

21. マイクロ・ナノ工学部門

21.1 部門設立の経緯

マイクロ・ナノ工学は、マイクロ・ナノメートル領域におけるさまざまな物理現象のメカニズムを解明するとともに、それを工学的に制御し、新しい機能を持つ材料やデバイス、およびそれらを利用したシステムを開発する学問分野と考えることができる。例えば、高効率エネルギー変換、センサネットワーク、IoT (Internet of Things)、自動運転技術、テーラーメイド医療など、現代の重要な技術課題の多くは、材料からシステム構築に至る過程においてマイクロ・ナノ工学と深く関わっており、本分野の継続的な研究開発の推進が不可欠である。

これらの技術課題は、機械工学の幅広い分野、さらには電気・電子、物理、化学、医学など多くの分野に関わる境界領域にある。日本機械学会では古くからマイクロ・ナノ領域の研究活動が活発に行われてきたが、研究者は各部門の中で個別に活動するに留まり、その活動は学会の外から見えづらくなるとともに、部門間の情報交流も必ずしも十分ではない状況にあった。マイクロ・ナノ領域の機械工学を発展させ、新しい産業に結びつけるためには、本会の各部門で展開している研究を分野横断的にカバーし、産学が結集してマイクロ・ナノ分野の現状と将来を議論できる新たな学会組織を構築することが急務の課題であった。

このような背景のもと、1) 国内外、特に産業界からマイクロ・ナノ領域の活動を見える形に顕在化する、2) 学会内に分散して活動しているマイクロ・ナノ領域に関わる研究者間の情報交換・研究発表の場を提供する、3) 当該分野で他学会との連携をはかれる組織を設立する、の三つの目標を掲げ、約 10 年前の 2006 年 12 月に「マイクロ・ナノ工学専門会議」を発足させた。以来、年次大会のテーマセッションや、マイクロ・ナノ工学シンポジウムの開催など、5 年間にわたって活発な活動を続け、その集大成として 2011 年 12 月に国際ワークショップ「International Workshop on Micro/Nano-Engineering」を京都大学桂キャンパスにて開催した。これらの活動が認められ、2012 年には「マイクロ・ナノ工学部門」を発足させた。

部門発足後は、専門会議で構築した活動基盤をより強固にするとともに、さらに発展させるべく、独自の取り組みを行ってきた。特に、部門講演会にあたる「マイクロ・ナノ工学シンポジウム」では、電気学会センサシンポジウム、応用物理学会集積化 MEMS シンポジウムとの合同開催として、7 回の会議を成功裏に開催し、ここ数年は 150 件以上の研究発表を集め、学術の深化や異分野の研究者の交流を推進してきた。

“Future Technologies” という冠のもと、3 学会を合わせた参加者数は 600 名を超え、当該分野で国内有数の会議に成長した。また、部門主催の国際会議である「International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (Power MEMS 2014)」の日本への招致、多様な学術領域を母体とした部門所属研究会の設立と運営、若手研究者・技術者の育成と表彰などの活動を展開してきた。これらの活動を通じて、学会内外の多くの研究者・技術者に認知されるようになり、既存部門との連携も図られるようになった。そして、3 年間の「助走期間」が終了し、2015 年度には理事会の評価を受け、2016 年度より日本機械学会の 21 番目の正式部門となることが認められた。

部門の登録者数は、部門発足時 (2012 年) の 400 名から着実に増加を続け、2016 年 11 月末には当初からの目標であった 1000 人に到達した (図 1)。部門第 1 位登録者の平均年齢は 30 代半ばと若手が活躍しており、部門登録者に対する部門講演会への参加比率は 4 割を超え、登録者一人当たりの事業費を示す「活動度係数」は他部門に比べて高い数値となっている。

2016 年度は、正式部門としての最初の年に当たり、部門運営体制の整備を行った。シンポジウム、年次大会、講習会、広報、表彰などの委員会体制を確立し、部門運営を主体的に進める総務委員会を立ち上げた。また、部門賞と部門一般表彰に関する規定を制定し、第 1 回の部門賞の選考、表彰を行った。また、正式部門化の記念行事として、2016 年 12 月には東京大学本郷キャンパスにて国際会議「International

Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016」を開催し、発表件数 160 件以上、参加者 220 名以上を集め、成功裏に終了することができた(図 2)。2017 年度には、マイクロ・ナノ工学シンポジウム(広島)、および Power MEMS 2017(金沢)の開催が予定されている。

マイクロ・ナノスケールを対象とする工学は、新素材、エネルギー、情報、バイオ・メディカルなど、成長が期待される産業の基盤技術である。本部門は、機械工学の立場から境界領域に積極的にに関わり、異分野との交流を促進し、産学が連携して新たな価値を創造していくことを使命として、活動を続けていく所存である。

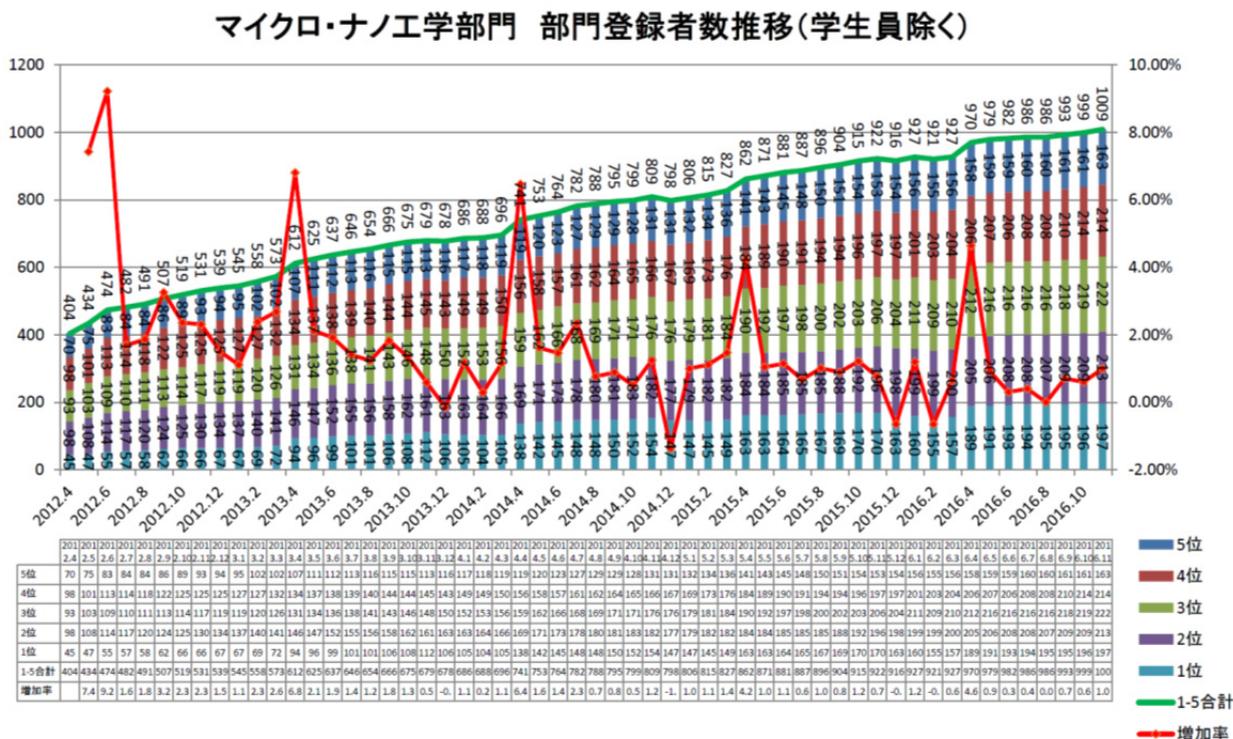


図 1 部門登録者数の推移⁽¹⁾



図 2 国際会議「International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016」で行われた正式部門化セレモニーと部門賞・部門表彰授賞式

[鈴木 健司 工学院大学]

21.2 マイクロ・ナノ工学概観

機械工学に関係するマイクロ・ナノ工学研究は、MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) 技術の進展とともに、応用分野の拡大、多様化が進んできた。これまでに Optical MEMS, RF-MEMS, Bio-MEMS, Power-MEMS, μ TAS 等に展開され、それぞれの分野で国際会議が開催されている。

また、産業界ではこれらの研究成果を着実に実用化に結び付ける動きが見られる。とくに、加速度センサや角速度センサに代表される物理量センサは、実用デバイスが広く普及し、小型化、集積化、高感度化、高精度化、信頼性向上などを目指して各メーカー間での競争が行われている。これらのデバイスは、携帯端末の高度化、自動車の安全性向上や自動運転、IoT (Internet of Things)、ドローンやロボティクスなどの最先端の技術を支えるベースとなっている。また、自動車のレーザー・ヘッドライトやヘッドアップ・ディスプレイのために、マイクロミラーデバイスの研究開発も多くの機関で行われている。

RF-MEMS では、従来の水晶振動子に代わるシリコン-MEMS 振動子によってクロック周波数を得る方法などが実用化され、さまざまなデバイスに導入されつつある。また、無線通信で周波数を選択する FBAR (film bulk acoustic resonator) フィルターも、SAW (surface acoustic wave) フィルターとともに携帯電話やスマートフォンに大量に使われるようになった。Optical-MEMS では専用眼鏡をディスプレイとして、画像をリアルな視野に重ねて見せる技術などが発表されている。Power-MEMS では静電誘導や圧電薄膜を用いた環境発電分野が進展しており、センサネットワークなどで構成される IoT の各種端末用エネルギー供給源として今後の実用化が望まれる。

MEMS 技術に関しては、全般的に日本の研究は活発であり技術的に高いレベルにあるが、中国や台湾の台頭も著しく、また事業レベルでは欧米企業が強い分野が目立っている。商品化に結び付く新しい MEMS デバイスの開発研究が求められており、戦略的な研究展開が必要である。一方、ナノテクノロジーの分野では、将来の基盤技術として期待される材料、流体、熱などの新しい研究の萌芽や多様化が見られる。将来の産業に結びつく技術の他、生命科学や医学の発展に寄与するツール、安心・安全の根幹をなす信頼性などに関する研究も盛んである。毎年秋に開催される本部門主催によるマイクロ・ナノ工学シンポジウムは、これらの新しい研究成果が一同に集まる機会であり、電気学会センサシンポジウム、応用物理学会集積化 MEMS シンポジウムとの合同開催により、それぞれの学会の特色を生かしつつ活発な議論がなされている。

マイクロ・ナノ工学の研究開発のための重要な課題として、MEMS などのデバイスや各種微細構造の製作に必要な高額な装置群とクリーンルーム環境の共用化が挙げられる。文部科学省は「ナノテクノロジープラットフォーム事業」⁽²⁾として、微細構造解析、微細加工、分子・物質合成の三つの技術領域において、最先端の研究設備の全国的な共用体制を構築し、産学官の多様な利用者による共同利用を推進する取り組みを行っている。その支援を受けて、東北大学、京都大学、東京大学、早稲田大学などの大学、および産業技術総合研究所、物質材料研究機構などの公的研究機関に、一般利用可能な共用施設が整備され、多くの研究者、技術者が利用している。これらの仕組みの有効性と必要性が益々広く認知され、その結果、我が国のマイクロ・ナノ工学の研究開発が活性化し、新しいマイクロ・ナノ技術が数多く生み出されることを期待したい

[田中 秀治 東北大学, 鈴木 健司 工学院大学]

21.3 マイクロ物理センサ

第5期科学技術基本計画⁽³⁾で謳われている「超スマート社会」実現のため多種多様な情報を収集する「センサ技術」が改めて注目されており、機械量、温度・熱、磁気、光など物理量を MEMS/NEMS 技術で計測するマイクロ物理センサの研究が活発化している。マイクロ・ナノ工学シンポジウムにおいても多数のマイクロ物理センサの開発や応用システムの研究が報告されている。単体のセンサではここ数年、触覚センサの研究発表が多く、また、圧力センサや慣性センサを人体運動、生体検出に用いるセンシングシステムについての報告も多くみられた。

直線運動を検出する加速度センサと回転運動を検出する角速度センサは車載センサとして開発され、スマートフォンなどの携帯機器への搭載で爆発的に生産量が増加した。さらに高感度化を実現し、応用先を広げる研究が行われている。このような状況のもと 2014 年から慣性センサの国際シンポジウム (IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems) が毎年開催され、関心を集めている。上記シンポジウムを中心として、慣性センサの特に高感度化を目指した最新研究を示す。

加速度センサの高感度化は寸法、すなわち質量を増加させ、静電容量変化を大きくするためにギャップを狭くする加工技術が求められている⁽⁴⁾。また、変位の電氣的検出に限界があるとみて慣性力による変位を弾

性梁の共振周波数変化で検出する手法⁽⁵⁾やフォトニック結晶構造を組み込んだ光学検出⁽⁶⁾などの新検出原理も試みられている。

角速度センサは、ジャイロ스코ープとも呼ばれ、手ぶれ防止などの比較的早い回転角速度から慣性航法に用いられる地球の自転よりもゆっくりとした回転まで幅広い範囲の回転を検出するさまざまな方式が用いられている(図3)、MEMSはバイアス安定性で0.01 deg/s、あるいは10 deg/hrまでの低価格なシステムで主流となりつつある。今後は光ファイバージャイロが主流の、慣性航法を実現するレベルを目指して研究が行われている。従来の音叉型MEMS振動ジャイロ(TFG)は角速度入力がない状態で励振振動が検出振動側に振動を引き起こすいわゆる漏れ振動によるオフセットドリフトや検出振動子が加速度によって変位して出力となる加速度感度に課題がある。これに対して、X-Y方向にいずれも対称に形成し、二つの振動子が重心を共有して移動しないDual Foucault Pendulumジャイロ⁽⁷⁾が提案されている。また、高感度化には励振と検出振動の共振周波数を一致させたmode-matchedジャイロが不可欠であり、これを実現する振動Q値100万以上の半球振動子⁽⁸⁾や円盤型のバルク振動子⁽⁹⁾が試作されており、ファイバージャイロの性能に匹敵するマイクロ角速度センサの実現が期待されている。

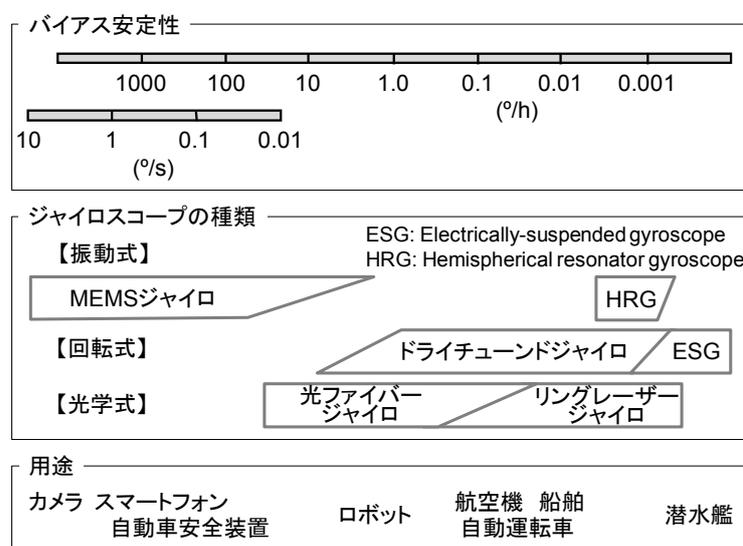


図3 ジャイロ스코ープの性能と種類

[土屋 智由 京都大学, 田中 秀治 東北大学]

21.4 バイオ・医療 MEMS

MEMS技術を駆使した最先端バイオナノ医療デバイスはLab on a Chipとして知られており、チップ上で細胞、ウイルスあるいは腫瘍マーカーなどの微粒子の検知や性状分析を可能とする。近年、これら微粒子を1個単位で検出および識別することを目標とする研究開発が盛んになってきている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。そこでは、熱や電磁場を複合的に利用することにより、微粒子の運動と液相の流動を個別に制御することが実現され、これまでに提案されてきた技術の精度がさらに高められている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁷⁾。

たとえば、生体分子の解析技術として、非常に困難とされてきたタンパク質の結合親和性計測がマイクロスケール熱泳動によって可能となり⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、in vivoでの分子操作も試みられている⁽¹⁵⁾。また、電解質溶液中に設置された細孔を通過する微粒子に対して、塩濃度の調製と高分解能の計測により表面性状の差異までが明らかにされており、高速・高精度識別の実用化に向けた先導技術が萌芽しつつある⁽¹⁶⁾。

[川野 聡恭 大阪大学]

21.5 マイクロエネルギー

マイクロエネルギーは、小スケールにおけるエネルギー変換・伝送、熱交換、およびエネルギーに関するマイクロシステムをカバーする領域である。マイクロエネルギーの中でも、振動、熱などの環境に存在する希薄なエネルギーから微弱な電力を得る環境発電(Energy Harvesting)は、無線センサネットワーク、モ

ノのインターネット (IoT) などへの関心が高まりから、多くの研究が行われている。マイクロエネルギー分野に特化した国際会議は、International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 国際会議)⁽¹⁸⁾であり、Power MEMS 2014 は、マイクロ・ナノ工学部門主催で兵庫県・淡路夢舞台国際会議場にて開催された。本部門主催の初めての国際会議であり、マイクロ燃焼、広周波数帯域振動発電、無線電力伝送、環境発電応用技術に関するミニシンポジウムも企画された。発表論文約 140 件のうち、環境発電、特に振動発電、熱発電に関する論文が大きな割合を占めた。現在、システム化開発も進み、実用化に近い産業界からの発表も増加しつつある。

環境発電に用いられる熱電材料に関しては、ナノ構造体による熱伝導と電気伝導の非相似制御⁽¹⁹⁾、有機材料の利用、スピンゼーベック効果⁽²⁰⁾などによる性能向上への新しい試みが検討されている。圧電材料では非鉛系⁽²¹⁾⁽²²⁾など新しい提案がなされ、エレクトレット⁽²³⁾では高性能材料⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾や新しい荷電方法⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾に関する論文発表も増加してきている。材料系や応物系の国際会議・国内講演会においても環境発電のセッションが設けられるようになり、機械系・電気系と材料系との境界領域として位置づけられつつある。なお、Power MEMS 2017 も、本部門主催で金沢にて 2017 年 11 月に開催予定である。

[鈴木 雄二 東京大学]

参考文献

- (1) 日本機械学会マイクロ・ナノ工学部門 2016 年度 (第 94 期) 第 3 回運営委員会資料
- (2) 文部科学省 ナノテクノロジープラットフォーム事業
- (3) 第 5 期科学技術基本計画 本文 (2016-1 閣議決定), 内閣府
<http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf> (参照日 2016 年 5 月 9 日) .
- (4) Tang, Y. and Najafi K., High Aspect-Ratio Low-Noise Multi-Axis Accelerometers Made from Thick Silicon, Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS 2016), pp. 121-124.
- (5) Zhao, J. et al., A low power MEMS-ASIC silicon resonant accelerometer with sub- μ g bias instability and ± 30 g full-scale, Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS 2016), pp. 46-49.
- (6) Flor Flores, J.G. et al., A CMOS-compatible oscillation-mode optomechanical DC accelerometer at 730-ng/Hz^{1/2} resolution, Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS 2016), pp. 125-127.
- (7) Senkal, D., Efimovskaya, A. and Shkel A.M., Dual Foucault Pendulum Gyroscope, Proceedings of the 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015), pp. 1219-1222.
- (8) Senkal, D., Ahamed, M.J., Asadian Ardakani, M.H., Askari, S. and Shkel A.M., Demonstration of 1 Million Q-Factor on Microglassblown Wineglass Resonators With Out-of-Plane Electrostatic Transduction, Journal of Microelectromechanical Systems, 24, 1 (2015), pp. 29-37, DOI: 10.1109/JMEMS.2014.2365113.
- (9) Mirjalili, R. et al., Substrate-decoupled silicon disk resonators having degenerate gyroscopic modes with Q in excess of 1-million, Proceedings of the 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015), pp. 15-18.
- (10) Cialla, D. et al., SERS-Based Detection of Biomolecules, Nano-photonics, 3 (2014), pp. 383-411.
- (11) Liu, S. et al., Correlated Electrical and Optical Analysis of Single Nanoparticles and Biomolecules on Nanopore-Gated Optofluidic Chip, Nano letters, 14 (2014), pp. 4816-4820.
- (12) Oedit, A. et al., Lab-on-a-Chip Hyphenation with Mass Spectrometry: Strategies for Bioanalytical Applications, Current Opinion in Biotechnology, 31 (2015), pp. 79-85.
- (13) Parker, J. I., and Newstead, S., Molecular Basis of Nitrate Uptake by the Plant Nitrate Transporter, NRT1.1, Nature, 507 (2014), pp. 68-72.
- (14) Srinivasan, V. et al., Crystal Structures of Nucleotide-Free and Glutathione-Bound Mitochondrial ABC Transporter Atm1, Science, 343 (2014), pp. 15955-15960.

- (15) Reichl, M. R., and Braun, D., Thermophoretic Manipulation of Molecules inside Living Cells, *J. of American Chemical Society*, 136 (2014), pp. 15955-15960.
- (16) Menestrina, J. et al., Charged Particles Modulate Local Ionic Concentrations and Cause Formation of Positive Peaks in Resistive-Pulse-Based Detection, *The J. of Physical Chemistry C*, 118 (2014), pp. 2391-2398.
- (17) Doi, K. et al., Electrohydrodynamic Flow through a 1 mm² Cross-Section Pore Placed in an Ion-Exchange Membrane, *The J. of Physical Chemistry B*, 119 (2015), pp. 228-237.
- (18) <http://www.powermems.org>. (参照日 2017 年 6 月 30 日)
- (19) Shiomi, J., Phonon engineering of nanocrystalline silicon thermoelectrics, *APL Mater.*, 4, 104504 (2016).
- (20) Uchida, K., et al., Thermoelectric generation based on spin Seebeck effects, *Proc. IEEE*, 104, (2016), pp. 1946-1973.
- (21) Minh, L., et al., Lead-free (K,Na)NbO₃ impact-induced-oscillation microenergy harvester, *J. Microelectromech. Syst.*, 24, (2015), pp. 1887-1895.
- (22) Kanno, I., Piezoelectric MEMS for energy harvesting, *J. Phys. Conf. Ser.*, 660, 012001 (2015).
- (23) Suzuki, Y., Recent progress in MEMS electret generator for energy harvesting, *IEEJ Trans. Electr. Electr. Eng.*, Vol. 6, No. 2, pp. 101-111 (2011).
- (24) Kashiwagi, K., et al., Nano-cluster-enhanced high-performance perfluoro-polymer electrets for micro power generation, *J. Micromech. Microeng.*, 21, 125016, (2011).
- (25) Tanaka, Y., et al., Polarization and microstructural effects of ceramic hydroxyapatite electrets, *J. Appl. Phys.*, 107, 014107, (2010).
- (26) Hagiwara, K., et al., Electret charging method based on soft X-ray photoionization for MEMS applications, *Trans. IEEE, Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 19, No. 4, (2012), pp. 1291-1298.
- (27) Sonoda, K., et al., Electrostatic energy harvester utilizing bipolar charging for high output power, *IEEJ Trans. Sensors Micromachines*, 135, (2015), pp. 91-97.