

## エネルギー自立分散ロボットに向けた集積 MEMS テクノロジ

### Integrated MEMS Technology Towards Energy-Autonomous Distributed Microrobots

東大工, ○三田 吉郎

Univ. of Tokyo, Yoshio Mita

E-mail: mems@if.t.u-tokyo.ac.jp

「感じる・考える・働きかける」自律ロボットの機能をセンチメートル未満の小型筐体に集積し、多数の自律ロボットの分散作業によって高度な自律性を持たせる「自律分散マイクロシステム」は、四半世紀を超える研究の歴史を持ち、常に新たなアプリケーション（トップダウン）と、それを実現するための新規技術（ボトムアップ）を生み出している。近年、多数の小型物体（以下、Catom と呼ぶ）の協調動作により、全体形状を自在に変更することを志向した「Programmable Matter」という概念が提唱され、筆者らのグループにおいても Programmable Matter の実現に向け、半導体デバイスと MEMS 素子を融合した「集積化 MEMS テクノロジ」によって Catom を実現することを目指し、技術開発を行ってきた。小型物体の自律動作を妨げるもっとも重大な要因は「テザー」と呼ばれるエネルギー供給のための電源配線である。筆者らによる大きさ  $3 \times 8 \times 0.38 \text{ mm}^3$  の「Electrowetting on Dielectrics (EWOD)」によるバブルジェット式水上走行素子（いわゆる「アメンボ」小型ロボット）での実験において、実験室で入手できた最も細い電源配線（ワイヤボンダーの金線、直径  $25 \mu\text{m}$ 、長さ  $10 \text{ mm}$  を、コイル状に巻いた直径  $0.1 \text{ mm}$  の銅線に接続して使用）ですら、簡単にロボットの動作を阻害することが確認されている。従って、テザーによることなく、筐体の中に発電（および蓄電）機構を備え、「エネルギー的に自立」したシステムが、Catom に代表される小型自律ロボットにおいては必須となる。ただし、本論でいう「自立」は、外部からの作動的なエネルギー供給を許容する。

伝送可能なエネルギー密度ならびにスケーリング則を考慮すると、光を用いたエネルギー伝送（面積に比例）は魅力的な電力源となる。受容体として最も素直な構成は半導体 PN 接合を用いた太陽電池であるが、材料の特性（バンドギャップ）から起電力は数 V（Si を利用した場合 1 接合あたり  $0.4 \sim 0.5 \text{ V}$  程度）、電子回路のみならず静電マイクロアクチュエータ（十数 V $\sim$ 100V を駆動に必要とすることが多い）を駆動するには多段の電圧増倍回路が必要となり、エネルギー損失が無視できない。そこで筆者らは、「エネルギー消費側（電子回路、アクチュエータ、センサ）が必要とする電圧を、直列太陽電池によって直接発生し利用する」という手法を考案し、Silicon-on-Insulator (SOI) 基板上にあらかじめ集積回路素子として直列ダイオード構造を作製し、MEMS 加工のために開発された「シリコン深掘りエッチング (DRIE)」を用いて直列素子を分離する方法を考案した。この手法は、信頼性の必要な部分を工業的に安定した集積回路試作ラインで作製し、特殊加工となる深掘り等方エッチングを大学のオープンファシリティ（微細加工プラットフォーム）によって加工しており、高い信頼性と通常の集積回路に無い新しい機能とを同時に実現できる。講演では本技術の詳細ならびに各種研究への応用可能性を論ずる。

謝辞： ANR-16-CE33-0022, JPMJCR20T2, JPJSCCA20190006, JPJ011438, JPMXP1222UT1005