

LIGA プロセス —マイクロデバイスへの応用と今後の展望—

内海裕一 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-1-2

要旨 電氣的・光学的・機械的・化学的諸機能を一定の領域に集積したマイクロ構造体の実現は、小型産業機器、民生機器の主要先端部品を構成するマイクロマシン・システムの発展に多くのメリットをもたらすものと期待される。マイクロマシン・システムは、集積化半導体回路の作製技術から派生した、MEMS（マイクロ・エレクトロ・メカニカル・システム）技術を用いて作製されているが、近年、より高い精度と高いアスペクト比を有する3次元構造体の実現が求められている。これを実現する技術として、放射X線リソグラフィ、電鍍、及び成形過程から成るLIGAプロセスが注目されている。本稿では、LIGAプロセスの実際と、そのデバイス適用を紹介し、合わせて技術的課題を抽出する。さらに次世代のLIGAプロセスを予感させるいくつかの新たな試みについて紹介する。

1. LIGA プロセス

「高度情報通信」、「環境・エネルギー」、「医療・バイオ」等の各種先端産業システムにおいて、小型集積化した機能デバイスである「マイクロシステム」の応用が急速に進んでいる。これらのマイクロシステムはPCや携帯電話のような情報機器、家電製品、自動車、電池および、医療システムといった高機能機器に搭載され、それらの機能の鍵を握る重要なパーツを構成している。マイクロシステムの応用は多岐にわたっているが、センサー、アクチュエーター、RFスイッチ、カテーテルなどのマイクロ電子機械部品、光スイッチ、光スキャナ、光導波路などのマイクロ光学素子、インクジェットノズル、集積化分析チップ、燃料電池などのマイクロ流体素子に大別される。これらの要素部品は電子回路による信号処理に加え、光学的、機械的および化学的な機能を同時に実現するために3次元構造をとる場合が多い。こうしたマイクロシステムの作製に用いられているのが、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）と呼ばれる微細加工技術である。従来はシリコン半導体技術を基本に、研磨、放電加工等の機械加工や積層、封止、接合等のアセンブリ技術を複合することによって形作られてきた。しかし近年、より微細で高アスペクト比（高さ/幅）の構造体を形成することが必要とされている。これは構造体の寸法が微細化すればするほど比表面積（面積/体積）が大きくなり、静電力や表面張力、表面密着力、表面化学反応等のマイクロ構造体の機能発現に有利な自然現象の効果が顕著となり、部品としての性能が向上するためである。また、マイクロシステムの医療やバイオ応用を展開する上で、生体組織、細胞、DNAの形態に適合した3次元構造は、必要とする機能実現と密接に

関わっており、任意形状によるフレキシブルな駆動や立体的情報のセンシングが技術的なブレイクスルーをもたらすことが期待される。

このような高アスペクト比の構造体を形成する技術として最も有力と期待されているのが、放射光を用いたLIGA（Lithographie（リソグラフィ）、Galvanoformung（電鍍）、Abformung（成形））プロセスである¹⁾。このプロセスは、Fig. 1に示すようにDeep（深堀りの意味）X線リソグラフィによる高アスペクト比の微細プラスチック構造体によるマスターを作製し、これを基に電鍍による金属金型の作製を行い、この金型をそのまま構造体部品として用いる。あるいはこれを鋳型としてプラスチック成型を行うという微細立体構造体の量産技術である。成型技術を用いるため、最終的に得られる構造体の材質は、金属以外に樹脂、ガラス、セラミックと自由度が高い。技術のルーツはドイツのカーlsruhe原子核研究所（KzK）にあり、その発展

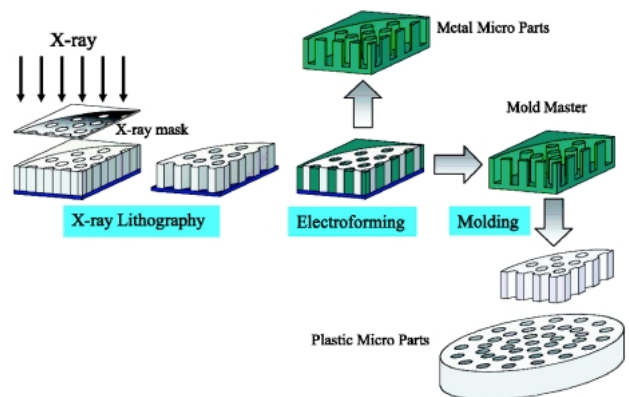


Fig. 1 Elemental steps of LIGA process.

の基礎となる技術の多くが今もなお同研究所（現在はカールスルーエ研究所（KfK）と改称）から誕生している。もともと精密機械加工技術の限界寸法を打破するために開発された技術であるため、今でも半導体加工（サブミクロン）と機械加工（数十 μm 以上）による加工寸法の狭間を埋める技術（数 μm ～数 mm ）としての用途が多く、成形、電鍍プロセスとの組み合わせで成り立っていることからその技術的・応用的な発想は機械加工に近い。一方で MEMS 技術と併用して用いられる場合が多く、その立体化の鍵を握る重要な技術となっている。本稿ではまずマイクロデバイスの開発を例に挙げて LIGA プロセスの優位性を述べる。さらにこのプロセスの個別工程に分け入ってその技術的課題抽出を行った後に、これらのブレイクスルーとして期待される最近の技術的試みのいくつかを紹介する。最後に、放射光を用いた産業応用を念頭に置いた将来展望について述べる。

2. LIGA プロセスによるマイクロデバイスの開発例

従来の MEMS 技術は、デバイスを成す主要な構造体の形状創成に半導体技術を主に用いたため、作製されるデバイスの厚みは数 μm 以下の二次元構造的な場合が多く、静電力を応用した各種アクチュエーターやセンサなどを例にとるとデバイス面積に対する出力効率や感度が低いことが難点であった。LIGA プロセスを用いた 3 次元構造によるアクチュエーターやセンサは従来の MEMS 技術で作製したものよりも高い出力と感度が期待できるため、1980 年代後半から MEMS の分野で注目される技術となった。LIGA プロセスは、もともとウラン濃縮のための分離用微小ノズルを量産するためにドイツのカールスルーエ原子核研究所（KfK）の E. W. Becker, W. Ehrfeld らが開発したものである^{1,2)}。分離ノズルは 2 次元構造の大きさに逆比例してガスの供給圧が上昇できるが、分離の収率を上げるためにはアスペクト比の大きい数ミクロンレベルの微小体構造が作製出来る技術が必要となった。そのために、従来の X 線リソグラフィより一桁大きいエネルギーの放射光を用いた微細な垂直加工技術と精密成形によるプロトタイプング技術が開発された。実証プラントの建設までは至らなかったが、その副産物としての作製技術は多くの新たなマイクロ部品の開発が加速する原動力となった。LIGA プロセス開発の当初は単にアスペクト比の高い微細 2 次元構造体を作製するだけであったが、その後 3 次元構造体を実現するためのいくつかの方法が開発されたため、その応用範囲は各種センサー、アクチュエーター、情報通信用光学部品などを中心に、医用、バイオ応用デバイスまで大きく広がっている。Table にこれまでの代表的な応用例を示す。以下にいくつかを取り上げて説明する。LIGA プロセスの有効性を示す典型的な例として良く知られているもの

Table 1 Examples for the experimental manufacture of micro devices using LIGA process

Category	Concrete Devices
Sensor	accelerated velocity sensor, position sensor, distance sensor, chemical analysis sensor, nuclear radiation sensor, supersonic transducer
Actuator	micro turbine, electrostatic linear actuator, electromagnetic linear actuator, pneumatic micro actuator, micro gear
Motor	electrostatic linear step motor, electromagnetic motor
Electronics	micro electrical connector, micro electrical switch, solenoid coil, micro capacitor, micro electrodes
Optics	optical switch, optical fiber connector, lighting guide panel, x-ray focusing lens, spectrometer, diffractometer
Fluidics	printer ink jet nozzle, isotope separation nozzle, micro membrane pump, bi-stability flow switch, separation filter, micro mixer, micro reactor, micro thermal exchanger

に、犠牲層プロセスを併用した容量型加速度センサーが挙げられる^{3,4)}。このセンサーは従来の MEMS 技術では基板に垂直方向の加速度しか測定できなかったのに対し、基板に水平な方向が測定できる。高アスペクト比構造のために可動電極、固定電極間の静電容量を格段に大きくすることができ、0.01 pF レベルの静電容量変化を精度良く測定する事が可能となった。特にこの犠牲層プロセスは 3 次元加工に展開する技術として LIGA プロセスの応用を大きく広げ、マイクロアクチュエーターとして静電型ステップモーター⁵⁾、や電磁型リニアアクチュエーター⁶⁾、空気駆動型アクチュエーター⁷⁾などが試作された。Fig. 2, 3 にリニア駆動、回転駆動のモーターの例を示す。情報通信用部品では光スイッチ^{8,9)}、コネクタアレイ^{10,11)}、各種光導波路¹²⁾、マイクロスペクトロメーター^{13,14)}、レンズ¹⁵⁾、ビームスプリッター、可変フィルタ、フォトニック結晶¹⁶⁾、測長器¹⁷⁾と開発が多岐に渡っている。これは、光通信市場が他の分野と比較して特に大きいために、ビジネスのターゲットとしてばかりでなく、これらの光学部品が光通信技術そのものに影響を与えたためである。光部品の例として Fig. 4 (a), (b) に、三菱電機のグループが作製したマイクロ測長器の例¹⁷⁾を挙げる。この光学システムはレーザーダイオード、モニターダイオード及び光検出器をとマイクロ光学基板を集約した構造となっており、LIGA プロセスを用いた高機能システムが実現されている。15 mm × 15 mm というコンパクトサイズに納まっており、数十 mm レベルの距離に対し $\pm 2\%$ 以内という高い測定誤差を得ている。

最近の新たな応用の展開としては、マイクロフルイディクス（マイクロ流体素子）に対する LIGA プロセスへの応用が始まっている。例えば製薬の高速スクリーニング、

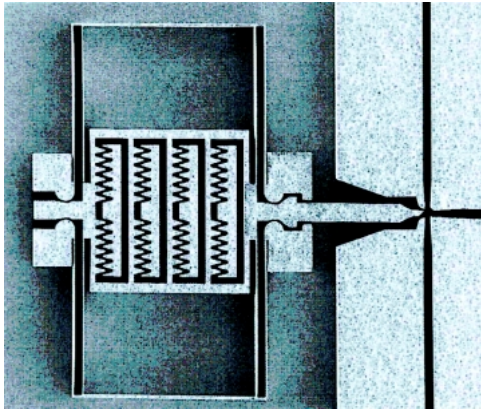


Fig. 2 Electrostatically driven linear motor with submicrometer nickel structures. This figure cited from catalog of KfK.

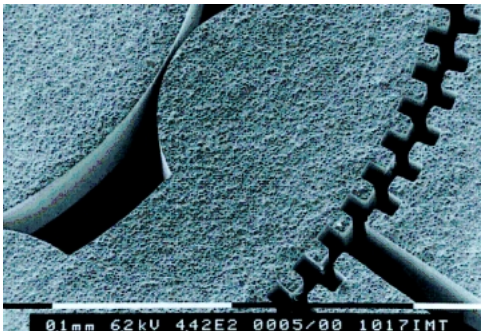


Fig. 3 Electrostatically driven rotating micromotor made of nickel. This figure cited from catalog of KfK.

臨床検査，ゲノム解析，環境分析などに用いられる電気泳動や液体クロマトグラフィーなどのマイクロチップや流体システムの要素部品としてのバルブ，ポンプ，リアクター，コネクタ等が挙げられる¹⁸⁻²⁴⁾。ディープX線リソグラフィの流路応用については，感光性エポキシ樹脂の構造体をモールドとして作製したPDMS（ポリジメチルシロキサン）チップにおいて，より試薬の電気泳動分離過程で分解能が低下しない特性が報告されている¹⁸⁾。これらは1チップにシステム的な機能集約が要求されるだけでなく，試薬毎の使い捨てが前提となるので，コストを大きく下げることが必須となるばかりでなく，分析チップの場合は試料分抽口ロボットのハンドリング規格サイズ（例えば86 mm×128 mm）に多数の電気泳動チップを集積することが必要であり，ディープX線リソグラフィの加工面積の飛躍的な向上が求められる²⁵⁾。マイクロリアクターは，LIGAプロセスの特長である高アスペクト比構造を利用することによって，反応の制御性，効率を大きく高めることが可能であるため，早くからその応用がなされてきた。この動きはMEMS分野にも波及し，現在はマイクロTAS（Total Analysis Systems）と呼ばれるマイクロ流体素子による新たな分析化学，生命科学への応用が飛躍的に高まっている。高アスペクト比構造を応用したミキサ

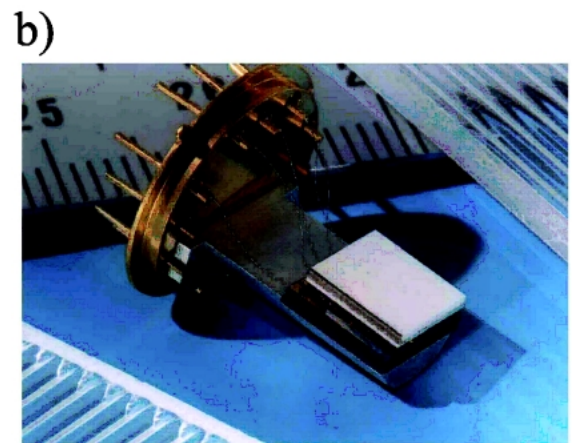
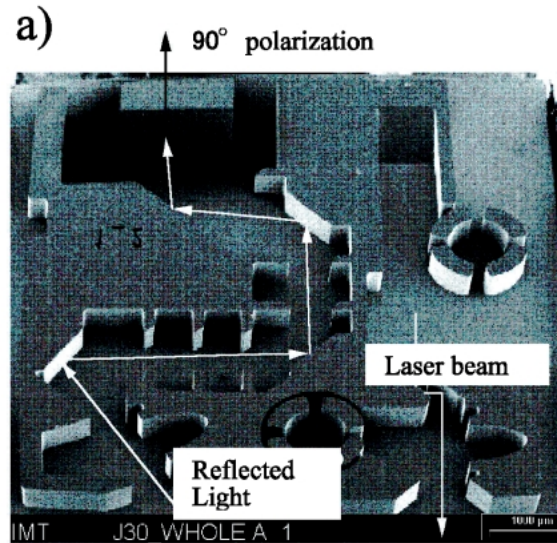


Fig. 4 SEM image of the micro-optical system.
a) Free space structure made by LIGA
b) Sensor chip mounted on a TO-8 CAN heater.

ー²¹⁾，多機能流体フィルターを用いた垂直単位操作型のマイクロリアクター^{22,23)}などが提案されている。それぞれをFig. 5(a), (b), Fig. 6(a), (b)に示す。Fig. 5は，LIGAプロセスを用いてマイクロ流体の有効なミキサー（Fig. 5(a)）を実現した最初の例であり，リアクターとしてパッケージング（Fig. 5(b)）したものが実用化に成功している。Fig. 6においては，流体フィルターの表面物性，穴径を最適化することにより，流体挙動を制御するためのバルブ機能と層流流路機能の二つの機能が実現され，これを用いた新たな垂直化学操作型のリアクターが提案された^{22,23)}。

次にMEMS技術や精密加工技術とLIGAプロセスの複合によって試作が行われた例として，Fig. 7にマイクロポンプの例を示す²⁰⁾。このポンプは可動ダイヤフラム部分がMEMS技術により作製され²⁴⁾，流路を形成するハウジングがLIGAプロセス即ちディープX線リソグラフィと成形工程によって作製され，それぞれが接着剤によって接合されている。これにより，大きな流量と圧力の制御範囲

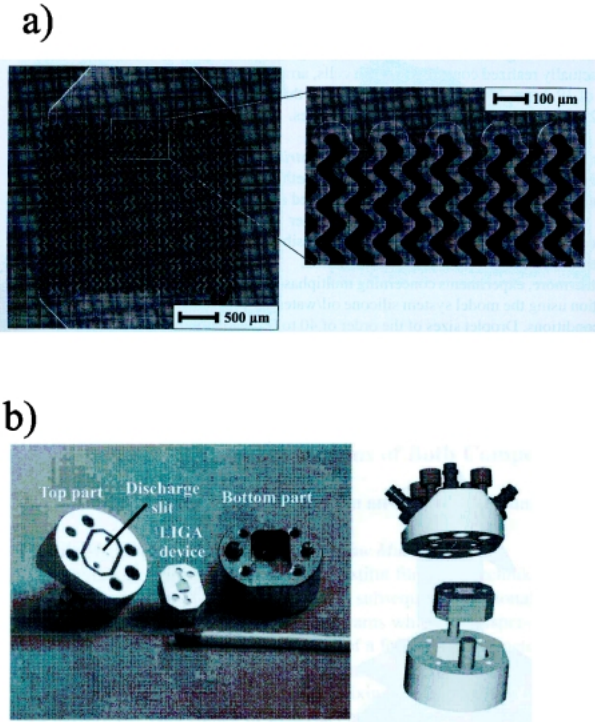


Fig. 5 Photographs of Micromixer²¹⁾.
 a) Mixing element fabricated LIGA
 b) Overhead view of micromixer

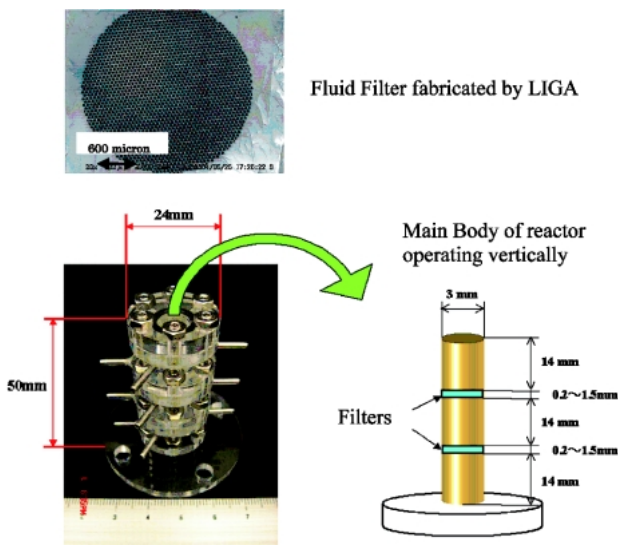


Fig. 6 Micro reactor for vertical chemical operation using fluid filters with micro bores.

(それぞれ150–280 $\mu\text{l}/\text{min}$, 40–140 hPa) を得ており、しかも7000時間以上の長時間運転によっても吐出圧力が一定という優れた特性を有している。

この他にも LIGA プロセスの応用は、内燃機関²⁶⁾ 燃料電池²⁷⁾ など広範に展開されており、枚挙にいとまがない。

以上のように LIGA プロセスにおいては MEMS 技術や精密機械加工を巧みに取り込みながら幅広く実用化が図ら

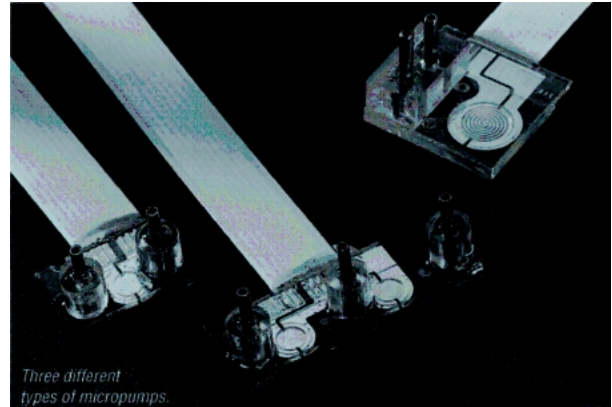


Fig. 7 Micropumps fabricated by LIGA and MEMS process. This figure cited from catalog of KfK.

れてきたが、半導体プロセスや精密機械加工技術と比較すると製品化例が少ない現状にある。それにはプロセスの完成度、技術の認知度、開発拠点の分布、作製コストに対する誤解など様々な要因が考えられる。しかし本稿では主に LIGA プロセスの技術的側面に絞って議論し、今後の展望を考えたい。

3. LIGA プロセスの個別工程と課題

LIGA プロセスは、簡単に言い直すと放射光からもたらされる X 線の高い輝度、平行性、及び透過性を利用して高アスペクト比の精密微細構造を形成し、電铸で金型を作製し、成形技術によってマイクロデバイスのパーツを直接製造、もしくは量産する技術である。ここでは LIGA プロセスを構成する一連の個別工程（ディープ X 線リソグラフィ、電铸による金属構造体形成、マイクロ成形）について触れ、将来の実用上のさらなる発展に向けた技術的課題を抽出する。

3.1 ディープ X 線リソグラフィ

ディープ X 線リソグラフィは、LIGA プロセスを用いて作製しようとする所望の微細構造体の形状や寸法、製作精度を決定してしまう最も重要な工程と言える。Fig. 1 に示したように、X 線マスクを通して X 線を基板上に形成した感光性樹脂（レジスト）層に照射する。マスクの X 線吸収体のない部分のみ感光したレジストの分子鎖が切断され、その後の現像工程によって感光した部分のみが選択的に溶解（ポジレジスト）もしくは残存（ネガレジスト）してレジストの微細構造体が形成されるものである。放射光光源の特性及びレジストの加工特性が工程の要素技術を決める最も重要な項目であり、これに従って X 線マスクの構造や材料、得られる微細構造体の寸法、解像度やアスペクト比が決まる。具体的には放射光光源、ビームライン、X 線マスク、露光装置、レジスト、パターン位置決めな

どの個別の専門技術の集約によって実現され、その技術的裾野は広い。光源、ビームライン技術については、ビーム物理学やX線光学、超高真空工学、放射線安全工学などの特殊な分野に属するため、その具体的内容は他の著書を参照されたい^{28,29)}。さて、以上のディープX線リソグラフィ工程で、主要となるX線マスク作製とレジスト工程について少し詳しく述べる。X線マスクは、吸収体と透過体(メンブレン膜)で構成される。吸収材料としては現在Au, Ta, W等が用いられているが、Auは電気メッキによって内部応力の低い膜が作製され、吸収特性やX線マスク作製工程における薬品耐性も高いことから最も一般的に用いられている材料である。Ta, Wは、本来は半導体プロセスにおけるX線リソグラフィで用いられて来た材料であり、電子ビーム描画とリアクティブエッチング(RIE)によってより微細なパタン形成され、寸法精度も10 nmと高いものが得られる。前者は簡便で低コストであるが、数百nm以下の構造体を形成する場合は後者を用いるのが一般的である。但し現状ではコストは格段に高くなり、サブミクロンレベルでのLIGAプロセスの実用化の障害となっている。メンブレン膜材料には、Si₃N₄, SiC, Be, ポリイミド、感光性エポキシ樹脂などが用いられている。ポリイミドなどに代表される高分子材料はX線の照射耐性に劣るが、作製工程が簡便でコストが低く、比較的大面積のものが得られることから、LIGAプロセスでは従来一般的に用いられて来た。BeはX線透過率も高く、機械的強度も高いが、マスクと基板レジストとのアライメントに用いる可視光を透過しない事が難点である。従来、実用部品の製作では主にSi₃N₄, SiCメンブレンが用いられて来たが、最近では寸法レベルが数十μm以上の製品では高分子のメンブレンを用いる場合も出てきている。

次に重要なレジスト技術について述べる。レジストは、LIGAプロセスにおけるオリジナルな構造体そのものとなるため、材料開発、露光技術、現像工程、リンス工程まで多くの条件が要求される。特に材料特性に対する要求項目は多い。レジスト材及びレジスト層形成工程で要求される特性には、高解像度、高感度であることや、X線照射によって変性しないことは勿論のこと、平坦膜が高い膜厚精度(1 μm以下)で均一に形成可能なこと、下地基板と高い密着性を有すること、現像工程で膨潤、クラック、基板からの剥離を起こさないこと等が求められる。このようにレジスト材料に求められる要求項目は多く、その開発は重要である。PMMA以外に本格的な取り組みが充分行われて来なかった。現在でも、PMMAは主要なレジストの一つである。

以上ディープX線リソグラフィの個別工程について概略的に述べた。ディープX線リソグラフィの主目的は、現在でも、なるべく高いアスペクト比の微細構造体を精度良く得ることにある。このために、半導体プロセスで提唱されていたX線リソグラフィのエネルギー領域(1~2

KeV)より高いエネルギー領域(3 KeV以上)の放射光を用いることにより、感光性樹脂へのX線の侵入深さを深くして高アスペクト比の微細構造体を得ている。近年では露光に用いるX線のエネルギーは一層高エネルギー化しており、20 KeV程度の高いエネルギーの放射光を利用して、3 mm程度の厚さの高アスペクト比構造体を実現している³⁰⁻³²⁾。一方、利用X線エネルギーの増大によって露光に用いるX線マスクの吸収体の厚さも数十ミクロンと増大している。このため実現出来る線幅の下限をサブミクロンレベル以下にすることが困難となり、微細化の限界寸法が高くなるというデメリットも生じて来ている。また、アスペクト比の高い構造体は作製できるが、露光の基本手法は従来のX線リソグラフィと同じであるのに加え、用いる放射光のエネルギー領域が高いため、基本的に形成できるマイクロ構造体は2次元面内に展開する構造であり、3次元形状の作製が困難であるという状況がある。さらに一括可能な露光面積はX線マスクの構造と作製工程の制限により4インチ程度に留まっている。微細化の限界はこれまで報告された例から0.2 μm程度^{33,34)}である。このように高エネルギーを用いたリソグラフィでは、吸収体の厚さは数十ミクロン以上必要とされ、電子ビームリソグラフィやUVリソグラフィで作製可能な吸収体のアスペクト比の制限要因から、線幅の下限が決まってしまうことが問題となる。また、レジスト工程には、塗布、露光、現像・リンス、剥離工程が含まれるが、今後作製する構造体のサイズが数μm~サブミクロンと微細化するにつれプロセス面積の増大も要求されつつあり、対する要求も厳しくなってくるものと考えられる。特に厚膜レジスト材の形成では膜厚の制御性と均一性、および電鍍後の剥離が問題になっており、従来とは異なる方式の開発も必要になると予想される。

3.2 電鍍によるマイクロ金属構造体(金型)の形成

LIGAプロセスにおける電鍍は、厚さが数百μm~数mm、最終寸法は一般的に数μm程度と、微細かつ高アスペクト比の構造体を作製する点で特徴がある。作製されるマイクロ金属構造体は1)次なる成形工程で用いる金型、2)金属構造部品としての最終製品の二つの目的に使用されるが、ここでは特に1)の観点から電鍍工程について述べる。前述したようにLIGAプロセスの概念は、金型を用いた成形までの量産工程にあるが、半導体プロセスや、他のMEMS技術プロセスと比較すると、実用まで至っている例は多くはない。この要因はいくつか考えられるが、特にディープX線リソグラフィ以降のマイクロ金属構造体(金型)の作製とこれを用いた成型プロセスが十分に確立、普及していないためと考えられる。従って成形に利用可能な高耐性マイクロ金型の実現はプロセスの一貫化、量産化を進める上で鍵となるものである。

成形に用いる金属(主にニッケル)金型には3 mm程度



Fig. 8 Outer appearance of the electro forming apparatus for 6 inch substrate (manufactured Access Engineering Co., JAPAN).

の厚さに及ぶマイクロ電鍍(メッキ)技術が必要であるが、そのためには電鍍膜の内部応力を殆どゼロに近い状態で堆積を最後まで継続する必要がある。内部応力存在下では析出と共に応力が蓄積され金型の中心から周辺に沿って大きな歪みが生ずる。この歪みは膜厚が増えるにつれて加速度的に増大し構造体の自己歪みとなる。電鍍は電鍍浴の電流密度の高い部分から優先的に進むため、電流密度にばらつきがあると膜の厚さに顕著な変化が生じ、これが内部応力の原因となる。このように金型の製作精度を上げるのは材料開発も含め、多くの技術的蓄積を要する。このために、電解析出条件と電解析出膜の機械特性を把握し、電析モデルに基づくシミュレーション結果等と比較しながら電鍍プロセスの最適化を行うことが重要となっている。Fig. 8に量産型の電鍍装置(アクセスエンジニアリング社製)の例を示す。この装置は1 mm以上の厚さのマイクロ金型を最大6インチまで作製可能である。従来は、電鍍材料としてNi, Au, Cuが主に用いられて来たが、量産に適した射出成形金型への本格的適用を考えた場合、あるいは駆動・摺動機能を有するマイクロ部品用材料への適用を考えた場合など、ヤング率、硬度等の機械的特性の優れた材料の開発が重要となる。こういった観点から2元系のNi-Fe³⁵⁾、Ni-W³⁶⁾など他にNi-Mn, Ni-Coなどの合金メッキの開発が精力的に進められるようになり、アクチュエータやマイクロプローブなどへの応用もなされている。しかし、電析中での電界集中の制御、電析条件の経時設定、めっき浴の最適化、浴管理などノウハウに係わる部分も多く³⁷⁾、この分野における技術波及の障壁となっており、今後は技術の共通化、標準化等への取り組みが望まれる。

3.3 マイクロ成形

最終工程であるマイクロ成形³⁸⁻⁴²⁾は、量産を具体的に

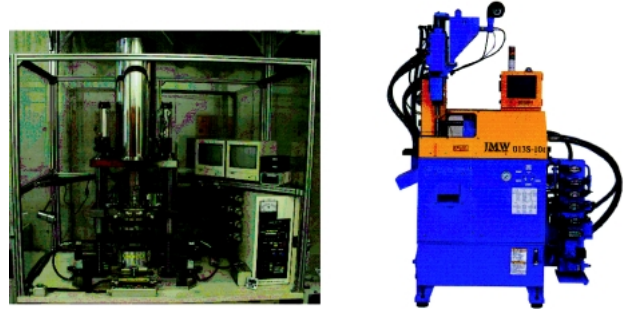


Fig. 9 Outer appearance of the molding apparatus. Left one (manufactured by Engineering System Co., JAPAN) is for hot embossing⁴²⁾ and right one is for injection molding (manufactured by Jyukuken Machine Works Co., JAPAN).

行うと共に、プロセスの最終部品の材料的バリエーションを広げる工程としてとして、Si系材料を主とした他のマイクロプロセスに対するLIGAプロセスの優位性をもたらしている。成形は材料をガラス転移温度以上まで加熱して、型に流し込む、あるいは押しつけたり焼結することによって構造体を形成する方法であり、適用可能な材料が広範である。樹脂のみならず、セラミック、ガラス、石英などのマイクロ構造体の形成が可能であり、量産のみならずマイクロデバイスの機能を広げる上で重要である。

これまでLIGAプロセスで用いられてきた成形方法は、①ホットエンボッシング、②射出成形、③反応性射出成形の3つがあり、用途による使い分けがなされているが、現在では①のホットエンボッシング成形が主流である。

Fig. 9にホットエンボッシング装置(左:エンジニアリングシステム社製)と射出成形装置(右:ジュケンマシンワークス社製)の例を示す。ホットエンボッシング成形は、真空もしくは大気中にてプラスチックと金型の両者をプラスチックのガラス転移温度直上まで加熱した後に徐々に荷重を加えて成形する方法であり、高アスペクト比のマイクロ構造体の作製に適した方法である。しかし加熱した後に荷重を加えて成形した後にプラスチックと金型を引き離す工程で造体の損傷や歪み等の種々の問題が発生する。これを解決するためには、作製する構造体のサイズと形状、プラスチック材質の種類に応じた注意深い離型荷重ステップが必要となる。さらにホットエンボッシング成形は1回の成形に要する時間サイクルが長く(一般的に5分以上)、量産の点で問題がある。実用的な成形方法に②の射出成形がある。この方法は常温の金型に、ガラス転移温度の150~200°C高い温度に加熱したプラスチックの熔融体を、短時間で圧力注入する方法である。注入が数秒のうちに行われ量産効率が非常に高いために、CDやDVD等、現在の量産型成形の主流である。射出成形では座屈や倒れを生じさせないように樹脂温度を下げて成形する必要があるが、加圧力に制限があるため、アスペクト比の比較的低い形状の構造体の成形に用いられている。熱可塑性の樹脂を用い

るが、構造が微細で高アスペクト比になるほど、注入不良や高粘性の樹脂の流れがもたらす不均一な残留応力による成型品の変形が予想される。これを解決する有望な方法の開発が待たれる。射出成形は、樹脂の凝固過程が高圧力下で短時間に行われる動的過程であるために、特にマイクロ領域ではそのメカニズムを理論的に予想することが困難である。特に高アスペクト比のマイクロ構造への熔融樹脂の凝固過程に関しては、理論、実験両面ともそのアプローチは殆どない状態と言って良い。最近のマイクロ射出成形の成果としては、径 $268\ \mu\text{m}$ の微小遊星歯車の量産に成功した例が挙げられる。

③の反応性射出成形は、液状の熱可塑性樹脂を攪拌して射出する方法であり、大型の構造体に用いられて来たが、ウラン濃縮用の同位体分離ノズルの量産のために LIGA プロセスとして、最初に用いられた。成型前の樹脂が液状であり注入できる構造体の形状、寸法の自由度が高く、最も微細で高アスペクト比の構造体の成型に適した技術である。ウラン濃縮用のノズルでは、最小線幅 $3\ \mu\text{m}$ 、平均厚さ $300\ \mu\text{m}$ 、アスペクト比100という非常に高いアスペクト比の構造体が作製された²⁾。しかし、1回の成形に要する時間サイクルが非常に長い事と専用装置の開発が遅れているために最近では用いられる例が少ない。

以上のように、LIGA プロセスにおける量産化を担う成形工程は優位性と共に多くの課題があり、実際の製品に応用された例はそれほど多くない。また、サブアセンブリの状態までどのようにして作製するかは今後の LIGA プロセスの大きな課題である。

4. LIGA プロセスと他工程の複合による 3次元構造の形成

前述したように、マイクロシステムにおいては、マイクロメーターサイズの3次元構造化が本質的に必要な場合が多い。例えば、指紋センサーなどでは電子回路基板の上に直接立体形状のタッチセンサーを形成している。マイクロシステムの実用化例として取り上げられるインクジェットプリンタヘッドも3次元構造を有し、最小寸法は数ミクロンから数十ミクロンである。また、実用化されている光スイッチの代表である DMD (Digital Mirror Device) は光のパスを様々な方向に変える必要があり、必然的に3次元構造である。また医療応用では、マイクロカテーテルなど、生体組織の形状に適合した形状が必要とされる場合も多い。今後は、燃料電池の電極部、微小リアクタの触媒担持部、及び特定の部位に薬剤を注入する DDS (Drug Delivery System) など、サブミクロンレベルの3次元構造体の必要性も益々高まり、その応用を実現することにより、各産業システムの大きな発展も期待できる。

LIGA プロセスでは基本的に数百 μm の厚みを持った2次元形状の構造物しか出来なかった。ここでは、この欠点

を改良し、3次元構造体を形成するための新たな試みのいくつかを紹介する。

4.1 犠牲層技術

旧来の LIGA プロセスでは基板に固定した機構部品しか出来なかったため、得られる構造体の適用範囲が制限されるといった問題点があったが、これは1990年代に入って犠牲層を用いることによってクリアされた^{3,4)}。基板上に電鍍のためのシード層のスパッタ、パターニングを行った上でさらに犠牲層 (Ti, Cu など) のスパッタ、パターニングを行い、さらに厚膜 PMMA を形成した上でディープ X 線リソグラフィによって可動部品のパターニングを行った後に電鍍にて可動部の形成を行い、最後に犠牲層とメッキ用ベースの除去を行うものである。3回のスパッタ工程、2回の UV リソグラフィ工程、1回のディープ X 線リソグラフィと電鍍工程、さらにはウェットエッチング工程が必要となりやや複雑であるが、この方法によって、LIGA プロセスを用いて大きな駆動力を有する実用的なマイクロタービンや電磁モーターなどのアクチュエータや、高感度の加速度センサなど、多くの応用が展開されるきっかけとなったことは特筆すべきことである。

4.2 ステップ状 3次元構造の形成技術

3次元構造のマイクロ機構を実現するための有効な方法として、2次元構造を積層したステップ状の3次元構造体の製造方法が提案され、試作した2段構造がマイクロ電磁モーターに応用された⁴³⁾。この方法は、LIGA プロセスで作製した金型を用いて2層レジスト自体を成形して、アライメントの後に2回目のディープ X 線リソグラフィと電鍍を用いてステップ形状の金型を作製し、さらにこれを用いてステップ状3次元構造の樹脂成形構造を作製するものである。この工程で重要となるのが2層レジスト層の形成とマスクとレジストとのアライメントである。2層レジストは、ディープ X 線リソグラフィに対する必要条件を満たす高分子量で基板との密着性が良好な PMMA 下層部と離型剤を含み、成形工程に適した低分子量の PMMA 上層から構成されている。分子量の違う PMMA の2層であるために現像速度が異なり、段差が生じる可能性があるが、その抑制のために分子量や現像条件の厳密な制御が必要となる。しかし、こうした多段ステップ構造は、デバイスのアセンブリに必要な支持構造体やケースのみならず、機能集積した各種マイクロシステムを実現するうえで重要となる。

4.3 AMANDA 技術 (Surface Micromachining, Molding and Diaphragm Transfer)

この方法は1990年代末に KfK (カールスルーエ研究所) で生み出された^{20,24)}。Fig. 10 に工程図を示す。ステップ状3次元構造の形成法で作った3次元形状の樹脂構造体をダ

ダイヤフラム構造を有する Si ウェハに接着剤で貼り付け、ダイヤフラム構造を機械的に Si ウェハから引き剥がし、メンブレン構造を 3 次元形状の樹脂構造体に移送する。さらに別の面からもう一つの 3 次元形状の樹脂構造体を貼り付け、3 次元のデバイスを作製する技術である。ダイヤフラム構造からなる構造は、流体の制御や測定に必須であることから、高感度の流量センサーや、ポン

プ、バルブなどのマイクロ流体デバイスを作製するうえでキーとなる技術と言える。Fig. 7 で紹介したマイクロポンプはこの方法によって作製されたものである。

4.4 X線リソグラフィによる直接 3 次元構造体の作製

以上の様に LIGA プロセスを繰り返す工程と犠牲層工程と接合、剥離工程を組み合わせることによって比較的複雑な形状の 3 次元マイクロ構造体を作製できるが、X 線リソグラフィの工程において一括して 3 次元加工が実現出来れば、大幅な工程短縮が図れるのみならず、マイクロ構造体の形状自由度と加工精度の高い、新たな量産プロセスの実現が期待できる。このため、近年は、X 線リソグラフィによる直接 3 次元構造体の作製の研究が盛んになっている⁴⁴⁾。Fig. 11 は、同様の方法で作成された米国ウィスコンシン州立大学の立体構造体である⁴⁵⁾。これに対し、立命館大学のグループは X 線マスクとレジスト基板の相対位置を露光中に変化させることによって仮想的にレジスト面内に 2 次元の露光強度分布を作製し 3 次元構造体を作製している⁵⁰⁾。また、兵庫県立大学のグループは X 線マスクの吸収体の厚さに 2 次元分布を持たせ、X 線を一部透過させることによって 2 次元の露光強度分布を作製し 3 次元構造体の作製を試み⁴⁶⁾、これを液晶ディスプレイの導光板に応用した (Fig. 12 (a), (b))。光学散乱体のドットに 3 次元構造を適用することにより、輝度が約 1.5 倍向上する事が報告されている⁴⁷⁾。また、露光中に基板と X 線マスクの相対位置をスキャンする事によって 3 次元構造を得る方法は最も多く提案されている⁴⁸⁻⁵⁰⁾。しかしながら、これらの手法で得られる構造体は対称形、もしくは一定の構造の繰り返しによる 3 次元形状であり、生体の組織形状に適合するような自由度の高い 3 次元構造はまだ得られていないのが現状である。3 次元の形状自由度は低

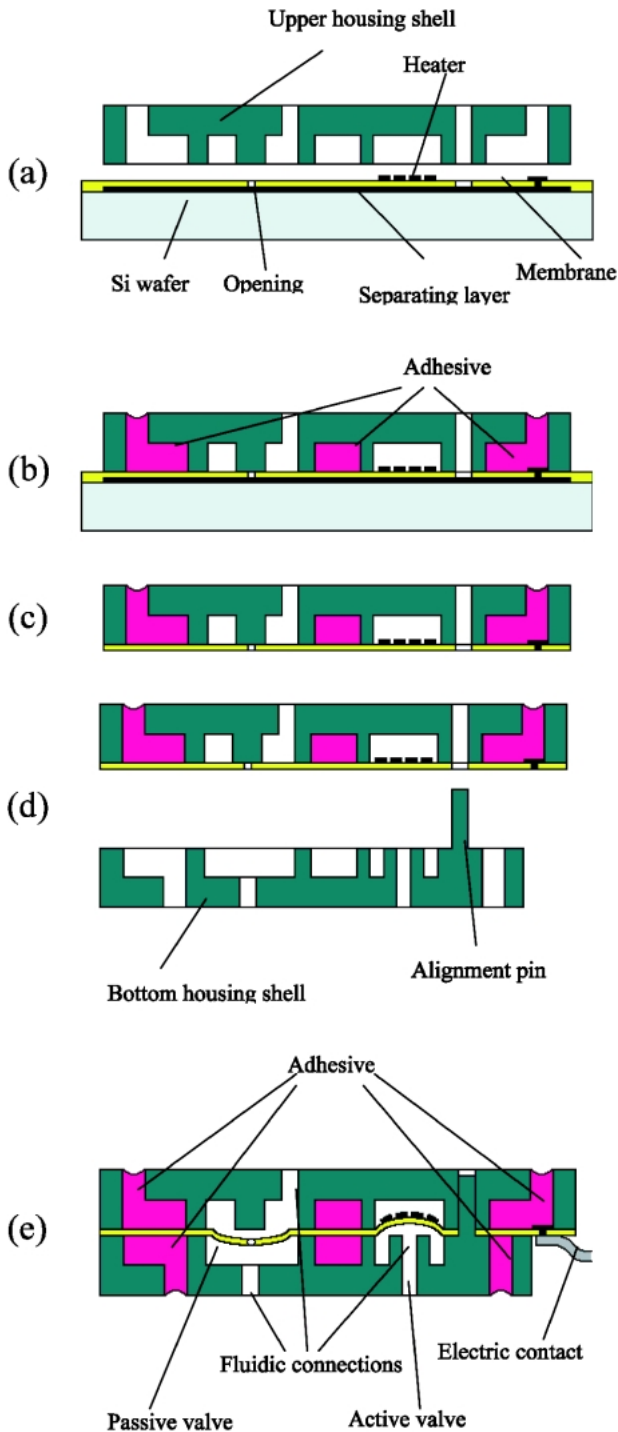


Fig. 10 Schematic view of the AMANDA process developed at KfK^{20,24)}.



Fig. 11 Example of 3D microstructure fabricated by multi-step x-ray exposure⁴⁵⁾.

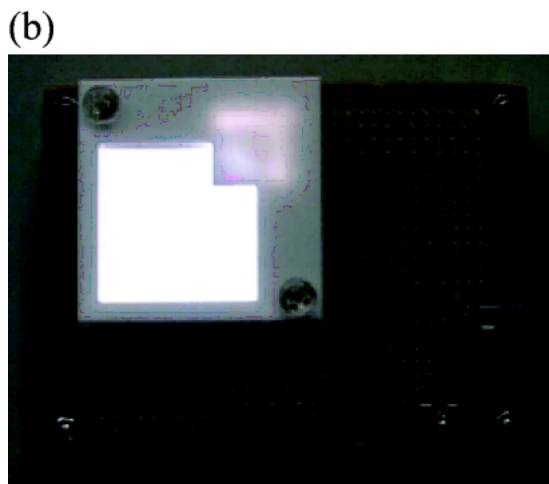
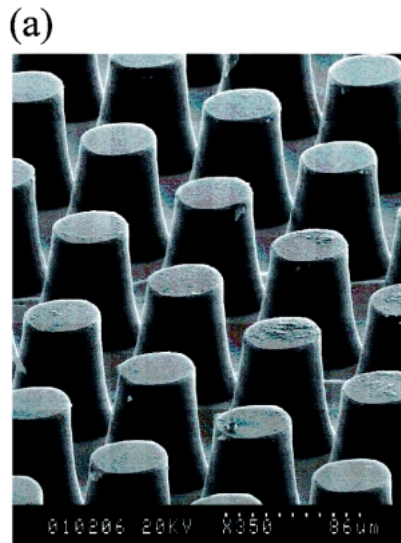


Fig. 12 Example of the application of 3D structures to lighting panel.
 a) Trapezoidal cylinder structures
 b) Optical wave guide mounted at the lighting panel

くとも、量産性と低コスト性が優先的に求められる携帯端末や自動車部品、燃料電池など市場の大きなマイクロ部品への適用を主に、開発が進んで行くものと考えられる。レーザーのステレオリソグラフィで得られているような任意の3次元構造を得るためには、従来とは別原理によるアプローチが必要となる。

現在のLIGAプロセスの研究開発ターゲットとなっている、主要な課題を列記する。

- ① 線幅がサブミクロンレベルのより高アスペクト比構造の形成
- ② ディープX線リソグラフィの面積化
- ③ 任意の3次元マイクロ構造体を形成する手法の探索
- ④ 量産を握る電铸，成形プロセスの高度化，プロセス工程間の整合性の確立
- ⑤ 位置決めモールド技術，電子・光回路上への構造体

の直接アセンブリ技術の開発

- ⑥ 露光，現像，電铸，成形等の各工程のシミュレーション技術の開発
- ⑦ トータルとしてのLIGAプロセスと設計とのコンカレント化

5. LIGAプロセスの展望

これまで述べたように、LIGAプロセスはマイクロシステム製造の有力な微細加工技術であり、多くの機能デバイスに応用されてきた実績がある一方で、今後の産業システムへの本格的な導入を図るためには解決すべきいくつかの重要な課題がある。本稿の最後に、これらのブレークスルーと目される注目すべき動きを順に紹介し、新たなLIGAプロセスの展望に繋げたい。

前述したようにディープX線リソグラフィについては、利用X線エネルギーの高エネルギー化により、露光に用いるX線マスクの吸収体の厚さが数ミクロンから数十ミクロンと一層増大しているため、微細化のサイズが大きくなっている問題がある。このためには、露光に用いる放射光のエネルギーをより低くし、線幅がより微細かつ薄い吸収体のX線マスクを用いても有効にレジスト表面が感光できるようにする技術が必要である。また、量産やコスト低減のみならず、光学応用やバイオ応用では異なる形状、機能の構造体が面積に展開することによって初めて有効な機能をなしえる場合もあり、一括可能な露光面積をさらに広げる必要がある。後者は特に、液晶やプラズマディスプレイ等に用いられるマイクロ光学部品からの要請が強い。兵庫県立大学のグループはこの両者を実現する露光システムの開発を行った。露光システムの中核となるビームラインの概略図をFig. 13に示す。このビームラインは、10 KeV以上のハイエネルギービームラインと、1~2 KeVの低エネルギービームラインの2本のビームラインを縦に積層した新しい構造を有しており、高アスペクト比の構造体形成と、サブミクロンレベルの微細構造体をA4サイズで同一露光装置内で実現可能である。特に低エネルギービームラインは入射角可変ミラーの採用により、EUVL (Extreme ultra-violet Lithography) 領域の100 eVまでの低エネルギー光の利用が可能であり、差動排気の最適化によりA4サイズの露光時においても、高エネルギー放射光ビームラインは5桁、高エネルギー放射光ビームラインは10桁の真空度差 (pa) が得られるようになっており、露光ステーションへの基板冷却用ガスおよび、光化学反応の各種反応性ガスの導入が可能である。このような複合機能型のLIGAプロセス用ビームラインは、初の試みと言える⁵¹⁾。Fig. 14にA4サイズ全面にわたって一括形成した大面積マイクロ構造体(a)、及び拡大した高アスペクト比パターンのSEM写真(b)を示す⁵¹⁾。露光の対象となるレジストは、その材料開発が重要であるが、最近高

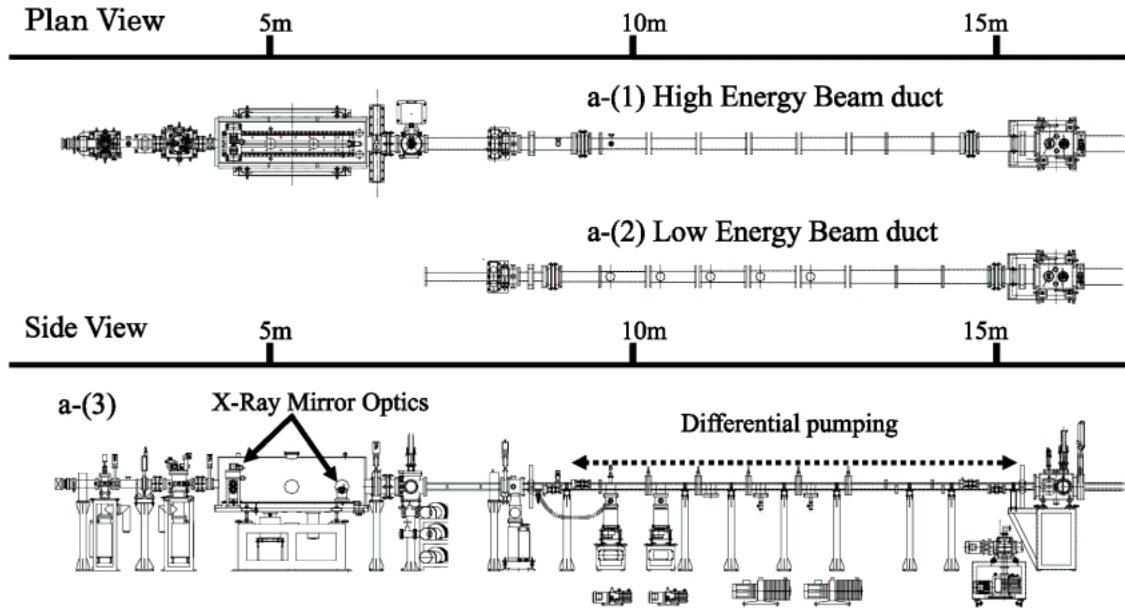


Fig. 13 Detailed drawings of the new LIGA beamline at the NewSUBARU facility.
a-(1) High-energy beam duct, a-(2) Low-energy beam duct, a-(3) Side view of the entire beamline

感度レジストの開発が初められて来た。例えば、MMA/MAA（メチルメタアクリレート/メタクリル酸）共重合体レジストや、感放射線性カチオン重合開始剤を含むエポキシ樹脂レジスト（TGP⁵²，SU-8）が挙げられる。これらはPMMAと比較して数十倍の感度を持ち、後者はUV領域においても厚く（500 μm以下）、高アスペクト比の構造体が作製できるレジストとして注目されている。

ディープX線リソグラフィ後続プロセスである金型作製技術に関しては、最近特にニッケルをベースとした合金材料面での開発が進んでいる。特に合金化することによって結晶粒のサイズや配列制御を行い、加圧成形の熱負荷時に要求される金型の機械的耐性を向上させたり、機械特性に異方性を与えるなどの新しい試みが行われている。金型そのものの作製プロセスに関しては、電鍍プロセスのシミュレーション技術が進んでおり、異なる形状・サイズのマイクロ構造体を大面積で形成できる金型の電鍍条件に関する最適化が図られている³⁵⁾。

マイクロ成形技術では、ホットエンボッシング技術を中心に高アスペクト比の構造体の形成に向けて開発が進んでいる。ドイツのIMTのグループは、シミュレーションを用いた成形条件の最適化を行い、アスペクト比10以上のマイクロ成形構造を得ることに成功している。一方で、成形プロセスそのもののメカニズムそのものに一部手を加えることによって高アスペクト比構造を得ようとする動きがある。ホットエンボッシングの成形時と離形時に超音波振動を印可し、樹脂のキャビティー内での完全充填をアシストする方法が提案されている。大気中で行った従来のホットエンボッシング法と比較して、超音波真空ホットエンボッシング法、真空ホットエンボッシング法共に、成

形時間、成形荷重が一桁以上低減するという顕著な効果を見いだした⁴²⁾。超音波振動印可によるホットエンボッシング法によりどの程度のアスペクト比の構造が成形可能か等、具体的な高アスペクト構造への適用が期待される。

また組み立てできるサブアセンブリの状態まで作製する技術として、一部の部品を樹脂に封じ込めて構造体を成形するインサート成形技術の開発も行われて来つつあり、LIGAプロセスへの応用が期待される。成形機は販売されているものは従来大型であり、マイクロ構造体の作製に必ずしも適さなかったが、最近ではホットエンボッシングや射出成形機を中心に専用の物が量産されるようになって来つつある。特にホットエンボッシング装置はここ数年注目されているナノインプリント技術^{53,54)}と手法的に共通項が多く、今後の装置開発の進展と高アスペクト比のナノ構造体複製技術への進展が期待される。

以上、ここ数年におけるLIGAプロセスの新たな動きについて紹介したが、競合となる微細加工プロセスに関しては、ここ数年、SU-8等のエポキシ系レジストを用いた厚膜UVリソグラフィや高密度ICP（Inductivity Coupled Plasma：誘導結合プラズマ）を用いたエッチングなどの高アスペクト比加工技術が台頭しつつあり、DMD（Digital Mirror Device）等を用いた光スイッチ等の加工に用いられている。しかし、実現しうるアスペクト比のみならず、加工精度、表面粗さ、材料の自由度、量産性からみた総合比較を行うと、技術的には依然としてLIGAプロセスに優位性があると結論できる。この優位性が維持されるためにも、LIGAプロセスの実用化への動きが今後、一層加速されることが望まれる。

以上LIGAプロセスの現状と課題を述べ、最近の新し

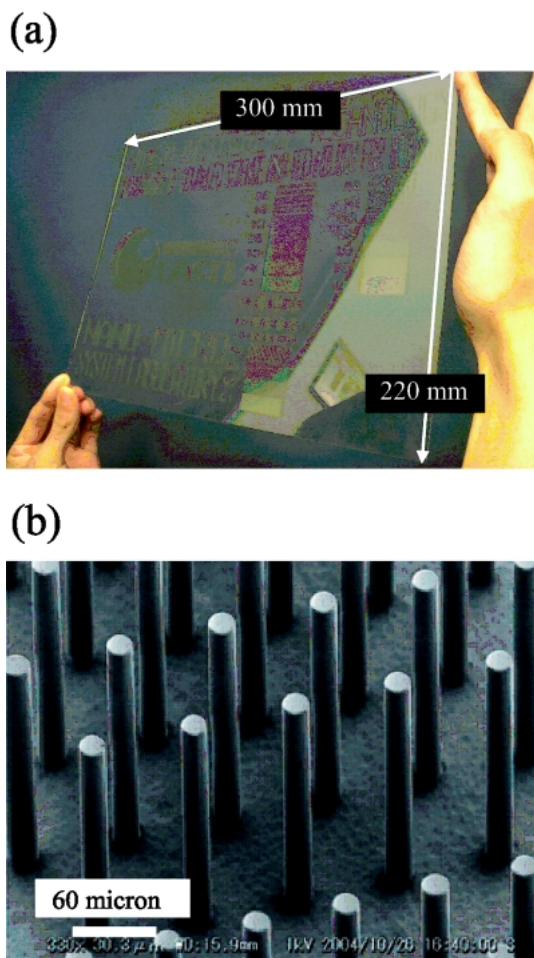


Fig. 14 The PMMA resist patterns fabricated using the large-area deep x-ray lithography system. (a) A4-size deep x-ray lithography, and (b) high-aspect-ratio patterning.

い動きについて述べた。特筆すべきは、今後放射光の応用を中心に、従来のLIGAプロセスから新しい段階への変革の兆しが見え初めていることである。これは、一部の産業界のLIGAプロセスに対する評価が光学部品を中心に見直され初めており、「大面積」、「3次元加工」、「機能付加」、「ナノレベルの微細化」など従来とは異なる要請が現れて来たためと考えられる。微細立体形状創成の有力な加工方法であるディープX線リソグラフィのエネルギー領域の活用がより広範化し、ナノレベル加工へのアプローチが図られて行くと同時に、放射光による物質表面修飾やテフロンなどの難加工材料に対する機能付加の動きなども現れ始めている。その意味で、これらの新たな加工機能が複合化された、「Advanced LIGAプロセス」の出現を期待したい。

参考文献

- 1) E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner and D. Munchmeyer: *Microelectronic Eng.* 4, 35 (1986).
- 2) P. Hagmann and W. Ehrfeld: *Reaction Injection Molding*, (Hanser Publishers, Munich) Chapter IV (1989).
- 3) C. Burbaum, J. Mohr, P. Bley and W. Menz: *sensor and Materials.* 3, 75 (1991).
- 4) M. Storrhmann, O. Fromhein, W. Keller, K. Lindemann and J. Mohr: *KfK 5238, 1, Statuskolloquium des Projektes Mikrosystem 65*, (1993).
- 5) U. Wallrabe, P. Bley, B. Krevet, W. Menz and J. Mohr: *Proc. MEMS 92*, S, 139 (1992).
- 6) H. Guckel, T. Earles, J. Klein, J. D. Zook and T. Ohnstein: *Sens. Actuators A*, 53, 386 (1996).
- 7) W. Menz, W. Wachter, M. Harmening and A. Michel: *Proc. MEMS 91*, 69 (1991).
- 8) A. Ruzzu, D. Haller and J. Mohr: *Proc. Conf on MOMEMS 1999*, 186 (1999).
- 9) X. C. Shan, R. Maeda, T. Ikehara, H. Mekaru and T. Hattori: *Sens. Actuators A*, 108, 224 (2003).
- 10) H. Bauer, W. Ehrfeld, M. Gerner, T. Paatzsch, A. Picard, H. Schiff and L. Weber: *Proc. the International symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, 33 (1995).
- 11) U. Wallrabe, H. Dittrich, G. Friedsam, T. Hanemann, J. Mohr, K. Muller, V. Piotter, P. Ruther, T. Schaller and W. Zissler: *Proc. HARMST 2001*, 231 (2001).
- 12) M. Foulger, C. D. Hannaford and W. Hendersen: *IEEE Colloquium on Microengineering Applications in Optoelectronics*, 41 (1996).
- 13) J. A. Cox, J. D. Zook, T. Ohnstein and D. C. Dobson: *Proc. SPIE*, 2383, 17 (1995).
- 14) P. Krippner, T. Kuhner, J. Mohr and V. Saile: *Proc. SPIE*. 3912, 141 (2000).
- 15) J. Mohr, P. Krippner and U. Wallrabe: *FKZA-Bericht 6423*, 171 (2000).
- 16) G. Feiertag, W. Ehrfeld, H. Freimuth, H. Kolle, H. Leibr, M. Schmidt, M. M. Sigalas, C. M. Soukoulis, G. Kiriakidis, T. Pedersen, J. Kuhl and W. Koenig: *Appl. Phys. Lett.* 71, 1441 (1997).
- 17) T. Oka, H. Nakajima, M. Tsugai, U. Hollenbach, U. Wallrabe and J. Mohr: *Sens. And Actuators A*, 102, 261 (2003).
- 18) Y. Utsumi, M. Ozaki, S. Terabe and T. Hattori: *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, 4098 (2003).
- 19) K. Goll, W. Bacher, B. Bustgens, D. Maas and W. Menz: *W. K. Schomburg, J. Micromech. Microeng.* 6, 77 (1996).
- 20) B. Bustgens, W. Bacher, W. Bier, R. Ehnes, D. Maas, R. Ruprecht, W. K. Schomburg and L. Keydel: *Proc. 4th Int. Conf. On New Actuators 1994*, 86 (1994).
- 21) W. Ehrfeld, V. Hessel and H. Löwe: "Microreactors", Chapter 3, 41-86, WILEY-VCH (2000).
- 22) Y. Utsumi, T. Asano, T. Hattori, K. Matsumi, M. Takeo and S. Negoro: *Proc. Microprocess and Nanotechnology Conference 2004*, 248, (2004).
- 23) T. Asano, K. Matsumi, M. Takeo, S. Negoro and Y. Utsumi: *Proc. Molecule-Based Information Transmission and Reception 2005*, 62 (2005).
- 24) W. K. Schomburg, R. Ahrens, W. Bacher, J. Martin and V. Saile: *Sens. and Actuators*, 76, 343 (1999).
- 25) M. Heckel, A. Gerlach, A. Guber and T. Schaller: *Proc SPIE* 4408, 469 (2001).
- 26) B. L. Haroldsen, A. Morales, M. Bankert and T. N. Raber: *Proc. HARMST 2003*, 195 (2003).
- 27) M. A. Muller, C. Muller, R. Foster and W. Menz: *Proc. HARMST 2003*, 253 (2003).
- 28) 「シンクロトロン放射光の基礎」大西宏之編, 丸善 1996.
- 29) 「シンクロトロン放射光技術」富増多喜夫編, 工業調査会 1990.
- 30) F. J. Pantenburg and J. Mohr: *Nucl. Instrum. and Meth. A*,

- 467, 1269 (2001).
- 31) F. J. Pantenburg, S. Achenbach and S. Mohr: *Microsystems Tech.* 4(2), 89 (1998).
- 32) J. Gottert, H. O. Moser, F. J. Pantenburg, V. Saile and R. Steininger: *Microsystem Technologies* 6, 113 (2000).
- 33) S. Achenbach: *proc HARMST 2003*, 7 (2003).
- 34) S. Sugiyama, Y. Zang, H. Ueno, M. Hosaka, T. Fujimoto, R. Maeda and T. Tanaka: *Proc.*, MHS 96, 79 (1996).
- 35) K. Bade, U. Kohle, B. Krevet, B. Matthis and J. Schultz: *Proc. High Aspect ratio Micro-Structure Technology 2003*, P89 (2003).
- 36) T. Yamasaki, T. Mochizuki and T. Fukami: *Proc. of High Aspect ratio Micro-Structure Technology 2001*, P195 (2001).
- 37) Y. Utsumi, K. Kitadani and T. Hattori: *Proc. JSME/ASME International Conference on Materials and Processing 2002*, 2, 585 (2002).
- 38) M. Heckel, W. Bacher and K. D. Muller: *Microsystem Technologies* 4, 122 (1998).
- 39) M. Hecke, A. Gerlach, A. Guber and T. Schaller: *Proc. SPIE*, 4408, p469 (2001).
- 40) M. Heckel and A. Durand: *Proc. 2nd Euspen International Conf.* p196 (2001).
- 41) H. Mekaru, S. Kusumi, N. Sato, M. Yamashita, O. Shimada and T. Hattori: *Proc. Microprocess and Nanotechnology Conference 2003*, 156 (2003).
- 42) 銘苅, 服部, 中村, 丸山: *超音波 TECNO*, P65 (2004).
- 43) M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. El-Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, W. Mentz, A. Michael and J. Morh: *Proc MEMS 1992*, 202 (1992).
- 44) J. Mohr, W. Ehrfeld, D. Munchmeyer and A. Stutz: *Macromol. Chem., Macromol. Symp.* 24, 231 (1989).
- 45) J. Goettert, G. Aigeldinger, Y. Desta, Z. L. Ling and L. Rupp: *Proc. Synchrotron Radiation Instrumentation 2001*, 102 (2001).
- 46) 植田, 福田, 滝口, 服部: *設備管理学会秋季研究発表大会論文集* p13 (2003).
- 47) Y. Utsumi, M. Minamitani and T. Hattori: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, 3872 (2004).
- 48) A. D. Feinerman, R. E. Lajos, V. White and D. D. Denton: *J. Micrielectromechanical Sys.* 5, 250, (1996).
- 49) T. Katoh, N. Nishi, M. Fukagawa, U. Ueno and S. Sugiyama: *Proc. MEMS 2000*, 556 (2000).
- 50) O. Tabata, N. Matsuzaka, T. Yamaji, H. You, J. Minakuchi and K. Yamamoto: *Proc. MEMS 2001*, 94 (2001).
- 51) Y. Utsumi, T. Kishimoto, T. Hattori and H. Hara: *Proc. Microprocess and Nanotechnology Conference 2004*, 104 (2004).
- 52) N. Sakai, K. Tada, Y. Utsumi and T. Hattori: *Proc. HARMST 2003*, 15, (2003).
- 53) S. Y. Chou, P. R. Krauss and P. J. Renstrom: *Appl. Phys. Lett.* 67, 3114 (1995).
- 54) S. Matsui, Y. Igaku, Y. Ishigaki, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, M. Komuro and H. Hiroshima: *J. Vac. Sci. Technol.* B19, 2801 (2001).

● 著者紹介 ●



内海裕一

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 助教授

E-mail : utsumi@lasti.u-hyogo.ac.jp

専門 : マイクロシステム工学, 放射光マイクロプロセス

【略歴】

名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程, NTT 物性科学基礎研究所を経て, 2000年3月より姫路工業大学, 高度産業科学技術研究所, 助教授となり現在に至る。名古屋大学博士(工学)。主に生化学分析や環境分析に用いる集積化微小化学システムや機能性流体デバイス, 及びこれらを実現するための放射光を応用した MEMS プロセスの研究に従事している。

LIGA Process—Application to Microsystems and Outlook for The Future—

Yuichi UTSUMI University of Hyogo, Laboratory of Advanced Science and Physics, 3-1-2, Koto, Kamigori, Ako, Hyogo, 678-1205, JAPAN

Abstract The realization of 3D microstructures integrating multiple functions, such as, electrical, optical, mechanical, and chemical functions, in a restricted space will bring many advantages to the industrial applicability of microsystems. Microsystems have been fabricated using MEMS (micro electro mechanical systems) processes. Recently, however, fabrication techniques with more precision and higher aspect ratio than conventionally achievable have become increasingly important. The LIGA (abbreviated from the German terms Lithographite, Galvanofornung and Abfornung) process, which consists of deep x-ray lithography, electroforming, and molding processes, is one promising candidate for such 3D microfabrication¹⁾. In this report, the application examples of LIGA were reviewed and technical problems were extracted. The recent new technical attempts for the next generation process have been performed, and future perspective of LIGA applications is also expressed.