

# 機能性薄膜の MEMS デバイスへの 導入と応用展開

神野 伊策

神戸大学大学院工学研究科 機械工学専攻  
連絡先 kanno@mech.kobe-u.ac.jp

## 1. はじめに

高度情報化社会の進展と共に、身の回りにある家電等の電気・電子機器や自動車・ロボット等の機械製品の知能化が進められ、機能性の向上と共に複数の機能を集積化が求められている。知能化製品の頭脳となる部分は、コンピュータによる情報処理が担当するが、各種データの収集、また処理された結果を機械的な運動として出力する要素としてセンサ、アクチュエータがその機能を分担することになる。つまり、これら個々のセンサ、アクチュエータの機能が全体のパフォーマンスを形作ることになり、最終性能を決定するための重要な開発課題となる。

半導体微細加工技術を用いて作製する MEMS デバイスは、センサ、アクチュエータの小型化、高機能化、集積化、更に低コスト化に直接結びつく技術として幅広い分野でその実用化が進められている。特に、Si を構造部材とすることで CMOS との集積化が可能となり、また確立された Si 微細加工技術を応用することで、対向電極間の引力を利用した静電アクチュエータやキャパシタ構造、また Si のピエゾ抵抗効果を利用した力学量センサへの展開が容易であり、微細な 3 次元構造から生まれる機能性を利用したデバイスがこれまで数多く開発されてきた。MEMS 技術に占める Si 材料およびその微細加工技術は、前述の通り大きなメリットがある一方、静電アクチュエータの発生力は弱く、また発生力は引力のみとなるための制限があり、一方センサにおいても微小なギャップ間隔を維持するための複雑な構造、更に脆性材料である Si そのものの耐久性の問題が指摘されている。

Si-MEMS を補完または新しい機能性を付与する手段として機能性材料の導入が注目されている。本来半導体加工技術は異種材料の導入による汚染、および歩留まり低下を回避するため、複合酸化物材料等の導入には消極的であったが、機能性デバイスを電子部品の側からみた場合、強誘電体材料をはじめとする各種機能性材料が幅広く応用されており、現状において電子部品の小型化に向けた要求と MEMS の求める高機能化の方向性がクロスするところに来ていると言える。MEMS デバイスに機能性材料を集積化するためには、フォトリソグラフィによる微細加工の必要性から薄膜材料として形成することが前提となるが、特に機能性材料の薄膜化技術とその評価技術が機能性材料 MEMS の重要な研究対象となる。

## 2. 圧電 MEMS とその特長

我々の研究室では、酸化物圧電薄膜を用いた MEMS に関する研究を行っている。圧電効果は圧電セラミックスとして既に幅広く応用展開されており、その中心となる PZT セラミックスはその優れた圧電性から MEMS においても広く用いられている。圧電材料はご存じの通り、材料そのものが電気機械変換作用を有するため、単純な構造でセンサ、アクチュエータが構成でき、また高い変換効率はマイクロアクチュ

エータの低電圧、低消費電力化、またマイクロセンサにおける高感度化に大きく貢献し、従来の Si-MEMS の限界を超えた新しい機能性マイクロデバイスとして期待されている。

図 1 はこれまで我々が研究してきた圧電 MEMS デバイスの例を挙げている。それぞれの素子の名称、機能は以下の通りである。

- MEMS DM: 高分解能眼底観察を目的とした波面補償可変ミラー(Deformable Mirror). すばる望遠鏡にも用いられている天文学分野の技術を応用し、水晶体等で乱れた眼底像の波面収差を補正する<sup>1) 2)</sup>.
- Micro-pump: 圧電薄膜により流路壁面に誘起した進行波により流体を搬送するバルブレスポンプ. 関連技術がインクジェットヘッドにも応用されている<sup>3)</sup>.
- MEMS Scanner: レーザを反射、投影して映像を表示するレーザディスプレイのミラー. ステンレス基板上に形成した圧電薄膜によりミラーを走査する<sup>4)</sup>.
- Gyro sensor: 角速度を検出する振動ジャイロセンサ. 単純なカンチレバーの面内振動にコリオリ力が発生し、その振動から回転速度を測定する.
- MEMS Switch: ミリ波帯域の通信切り替えスイッチ. 圧電駆動により低電圧化が期待される<sup>5)</sup>.

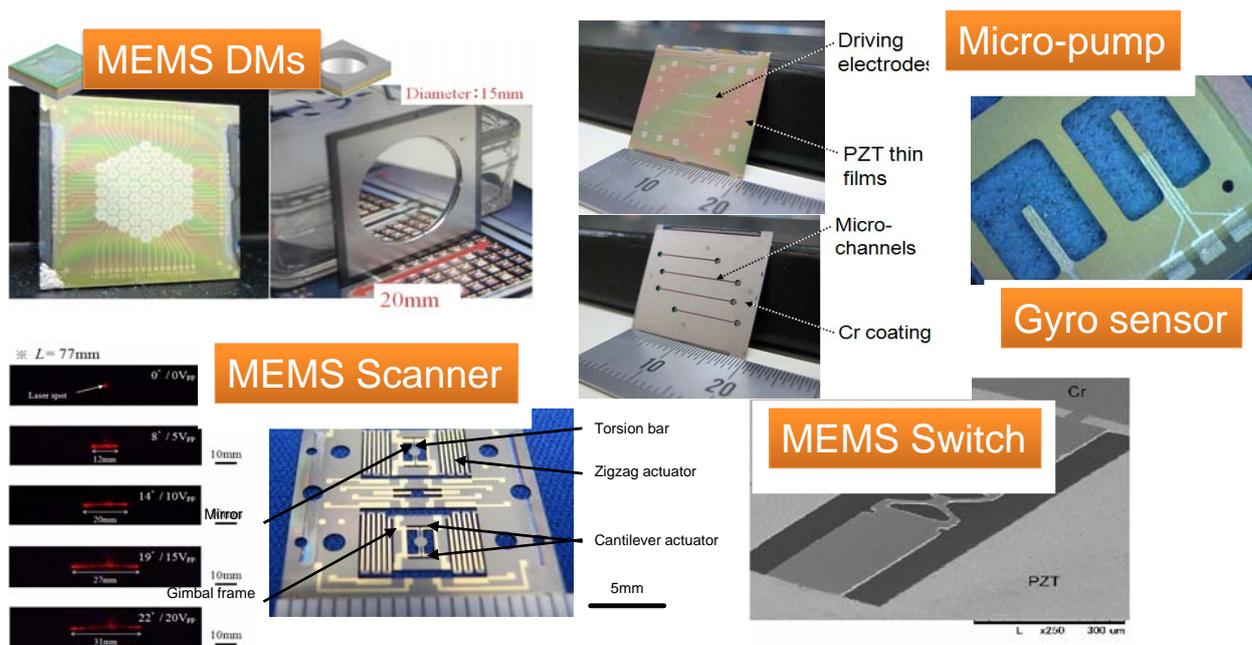


図 1 圧電薄膜を用いた機能性マイクロデバイス (圧電 MEMS)

### 3. 圧電 MEMS 技術の今後の展開と課題

圧電 MEMS は、マイクロセンサ、アクチュエータ応用に加え、近年エネルギーハーベストへの応用が注目されており、振動発電素子として実用に向けた取り組みが進められている。

圧電 MEMS 振動発電は、小型化においても高い発電効率が維持でき、また単純構造による設計の自由度が大きいことが主な長所であり、静電や電磁デバイスとの対比において実用性の高い方式であると考えられている。我々の研究室においても、圧電薄膜を使用した高効率振動発電素子を開発し、その発電特性向上に向けた取り組みを行っている<sup>6)8)</sup>。Si 基板上に形成した PZT 圧電薄膜による振動発電素子の他、低コストおよび高い材料強度を有するステンレス片持ち梁に圧電薄膜を作製し、高い信頼性を有した MEMS 振動発電素子の作製にも成功した(図2)。片持ち梁構造の振動発電素子は、構造の単純さから出力設計も容易であり、今後用途に合わせた素子の設計により特にセンサノードの電源としての応用が進展すると考えられる。

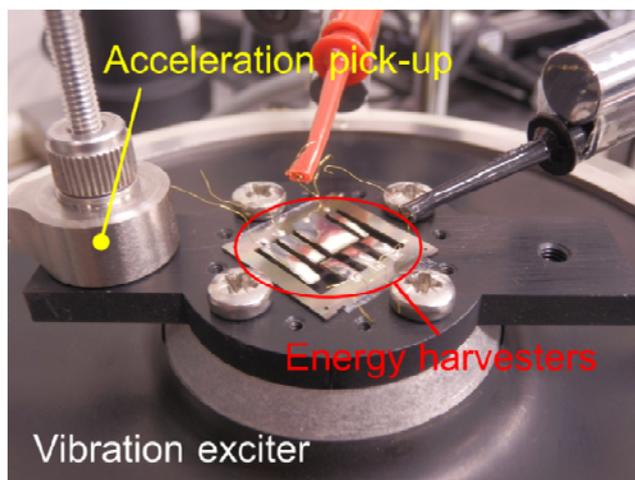


図2 ステンレスカンチレバー上に作製した PZT 圧電薄膜振動発電素子

圧電 MEMS 技術の課題として、大きく以下の3つが挙げられる。

- 圧電材料の薄膜化技術
- 薄膜材料の圧電特性評価技術
- 非鉛圧電薄膜材料の開発

PZT に代表される圧電材料は、ペロブスカイト構造を有しており、その結晶構造が圧電特性に大きく影響する。特に基板から受ける応力や組成の揺らぎ、また電荷を持った欠陥等を制御し、特性の安定化、更に大面積へ均質な成膜が求められる。現在、ゾルゲル法およびスパッタ法を中心に研究から実用化に向けた取り組みがなされており、我々もスパッタ法による成膜により圧電特性の向上に向けた取り組みを進めている。

一方、薄膜材料の圧電特性は、基板の存在によりその機械的な性質が支配されるため、薄膜そのものの圧電性を正確に測定することは容易ではない。現在、ユニモルフカンチレバーの正圧電効果、また逆圧電効果による圧電横効果の評価法が提案されており、我々も独自の評価技術の開発と共に、関連する研究者と共にその標準化に向けた取り組みを進めている<sup>9)10)</sup>。

最後の課題として、鉛フリー圧電薄膜材料の開発が挙げられる。バルクセラミックスの分野で非鉛圧電材料の開発が先行し、その実用化の可能性が期待されているが、薄膜材料においてもそれらの知見を元に非鉛圧電薄膜の研究が進められている。我々も、KNN 材料を中心にスパッタ法を用いて薄膜材料を作製し、その高い発電特性を報告してきた<sup>11)13)</sup>。薄膜圧電材料開発の課題として、組成探索のスループットが挙げられるが、我々はコンビナトリアルスパッタ法を用いて各種非鉛圧電薄膜においても最適組成の探索を進めている<sup>14)</sup>。

#### 4. まとめ

我々の周りにある工業製品は、人間が操作することを規準として一般にメートル、センチメートル単位のスケールで作りに上げられるが、その機能の高度化のために組み込まれている各種機能性デバイスの多くはマイクロメータ( $10^{-6}\text{m}$ )オーダーの微細な3次元構造の素子により構成される。また、機能性薄膜材料の特性はナノメートル( $10^{-9}\text{m}$ )の膜厚また分子構造の制御および最適化がベースとなる。更なる機能性材料の機能性は構成原子のピコメートル( $10^{-12}\text{m}$ )の位置変化が引き起こすものであり、これらがすべてうまく組み合わせて利用することにより新しい機能が作り出されると言える。

圧電 MEMS 技術は、材料技術とデバイス設計技術を融合したところに特徴がある。つまり、実験が主体となる材料開発と計算により機能を予測するデバイス設計は、極端に言えばコンセプトの異なる異種の技術であり、それらを単純に統合することは容易ではない。現在 Si-MEMS は確立された製造技術を用いるため、企画力、設計力に重点が置かれ、その中で日本企業のシェアはあまり大きくない。一方、経験的な技術要素が重要となる圧電 MEMS は MEMS 技術の中でも日本企業の特長を活かせる分野であり、海外からの期待も高い。我々もマルチスケールの視点で最終製品を見つめ直し、経験的な材料技術の蓄積をうまく利用することにより、真に社会に貢献する革新的な機能性マイクロデバイスが実現できるものと考えている。

#### 5. 参考文献

- 1) I. Kanno, T. Kunisawa, T. Suzuki, H. Kotera, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 13 (2007) 155
- 2) M. Sato, S. Tsuda, I. Kanno, H. Kotera, O. Tabata, Microsyst. Technol., 17 (2011) 931
- 3) J. Ogawa, I. Kanno, H. Kotera, K. Wasa, T. Suzuki, Sens. Actuators A, 152 (2009) 211
- 4) S. Matsushita, I. Kanno, K. Adachi, R. Yokokawa, H. Kotera, Microsyst. Technol., 18 (2012) 765
- 5) I. Kanno, Y. Tazawa, T. Suzuki, H. Kotera, Microsyst. Technol., 13 (2007) 825
- 6) K. Morimoto, I. Kanno, K. Wasa, H. Kotera, Sens. Actuators A, 163 (2010) 428
- 7) I. Kanno, T. Ichida, K. Adachi, H. Kotera, K. Shibata, T. Mishima, Sens. Actuators A, 179 (2012) 132
- 8) S.-G. Kim, S. Priya, I. Kanno, MRS Bulletin, 37 (2012) 1039
- 9) I. Kanno, H. Kotera, K. Wasa, Sens. Actuators A, 107 (2003) 68
- 10) D.-M. Chun, M. Sato, I. Kanno, J. Appl. Phys., 113 (2013) 044111
- 11) T. Mino, S. Kuwajima, T. Suzuki, I. Kanno, H. Kotera, K. Wasa, Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) 6960
- 12) I. Kanno, T. Mino, S. Kuwajima, T. Suzuki, H. Kotera, K. Wasa, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control., 54 (2007) 2562
- 13) K. Shibata, F. Oka, A. Ohishi, T. Mishima, I. Kanno, Appl. Phys. Express, 1 (2008) 011501
- 14) K. Tomioka, F. Kurokawa, R. Yokokawa, H. Kotera, K. Adachi, I. Kanno, Jpn. J. Appl. Phys., 51 (2012) 09LA12