

課題番号：2007075S

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

日高昌則^{1,2}、野上大史¹、大石 明広²、小林 和矢²、横尾侑典²
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.

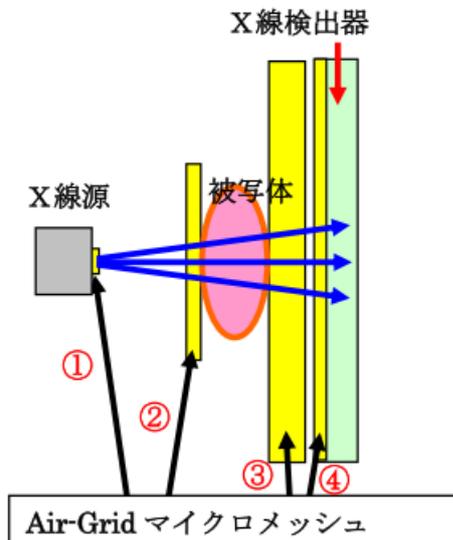
1. 概要

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線を抑制するので、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線画像の高質化が期待できる。M-AGM は、マイクロパターン配列を描画する Au 製部とフォトレジストの PMMA 製部から製作される。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。

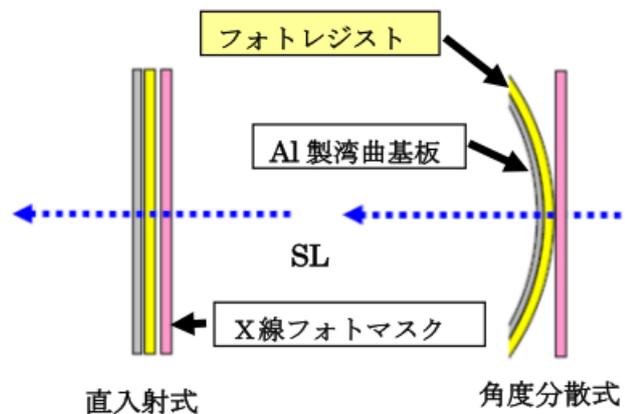
In the present investigations, the technical development of medical grid, Air-Grid micro-meshes (M-AGM), which are used at the X-ray imaging system, were carried out with the LIGA micro-machining (SL-LIGA, UV-LIGA) by using the high-bright X-rays emitted from synchrotron radiations (SL) and the high-power ultraviolet rays (UV). The M-AGM was made with the Au-electroplating parts painting the micro-patterns and the photo-resist parts. 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. At the present experiments, the exposure-conditions of the incident X-ray beams 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

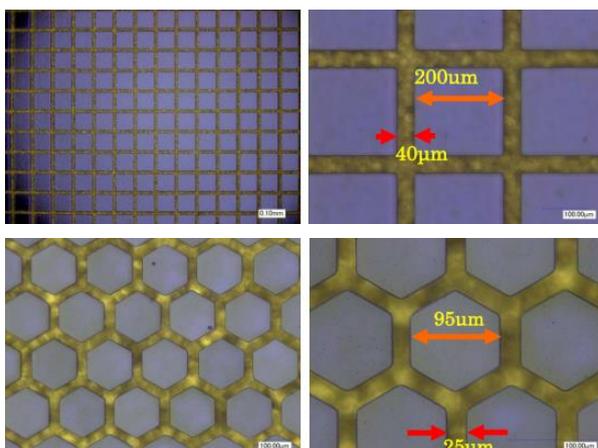
田口電機工業と九州大学大学院・理学研究院物理部門は、平成21～23年度に国の支援を受けて、LIGA 微細加工（UV-LIGA、SL-LIGA）に使用する各種の関連装置系を整備し、本格的な微細加工の技術開発研究を実施した。これまで国内外のシンクロトン光研究施設を利用して、シンクロトン光からの高輝度X線を使用した深刻X線リソグラフィによる SL-LIGA の技術開発を実施してきた。これらの各種のマイクロパーツの試作研究で、各種のマイクロメッシュ製作の技術開発も行なってきた。平成28年度から令和元年度では、日本健康倶楽部・福岡支部および九州大学医学部・保健学科の医療用画像診断装置を使用して、医療用 Air-Grid 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。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 試作研究は、これらの技術開発に基づいている。M-AGM（左図）は4種類（①～④型）があり、直入射式と角度分散式に分けられる。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。



右図は、直入射式と角度分散式の露光実験におけるフォトリソ基板ホルダーと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。上図の様に、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X線マスクホルダーの固定窓にセットされる。特に、角度分散式の実験では、この基板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。



下図の拡大マイクロスコップ撮像は、本研究で試作された2種類のM-AGMを示す。これらの撮像で、青紫色部はフォトリソ（PMMA製）で、黄色部は金めっきである。本研究では、フォトリソとして市販のドライフィルム（DFレジスト）を使用している。これらのM-AGMのマイクロパターン配列は、細孔内のDFレジストと細孔間壁の金製部から描画されている。上段は、正方形型マイクロ細孔配列のAir-Gridマイクロメッシュ（R-AGM）である。正方形角柱のサイズは約200 μm で、金製部の細孔間壁の幅は約40 μm である。細孔間壁の高さは約60 μm である。下段は、ハニカム形型マイクロ細孔配列の



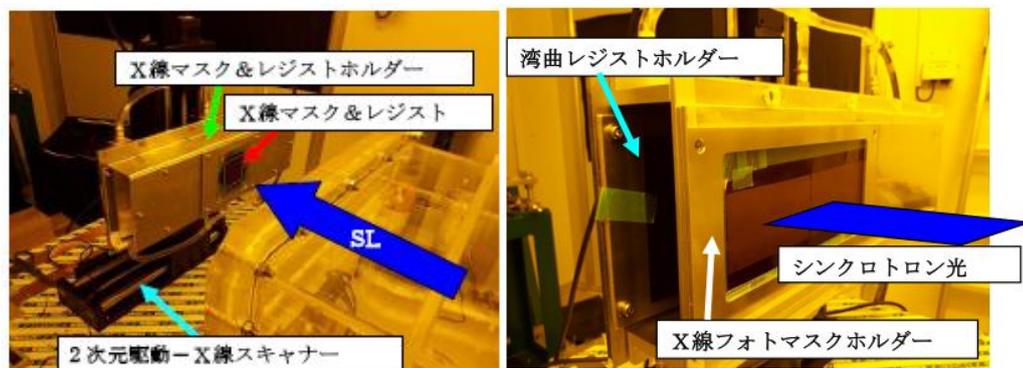
撮像で、青紫色部はフォトリソ（PMMA製）で、黄色部は金めっきである。本研究では、フォトリソとして市販のドライフィルム（DFレジスト）を使用している。これらのM-AGMのマイクロパターン配列は、細孔内のDFレジストと細孔間壁の金製部から描画されている。上段は、正方形型マイクロ細孔配列のAir-Gridマイクロメッシュ（R-AGM）である。正方形角柱のサイズは約200 μm で、金製部の細孔間壁の幅は約40 μm である。細孔間壁の高さは約60 μm である。下段は、ハニカム形型マイクロ細孔配列の

Air-Grid マイクロメッシュ (H-AGM) である。ハニカム形角柱の側面間サイズは約 $95\mu\text{m}$ で、金製部の細孔間壁の幅は約 $25\mu\text{m}$ で、細孔間壁の高さは約 $60\mu\text{m}$ である。これまでに実施した FPD 式の X 線画像診断装置で撮影された X 線画像は、M-AGM の金製部の高さ ; 約 $150\mu\text{m}$ 以上を示唆した。

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、直入射式では約 150mm 、角度分散式では約 250mm 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レジスト用の Al 製湾曲状の基板ホルダー (湾曲レジストホルダー) は、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 200cm の湾曲レジストホルダーを使用する。

下図は、本実験で使用する露光装置を示す。この写真では、直入射式&角度分散式兼用の X 線マスク & レジストホルダーが示されている。高輝度 X 線による X 線マスク、フォトレジストの温度上昇を抑えるために、これらを固定している Al 製ホルダーは、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、垂直方向のビームサイズは実験エリアで約 10mm であるので、2 次元駆動する X 線スキャナーに搭載された Al 製基板ホルダーは、露光中には上下方向に反復運動を行う。左側図には、直入射式の露光装置が示されている。直入射式では、X 線マスク & レジストホルダーの X 線入射側に設置されている Al 製平板ホルダーに、X 線マスクとフォトレジストが密着固定される。右側図には、角度分散式の露光装置が示されている。角度分散式では、X 線マスク & レジストホルダーの前窓にセットしている Al 製平板ホルダー (X 線フォトマスクホルダー) には X 線マスクのみが固定されて、背後にある Al 製湾曲レジストホルダーにはフォトレジストが固定される。この概容は、(2. 背景と目的) 項の角度分散式概念図に示されている。X 線フォトマスクは、この写真では、曲率半径 ; 200cm の湾曲レジストホルダーが設置されている。



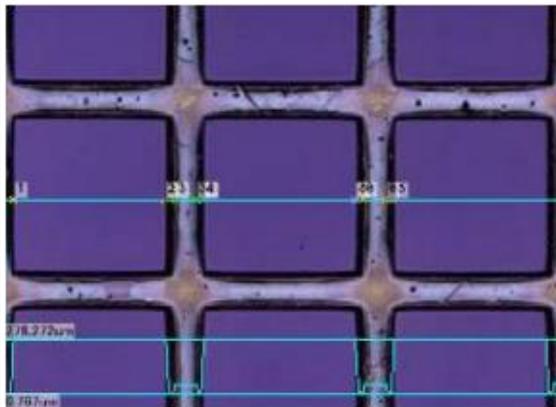
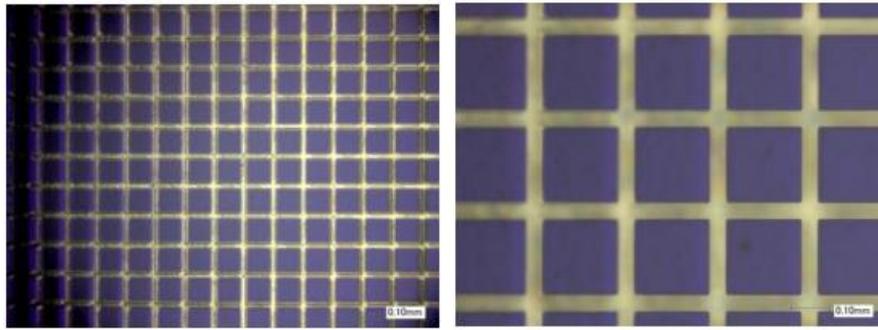
実験終了直後に、照射済フォトレジストは佐賀 L S のケミカルラボ (ケミラボ) において再熱処理を行う。露光・熱処理済フォトレジストは、田口電機工業の LIGA 微細加工実験室に運び、LIGA 処理工程 (現像、電気めっき、剥離等) を行う。これらの一連の作業を経て試作された M-AGM は、各種計測装置 (マイクロスコップ、レーザー顕微鏡、走査型電子顕微鏡、X 線分析装置 etc.) により解析・評価を行う。

4. 実験結果と考察

本研究の主目的は、X 線画像診断装置の X 線源から放出される照射 X 線の角度分散、照射 X 線の空気散乱および被写体からの 2 次散乱 X 線が診断画像に与える影響を調べることである。この研究のために、実験では LIGA 技法による X 線画像診断用の医療用 X 線グリッド・Air-Grid マイクロメッシュ (M-AGM) 製作の技術開発を行なった。本実験では、先ず、UV-LIGA により、正方形のマイクロパターン配列を持つ X 線フォトマスクを製作した。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、高輝度 X 線を利用してフォトレジストに転写された。本実験では、フォトレジストは、半導体部品の製作に利用されているドライフィルム (DF レジスト) を使用した。上述した 4 種類の 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。

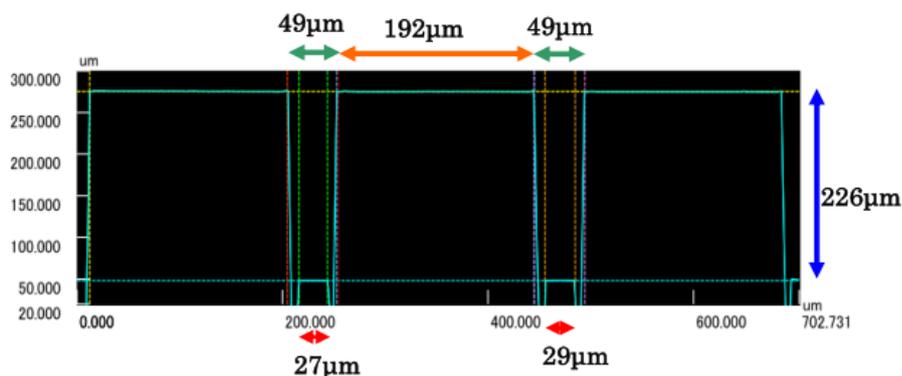
4-1. 直入射式による露光実験

(2. 背景と目的) 項の FPD 式 X 線画像診断装置で得られた情報を基に、使用したフォトリソトは、厚さ ; 約 $112\mu\text{m}$ の DF レジストを 2 枚貼り付けた積層である。下図は、直入射式の露光実験で得られた現像済 DF レジストの顕微鏡撮像を示す。正方形型マイクロパターン配列は、高精度に作成されている。露光の総電流量は 10mAh 、現像時間は 8 分であった。

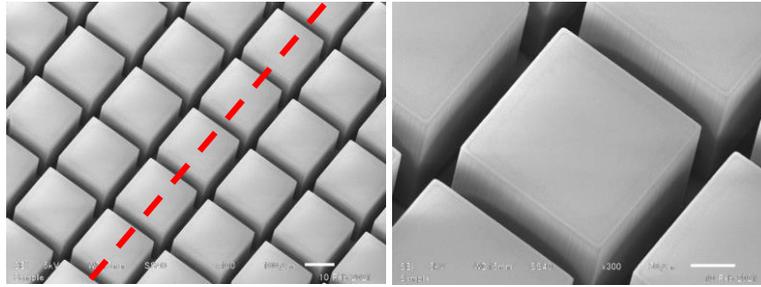


左図には、上図の露光・現像済 DF レジストのレーザー顕微鏡による顕微鏡撮像 (レーザー・顕微鏡撮像) を示す。青色部は PMMA 製の正方形角柱で、この中央部を横断する青線はレーザー光のスキャン方向を表示している。現像処理は細孔配列の交差個所では十分であるが、交差個所から離れた細孔底部の両側壁では、残留 PMMA が観測される。一方、左図の下側に表示されている青線は、中央部のレーザー光スキャンによる細孔内での深さ方向・断面を示す。従って、残留 PMMA が細孔底部の両側壁近傍で確認される。

下図には、こ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。PMMA 製正方形角柱の高さは約 $226\mu\text{m}$ 、角柱表面の幅は約 $192\mu\text{m}$ である。隣接角柱間の細孔表面幅は約 $49\mu\text{m}$ 、底部は約 $28\mu\text{m}$ である。しかし、上図のレーザー・顕微鏡撮像が示すように、レーザー顕微鏡から入射されたレーザー光は、残留 PMMA で乱反射されて、この顕微鏡に再入射していない。レーザー顕微鏡では、入射光と反射光との光路差で被写体の高さを計測している。しかし、R-AGM を作製するための Au めっきは可能である。



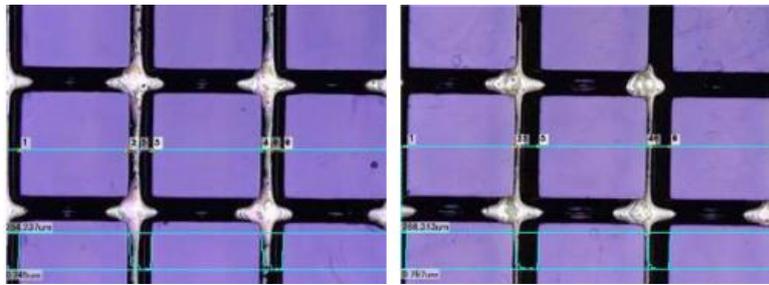
下図は、上記の直入射式の露光実験で得られた現像済 DF レジストの走査型電子顕微鏡で得られた SEM 撮像を示す。これらの撮像は、左側では 100 倍、右側では 300 倍で撮られている。また、この DF レジストは、SEM の試料ステージを 25 度傾斜して撮られている。左側で表示されている赤点線は、X 線スキャナー反復運動の鉛直方向を示す。これらの SEM 撮像から、正方形型マイクロパターン配列が高精度に形成されていることを確認する。



4-2. 角度分散式による露光実験

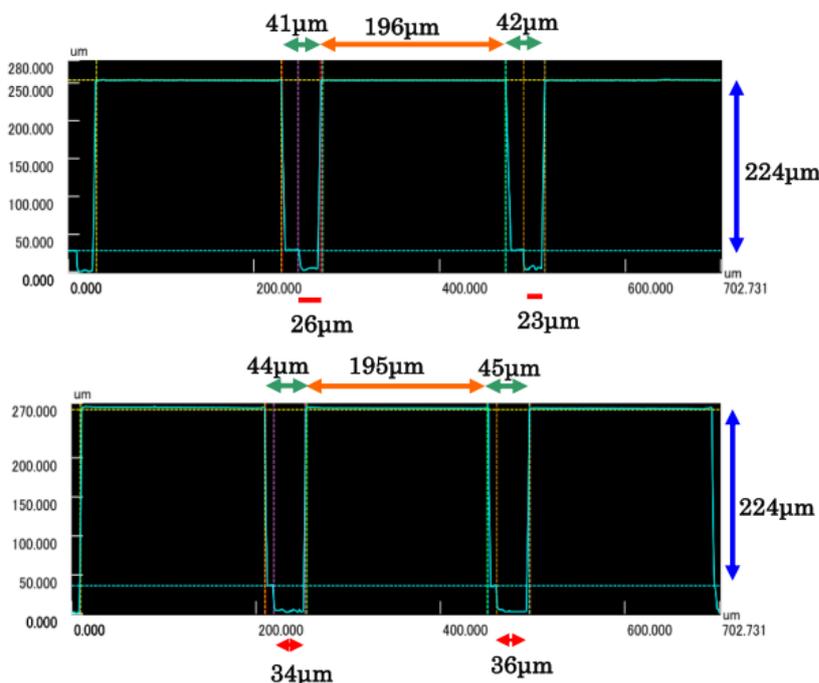
本研究では、角度分散式の露光実験も行った。角度分散式での露光用湾曲フォトレジスト・DFレジストは、曲率半径 200cm で作製された Al 製薄板表面に固定された。(3. 実験内容) 項で述べた様に、正方形型マイクロパターン配列が描画された X 線マスクは、入射 X 線側にセットされた平板上の X 線マスクホルダーに設置された。

下図は、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・マイクロスコープ撮像を示す。正方形型マイクロパターン配列は、高精度に作成されている。露光の総電流量は 8mAh、現像時間は 12 分であった。DF レジストにおいて、左側が中角部、右側が高角部における撮像を示す。この 2 次元撮像の青色部は PMMA 製の正方形角柱で、こ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。



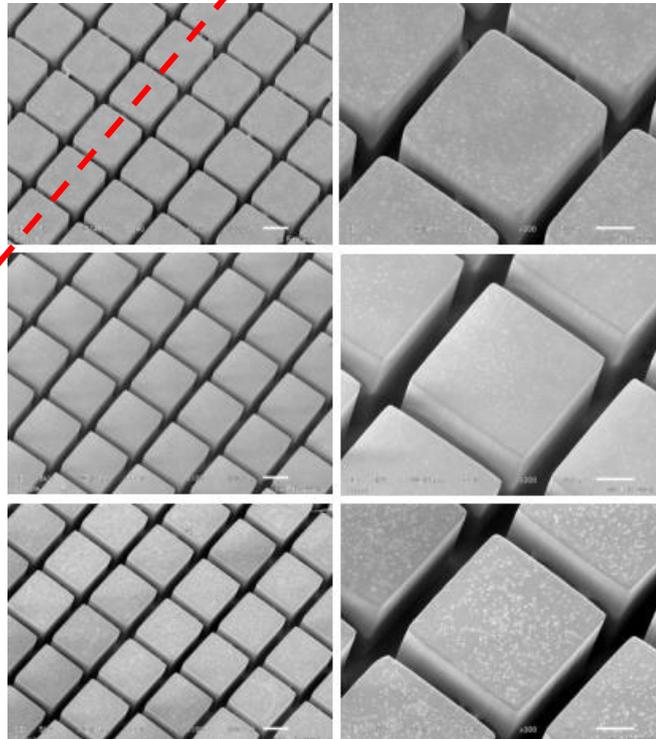
レーザー・マイクロスコープ撮像の鉛直方向に走る細い白線が示すように、角度分散式では、隣接角柱間の細孔底部は、鉛直方向に沿うラインで観測される。また、これらの鉛直ラインが水平方向の細孔と交差する領域では、局部的に白色部（底部）が観測される。

また、角度分散式の実験では、この基板ホルダーの湾曲面は水平面内にあり、X 線フォトマスクホルダーと湾曲レジストホルダーは X 線スキャナー上で Z 軸方向に反復駆動を行う。なお、本実験で使用する湾曲面は、鉛直方向に円柱軸をもつ。従って、



左図には、上段が中角部、下段が高角部におけるレーザー解析が示されている。両領域とも、PMMA 製正方角柱の高さは約 224μm、角柱表面幅は約 195μm である。しかし、隣接角柱間の細孔幅は、表面と底部では大きく異なる。特に、細孔底部の右側では、底部から反射されたレーザー光がレーザー顕微鏡に戻っていない。この事象は、細孔の右側面が傾斜していることを示唆する。

下図は、上記の角度分散式の露光実験で得られた現像済 DF レジストの走査型電子顕微鏡で得られた SEM 撮像を示す。上段図から、湾曲レジストホルダー上での頂点部、中角部、高角部での撮像で、左側では 100 倍、右側では 300 倍で撮られている。また、この DF レジストは、SEM の試料ステージを約 25 度傾斜して撮られている。上段図の左側で表示されている赤点線は、X 線スキャナー反復運動の鉛直方向を示す。ただし、それぞれの SEM 撮像では、傾斜角度は若干異なっている。これらの SEM 撮像から、正方形型マイクロパターン配列は高精度に形成されている。



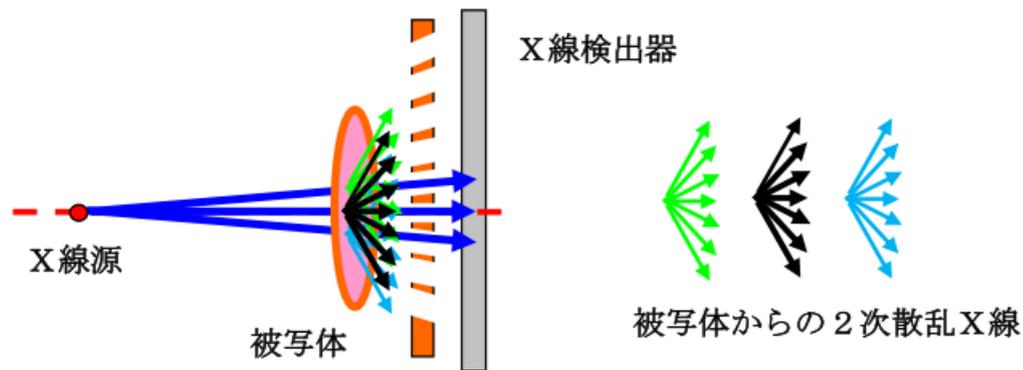
本実験で使用した湾曲レジストホルダーの曲率半径は約 200 cm である。従って、上記の現像済 DF レジストの湾曲レジストホルダー上での照射角度は、頂点で 0.0 度、中角部で約 2.0 度、高角部で約 4.3 度である。また、この DF レジスト上では、頂点からの距離 L は、中角部では約 7 cm、高角部では約 15 cm である。従って、本実験手法により、約 (30 x 30 cm) サイズの医療用グリッド・Air-Grid マイクロメッシュ (M-AGM) 製作は可能である。照射角度が約 5.7 度であれば、約 (40 x 40 cm) サイズの M-AGM が作製できる。現在、直入射式と角度分散式の露光実験で得られた露光・現像済 DF レジストに対して、LIGA 技法の Au めっき工程の技術開発を行なっている。本実験では、露光用フォトレジストとして、厚さ；約 112 μ m の DF レジストを 2 枚貼り付けた積層ドライフィルム（厚さ；約 224 μ m）が使用された。このような積層 DF レジストの利用は、高輝度 X 線の露光時間および現像時間を大きく減少させた。また、本実験の結果は、金製部の厚さ；300 μ m 以上の M-AGM 作製の可能性も与えた。

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、回転陰極型の X 線源（回転 X 線式）が主である。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、M-AGM は照射 X 線の空気による散乱および被写体からの 2 次散乱 X 線を減少するので、X 線源の出力は低下でき、X 線画像は高画質化して、照射被写体の被ばく線量は抑制できる。

5. 今後の課題

本研究の主目的は、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。BL09 ビームラインでの実験結果から、直入射式では約

100mm、角度分散式では約 250mm の水平方向ビームサイズは有効であることが確認できた。しかし、広面積の医療用グリッド・Air-Grid マイクロメッシュ製作には、佐賀 L S の水平方向 ; 300~400mm のビーム利用が必要である。また、垂直方向にも、フォトレジストの転写領域を拡大したい。従って、今後の研究課題として、湾曲フォトレジストの露光実験を行う角度分散式では、X線スキャナーの改造および2次元駆動方式を検討する。



上図左側は、X線画像診断における被写体からの散乱X線の概容を示す。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線に加え、被写体からの新たに散乱されるX線（2次散乱X線）を含む。右側には、被写体から放出される3種類（緑色、黒色、青色）の2次散乱X線が描かれている。これらの2次散乱X線は、X線検出器でのX線光子計測値を増加して、画像の低質化を与える。従って、市販のX線画像診断装置では、X線検出器の直前にグリッドが設置されている。通常、このグリッドは、鉛薄板 ; Pb とアルミ薄板 ; Al の交互積層で形成されている。この交互積層でのPbおよびAlの厚さは、それぞれ約3mm、約2mm程度である。(Pb - Al) 薄板の静止グリッドでは、それぞれの薄板幅のサイズに依存するX線検出器の未計測領域が生じる。この状況を避けるために、微動振動グリッドでは、この未計測領域のX線光子数を平滑化する。いずれの場合でも、X線検出器で計測される各ピクセル値は、最終的にはソフト的に解析処理される。しかし、正方形型マイクロ細孔配列のAir-Grid マイクロメッシュ(R-AGM)では、正方形角柱のサイズは約200 μm で、金製部の細孔間壁の幅は約40 μm である。従って、R-AGMでは、未計測領域が極めて少ない。

医療用グリッドでのPb薄板の利用は、Pbが大きなX線吸収率を持つことによる。しかし、Pbは延性に乏しく、細線にすることはできない。また、Pbは鉛中毒を誘起する。本研究では、Pb X線吸収率と同レベルのX線吸収率をもつ金・Auを利用するマイクログリッドの試作研究を実施している。従って、通常使用されている医療用グリッドのPb部はAuで、Alはフォトレジスト(PMMA製)部で置換する。医療診断に使用されているX線源は、FPD型X線診断装置ではレニウムタングステン(W)、IPD型X線診断装置・マンモグラフィーではモリブデン(Mo)が使用されている。Mo-K α 領域でのX線吸収断面積係数は、Pb ; 79840、Au ; 68030、Al ; 2249で、フォトレジスト素材 ; PMMAによるX線吸収はほとんど無視できる。ただし、用途により、M-AGMのフォトレジスト部は除去できる。

本研究で試作する角度分散式の③型M-AGMはこの2次散乱X線を抑制して、②型M-AGMはX線源から被写体の空間で生じる照射X線の空気散乱の影響を低下させる。(2. 背景と目的)の項で述べた様に、今後の技術開発研究では、FPD型とIPD型X線検出器のX線光子を計測するピクセル素子配列に対応する④型M-AGMの試作も検討したい。

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2月)