクロSCOPE、レーザー顕微鏡、走査型電子顕微鏡、X 線分析装置 etc.）により解析・評価を行う。

実験終了直後に、露光済フォトレジストは佐賀 L S のケミカルラボ（ケミラボ）において再熱処理を行う。熱処理済フォトレジストは、田口電機工業の LIGA 微細加工実験室に運び、LIGA 処理工程（現像、電気めっき、剥離等）を行う。これらの一連の作業を経て試作された M-AGM は、各種計測装置（マイクロSCOPE、レーザー顕微鏡、走査型電子顕微鏡、X 線分析装置 etc.）により解析・評価を行う。

#### 4. 実験結果と考察

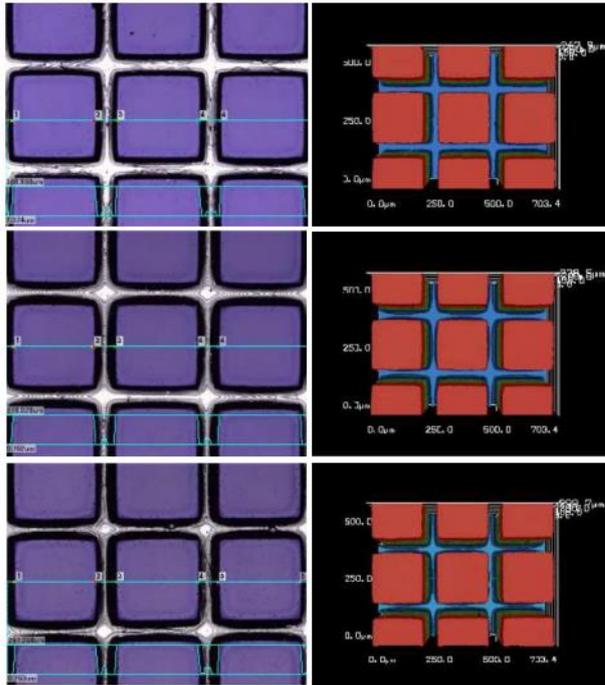
本実験で使用する X 線フォトマスクは、田口電機工業で UV-LIGA 技法により作製された。下図は、正方形のマイクロ細孔配列をもつ X 線フォトマスクを示す。使用したフォトレジストは、半導体部品の製作に利用されている厚さ；約 56 $\mu\text{m}$  の DF レジストである。これらのマイクロ細孔配列を形成している直線状の黄色壁は、高さ；約 28 $\mu\text{m}$ 、細孔間壁；40 $\mu\text{m}$  の金製めっき部である。青色部のマイクロ正方形角柱（高さ；約 56 $\mu\text{m}$ ）は、フォトレジスト材の PMMA である。この X 線フォトマスクに描画されているマイクロパターン配列は、佐賀 L S の高輝度 X 線を利用してフォトレジストに転写された。M-AGM を試作するために、直入射式と角度分散式による露光実験を行った。ただし、露光・転写に使用した DF レジスト（外形サイズ；約 100 x 200mm）は、厚さ；約 112 $\mu\text{m}$  の DF レジストを 2 枚貼り付けた積層（厚さ；約 224 $\mu\text{m}$ ）シートである。



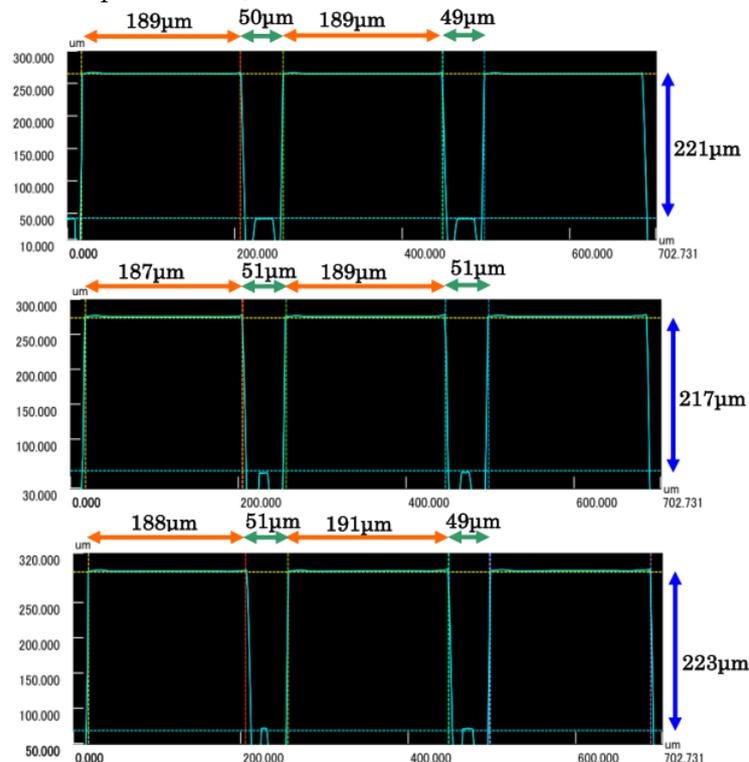
##### 4-1. 直入射式による露光実験

下図は、上図の X 線フォトマスクに描画されているマイクロパターン配列が転写された露光・現像済 DF レジストのレーザー顕微鏡によるマイクロSCOPE撮像（レーザー・マイクロSCOPE撮像）を示す。この正方形マイクロパターン配列は、高精度に転写されている。高輝度 X 線による露光の総電流量は 8mAh であった。これらのレーザー・マイクロSCOPE撮像で、左側は 2 次元図、右側は 3 次元図である。2 次元図で、青色のマイクロ正方形角柱は DF レジストの PMMA 製部である。こ

これらの角柱間に形成された直線状の白色部は、露光・現像処理で作製されたマイクロ細孔である。直入射式実験では、X線フォトマスクとDFレジストは、平板状のX線マスクホルダー上に密着固定される。従って、直入射式の露光実験では、水平方向；約250mmの高輝度X線とDFレジストとの中央部がほぼ一致するようにセットされた。高輝度X線の入射方向（X軸）に対して、露光・現像済DFレジストの水平方向（Y軸； $y = \pm 100\text{mm}$ ）に沿って、下図の上段、中段、下段には、それぞれ左高角、中央、右高角領域でのレーザー・マイクロスコブ撮像が示されている。入射X線の中心を原点（ $y = 0\text{mm}$ ）とすると、上段は $y = \text{約}-80\text{mm}$ 、下段は $y = \text{約}+80\text{mm}$ の位置で撮られている。2020年に佐賀LS-BL09ビームラインで実施した同種の実験では、露光・現像済DFレジストは、直線状のマイクロ細孔（深さ；約 $220\mu\text{m}$ ）底部に僅かな残留フォトレジストを示した。この処理工程を改善するために、本実験では、福岡県立3次元半導体研究センターに現像処理を依頼した。この結果が左図に示されている。使用した露光用DFレジストは無電解Niコートされたフォトレジスト基板の上に固定されている。それぞれのPMMA製角柱の側壁は、僅かに傾斜している。



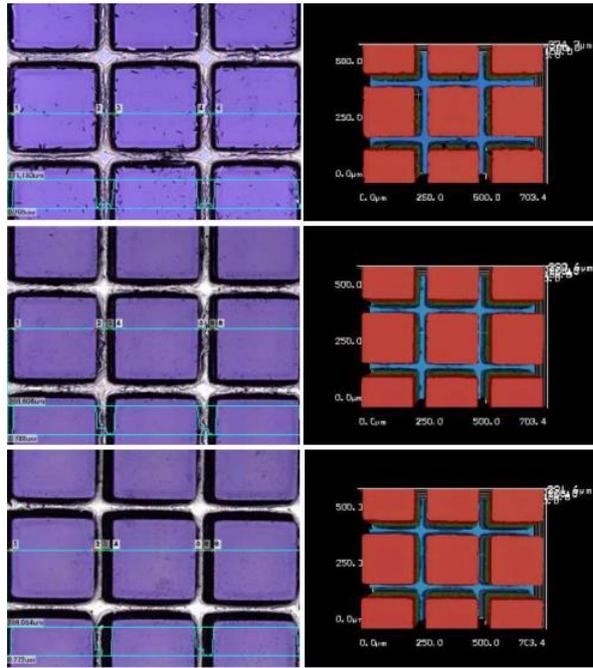
上図・各段の2次元レーザー・マイクロスコブ撮像で、正方形角柱配列の中央部を横断する青線は、レーザー光のスキャン方向を表示している。下図の上段、中段、下段には、それぞれのレーザー顕微鏡によるレーザー解析（レーザー解析）が示されている。下図の上段、中段、下段において、それぞれの細孔の底部は約 $40\mu\text{m}$ である。従って、これらの細孔内では、電気めっきが可能である。



#### 4-2. 角度分散式による露光実験

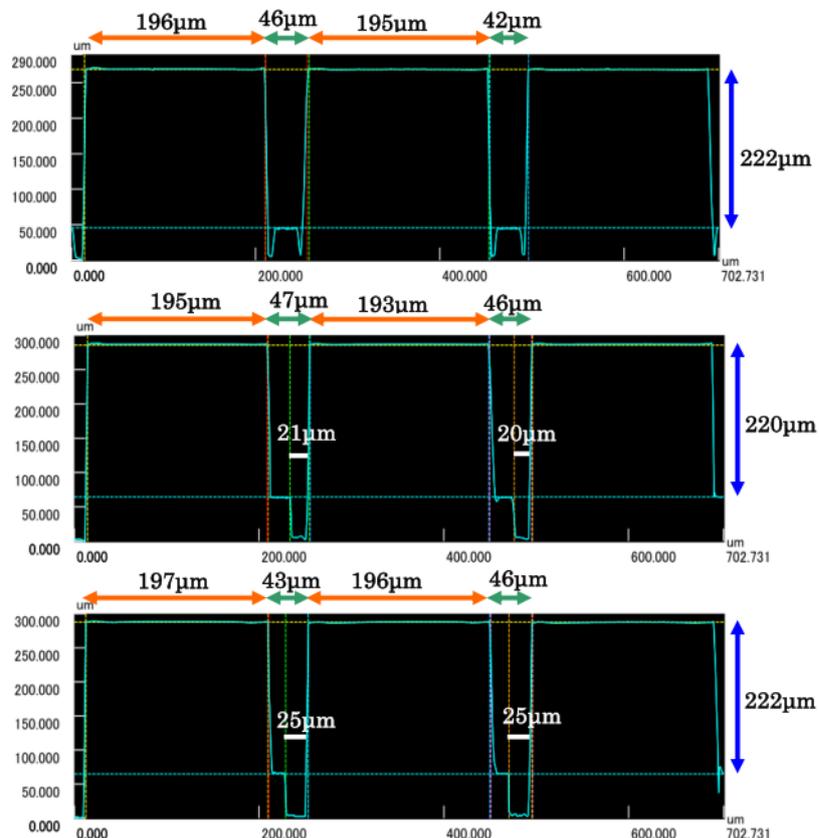
本研究では、角度分散式の露光実験も行った。角度分散式での露光用の湾曲フォトレジスト・DFレジストは、曲率半径；約 $200\text{cm}$ で作製されたAl製薄板表面に固定された。（3. 実験内容）項で述べた様に、正方形型マイクロパターン配列が描画されたX線フォトマスクは、入射X線側にセット

された平板状のX線フォトマスクホルダーに設置された。DFレジストの高角側にもマイクロパターン配列を転写するために、X線フォトマスクおよび湾曲DFレジストの左端は、湾曲Al製薄板の頂点から左側；約20mmに off-set された。本実験でも、福岡県立3次元半導体研究センターに現像処理を依頼した。

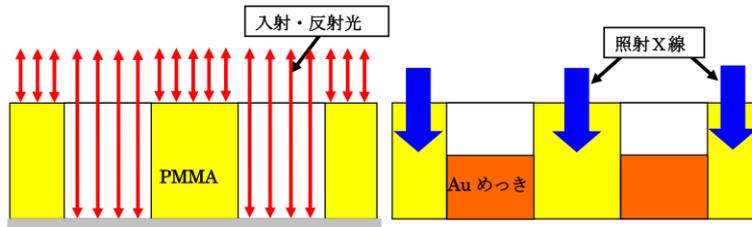


左図は、角度分散式の露光実験で得られた現像済DFレジストのレーザー・マイクロSCOPE撮像を示す。使用した露光用DFレジストは、無電解Niコートされたフォトレジスト基板の上に固定されている。正方形型マイクロパターン配列は、高精度に転写されている。露光の総電流量は10mAhであった。上段、中段、下段には、高輝度X線の入射方向(X軸)に対して、それぞれ中央(約0.6度)、右中角(約3.2度)、右高角(約5.7度)領域でのレーザー・マイクロSCOPE撮像が示されている。ただし、湾曲状態で露光されたDFレジスト(外形サイズ;約100x200mm)は、レーザー顕微鏡の試料ステージに設置して撮られている。上段付近を原点(y=0mm)とすると、中段はy=約+100mm、下段はy=約+180mmの位置で撮られている。ただし、右中角および右高角のPMMA製角柱の左側壁は、僅かに傾斜している。この傾斜は、角度分散式の特徴である。

上図・各段の2次元レーザー・マイクロSCOPE撮像で、正方形角柱配列の中央部を横断する青線は、レーザー光のスキャン方向を表示している。下図の上段、中段、下段には、それぞれのレーザー解析が示されている。下図の中段、下段において、細孔底部の右側壁では、底部から反射されたレーザー光はレーザー顕微鏡に戻っていない。これらの領域は、中角では約20 $\mu$ m、高角では約25 $\mu$ mである。この事象は、PMMA製角柱の左側壁が傾斜していることを示唆する。



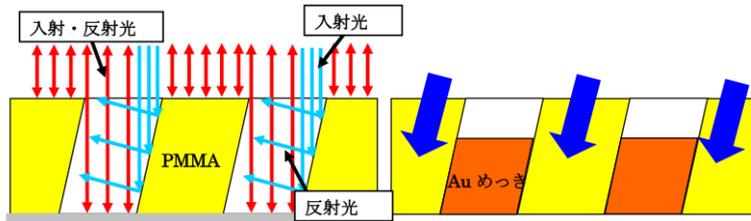
レーザー顕微鏡によるレーザー解析では、試料表面の凹凸・形状が入射光と反射光との光路差により高精度に計測される。しかし、上述した様に、反射レーザーがレーザー顕微鏡に再入射しない状況でも、細孔底部の傾斜状況は確認できる。通常、レーザー顕微鏡によるレーザー解析では、試料はレーザー顕微鏡の平板状試料ステージ上にセットされる。下図は、直入射式の露光・現像済 DF レジストを示す。左側は、レーザー顕微鏡・対物レンズでのレーザー光の入射・反射経路（赤色矢印）、PMMA製のフォトレジスト・DF レジスト（黄色部）、露光・現像処理で除去された細孔（無色部）を示す。右側は、マイクロ細孔内の Au 製めっき部（橙色部）と PMMA 製部の透過照射 X 線（青色矢印）との



の関係を示す。照射 X 線は、PMMA 製部では透過して、Au 製部では吸収される。X 線画像診断装置に使用する M-AGM の試作研究では、PMMA 製部は残す。この主な理由は、X 線画像診断装置の照射 X 線が

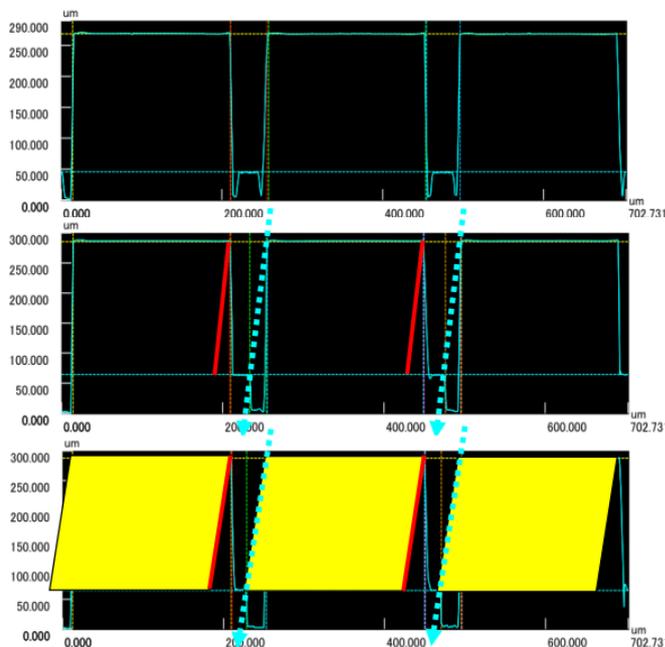
PMMA 製部によりほとんど減衰されないことによる。ただし、X 線画像診断装置の種類によっては、PMMA 製部は除去する。

下図は、角度分散式の露光・現像済 DF レジストを示す。角度分散式の露光実験では、露光用 DF レジストは、Al 製の湾曲レジストホルダーの湾曲基板に密着固定される。従って、この湾曲基板の曲率半径に応じて、X 線マスクに描画されたマイクロパターンは、この湾曲状レジストの高角領域では傾斜して転写される。左側では、赤色矢印の入射レーザー光は、DF レジストの表面および細孔底部から反射されて、対物レンズへ再入射する。しかし、水色矢印レーザー光は、傾斜した PMMA 製側壁で反射されて、



対物レンズへ再入射しない。従って、角度分散式で作製された DF レジストでは、再入射しない反射レーザー光は、傾斜している PMMA 製側壁の情報を与える。

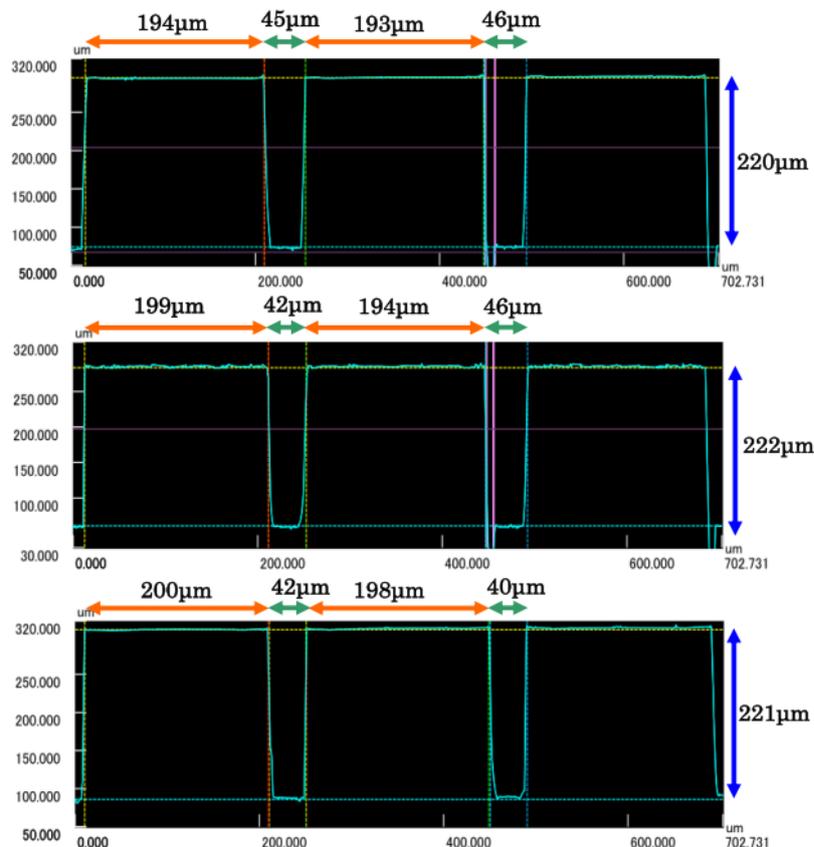
この様なレーザー顕微鏡の光学特性を考慮して、上述した角度分散式の露光実験で得られたレーザー解析結果から、細孔側壁の傾斜が推定された。左図の上段、中段、下段には、中央（約 0.6 度； $y = 0\text{mm}$ ）、中角（約 3.2 度； $y = \text{約} + 100\text{mm}$ ）、高角（約 5.7 度； $y = \text{約} + 180\text{mm}$ ）領域で観測される細孔側壁が示されている。水色点線は、レーザー解析から推測される細孔の右側壁の傾斜を表示する。また、赤色線は、推測される細孔の左側壁を表示する。下段・高角での黄色・平行四辺形は、現像済 DF レジストでの残留 PMMA 製部配列を表す。従って、DF レジストのマイクロ細孔配列は、傾斜形状の角度依存を示す。



ただし、「この様な角度分散式の露光・現像済 DF レジストで得られるマイクロ細孔配列は、本研究で推定される形状を示すのか？」この検証は重要である。前述したように、角度分散式でのレーザー解析では、DF レジストは、レーザー顕微鏡にセットされている円形板状の試料ステージで計測された。従って、レーザー顕微鏡の試料ステージは、本実験で使用した Al 製の湾曲レジストホルダー

ただし、「この様な角度分散式の露光・現像済 DF レジストで得られるマイクロ細孔配列は、本研究で推定される形状を示すのか？」この検証は重要である。前述したように、角度分散式でのレーザー解析では、DF レジストは、レーザー顕微鏡にセットされている円形板状の試料ステージで計測された。従って、レーザー顕微鏡の試料ステージは、本実験で使用した Al 製の湾曲レジストホルダー

に変更された。このホルダーの曲率半径は、約 200cm である。下図の上段、中段、下段には、中央（約 0.6 度； $y = 0\text{mm}$ ）、中角（約 3.2 度； $y = \text{約}+100\text{mm}$ ）、高角（約 5.7 度； $y = \text{約}+180\text{mm}$ ）付近で再計測されたレーザー解析が示されている。これらのレーザー解析は、円形板状の試料ステータで測定した結果と異なる。大きな違いは、マイクロ細孔底部でのレーザー光のスキャン状況である。中角と高角の 2 つの細孔底部の右側壁付近では、底部から反射されたレーザー光はレーザー顕微鏡に再入射している。しかし、中央と中角の右側細孔では、反射レーザー光は左側壁の極近傍ではレーザー顕微鏡に再入射してなく、これらの未観測領域は中央では約  $13\mu\text{m}$ 、中角では約  $9\mu\text{m}$  であった。この事象は、露光・現像済 DF レジストがレーザー顕微鏡に仮設された Al 製湾曲レジストホルダーに正確にセットされていないことを示唆する。従って、下図のレーザー解析から、角度分散式で得られた湾曲 DF レジストの平板状のマイクロ細孔配列は、垂直方向（Z 軸）に沿ったマイクロ平行四辺形柱を示す。ただし、これらの形状は、露光・現像済 DF レジストの水平方向（Y 軸）の角度依存をもつ。このような集光型のマイクロ細孔配列をもつ Air-Grid マイクロメッシュ（M-AGM）は、医療用の X 線画像診断装置のグリッドに極めて有効である。

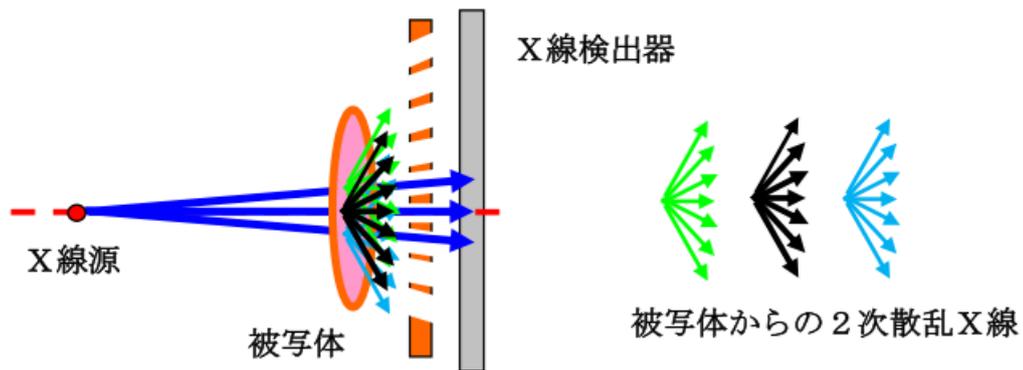


現在、健康診断に利用されている医療用の X 線画像診断装置では、照射 X 線源は、主に回転陰極型の X 線源（回転 X 線式）である。この回転 X 線式でも、ターゲット金属面から放出される X 線は、ある程度の角度分散性を示す。従って、被写体の場所での照射 X 線の均一性を得るために、通常の医療用の X 線画像診断装置では、X 線源から X 線検出器まで距離は、約 60~200 cm 離れてセットされている。この距離の拡大は、X 線発生装置に搭載されている X 線源の出力増加をもたらす。しかし、（2. 背景と目的）の項で述べたように、集光型のマイクロ細孔配列を持つ M-AGM は、照射 X 線の空気散乱および被写体の 2 次散乱 X 線の影響を減少する。この特性により、X 線源の出力は低下して、X 線画像の高画質化および被写体の被ばく線量の低下をもたらす。

## 5. 今後の課題

下図・左側は、X 線画像診断における被写体からの 2 次散乱 X 線の概念図を示す。被写体の後部に設置された X 線検出器は、X 線源から放出された透過 X 線（青色矢印）の他に、被写体からの新たに散乱される 2 次散乱 X 線（緑色、黒色、青色 etc.）を含む。しかし、被写体から放出される 3 種類の 2 次散乱 X 線は、異なる角度分散をもつ（下図・右側）。試作する M-AGM（橙色）のマイクロ集光

性スリットは、これらの2次散乱X線を抑制するためである。本実験では、曲率半径；約 200cm の Al 製湾曲レジストホルダーを使用した。しかし、この曲率半径が小さくなった場合（約 60cm 程度）には、平板状のX線フォトマスクホルダーに設置されたX線フォトマスクと湾曲フォトレジストとの距離は、かなり大きな角度依存性を示す。従って、高輝度X線の新しい露光技法の開発が望まれる。



また、(4-2. 角度分散式による露光実験)の項で述べた様に、高画質のX線画像を必要とする診断では、マイクロ細孔内にあるフォトレジスト材・PMMA 製部は除去する。しかし、この種のM-AGM 試作では、強度を考慮する製作工程が望まれる。現在、この技術開発を継続中である。

6. 参考文献 特になし

7. 論文発表・特許

8. キーワード・・・LIGA, X線回折格子

9. 研究成果公開について

② 研究成果公報の原稿提出 (提出時期：2021年8月)