

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760201

研究課題名(和文) オンチップ分散配置駆動機構を有するマイクロシステムのアセンブリフリー加工法の開発

研究課題名(英文) Development of an assembly-free fabrication process for microsystems driven by distributed actuators on a chip

研究代表者

鈴木 孝明 (SUZUKI TAKAAKI)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：10378797

研究成果の概要(和文)：本研究では、MEMS 製造システム技術のフレキシブル化・ハイスループット化を目的として、駆動機構を有する複数の機能を集積化したマイクロシステムを単一マスクパターンからアセンブリフリーで作製する方法を開発した。本技術の特徴は、複雑に流路が入り組んだマイクロ流体システムの作製と、さらにその内部に磁気駆動素子を組み込むことをアセンブリフリーでできる点にある。作製方法として、独自の加工技術である単一マスク回転傾斜リソグラフィにより、①フォトレジストを塗布して流路構造を作製し、②さらに①とは逆型のフォトレジストに磁気微粒子を懸濁し、流路内に導入して同じマスクを用いて露光することによって、磁気駆動素子をマイクロ流路内に作製・同時設置する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Composite material made of magnetic nanoparticles/SU-8 is expected to be a material of microactuators which can be controlled by external magnetizing field and easily fabricated by only photolithography. In this study, we evaluated the dispersivity of the proposed nanocomposites mixed by a planetary and an ultrasonic stirrers. As a result, the planetary stirrer achieves higher dispersivity than the ultrasonic one. Moreover, we propose assembly-free integration method for driving elements internally fabricated by infusing liquid nanocomposite and sacrificial resist into a microchannel before exposing. By a magnetic driving test in the microchannel, it is confirmed that the fabricated element made of the proposed nanocomposite moved with the external magnetic field applied by an electromagnet.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：マイクロ・ナノ加工、MEMS、MicroTAS

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノデバイス、マイクロマシン、フォトリソグラフィ、流体工学、ナノコンポジット

1. 研究開始当初の背景

近年、高度化するマイクロ領域の研究ニーズに対応して、半導体製造技術に基づいたMEMS加工プロセスは複雑化、多段階化する一方である。従来のMEMSプロセスで駆動構造を有する3次元マイクロ構造物を作製する場合は、多数のマスクを利用したり（アライメント）、別工程で作製した構造物を張り合わせたり（ボンディング）、駆動素子を実装（アセンブリ）する必要があり、複雑な工程となっている。また、駆動方法についても静電、圧電、電磁、熱などを初めとして様々な方法が取られているが、それらの駆動素子作製についても、スパッタや電鍍といった長時間の製作工程が必要となることが多い。このような問題点に対応するため、簡単な加工プロセスで駆動素子を作製する方法として、厚膜レジストに磁性粒子を懸濁させた複合材料を用いて駆動素子を作製する研究が行われている。

ナノ磁性粒子と光反応性樹脂であるSU-8（厚膜レジスト）からなる複合材料は、シリコンや金属に比べヤング率が低く、大きな変位を得ることができ、非接触磁気駆動が可能な点や、制御しやすいといった特長がある。また、露光法によるパターニングといった少ない製作工程で容易にマイクロ構造体が成形可能であるといった利点もある。

Dameanら[J. Micromech. Microeng., Vol. 15, pp. 29-34, 2005.]は、露光に使用する光の波長である365nmよりも小さな粒径80~150nmのニッケルナノ粒子を用いてSU-8との複合材料を作製し、重量比による光透過性の評価を行うと共に、磁気駆動型マイクロミラーを作製し、永久磁石による外部磁場とアクチュエータ変位量の関係を求めている。また、Suterら[Proceedings of the 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, pp. 869-872, 2009.]は、粒径13nm程度の Fe_3O_4 を12wt%で懸濁したSU-8の磁化曲線を計測すると共に、分散剤を使用し均一に分散した様子をTEM観察し、カンチレバー型素子の駆動特性を計測している。以上のように、従来研究では、粒子の材料種による磁氣的性質の評価や、カンチレバー型素子の駆動特性についての評価が行われている。特に、駆動特性に関しては、厚膜レジストのヤング率がシリコンなどと比較して低いことから、大変位が比較的容易に得られることが分かっている。しかし、露光法によって作製した磁気駆動素子について、固定部のない、移動が自由な構造についての駆動特性評価や、ナノ複合材料の加工精度、分散度などの評価は十分になされていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、フォトリソグラフィに

よるパターニングのみによって作製可能なマイクロ流路内で駆動することを想定した磁気駆動素子の作製を目的として、ナノ磁性磁子の中でも比較的安価に購入することが可能な強磁性体である Fe_3O_4 （粒径20~30nm程度）とSU-8からなる複合材料について、その混合法の検討と、分散度の評価を行う。具体的には、複合材料の加工性としてナノ磁性粒子の含有率（重量比）による分散度の変化、露光量による加工精度の変化について評価するとともに、非磁性のカンチレバー先端に磁気駆動素子を貼り付けた簡易な試験法による吸引力の評価、また、マイクロ流路内での搬送性を検討するため、流路内での磁気駆動素子の駆動特性について検討を行った。

3. 研究の方法

本研究では、マイクロ流路内で駆動することによって、マイクロポンプ、マイクロバルブ、マイクロミキサの駆動素子となる構造をフォトリソグラフィによりパターニングすることを主な目的とすることから、必要とする構造物の加工精度は、数十~数百 μm となる。本研究では、加工精度が数~数百 μm の厚膜レジストである日本化薬社製の厚膜ネガレジストSU-8に、ナノ磁性粒子を懸濁させたものを複合材料として使用した。ナノ磁性粒子は粒子径20~30nmの強磁性 Fe_3O_4 を使用した。必要とする加工精度よりも粒子径は十分小さいため、構造物の加工には影響をほぼ与えないと考えられる。また、ナノ磁性粒子をSU-8内で均等に分散させるため、分散剤を使用している。

4. 研究成果

(1) 分散度評価 提案する複合材料について、ナノ磁性粒子とSU-8の重量比の変化による分散度を評価した。分散剤を混合しても、ナノ磁性粒子の凝集（クラスタ）は避けにくいのが、作製する構造物のサイズが微細化するにつれて磁性粒子のクラスタサイズの影響が顕著になる。また、攪拌が不均一でクラスタが局所に偏って存在した場合、磁気駆動素子の磁化特性が不均一になり、磁場に対する反応に影響を与える可能性がある。そこで、様々な重量比を持つ複合材料からなる素子を光学顕微鏡で撮影した透過光写真について画像解析を行い、クラスタの面積、数を計測し、攪拌方法について評価を行った。今回は、超音波洗浄機を用いた超音波によって発生するキャビテーションによる攪拌法と、遊星式攪拌装置（クラボウ、KK-50S）による攪拌容器の自転と公転を組み合わせた攪拌法を比較した。重量比は5~15wt%の2.5wt%きざみで掃引した。透過光を使用し、対物レンズ50倍(NA0.5)を用いてCCDカメラで撮影、画像解析を行った例を図1に示す。

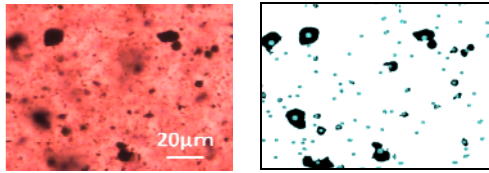


図1 顕微鏡像と2値化像

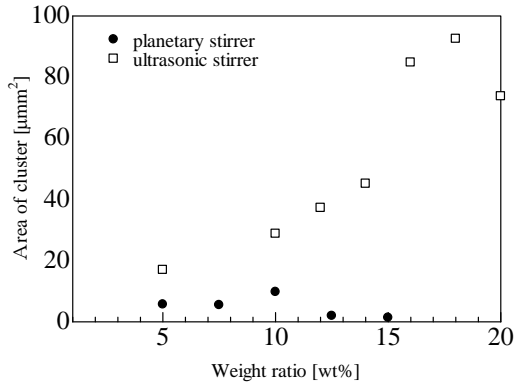


図2 重量比に対するクラスタ面積の変化

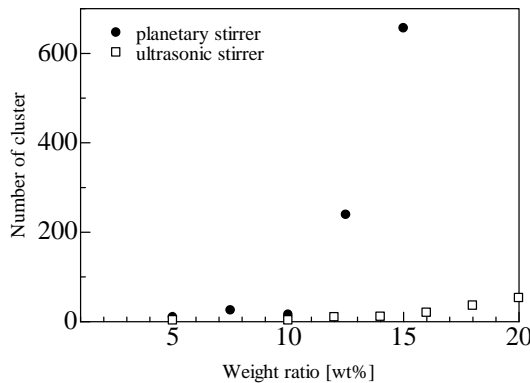


図3 重量比に対するクラスタ数の変化

図2に、重量比に対するクラスタ面積の変化を示す。黒丸が遊星式攪拌装置、白四角が超音波攪拌を行った結果である。図より、超音波攪拌では重量比が増加するに従いクラスタ面積が大きくなっているのに対し、遊星式攪拌装置を用いた場合にはクラスタ面積に大きな変化は見られない。また、攪拌方法を比較すると遊星式攪拌装置を用いた場合の方がクラスタ面積が全領域で小さくなるのが分かった。本評価方法においては、光学顕微鏡の解像度以上に微細な構造は評価できないが、平均クラスタ面積が小さいほど、分散度が高いといえる。

図3に、重量比に対するクラスタ数の変化を示す。超音波攪拌に比べて遊星式攪拌装置

の方が、クラスタ数の増加が顕著であることが分かる。以上の2つの図より、遊星式攪拌装置の方が、クラスタ面積が小さくなり、クラスタ数が多くなるということから、分散度が高いことが分かった。

(2) 加工精度評価 厚膜レジストであるSU-8は化学増幅型のネガティブ型フォトレジストであり、紫外光(365 nm)により酸が発生、PEB (Post Exposure Bake)により架橋反応が促進し、高アスペクト比の構造物ができる。ネガティブ型であることから露光量が過剰になると、構造物がマスク開口サイズよりも大きくなる傾向があり、また、ナノ磁性粒子がSU-8内に存在することによって露光された光が回折、拡散、減衰されることも考えられる。そこで加工精度を重量比と露光量の関係について評価を行った。評価に用いるサンプル形状は一辺が100μmの正方形、円形、三角形であり、マスクの実測値と作製した構造物の実測値の差を求めた。

露光量を2000mJ/cm²で固定し、重量比を5~15wt%の2.5wt%きざみで作製したサンプルについて、マスクサイズと作製構造物の寸法差を計測した結果を図4に示す。■が正方形、●が円形、▲が三角形の構造である。いずれの場合も、露光量が過剰であり、マスクサイズよりも作製した構造物のサイズの方が大きくなっている。また、正方形、円形については、重量比が高くなるにつれて、寸法差が減少している。これは、重量比が高くなり光の透過率が下がり、結果として露光量が少なくなったためと考えられる。三角形形状については、露光量との相関関係が見られなかったが、これは鋭角形状で構成されているため、露光量よりも現像工程の影響が大きいことが考えられる。

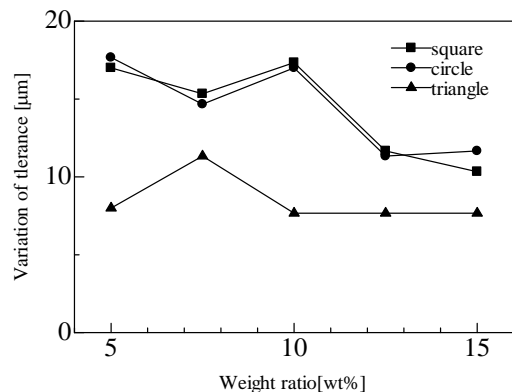


図4 マスクサイズと作製構造物の寸法差

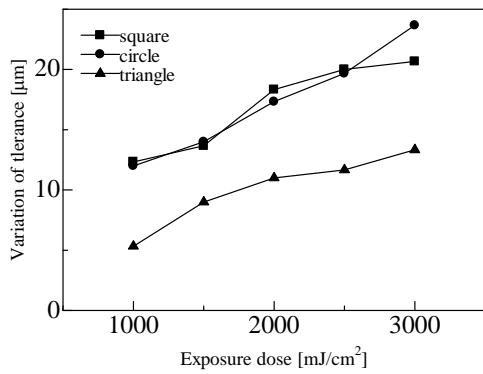


図5 露光量に対する加工精度の変化

また、ナノ磁性粒子を 10wt%で懸濁した複合材料について、露光量を 1000~3000 mJ/cm²と変化させた場合の、露光量に対する加工精度の変化を図5に示す。横軸に露光量、縦軸にマスクサイズとの寸法差を示す。■が正方形、●が丸、▲が三角の構造の結果をしめす。図より、露光量が増加するに従って、過露光によりマスクサイズとの寸法差が大きくなっている事が分かる。

(3) 吸引力評価 複合材料を用いて作製した試験片の吸引試験を行った。吸引力はマイクロ構造物中の磁性粒子の量、外部磁場の大きさに影響されることが考えられる。吸引力の簡易的な計測法として、アルミニウム製のカンチレバー先端に提案する方法で作製した磁気駆動素子を取り付け、電磁石に流れる電流値を変化させながら、吸引力により生じたたわみ量から複合材料の重量比に対する吸引力を計算した。試験片としては、18mm×18mmのカバーガラスに複合材料をスピコートしたのち全面露光を行ったものを使用した。複合材料内のナノ磁性粒子の割合は 5~15wt%の 2.5wt%きざみで攪拌した。また、印加する電流値は 10~50mAとした。

図6に電流値に対する吸引力の測定結果を示す。横軸が電流値、縦軸がレーザー変位計により測定したカンチレバー変位を用いて算出した吸引力である。図より、重量比、および電流値が増加するにつれて吸引力が大きくなることがわかった。これは重量比が増加するに従って複合材料内の磁性粒子の量が増え、外部磁場の影響をより大きく受けるためと考えられる。

(4) 流路内での駆動特性 提案する複合材料によって、マイクロポンプやバルブ、ミキサなどの駆動素子を作製し、マイクロ流路内で駆動する磁気駆動素子を想定し、外部磁場によって素子を流体内で駆動する実験を行った。流路内にエタノールと作製した磁気駆動素子(直径 300μm、厚み 100μm)を入れ、電磁石によって吸引を行った。駆動の様子を

実体顕微鏡で観察し CCD カメラにより動画撮影した。動画を 1 秒あたり 30 コマ撮影し、ある一定距離の間を移動するのにかかった時間をコマ数から計算し、速度を算出した。なお、電磁石にかける電流値は 50mA として実験を行った。図7に重量比の異なる駆動素子による速度変化を示す。横軸が重量比、縦軸が速度を表す。複合材料中に含まれる磁性粒子の割合が増加するに従って、速度も増加傾向にあり、前章の吸引力試験の結果と一致していることが分かる。

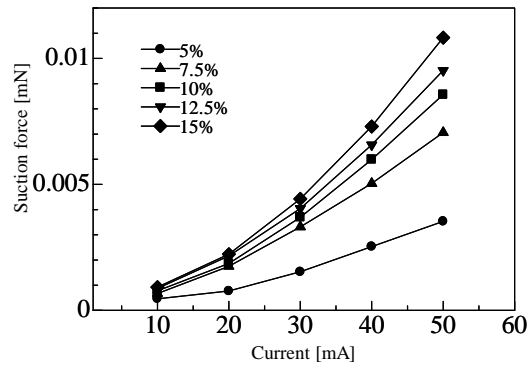


図6 印加電流に対する吸引力の変化

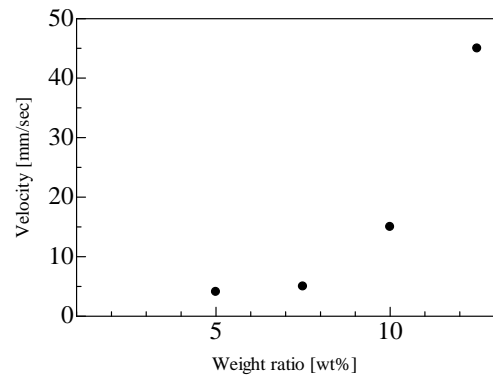


図7 流路中での素子の移動速度

(5) まとめ 本研究では、厚膜レジストである SU-8 とナノ磁性粒子からなる複合材料を用いたマイクロ磁気駆動素子の作製について検討した。作製したマイクロ磁気駆動素子について、混合法の違いによる粒子の分散度の評価を行い、遊星式混合装置の方が、ナノ粒子をより均一に分散できることが分かった。また、加工精度について検討を行ったところ、現像中の剥離を抑制するためには、過露光となる露光量が必要であることが分かった。また、吸引試験、流路内での駆動特性試験から、複合材料の駆動特性を評価し、流路内で駆動するマイクロ磁気素子への可能性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 平丸大介, 鈴木博之, 神野伊策, 小寺秀俊, 鈴木孝明, 多重マスク回転傾斜露光法による3次元複雑マイクロ構造の作製, 日本AEM学会誌, 査読有, Vol. 18, No. 4, pp. 377-382, 2010.
- ② 鈴木孝明, 単一マスク回転傾斜露光技術の応用展開, (解説論文), 電子材料(工業調査会), 査読無, pp. 28-33, 2010.
- ③ 鈴木孝明, アセンブリフリー回転傾斜露光法を用いた細胞アレイの作製とその応用, (解説論文), エレクトロニクス実装学会誌, 査読無, Vol. 13, No. 3, pp. 194-199, 2010.

〔学会発表〕(計18件)

- ① Y. Hosokawa, T. Nakahara, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, and T. Suzuki, Fabrication of a Magnetically-Driven Microstructure Made of Magnetic Nanoparticles/SU-8 Composite, Proceedings of the 6th International Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, 査読有, pp. 74-75, 2011/5/4-6, Lucerne, Switzerland.
- ② 赤松幹夫, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明, スプレー塗布による厚膜レジストの膜厚制御性に関する研究, 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会, pp. 30-33, 2011/3/22-23, 東京電機大学(東京都).
- ③ T. Mishima, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, and T. Suzuki, Crystalline Anisotropic Dry Etching for Single Crystal Silicon, Technical digest of 24th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 査読有, pp. 221-224, 2011/1/23-27, Cancun, Mexico.
- ④ 鈴木孝明, マイクロ・ナノ加工技術とその応用, 将来加工技術第136委員会 第11回研究会(合同), 日本学術振興会 将来加工技術第136委員会, 招待講演, 2010/11/19, 学士会館(東京都千代田区).
- ⑤ H. Suzuki, D. Hiramaru, K. Terao, H. Takao, F. Oohira, H. Kotera, and T. Suzuki, A High-Throughput FISH Microchip for Clinical Genetics, Proceedings of The 14th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, 査読有, pp. 702-704, 2010/10/3-7, Groningen, Netherlands.

- ⑥ 鈴木孝明, アセンブリフリー回転傾斜露光法とそのバイオ応用, 第117回講演会ラドテック研究会, 招待講演, 2010/4/14, 学士会館(東京都千代田区).
- ⑦ 細川祐揮, 中野哲郎, 寺尾京平, 高尾英邦, 大平文和, 鈴木孝明, ナノ磁気粒子とSU-8からなる複合材料を用いたマイクロ磁気駆動構造の作製, 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会, pp. 114-117, 2010/3/16-17, 東京電機大学(東京都).
- ⑧ T. Suzuki, Y. Hagio, D. Hiramaru, K. Terao, A. Okonogi, I. Kanno, and H. Kotera, Three Dimensional Multi-Layered Flow Generator, Proceedings of The 13th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, 査読有, 2009/11/1-5, Jeju, Korea2-54, 2009.
- ⑨ T. Suzuki and K. Terao, Development of an Assembly-Free 3D Lithography for Bio-Microsystems, 招待講演, IEEE-NANOMED, 2009/10/18-21, TAINAN, TAIWAN.
- ⑩ T. Suzuki, H. Yamamoto, I. Kanno, M. Washizu, and H. Kotera, Assembly-Free 3-D Microfabrication Process Using Single-Mask Multidirectional Photolithography, Proceedings of the 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 査読有, pp. 1900-1903, 2009/6/21-25, Denver, Colorado, USA.

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称: 微小構造体の作製方法

発明者: 鈴木孝明、小寺秀俊、神野伊策、平丸大介

権利者: 香川大学、京都大学

種類: PCT 出願

番号: PCT/JP2010/068047

出願年月日: 2010年10月14日

国内外の別: 国外

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~suzuki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 孝明 (SUZUKI TAKAAKI)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号: 10378797