ポリマーを用いた MEMS 技術とその応用

正 員 庄子 習一*

Polymer-MEMS and Its Applications

Shuichi Shoji, Member

Fabrication methods of polymer microstructures for μ TAS, Lab-on-a-chip and BioMEMS developed so far are reviewed. Conventional plastic molds of hot embossing, injection molding and casting have been applied for fabrications of the microstructures with improvements of precise temperature control etc. New silicone like material, PDMS have been widely used in μ TAS. Some UV photolithography methods have also been developed to realize 3D microstructures. Surface micromachining technologies using polymer as the structure and positive photoresist as the sacrificial layer are another potential fabrication methods in μ TAS.

キーワード：ポリマー，モールド，プラスチック，PDMS，感光性ポリマー，3次元マイクロ構造形成

Keywords : Polymer, Molding, Plastic, PDMS, Photosensitive Polymer, 3D microstructure

1. はじめに

MEMS 技術はシリコンのマイクロマシーニングを中心として発展し、その結果、圧力センサ、加速度センサなど自動車、工業計測用物理量センサ、デジタルミラーデバイスに代表される光学デバイス (MOEMS)、インクジェットプリンタヘッド等のデバイスが実用化されている。また、近年、フィルタやスイッチなどの高周波デバイスの分野 (RF-MEMS) でも応用が期待されるなど、様々な分野に幅広く浸透しつつある。化学・生化学分野への応用も進行しており、 μ TAS (Micro Total Analysis Systems), Lab-on-a-Chip (LOC), BioMEMS などと呼ばれる新しい分野が立ち上がっている。2003 年の Transducers 国際会議では、 μ TAS や Microfluidics に関する論文が増加しており、2002 年に日本で行われた μ TAS 国際会議でも参加者が 700 名を越えるなど、MEMS の大きな市場として期待が持たれている。

μ TAS や LOC 分野の代表的なデバイスであるゲノムチップや電気泳動チップは、これまでのところガラスを材料としている場合が多い。これは、蛍光や吸光を利用した光学的な検出方式を用いるため、可視光領域の光透過性が要求されることと、絶縁性を要求されることなどが原因である。また、 μ TAS において使い易いデバイスの代表寸法が数 $10\mu\text{m}$ から数 $100\mu\text{m}$ で、複雑な構造を必要としないことなどもガラスが基板として選ばれている大きな要因である。また、化学、生化学の研究者がガラス器具の使用に慣れて

いて、シリコンをツールとして使用するのに違和感を覚えるということも事実であると思われる。

実際にバイオテクノロジーや医療の現場で μ TAS や LOC のデバイスやシステムを使用する場合を考えると、汚染や2次感染の問題から使い捨てにせざるを得ない場合が多い。このため、コストの観点からモールド技術で大量生産可能なプラスチックなどの有機ポリマー構造体を使用する方が有利と考えられる⁽¹⁾。また、生体適合性などの点からも有機ポリマー材料を使用する方が有効な場合も多いと考えられる。

シリコンの DeepRIE とともに高アスペクト比構造の形成技術である LIGA プロセスは、高精度のプラスチック構造を実現する手法として当初から注目されてきた。近年、上述の状況からモールドによるプラスチック形成手法がさらに研究されるようになってきた。特にシリコーンゴムの一種である Polydimethylsiloxane (PDMS) は取り扱いが容易で、簡単に構造体形成が行えるため、広く使われるようになっていく。その他、フォトレジストや UV 硬化性樹脂など感光性高分子を用いた構造形成などについても新たな報告が目立ち、PolymerMEMS という技術が新領域として確立されつつある⁽²⁾。また、バルク構造体形成の技術の他に、Polymer を構造体として使用した表面マイクロマシーニングも多数報告されている。

本報では、モールド技術によるバルクポリマー構造形成や感光性樹脂やフォトレジストによる3次元構造形成およびポリマーを用いた表面マイクロマシーニングなど、PolymerMEMS の現状を紹介する。

* 早稲田大学理工学部
〒169-8555 東京都新宿区大久保 4-3-1
Waseda University
3-4-1, Ohkubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555

2. モールド

MEMS におけるプラスチックバルク構造形成は、LIGA プロセスによるものが早くから注目されていた。これは、SR X 線照射のコストが高いことから金属レプリカを作り、それをプラスチックに転写することが現実的とされていたからである⁽³⁾。その後、Deep RIE シリコンエッチングや EPON SU-8 を用いた UV 露光により、高アスペクト比マイクロ構造体を作成できるようになり、近年、これを鋳型に用いたモールド技術が身近になってきた。モールドによるプラスチック構造体形成には、図 1 に示すように押し込み鋳造 (Hot Embossing)、射出成形 (Injection Mold)、キャストイング (Casting) などの方法がある。まず、コンパクトディスク (CD) で確立されたプラスチック成形技術が、 μ TAS の低価格形成技術として応用できないか検討された。その結果、LIGA プロセスで形成した金属鋳型を用いた押し込み鋳造による高アスペクト比構造形成がまず報告された⁽⁴⁾。その中でプラスチック材料としては、熱可塑性を示す Polymethylmethacrylate (PMMA) や Polycarbonate (PC) が用いられた。それぞれの材料を加熱して (PMMA:106°C, PC:150°C) で加熱し、鋳型に 20~30 kN で押し付けて構造を転写する方法でプラスチックマイクロ構造体を実現された。高アスペクト比構造の実現のため、鋳型だけでなくプラスチック自体も加熱して押し込み易くする必要がある点が、従来の CD (アスペクト比 約 0.2) の製作と異なる。DeepRIE により形成した鋳型を用いても同様なマイクロプラスチック構造が実現可能である。押し込み鋳造では、熱変形や鋳型からの取り外しなどにおいて、複雑な温度制御が必要で、成形時間が多少長くなるという問題がある。このため、射出成形についても検討が行われた。まず、通常のリソグラフィとめっきにより形成した鋳型について、PMMA, PC および Cyclic Olefin Co-polymer (COC) などについて成形が試みられた⁽⁵⁾。さらに、射出成形の加熱成形時間を短縮するとともに高アスペクト比の構造実現を目指し、Ni の金属鋳型表面にハロゲンランプを光源として赤外線照射して瞬間的に加熱成形する方法が考案された⁽⁶⁾。この方法により、短時間で PMMA, PC, COC などのプラスチック構造形成が実現できることが報告されている。これらの手法で、プラスチック構造体形成は可能となるが、マイクロチャネルなど μ TAS で必要となるプラスチックマイクロ構造形成には図 2 に示すようなプラスチックどうしの張り合わせ技術が必要である。接着剤を用いる方法もあるが、接着剤のマイクロチャネルへの流入など問題が多い。そのため、可熱・圧力印加による接合が検討されている。このとき、構造体を形成した基板をアライメントして張り合わせるための装置が必要となる。ところで、接合の手間を省くためにマイクロチャネルなどのマイクロ構造を形成した硬いプラスチック基板に、柔らかいポリマー膜、例えば PDMS を貼り付ける方法が提案されている。PDMS は多種材料との密着性が良く、特に表面処理を施したプラスチックとではある程度の圧力に耐えられ

図 1 モールドによるポリマー成形の種類

Fig. 1. Polymer structure fabrication methods by molding.

図 2 ポリマー基板の張り合わせ

Fig. 2. Bonding methods of the polymer substrates.

る張り合わせが可能である。

近年、キャストイングにより成形可能な PDMS を材料としたポリマー構造体形成が μ TAS の分野で多用されるようになってきている。これは、低温のプロセスで微小な構造体を精密転写でき、また、柔らかく多種構造体基板との密着性も良いため、容易にマイクロチャネルなどの形成が可能であるためである。また、酸素プラズマによるアッシングを施すと表面の親水性が増すなどの表面改質も可能である。PDMS 構造体と多種基板と複合構造により微小な流体制御用のマイクロバルブやマイクロポンプが形成されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、工程を工夫することにより、PDMS の多層構造のみで無効体積が無く、リークが全く無いニューマチックマイクロバルブが製作されている⁽⁹⁾。さらに、PDMS の構造体に金属電極を 3 次的に埋め込む方法も提案されている⁽¹⁰⁾。PDMS は強酸や有機溶剤に対して耐性が無く、化学的な用途に限界がある。そこで、PDMS のマイクロチャネル表面をテフロン薄膜でコーティングして、この問題を解決した例も報告されている⁽¹¹⁾。

3. リソグラフィ

3 次的なプラスチックマイクロ構造を形成する方法としては紫外線効果樹脂を用いた光造形法が開発され、ラビッドプロトタイピングの一手法として確立されている⁽¹²⁾。

図3 Epon SU-8 レジストを用いた立体構造形成⁽¹⁷⁾

Fig. 3. 3D microstructure formed by inclined UV exposures⁽¹⁷⁾.

この手法を用いてプラスチックの積層構造により、化学・生化学のプロセスを実現する化学 I C の概念が提案された。近年、形状記憶合金のアクチュエータを含む流体制御素子も集積化できるようになり、化学マイクロシステムとしての機能も実現されている⁽¹³⁾。

シンクロトロン放射 (SR) 平行 X 線光を用いた露光技術は高アスペクト比プラスチック構造を実現する方法として有名である。レジストとしては PMMA が一般に使われており、アスペクト比 100 以上の厚いプラスチック構造が実現されている。この露光技術とめっき技術の組み合わせで実現される LIGA (Lithographic Galvanofarming Abformung) は、前節の金属鋳型を形成する方法として有効である⁽¹⁴⁾。特に X 線マスクを回転振動させて露光する Moving Mask 法は、テーパを持った鋳型の形成に有効な方法である⁽¹⁵⁾。また、レジスト構造体自身を構造体として用いることも勿論可能である。しかし、その場合は高価な SR 装置を必要とすることから、加工単価が高くなるという問題がある。

通常の紫外線露光で高アスペクト比構造を実現するための特殊なレジストも開発されている。Epon SU-8 はその代表的なもので、紫外線に対する透過性が高く 100 μm 厚の構造

図4 斜め露光技術で形成したマイクロメッシュ構造⁽¹⁷⁾

Fig. 4. SEM micrograph of the in channel micromesh structures⁽¹⁷⁾.

形成も可能である。最近このレジストを用いて簡単に 3 次元立体構造を実現する方法が提案されている。通常のフォトマスクを用いる代わりに金属微細パターンを形成したガラス基板に SU-8 を厚く塗布し、裏面から UV 露光をすると高アスペクト比のネガレジストパターンが形成できることが報告されているが⁽¹⁶⁾、この手法を応用して図 3 に示すようにガラス基板を傾けてそれぞれ違う角度で 2 回露光すると網目状のネガレジストパターンが形成できる。さらに、上面からフォトマスクを用いて再度露光すると、図 4 に示すような溝に垂直に網目構造を形成した形のプラスチック構造が形成できる⁽¹⁷⁾。この場合の網目の大きさは金属パターンの間隔と露光の角度によって決まり、10 μm 程度の開口を持つマイクロメッシュが簡単に形成可能である。この手法により形成したプラスチック構造に PDMS 等の蓋をかぶせることにより網目構造を持ったマイクロチャネルが形成できる。この構造はマイクロ流体フィルタやマイクロミキサとしての有効性が示されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

4. 表面マイクロマシニング

PSG 犠牲層エッチングを用いたポリシリコン構造体形成は表面マイクロマシニング技術として、物理量センサやマイクロ光学デバイスの製作に応用されてきた。一方、PSG の代わりにポジ型フォトリソレジストを犠牲層として用い、ポリマー薄膜を構造体として用いた表面マイクロマシニングも μTAS の分野では、早くから提案されている。この場合、製作工程に高温のプロセスを必要とせず、シリコン等の基板にセンサを予め作りこむことが可能であるなどのメリットがある。構造体としてネガ型フォトリソレジストを用いた酸素、炭酸ガス、pH のマルチセンサアレーやマイクロバルブが最初に提案された⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。その後、フォトリソレジストの代わりにシリコーンゴムを構造体として用いたマイクロバルブが多数報告された。また、電気泳動用のマイクロチャネルを同様な方法でシリコン基板上に形成する方法

図5 ポリマーを用いた表面マイクロマシーニングの例⁽²¹⁾

Fig. 5. An example of the polymer surface micromachining⁽²¹⁾.

が提案されている。図5に示すようにポジ型フォトレジストをバリレン (Poly-p-xylylene) 薄膜ではさみ、機械的強度を保つためにさらに感光性ポリイミド膜を形成する⁽²¹⁾。この方法では予めシリコン基板に金属電極や光センサを形成できるため、センサ集積化型のマイクロチップ作成に応用可能である⁽²²⁾。さらに同種の手法で、バリレン膜を構造体とした多層ポリマー構造を用いた静電型マイクロバルブやフローセンサを組み込んだマスフローコントローラが作成されている⁽²³⁾⁽²⁴⁾。さらに、同様な手法で神経細胞を培養してネットワークを形成させることを目的としたニューロケイジが試作されている⁽²⁵⁾。

5. おわりに

本報では、ポリマーを材料としたマイクロ構造体形成技術について紹介した。MEMS 技術の化学・生化学応用を目的とした μ TAS, LOC, BioMEMS の分野では、生体適合性やコストの面から様々なポリマーを用いたマイクロデバイス

が試作・評価されている。コストの面ではモールドによるプラスチック成形が有利である。しかし、実際の応用を考えると金属電極や光学部品等を一体化する要求が多く機能部品を集積化する技術が要求されている。また、PDMS のように成形が容易で、ラピッドプロトタイピングに適した材料が開発され多用されるなど、近年 PolymerMEMS に関心が高まっている。ナノインプリンティングなど、他にもポリマーを用いた加工技術の進展が予想され、今後、益々ポリマー材料開発が進むものと思われる。また、それと並行して新材料に適した加工技術や化学・生化学の応用の具体的な用途に適した表面コーティング技術などの技術開発が期待されている。

謝 辞

本論文で紹介した研究の一部は、文部科学省化学研究費 早稲田大学 COE 分子ナノ工学研究拠点形成プログラムによって行ったものである。

(平成 15 年 12 月 12 日受付)

文 献

- (1) S. Shoji : "Micromachining for biosensors and Biosensing Systems: Biosensors and Their Applications", Kluwer Acad./ Plen. Pub., New York, pp.225-241 (2000)
- (2) P. Renaud, S. Metz, S. Jiguet, and A. Bertsch : "Composite Photoplumer Microstructures: From Planar to 3D Device", 12th Int. Conf. On Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Vol.2, pp.991-994 (2003)
- (3) A. Rogner, J. Eicher, and D. Munchmeyer et. al. : "The LIGA Technique: What are the New Opportunities", J. Micromech. Microeng., Vol.2, pp.133-140 (1992)
- (4) H. Becker and U. Heim : "Hot Embossing as a Method for Fabrication of Polymer High Aspect Ratio Structure", Sensors & Actuators, Vol.83, pp.13-135 (2000)
- (5) J.-W. Choi, S. Kim, and R. Trichur, et. al. : "A Plastic Micro Injection Molding Technique using Replaceable Mold-Disks for Disposable Microfluidic Systems and Biochips", 5th Int. Conf. On Micro Total Analysis Systems, pp.411-412 (2001)
- (6) S. Kim, R. Trichur, G. Beaucage, and C. H. Ahn : "New Plastic Microinjection Molding Technique for Extremely Tall Plastic Microstructures Using Remote Infrared Radiation Heating Method", Proc. Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop, pp.206-209 (2002)
- (7) K. Hosokawa, T. Fujii, and I. Endo : "Handling of Picoliter Liquid Samples in a Polydimethylsiloxane (PDMS)- Based Microfluidic Device", Anal. Chem., Vol.71, No.20, pp.4781-4785 (1999)
- (8) Y. -C. Su, L. Lin, and A. P. Pisano : "A Water-Powered Micro Drag delivery System", Proc. Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop, pp.69-72 (2002)
- (9) J. S. Go, T. Yamazaki, K. Kanai, H. Sato, S. Kawakami, and S. Shoji : "A disposable, dead volume-free and leak-free monolithic PDMS microvalve", 12th Int. Conf. On Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Vol.1, pp.643-646 (2003)
- (10) M. Ishizuka, M. Abe, H. Houjou, S. Shoji, J. Mizuno, and Y. Wada : "Design and fabrication of multi-metal electrodes implanted PDMS structures for micro flow devices using 3-D assembly", 12th Int. Conf. On Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Vol.2, pp.999-1002 (2003)
- (11) M. Kanai, D. Uchida, S. Sugiura, Y. Shirasaki, J. S. Go, H. Nakanishi, T. Funatsu, and S. Shoji : "PDMS microfluidic devices with PTFE passivated channels", 7th Int. Conf. On Micro Total Analysis Systems, Vol.1, pp.429-432 (2003)
- (12) 生田幸士 : 「マイクロ光造形法と医学応用」, BME, Vol.9, No.8, pp.38-44 (1995)

- (13) K. Ikuta, A. Takahashi, K. Ikeda, and S. Maruo : “Fully Integrated Micro Biochemical Laboratory Using Biochemical IC Chips”, IEEE 16th Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems, pp.451-454 (2003)
- (14) 庄子習一 : 「LIGA プロセス」, BME, Vol.9, No.8, pp.11-18 (1995)
- (15) O. Tabata, N. Matsuzuka, T. Yamaji, and H. You : “Fabrication of 3-Dimensional Microstructures Using Moving Mask Deep X-Ray Lithography (M²DXL)”, IEEE14th Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems, pp.94-97 (2001)
- (16) A. Kawamura, S. Ike, and S. Shoji : “Fabrication of Fine Metal Microstructures Packaged in the Bonded Glass Substrate”, *Proc. Of SPIE*, Vol.3893, pp.486-493 (1999)
- (17) H. Sato, T. Kakinuma, J. S. Go, and S. Shoji : “A Novel Fabrication of In-Channel 3-D Micromesh Structure Using Maskless Multi-Angle Exposure and Its Microfilter Application”, IEEE16th Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems, pp.223-226 (2003)
- (18) Y.-K. Yoon, J.-H. Park, F. Cros, and M. G. Allen : “Integrated Vertical Screen Microfilter Systems Using Inclined SU-8 Structures”, IEEE16th Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems, pp.227-230 (2003)
- (19) S. Shoji and M. Esashi : “Micro Flow Cell for Blood Gas Analysis Realizing Very Small Sample Volume”, *Sensors & Actuators B*, Vol.8, pp.205-208 (1992)
- (20) S. Shoji, B. H. van den Schoot, N. F. de Rooij, and M. Esashi : “Smallest Dead Volume Microvalves for Integrated Chemical Analysis Systems”, *Tech. Dig. 6th Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators*, pp.1052-1055 (1991)
- (21) P. F. Man, D. K. Jones, and C. H. Mastrangelo : “Microfluidic Plastic Capillaries on Silicon Substrate: A New Inexpensive Technology for Bioanalysis Chips”, *Proc. 10th Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp.311-316 (1997)
- (22) J. R. Webster and C. H. Mastrangelo : “Large-Volume Integrated Capillary Electrophoresis Stage Fabricated Using Micromachining of Plastic on Silicon Substrates”, *Tech. Dig. 6th Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators*, pp.503-506 (1997)
- (23) J. Xie, X. Yang, X. Q. Wang, and Y.-C. Tai : “Surface Micromachined Leakage Proof Parylene Check Valve”, *Proc. IEEE 14th Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems*, pp.539-542 (2001)
- (24) J. Xie, J. Shih, and Y.-C. Tai : “Integrated Surface-Micromachined Mass Flow Controller”, *Proc. IEEE 16th Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems*, pp.20-23 (2003)
- (25) Q. He, E. Meng, Y.-C. Tai, C. M. Rutherglen, J. Erickson, and J. Pine : “Parylene Neuro-Cages for Live Neural Networks Study”, *12th Int. Conf. On Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Vol.2, pp.995-998 (2003)

庄子習一 (正員) 1956年1月5日生。1984年3月東北大学大学院修了。(工学博士)。同年4月東北大学工学部助手, 助教授を経て, 1994年より, 早稲田大学理工学部助教授。1997年より, 同教授, 現在に至る。この間, マイクロセンサ, マイクロ流体デバイス, マイクロ・ナノ化学・生化学システムの研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 日本機械学会等会員。