

丸文研究奨励賞 受賞者

岩瀬 英治

早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 機械科学・航空学科
准教授



マイクロ構造に固有の力学を活用したMEMSの形成法の開拓と応用

マイクロサイズの折り紙・積み木、ナノ粒子による自己修復配線

研究の背景

現在Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) デバイスは、スマートフォンや車載用のセンサなどさまざまな分野で利用されている。しかしながら、数百 μm ~数十nmのマイクロ・ナノサイズの領域と我々の身近な数m~数mmといったサイズの領域とでは、支配的となる物理現象が異なる場合が多い。そこで、マイクロ・ナノサイズの領域で特に強く働く力や物理現象を有効に活用すること、またそれによりこれまで実現が困難であった機能をデバイスに付与することを目的として研究を行った。

研究の成果

前述のような観点から行った研究の範囲は多岐に渡っている。例えば、マイクロバ

イスの加工技術に関しては、従来のマイクロ加工技術の多くは半導体加工技術に由来しているため2次元の精密加工は得意であるが、3次元のMEMSデバイスは現在でも製作・加工が容易ではないという側面がある。そのような中で、磁場を利用した“折り紙型”の「磁気組立て」[1, 2]や、付着力の制御を利用した“積み木型”の「スタンピング転写」[3, 4]と呼ぶマイクロ3次元構造体の形成技術を発案した。さらに、電場を用いた「自己修復型金属配線」[5]もその成果に含まれる。砂鉄が磁石の上に立つことや、モニタに付着した埃が取れにくいように、磁場や電場、付着力はマイクロ・ナノ領域において支配的となる力である。これらを理論的に解析し有効に利用することで、センサの多軸化やフレキシブルデバイス化・異種材料の統合化・自己修復機能などのこれまでに実現されていなかった機能をデバイスに付与するこ

とを実現した。これらの手法は相補的に用いることができ、これらを用いることで非常に幅広い3次元MEMSデバイスやこれまで実現できなかったフレキシブルMEMSデバイスが実現可能となる。

1. マイクロサイズの折り紙

— 磁気異方性を用いた順序制御可能な一括組立て —

磁石の上に砂鉄が立つことの原因である形状磁気異方性モーメントを利用することで、基板上に多数配列された展開図形状のマイクロ構造を一括して組立てる手法である。本手法は、図1のように通常のMEMS加工技術を用いて基板上に2次元的な展開図形状を製作しておき、折り紙を折るように3次元形状を組み立てるため、2次元の精密加工が得意な通常のMEMS加工技術の利点を生かした手法であるといえる。また、組立てのために必要な“仕掛け”が少ないことが大きな特徴である。まず、起き上がらせたい部分に磁性体薄膜(NiやNiFeなど)を成膜するだけで良く、組立ても外部の場(磁場)を利用した組立てのため、基板を永久磁石の上に置くだけで良い。そのため組み立った後に不要なものがほとんどなく、またウェハレベルのサイズで一度に組み立てられるのが大きな特徴である。この特徴により、幅広い3次元MEMSデバイスの製作への利用が非常に容易である。多数の構造を一括して組み立てる方法のほか、組み立てる力として使っている磁気異方性モーメントとヒンジの機械剛性を理論的に考察することにより、あるひとつ無次元量を用いて組立て順序を制御できることを示している[2]。また、この手法を用いたMEMSデバイスの実証も数多く行っている。

図1 磁気組立てを用いた上下動可能な磁気駆動型MEMSアクチュエータ。外部の磁場により、2次元の展開図構造から3次元形状に起き上げる。起き上げる場所や順序を磁性体の有無や体積によって制御することができる。

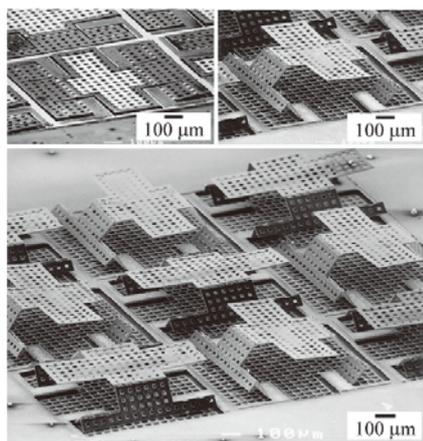
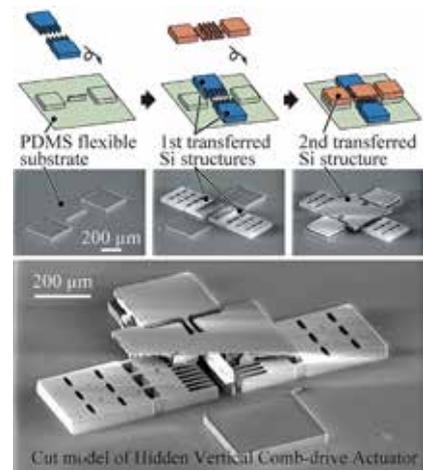


図2 スタンピング転写を用いてフレキシブル基板上に製作したhidden vertical comb-drive actuator。単結晶シリコンでできたマイクロサイズの部品を積み木のように積むことで、3次元MEMSデバイスをフレキシブル基板上に実現している。



2. マイクロサイズの積み木

— スタンピング転写を用いたMEMSデバイスの製作 —

別々の基板上で製作した微小構造を別の統合基板上へ3次元的に統合する手法である。この手法には2つの大きな利点がある。1つ目は複雑な3次元構造を有するMEMSデバイスを積み木を積むように容易に製作が可能となる点、2つ目は同一の基板では製作が困難である材料を統合することが可能な点である。そのため本手法により、高温プロセスを含むMEMS加工技術を用いて製作した高精度な構造や高感度なセンサを、熱に弱いフレキシブル基板上に統合することが可能となる。図2は、通常のMEMS加工技術では製作プロセスが煩雑となる単結晶シリコンの hidden vertical comb-drive actuator を2回のスタンピング転写を用いて、フレキシブルなシリコンゴム基板上に製作したものである。上部の平板の下に櫛歯構造があるため、高い転写位置合わせ精度も要求されるものである。このような3次元構造を有するシリコンMEMSデバイスを、スタンピング転写を用いてシリコンゴム基板上に製作できることを示した。

3. ナノ粒子による自己修復配線

— 金属ナノ粒子の電界トラップを用いた自己修復型金属配線 —

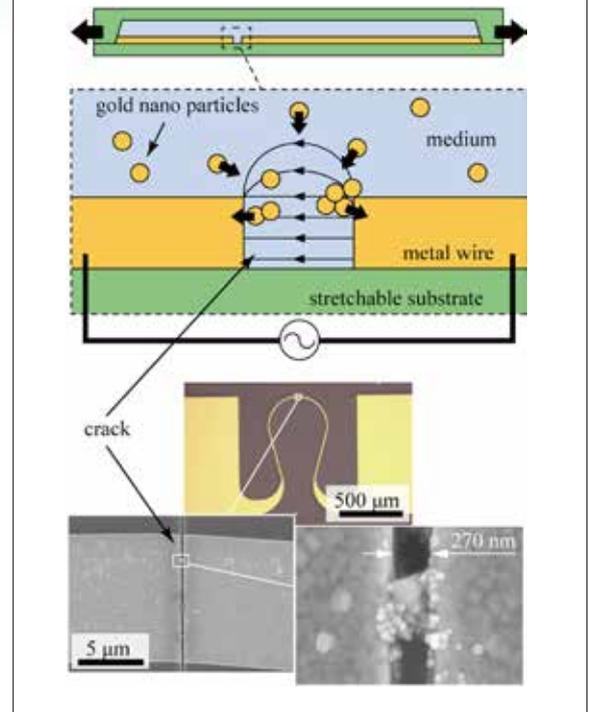
伸縮可能なフレキシブルデバイスの配線材料として、導電体をゴム材料などに混ぜた導電性エラストマがあるが、金属に比べると導電率が低い。そこで、導電率の高い金属配線に自己修復機能を付与することで、高伝導率・高伸縮耐性の配線ができないか考えた。まず、自己修復配線に求められる特性としては、配線にき裂が生じた場合にき裂の場所や大きさを知らずともき

裂部のみを選択的に修復する「自己診断性」と、き裂部以外やき裂修復後に過剰な修復を行ない「選択的修復性」を持つことであると考えた。この自己修復配線を実現するために、金属ナノ粒子の電界トラップ現象を用いることを考えた。金属ナノ粒子の電界トラップ現象は非一様な電場が存在する領域で生じる。そのため、電圧が印可された配線において、図3のようにき裂が生じると、き裂が生じた部分のみに電場が生じるため、き裂の大きさや位置に関わらずき裂部のみを選択的に修復することができる。また、一度き裂が修復されると、電場が消失するため、過剰な修復も行われない。このように、マイクロ・ナノサイズにおいて特異的な電界トラップ現象を用いることで、自己診断性と選択的修復性を有する金属配線の自己修復という全く新しい機能を実現した。

将来の展望

本研究成果は新たな機能を有するMEMSデバイスの領域を拓いたものであり、さらには今後フレキシブルMEMSデバイスの新たな展開を拓くものであると考えている。これらの研究成果は新たな機能を有するMEMSデバイス分野を開拓するという大きな1つの目標のために行ってきたものであり、相補的に用いることができる。例えば、伸縮可能な3次元形状を有する高機能センサシートは、センサ部を「磁気

図3 金属ナノ粒子の電界トラップを用いた自己修復型金属配線。フレキシブル基板上の金属配線を覆うように金属ナノ粒子分散溶液が配置されている。き裂に生じた電場により、き裂部のみが選択的に金属ナノ粒子により修復される。



組立て」によって3次元的に起き上げ、「スタンピング転写」によりフレキシブル基板上に配置し、配線には「自己修復機能」を付与することで実現できる。単結晶シリコンを用いた高感度なMEMSセンサをフレキシブル基板上に統合することが可能となり、高性能・フレキシブルという利点を併せ持つ実用性の高いデバイスが実現可能となると考えている。

最後に、本研究成果は多くの共同研究者の方と行ったものであり、関係する皆様に深く感謝申し上げます。また、この度の受賞を励みに今後ますます研究を進めてゆきたいと考えております。

References (参考文献)

- [1] Eiji Iwase, Isao Shimoyama, "Multi-Step Sequential Batch Assembly of Three-Dimensional Ferromagnetic Microstructures with Elastic Hinges," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, no. 6, pp. 1265-1271, 2005.
- [2] Eiji Iwase, Isao Shimoyama, "A Design Method for Out-of-Plane Structures by Multi-Step Magnetic Self-Assembly," *Sensors and Actuators A-Physical*, vol. 127, no. 2, pp. 310-315, 2006.
- [3] Hiroaki Onoe*, Akihito Nakai*, Eiji Iwase*, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, "Temperature-Controlled Transfer and Self-Wiring for Multi-Color LED Arrays," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 7, 075015, 2009. (*: equal contribution)
- [4] Kentaro Noda, Hiroaki Onoe, Eiji Iwase, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, "Flexible Tactile Sensor with Thin Piezoresistive Cantilevers for Shear Stress Measurement," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 22, no. 11, 115025, 2012.
- [5] Tomoya Koshi, Eiji Iwase, "Self-Healing Metal Wire using Electric Field Trapping of Metal Nanoparticles," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 6S1, 06FP03, April 21, 2015.