SU-8/Fe コンポジットを用いた磁気駆動型マイクロバルブの開発

Development of magnetically driven micro valve using SU-8/Fe composite

鈴木 淳也* (学生員), 寺尾 京平*, 高尾 英邦*, 下川 房男*, 大平 文和*, 鈴木 孝明** (正員)

Junya SUZUKI (Stu. Mem.), Kyohei TERAOKA, Hidekuni TAKAO, Fusao SHIMOKAWA,
Fumikazu OOHIRA and Takaaki SUZUKI (Mem.)

In this study, we propose a magnetically driven micro valve made of magnetic composite with thick negative photoresist SU-8 and magnetic particles. It is able to fabricate a magnetically driven element using simple processing method based on micromachining technology by magnetic composite. To evaluate performance of the proposed microvalve, driving test under the external magnetic field was carried out. A prototype of the microvalve has the flow rate reduction rate of about 60%, and pressure resistance of 9 kPa.

Keywords: SU-8/Fe composite, micro valve, magnetic drive.

1 緒言

ポリマー材料は、高加工性、軽量性、低コストといった観点から注目されており、さまざまな分野で利用されている。MEMS (Micro Electromechanical Systems) 分野においても容易かつ柔軟な加工性、低剛性、化学的に不活性かつ高安定、低コスト等の観点からポリマー材料が注目されており、例えば、高アスペクト比、高解像度、高い再現性を有する厚膜ネガレジストが盛んに利用されている[1-4]。

また、ポリマー材料の特性を向上させ、より広い応用に向けたコンポジット化についての研究も進められている。コンポジット化の目的には、主材料の機械的特性向上、または、添加材料の機能性付加の2つが挙げられる。MEMS 分野においてもポリマーのコンポジット化は注目されており、Chiamori ら[5]は、厚膜ネガレジスト SU-8 のマトリクス内へ金ナノ粒子、ダイヤモンド、カーボンナノチューブを添加したコンポジットを提案し、パターン形成後の残留応力、粘度等の特性変化について報告している。Damean ら[6]は、SU-8 内へニッケル粒子を懸濁した磁気特性を付加させたコンポジットの UV 露光時における光の反射・散乱、磁性粒子による回折等の加工特性に関する評価を行っている。また、デバイス応用として、磁気駆動マイクロカンチレバーを製作し、その先端ヘミラーを接続した

マイクロミラーを報告している。また、Suter ら[7]はマイクロデバイスへの応用に向け、SU-8 内へ Fe₃O₄ を懸濁したコンポジットのヤング率や磁化特性等の諸特性を評価している。しかし、これまでに報告されている例では、コンポジットの機能性に関する報告が多く、マイクロデバイス応用に関する研究例は少ない。また、アプリケーションに関する報告例についても、デバイスを設計する上で重要となる機械的特性の変化や機能性に関する評価を行っているものは少ない。

そこで我々の研究グループでは、厚膜ネガレジスト SU-8 へ磁性純鉄粒子を分散させた SU-8/Fe コンポジットに関する機能性や機械的特性の評価と、マイクロデバイスへの応用についての研究を行っており、粒子の含有量による磁気特性・機械的特性・加工特性の変化について評価し、得られた特性を基にマイクロデバイスの設計・製作に関する研究を行ってきた[8, 9]。さらに、これらの設計製作技術を組み合わせて、SU-8/Fe コンポジットをベースとした各種のマイクロ流体デバイスを確立し、チップ上へ集積化した分析システムを提案、構築することを目的としている。

本研究では、これまでに取得している SU-8/Fe コンポジットに関する機械的特性および機能性の評価結果をデバイス設計および製作プロセスに適用し、マイクロ流体システムにおいて、サンプルや試薬などの流量やタイミングを調節する役割を持つ重要な要素であるマイクロバルブを製作する。バルブを SU-8/Fe コンポジットによって製作し、ソフトマイクロマシニング技術をベースとした簡易な加工方法によって微小駆動構

連絡先: 鈴木 孝明, 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 群馬大学

e-mail: suzuki.taka@gunma-u.ac.jp

*香川大学 **群馬大学

造が製作でき、従来のマイクロバルブ製作における課題である複雑駆動構造の形成や加工時間の短縮等の改善を図る。さらに、チャンバ内にバルブ素子を封入したマイクロバルブチップの耐圧性能とリーク量を評価することでその有用性について検証する。

2 SU-8/Fe コンポジット

SU-8/Fe コンポジットは、Fig.1 に示すような厚膜ネガレジスト SU-8 (日本化薬株式会社製) 内に、強磁性を持つ純鉄粒子 (株式会社高純度化学製、直径 3~5 μm) と、SU-8 と粒子界面の親和性を高める界面活性剤 DISPERBYK-111 (ビックケミー・ジャパン社製) を懸濁することで製作する。SU-8/Fe コンポジットは主材料に SU-8 を用いていることから、フォトリソグラフィによって基板上の任意の位置へ構造物を形成・配置できる。また、コンポジット内へ懸濁させる粒子含有量を調節することで、磁気吸引力を変化させることも可能である[9]。コンポジットの磁気特性は SU-8 内へ含有される純鉄粒子の分散度と含有量に大きく影響される。そのため、材料容器の自転と公転を組み合わせた遊星式攪拌法と超音波励起振動による攪拌の 2 種類を組み合わせた懸濁方法を用いて、SU-8 内で凝集体を形成している純鉄粒子の分散・均一化を図った。

本研究で使用する SU-8/Fe コンポジットの製作方法を述べる。初めに、遠沈管を用いて、懸濁する純鉄粒子の質量に対して 2.5%の界面活性剤を主材となる SU-8 3025 に加え、遊星式攪拌機を用いて 90 秒間攪拌する。次に、この SU-8 に対して 15wt%の割合で純鉄粒子を加え、10 分間の遊星式攪拌を行う。遊星式攪拌による攪拌後は超音波洗浄機を使用し、材料が入っている遠沈管へ励起振動を与えることで、凝集した純鉄を分散させる。この超音波攪拌を 60 分間行う。超音波攪拌後に再度、10 分間の遊星式攪拌を行うことで純鉄の分散度を高める。最後に、コンポジット内の気泡を除去するために、60 分間の真空脱気を行う。本研究では、バルブ構造のパターン精度を考慮し、粒子含有量を 15wt%と設定した。試料振動型磁力計を用いて、粒

Fig. 1 Construction materials of SU-8/Fe composite

子含有量 15wt%における SU-8/Fe コンポジットの飽和磁化について評価したところ約 100kA/m となり、同じ含有量で Fe₃O₄ や Ni 粒子を添加したコンポジットの飽和磁化である約 20kA/m と比較し、高い磁化特性を有することが分かっている[10]。

3 構成・原理

提案するマイクロバルブチップの構成と動作原理を示す。提案するマイクロバルブチップは、Fig.2 に示すように、マイクロ流路とチャンバを含む PDMS 製マイクロ流路とコンポジット素子を形成した基板から構成される。コンポジット素子はチャンバ端部に存在する PDMS (ポリジメチルシロキサン) ピラーによって回転支持され、チャンバ内に配置されている。コンポジット素子底面は、基板から浮いた構造 (リリース状態) にあり、外部から永久磁石による磁場を印加すると、基板上を面内駆動することが可能となる。

次に、リリース状態のコンポジット素子をバルブとして機能させる原理について Fig. 3 に示す。チャンバ高さに対して、流路高さを低くし、チャンバ内のバルブをその中間の厚さにすることで、バルブが流路を塞ぐ構造である。バルブは Normally closed 方式となっており、チップ内の流路に液体を流入すると、流路およびチャンバ内に流れ場が形成され、チャンバ内のバルブに流れ場による圧力が加わり、チャンバ出口を封止する位置まで素子が移動することによって CLOSE 状態となる。OPEN 状態に遷移するには、チップ外部から磁場を印加し、コンポジット素子をチャンバ中央部まで磁気駆動することによって、チャンバ出口を開くことによって、流体が流れる。

Fig. 2 Configuration of composite valve chip

(1) OPEN state (2) CLOSE state
Fig. 3 Driving principle of composite valve chip

Fig. 4 Process flow of composite element and PDMS microchamber

4 プロセスフロー・マイクロバルブチップ試作

提案するマイクロバルブチップはコンポジット素子を有する基板と PDMS 製チャンバからなり、それぞれを独立して作製し、最後に組み合わせて、犠牲層である Cr 層をエッチングリリース[11]することによって、完成する。Fig. 4 に提案するプロセスフローを示す。

初めに、バルブとなるコンポジット素子を含む基板の製作方法を示す。Si またはガラス基板上に、犠牲層となる Cr/Au/Ti 薄膜を成膜する。金属薄膜を堆積後にポジレジスト s1805 を保護膜として塗布し、フォトリソグラフィ及びウェットエッチングによってチャンバ底面形状にパターニングを行い、Cr, Au をエッチングする。その後、硫酸過水洗浄によって s1805 と Ti を除去する。洗浄後の基板へ SU-8/Fe コンポジットをスピコート塗布し、ソフトベークによって硬化させる。SU-8/Fe コンポジットの硬化後、フォトリソグラフィとウェットエッチングによって Cr 膜上にコンポジットバルブ素子が形成され、最後にチップサイズに基板をダイシングしてバルブチップ本体を作製した。

次に、PDMS チャンバの製作方法を示す。まず、ガラス基板上へマイクロ流路領域となる 1 層目の SU-8 3025 をスピコート塗布し、ソフトベークを行うことで硬化させる。硬化後に 1 層目 SU-8 を流路形状に UV 露光する。流路形状を UV 露光後、チャンバ領域となる 2 層目の SU-8 3050 をスピコート塗布し、ソフトベークを行い、硬化させる。2 層目の SU-8 をチャンバ形状に UV 露光を行う。SU-8 現像液を用いて 1 層目、2 層目の SU-8 をウェットエッチングにより一括で現像し、SU-8 製のマイクロチャンバ鋳型を作製する。最後に、マイクロ鋳型のパターンを PDMS へ転写すること

によって PDMS 製チャンバを作製する。

上記の方法にて製作したバルブ素子が形成された基板と PDMS 製チャンバを酸素プラズマ接合することでバルブチップを形成する。ボンディング後は、犠牲層 Cr を除去するためチャンバ内へ Cr エッチング液を一定流量で流し込むことでコンポジット素子をリリースして完成する。試作したマイクロバルブチップを Fig. 5 に、コンポジット素子の SEM 画像を Fig. 6 に示す。本研究では、コンポジットのパターン形成後に基板をダイシングしてチップを作製するため、基板を Si とすることで複数個の基板を同時製作することを可能とした。また、製作したマイクロバルブを実測したところ、PDMS 流路幅は 300 μ m、流路高さは 40 μ m、チャンバ

Fig. 5 Photograph of the fabricated valve chip

Fig. 6 SEM image of composite structure on release layer

高さは150 μm 、PDMS ピラーの直径は100 μm であった。コンポジット素子のサイズは、長さ1500 μm 、幅200 μm 、固定部外周の直径が420 μm 、ピラーを固定する内部の直径が280 μm 、コンポジット膜厚が70 μm であった。SEM 観測結果より、パターン形成を行ったコンポジットは粒子の含有が影響し、側面部の表面粗さが大きくなっているが、設計値に近いバルブ形状のパターンが得られていることが分かる。また、製作したチップ外部へ永久磁石を近づけ、磁場を印加させた際にバルブは PDMS ピラーを回転軸とした円運動を行うことが可能であることが分かった。

5 評価

マイクロバルブに求められる主な性能として、バルブ CLOSE 状態での耐圧、バルブ CLOSE 状態でのリーク量、OPEN/CLOSE の切り替え応答性が挙げられる。そこで、これらのバルブ性能を評価して、試作したマイクロバルブの有用性について検討する。実験構成図を Fig. 7 へ示す。送液液体はエタノールとし、シリンジポンプを用いて一定流量のエタノールをマイクロバルブチップの Inlet 側へ流し込み、チップ内をエタノールで満たす。このとき、三方活栓を用いることで、圧力計 (Keyence 社製, AP-52A) へエタノールを分岐させ、圧力計測を行う。バルブとなるコンポジットの駆動観測は、3D デジタルマイクロスコプ (Keyence 社製, VHX-1000) を用いて PDMS 上部から観測する。その後、下流のエタノールはシャーレ内へ排出され、その排出した質量をバルブチップからの排出量として電子天秤により測定する。コンポジット素子の駆動についてはチップ底面部に永久磁石 (材質:ネオジウム、

直径:5mm、高さ:3mm、表面磁束密度:0.28T) を操作することで OPEN/CLOSE 状態の遷移を行う。

作製したバルブチップの評価として、定常流下で外部磁場を印加させた際の磁気駆動実験を行う。また、コンポジット素子を OPEN/CLOSE 状態とした際の圧力・排出量計測実験を行い、耐圧性能と流量制御性能について評価する。最後に、外部磁場による OPEN/CLOSE 切り替え実験により応答性を評価する。

5.1 定常流下での磁気駆動実験

Normally closed 方式のマイクロバルブチップとして機能することを確認するために、チャンバ内へ一定流量のエタノールを送液し、定常流中のコンポジット素子へ流れ場による圧力が作用する環境下において、磁場を印加させた際にコンポジット素子が駆動する様子を観察した。

流量 0.5ml/min でチップ内へエタノールを送液し、コンポジット素子を CLOSE 状態とした。その後、永久磁石をチップ底面部へ設置し、コンポジット素子を OPEN 位置へ移動させた。磁場によるコンポジット素子の駆動観測結果を Fig. 8 へ示す。送液前の実験開始時にはコンポジット素子は OPEN 状態となっているが、

(1) Experimental system diagram

(2) Cross-sectional view of valve chip

Fig. 7 Experimental set-up

(1) Initial state (0 s)

(2) Close state by constant fluid flow (6 s)

(3) Open state applied by external magnetic field (8 s)

Fig. 8 Magnetically drive result in constant fluid flow

送液開始から 6 秒後に、コンポジット素子が流体の圧力によって流路を封止する CLOSE 状態となっていることが観測された。また、CLOSE 状態のコンポジット素子に対してチップ底面部から永久磁石によって磁場を印加させた際に、コンポジット素子を OPEN 状態へ遷移させることが可能であった。

コンポジット要素が Normally closed 方式として機能する際に必要なトルク T [N・m] の概算値を以下の式を用いて求めた。

$$I_z = M(a^2 + b^2)/12 \quad (1)$$

$$I = I_z + h^2 M \quad (2)$$

$$T = I\dot{\omega} + D\omega \quad (3)$$

ここで、 I_z は矩形板における重心の慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]、 I は回転軸中心の慣性モーメント、 h は軸間の距離 8.55×10^{-4} [m]、 M はコンポジット要素の質量であり、実測により 9.0×10^{-8} [kg]、 a 、 b はそれぞれ、矩形板の長辺： 1.71×10^{-3} と短辺： 2×10^{-4} [m]、 $\dot{\omega}$ はコンポジットが回転駆動する際の角加速度 [rad/s^2]、 D は粘性抵抗係数を表している。ここで、コンポジット要素を直方体と仮定し、液体の粘性抵抗を無視したコンポジット要素を駆動させるために必要な最低トルクの概算値を算出した。式(1)より、重心周りのモーメントを算出した結果、 $I_z = 2.223 \times 10^{-14}$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] であった。算出した重心周りの慣性モーメント I_z と式(2)の平行軸の定理を用いて、回転軸周りの慣性モーメントを算出すると $I = 8.802 \times 10^{-14}$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] となる。次に、コンポジット要素の回転運動における角速度と角加速度を画像解析ソフト Image J を用いて算出した。その結果、コンポジット要素は送液開始から 6 秒後に約 51.27 度回転駆動していることが分かった。この結果を用いて、角速度と角加速度を算出するとそれぞれ、 $\omega = 0.149$ [rad/s]、 $\dot{\omega} = 0.0249$ [rad/s^2] であった。算出された回転軸の慣性モーメント I と角加速度 $\dot{\omega}$ を式(3)へ代入すると、 $T = 2.190 \times 10^{-15}$ [N・m] となった。以上の結果から、提案するバルブチップは、流れ場によって作用する圧力と印加磁場の組み合わせによって駆動させることが可能であった。また、コンポジット要素に対して $T = 2.19 \times 10^{-15}$ [N・m] のトルクが負荷されることで Normally closed 方式の磁気駆動型マイクロバルブとして機能することが分かった。ただし、バルブ設計時の必要トルクの計算においては、送液する液体によって粘性抵抗が変化することから、特に高粘度の液体を制御する場合には粘性抵抗項を無視できなくなり、各液体での検証が必要となる。

5.2 OPEN/CLOSE 状態での圧力・流量評価

OPEN/CLOSE 状態での圧力差を計測し、提案するマイクロバルブチップの耐圧性能について評価した。本実験では、チップ内へエタノールを送液する前に、永久磁石を用いてコンポジット素子を OPEN または CLOSE 状態まで駆動させる。送液開始後は OPEN 状態における圧力計測では、磁場を印加させ続けることで OPEN 状態を維持させる。CLOSE 状態での圧力計測では、永久磁石を取り除き、流れ場によって作用する圧力で CLOSE 状態を維持させる。Fig.9 に OPEN/CLOSE 状態での圧力計測結果を示し、縦軸は圧力計測結果、横軸は送液時間を表している。10 分間エタノールを送液し、10 秒毎に圧力の計測を行った。OPEN 状態での最大圧力は約 1.1kPa、CLOSE 状態での最大圧力は約 9.0kPa であり、約 8.0kPa の圧力差が生じることを観測した。また排出量の計測結果はそれぞれ 132 μl 、49 μl であった。ここで、式(4)に排出量の低減率 R_{diff} の算出式を示す。

$$R_{diff} = \frac{R_{open} - R_{close}}{R_{open}} \times 100[\%] \quad (4)$$

ここで、 R_{open} はバルブ OPEN 状態での排出量、 R_{close} はバルブ CLOSE 状態での排出量を示す。上式に得られた排出量を代入し流量制御能力を評価した結果、最大で 63% の排出量の低減があったことが分かった。以上の結果から、試作したマイクロバルブは、送液時間 10 分間の実験では、耐圧性能が約 9.0kPa、排出量を最大で 63% 低減できることが分かった。本実験において、バルブ CLOSE 状態での排出量をゼロにすることができなかった要因として、コンポジット素子の表面粗さによる接触不良、基板と PDMS マイクロ流路の酸素プラズマボンディング時における PDMS 圧着時のチャ

Fig. 9 Time response of pressure under open/close state

ンパ領域の歪みが考えられる。コンポジット素子の側面を用いてマイクロ流路を封止する構造となっているため、これらの要因によって、流路封止時にギャップが発生、封止性能が低下し排出量の制御能力に限界ができたと考えられる。

また、CLOSE 状態で送液を続けると、圧力は上昇し続けたが、飽和傾向があることが分かる。10 分間の実験結果を用いて、以下の飽和曲線の近似式で飽和値を求めた。

$$P_{close}(t) = P_s \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{b} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

ここで、 t は送液時間[s]、 P_s は飽和圧力[kPa]、 b はフィッティングパラメータ、 $P_{close}(t)$ は送液時間 t [s] における圧力の実験値[kPa]である。本実験では、計測時間を 10 分間としているが、式(5)によって飽和圧力と飽和圧力までに達する経過時間を近似したところ、 $b=469.4$ において、飽和圧力は約 12.4kPa となった。

以上の結果より、製作したチップは流量 1 ml/min の送液において、飽和圧力が約 12.4kPa、流量低減率が約 63%の性能を有することが分かった。

5.3 磁気駆動による OPEN/CLOSE 切り替え評価

磁場による OPEN/CLOSE 状態の切り替え評価を行った。初めに、チップ底面部から磁場を印加し、コンポジットを OPEN 状態で維持した。OPEN 状態のチップ内へシリンジポンプを用いて流量 5 μ l/min でエタノールを流し込み、OPEN 状態で圧力が安定した後に磁場の印加を止めるとバルブが CLOSE 状態へと遷移し、圧力が上昇する。圧力が上昇した後に、再度、磁場を印加して、バルブを OPEN 状態へと遷移させた。以上の行程の圧力変化を計測することによってバルブ応答性を評価する。Fig. 10 に磁気駆動による OPEN/CLOSE 切り替え時の圧力計測結果を示し、縦軸は圧力計測結果、横軸は送液時間である。図に示す結果では、0 から 50 秒は圧力を安定させるために磁場を加えた状態とし、50~180 秒では磁場印加を停止し、OPEN 状態から CLOSE 状態へと遷移させた。180~400 秒間では再度、磁場を印加させ、OPEN 状態とした。また、Fig. 10 に示す圧力値は段階的に変化しているが、これはセンサの計測分解能が 0.1kPa であるためであり、コンポジット要素の運動は連続的であることをマイクロ스코プによる観測で確認している。磁場印加を停止することによって圧力増加が見られ磁場を再度、印加させ

Fig. 10 Pressure change by valve switching

ることによって圧力の減少を観測することができた。以上の結果から、定常流中において磁場によるコンポジット要素の駆動が可能であり、かつ、圧力変化の発生によってバルブとして機能できることが分かった。ただし、制御しようとする流量が大きくなっていくと、チップ内の圧力が増加することで、外部磁場によるコンポジット要素の OPEN 状態への応答が遅れる傾向があった。また、チップ内の圧力が 1.5kPa を超えた際には、コンポジット要素の OPEN/CLOSE 状態の遷移が困難となった。これは、流れ場によって形成される圧力が磁場による吸引力を上回ったことが原因であると考えられる。よって、追従性能を向上させるために、コンポジットの粒子含有量を増加、またはコンポジット要素の体積を増加することで、磁気吸引力を向上する必要がある。

6 まとめ

厚膜ネガレジスト SU-8 内へ磁性純鉄粒子を懸濁させた機能性複合材料である SU-8/Fe コンポジットを駆動構造体とした磁気駆動型マイクロバルブの提案および製作・評価を行った。提案するマイクロバルブの駆動方式として、流体の流れによって CLOSE 状態、外部から磁場を印加することで OPEN 状態となる Normally closed 方式のバルブチップを試作した。提案するマイクロバルブチップはソフトマイクロマシニング技術をベースとし、フォトリソグラフィとウェットエッチングのみによる簡易加工での製作を可能とした。製作したプロトタイプのパフォーマンス評価を行ったところ、流れ場によって作用する圧力と外部からの磁場印加によって OPEN/CLOSE を遷移させることができ、耐圧性能 9.0kPa、排出量低減率 63%の性能を持つバルブチップであることが分かった。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B) (No.26289067), 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(香川大学)の支援を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

(2015 年 5 月 25 日受付)

参考文献

- [1] J. M. Ruano-L'opez et al., "A new SU-8 process to integrate buried waveguide and sealed microchannels for a lab-on-a-chip", *Sensor and Actuators B: Chemical*, Vol. 114, pp. 542-551 (2006).
- [2] F. J. Blanco et al., "3-D Polymeric Microfluidic devices for BioMEMS applications", *Proceeding of SPIE*, Vol. 5839, pp. 127-137 (2005).
- [3] B. Cortese et al., "Characterisation of an irreversible bonding process for COC-COC and COC-PDMS-COC sandwich structures and application to microvalves", *Sensor and Actuators B: Chemical*, Vol. 160, pp. 1473-1480 (2011).
- [4] D. Kim, et al., "A bi-polymer micro one way valve", *Sensor and Actuators A: Physical*, Vol. 136, pp. 426-433 (2007).
- [5] H. C. Chiamori et al., "Suspension of nanoparticles in SU-8: Processing and characterization of nanocomposite polymers", *Microelectronics journal*, Vol. 39, pp. 228-236 (2011).
- [6] N. Damean et al., "Composite ferromagnetic photoresist for the fabrication of microelectromechanical systems", *Journal of Micromech. Microeng.*, Vol. 15, pp. 29-34 (2005).
- [7] M. Suter, et al., "A photopatternable superparamagnetic nanocomposite: Material characterization and fabrication of microstructures", *Sensor and Actuators B: Chemical*, Vol. 156, pp. 433-443 (2011).
- [8] 三浦ら, 感光性ナノコンポジットを用いた磁気駆動型ポリマーMEMS ミラーの駆動特性評価, 電気学会第 29 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, SP1-11, (2012).
- [9] 植田ら, 感光性磁気ナノ複合材料を用いた電磁マイクロポンプの開発, 日本 AEM 学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 202-207 (2014).
- [10] T. Nakahara et al. "Self-Aligned Fabrication process for a Active Membrane Made of Photosensitive Nanocomposite", *Technical digest of 25th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 1181-1184 (2012).
- [11] A. Ezkerra, et al. "A microvalve for a lab on a chip application based on electrochemically actuated SU8 cantilevers", *Sensor and Actuators B: Chemical*, Vol. 155, pp. 505-511 (2011).