

## 調査研究報告書の要約

分類・テーマ別	I・2		分類・業種別	6・5	
書名	平成 15 年度新機能性材料の NEMS への展開報告書				
発行機関名	社団法人 日本機械工業連合会・財団法人 マイクロマシンセンター				
発行年	H16(2004)	頁数	208 頁	識別	15 先端-5

### [ 目次 ]

#### 第 1 章 調査研究の概要

- 1.1 調査研究の目的
- 1.2 調査研究の体制
- 1.3 調査研究の内容
- 1.4 実施結果

#### 第 2 章 次世代 MEMS/NEMS に期待される新機能性材料の調査研究

- 2.1 まえがき
- 2.2 カーボンナノチューブ
- 2.3 フラーレン
- 2.4 ナノメタル
- 2.5 ナノセラミックス
- 2.6 ナノガラス
- 2.7 ナノ粒子
- 2.8 フォトニック結晶
- 2.9 ナノポア材料
- 2.10 生体高分子
- 2.11 強誘電体
- 2.12 low-k 材料
- 2.13 スピントロニクス材料
- 2.14 導電性ポリマー
- 2.15 超塑性材料
- 2.16 圧電材料
- 2.17 超磁歪材料
- 2.18 形状記憶合金
- 2.19 自己組織化膜
- 2.20 まとめ

#### 第 3 章 次世代 MEMS/NEMS に期待される新機能性材料の加工に関する調査研究

- 3.1 まえがき
- 3.2 リソグラフィ技術
- 3.3 エッチング技術
- 3.4 堆積技術
- 3.5 研磨・切削・メッキ・乾燥・接合加工技術
- 3.6 バイオ・化学を応用した加工技術
- 3.7 ナノ細線・ナノチューブの加工技術
- 3.8 まとめ

## 第4章 新機能性材料を必要とする MEMS/NEMS 応用に関する調査研究

- 4.1 まえがき
- 4.2 実用化段階にある MEMS における材料技術
- 4.3 研究開発段階にある MEMS/NEMS における材料技術
- 4.4 MEMS/NEMS のロードマップと必要な新機能性材料
- 4.5 まとめ

## 第5章 新機能性材料の NEMS への展開を促進するための提言

### [ 概要 ]

#### 1. 調査研究の目的

微細加工技術の進展により、ナノスケールの超微細加工が可能になった現在、マイクロマシン技術はナノテクノロジーを応用した新機能デバイスの開拓のための手段という位置づけにおいても重要性が認識され、従来の MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)に対して NEMS (Nano Electro Mechanical Systems) という呼称が使われ始めている。

現状の主要なMEMS製造手段はシリコン系材料を用いる半導体プロセス技術を応用したものであるが、MEMS/NEMSを情報通信分野、バイオ・医療分野等、幅広い産業領域へ適用するためには非シリコン系の、ポリマー、圧電材料、磁性体材料、ナノ材料等を含む機能性材料や異種材料の組み合わせに期待が持たれている。本調査研究では、これら材料と加工・製造方法とを併せて検討し、新たな微小デバイス製造の現状と可能性を明らかにすることを目的とした。本調査研究事業は、社団法人日本機械工業連合会より「新機能性材料のNEMSへの展開」に関する調査研究の委託を受けて、財団法人マイクロマシンセンターが実施したものである。

#### 2. 調査研究の内容

学識経験者及び専門家から成る「新機能性材料の NEMS への展開に関する調査研究委員会」を財団法人マイクロマシンセンター内に設置して、以下の項目について調査研究を実施した。

##### (1) 次世代 MEMS/NEMS に期待させる新機能性材料の調査研究

各種新機能性材料を期待した MEMS/NEMS の研究が本格化しつつある。ここでは、各種新機能性材料と、その特性を有効発現しようとする研究開発の現状や事例を概観し、あわせて将来展開が期待される産業領域(アプリケーション)について調査検討を行った。

##### (2) 次世代 MEMS/NEMS に期待される新機能性材料の加工に関する調査研究

新機能性材料は、MEMS/NEMS を幅広い産業分野に適用するために期待が持たれているが、その機能性を有効に発現させるためには、その特性に見合った新たな加工・製造技術も求められてくる。そこで、今後発展が期待される新たな技術の研究開発の現状と可能性につき調査研究を行った。

##### (3) 新機能性材料を必要とする MEMS/NEMS 応用に関する調査研究

将来の応用展開を検討するため、実用化段階にある MEMS と、研究段階にある MEMS/NEMS を応用面からの課題を踏まえながら調査研究を行った。

##### (4) 新機能性材料の NEMS への展開を促進するための提言

上記(1)から(3)を踏まえて、今後新機能性材料の NEMS への展開を

促進するための提言を行い、将来展望について概観した。

### 3. 調査研究の進め方

新機能性材料の NEMS への展開を調査研究するに際し、材料技術、加工技術および応用分野の3つを大きな調査項目とし、MEMS/NEMS 技術との関わりを視点として据えた。さらに、調査研究の効率と質を考慮し、3つの調査項目はそれぞれでワーキンググループを構成し、密度の濃い情報交換とグループ間連携をとりながら同時並行的に検討を進めた。

#### [グループ構成]

- ・材料ワーキンググループ
- ・加工ワーキンググループ
- ・応用ワーキンググループ

### 4. 実施結果

#### 4.1 次世代 MEMS/NEMS に期待される新機能性材料の調査研究

##### (概要)

新材料の発見や改良は、科学の発展に根幹的な変革をもたらすことが多い。MEMS/NEMS 研究をさらに発展させるためには、新機能性材料を従来技術の中に積極的に取り入れていくことが重要である。本項目は第2章として構成され、MEMS/NEMS に対する材料の作用の仕方の違いを考慮しながら、新機能性材料、半導体材料、ナノテクノロジーに関連する材料を広く抽出し、調査研究を行った。

これらの調査研究の結果、新しい材料による新しい機能を活かし MEMS/NEMS の研究を関係異分の研究者間で連携して進めることで、新たな付加価値をもつ革新的な技術を創出できる可能性を見出せた。

##### (まとめ)

現在まで MEMS 技術は高度に発達したシリコン微細加工技術が主役であった。しかし 21 世紀のナノテクノロジー時代においては、もう一度根本的な製造原理を見直し、新しい材料による新しい機能を活かした NEMS/MEMS の研究を再構築すべきであると考え。もちろん今までの蓄積である半導体微細加工技術を放棄するわけではなく、その技術は大いに転用すべきであるが、新しい材料との融合を積極的に行うべきである。そのために、NEMS/MEMS の研究者と化学、薬学系研究者が密接に連携した研究組織を整えることがまずは必要であろう。あるいはまずそれらの研究者がざっくばらんにそれぞれの技術を紹介して、お互いの最先端の成果に対して理解し合うような場を設けることから早急に始めるべきであると考え。ナノテクノロジーという旗のもと、異分野の研究者が会合するよい機会が生まれた。是非この機会を逃すことなく、産業革命に匹敵するような革新的な技術開発が行われることを期待する。

調査検討を行った材料と、その機能およびアプリケーションの観点からまとめた表を示す。

分類	材料	機能	アプリケーション
無機 ナノ材料	カーボンナノチューブ	高強度、水素吸蔵、触媒（触媒金属保持）	電子源、FED、ナノプローブ、単電子トランジスタ、燃料電池
	フラーレン	金属内包、電荷制御、光触媒	単分子素子、DNA 鎖特定部位切断
	ナノメタル	高強度、高剛性(Al,Mg) 水素吸蔵(Mg) 高強度、高たわみ性(Ti,Zr) 軟磁性、硬質磁性(Fe,Co) 高耐食性(Ni,Cu) 水素透過性、高活性電極(Pd)	生体・医療材料、バネ材料、制振材料、衝撃吸収材料、モーター、水素透過膜
	ナノセラミックス	高強度、高靱性、塑性変形性	積層コンデンサ
	ナノガラス	方向性光伝播、感光性、負の熱膨張率、熱相変化、高加工性、多孔性、生体適合性	フォトリソグラフィ結晶レーザーガラス、フォトクロミックガラス、相変化メモリ、電気絶縁、分離膜、人口骨
	ナノ粒子（ナノクラスター）	高活性、高選択性触媒、特異的光・磁気特性、付着・凝集性、圧縮性、分散性	単電子デバイス、触媒、磁性材料、発光素子
	ナノポア材料	触媒、吸着、イオン交換性、光感応性、他材料吸収	光スイッチ、蛍光流体、レーザー、低誘電率相間絶縁膜、分子ふるい、強磁性材（カリウムによる）
有機材料	導電性ポリマー	導電性、超伝導、非線形性、光・熱・電気応答性	有機トランジスタ、分子集積回路
	機能性ポリマー	親水性、疎水性、疎油性、耐熱性、液晶性、磁性、形状記憶、感光性、圧電性、焦電性、酵素機能、触媒	液晶、ドラッグデリバリー、各種センサー、感光性樹脂、光部品材料、構造樹脂、膜分離
	生体高分子	自己組織化、導電性、光応答性、選択性	分子素子、生体整合性
	自己組織化膜	光有機相転移、自己組織化、自己修復、自己増殖、超格子、単分子膜	フレキシブルディスプレイ、光メモリ、センサー、1次元、二次元、3次元超格子、撥水膜
機能性材料	強誘電体	強誘電率、圧電性、屈折率変化	メモリ、フォトリソグラフィ結晶、マイクロアクチュエータ、低回転高トルクモーター、インクジェット方式プリンタのインク噴きだし素子、レーダ、超音波マイクロホン、パルス発信器
	Low-k 材料	低誘電率	相間絶縁膜

	圧電材料	圧電性、焦電性	マイクロアクチュエータ、弾性表面波デバイス、振動子、超音波センサー、赤外線センサー、加速度・圧力センサー
	磁歪材料	磁歪、超磁歪	マイクロアクチュエータ、振動子、ジャイロ、圧力センサー
	スピントロニクス材料	電子スピン	スピントランジスタ、MRAM
	形状記憶合金	形状記憶効果	マイクロアクチュエータ、各種構造材
	超塑性材料	超塑性	マイクロ金型
半導体材料	シリコン系材料 (Si, SiC, SiGe)	構造材、高硬度、光反応性、ピエゾ効果	マイクロマシン構造材、光センサー、各種センサー
	非シリコン系材料 (GaAs、GaN、InP 等)	構造材、発光・受光、高移動度	トランジスタ、MOEMS、レーザー、超高周波素子

上記表でアプリケーションはあくまで現在考えられるものについてあげているもので、決してこれに制限されるものではない。願わくは今までに考えられているものの枠を超えて、新しいアプリケーションが提案されることが望まれる。

材料開発は産業の根本的なシーズであり、MEMS/NEMS の研究者は、開発された材料の有する多様な機能を最大限に活かし、世の中のニーズに応えるような研究開発を行っていくべきである。

#### 4.2 次世代 MEMS/NEMS に期待される新機能性材料の加工に関する調査研究 (概要)

次世代 MEMS/NEMS のための新機能性材料の加工には、従来の半導体加工・製造技術をさらに発展させた技術や、MEMS/NEMS 特有の技術、ボトムアップ型の新たなアセンブリ技術などの応用が期待されている。本項目は第 3 章として構成され、単なる加工技術としてではなく、将来 MEMS/NEMS へ応用するための視点を盛り込んだ調査研究を行った。調査研究の対象は次のとおりである。

加工・製造技術名		調査研究対象
リソグラフィ技術	フォトリソグラフィ技術	・ EUV リソグラフィー ・ EB リソグラフィー ・ X 線フォトリソグラフィー
	プローブナノリソグラフィ技術	・ プローブ陽極酸化加工 ・ ディップペンナノリソグラフィ
	ナノインプリンティング技術	・ ナノインプリント ・ ソフトリソグラフィー ・ LISA (Lithographically induced self-assembly)
エッチング技術		・ ビーム加工 ・ プラズマ加工技術

堆積技術		<ul style="list-style-type: none"> <li>・気相蒸着法</li> <li>・液層法</li> <li>・特殊堆積技術</li> </ul>
研磨・切削・メッキ・乾燥・接合加工技術	研磨・切削加工技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EFM(Elastic Emission Machining)法</li> <li>・超純水電気化学的加工法</li> <li>・フラスマ CVM(Cheical Vaporization Machining)法</li> <li>・原子間力顕微鏡(AFM)機構を利用した極微小切削加工法</li> </ul>
	メッキ・乾燥・接合加工技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無電解メッキ法</li> <li>・超臨界乾燥法</li> <li>・表面活性化接合 (Surface Activated Bonding:SAB)法</li> </ul>
バイオ・化学を応用した加工技術	・DNA・セルフアセンブル分子を利用した加工	
	・DNA・蛋白チップアレイの作製技術	
	・バイオミメティック構造の作製	
ナノ細線・ナノチューブの加工	ナノチューブ・ナノ細線の作製方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナノチューブの作成方法</li> <li>・ナノワイヤの作成方法</li> </ul>
	機能性を発現するための加工方法	
	ナノデバイス・ナノ電気機械に応用するための加工	

(まとめ)

これらの調査研究の結果、今後 MEMS/NEMS がナノスケールでの機能を十分に発揮するために必要な、先端の微細加工・製造技術の動向と可能性を明らかにできた。また、自己組織化などのボトムアップ型の製造技術が、今後複雑で精緻な構造体の製造を、廉価かつスピーディーに行う産業化を促進する手段の一つとして有望であることを見出せた。

#### 4.3 新機能性材料を必要とする MEMS/NEMS 応用に関する調査研究

(概要)

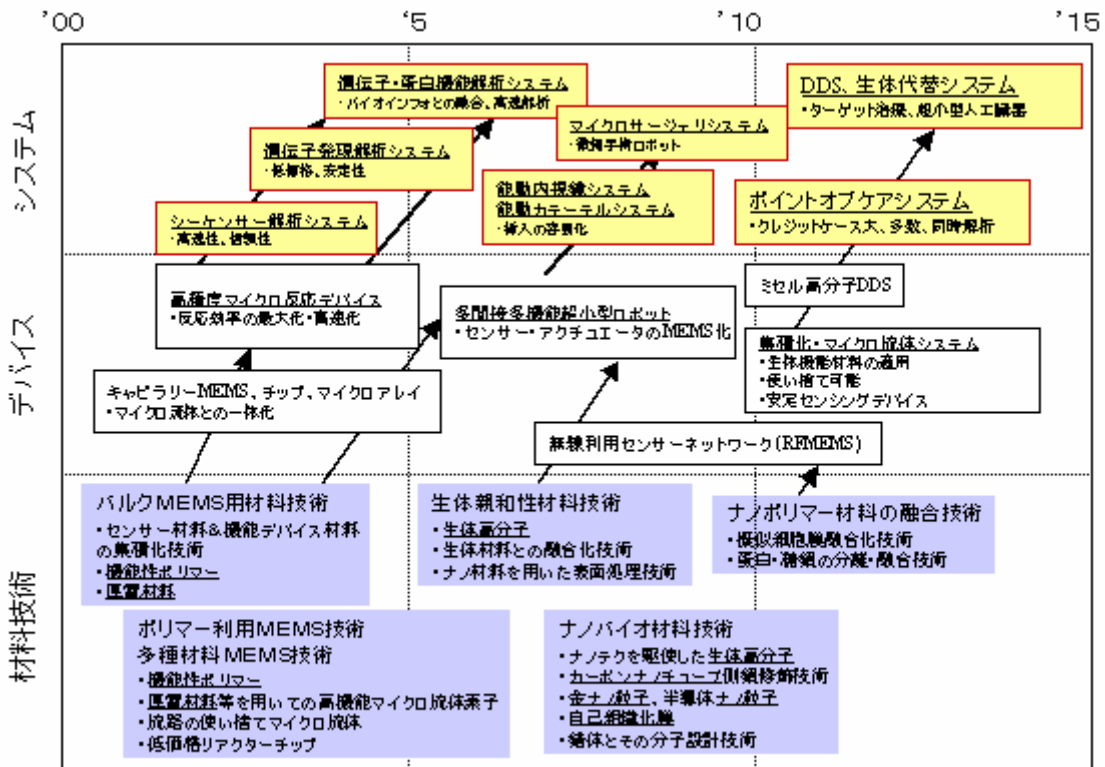
ナノ材料を含む新機能材料を MEMS や NEMS の応用製品からの要求側面から検討し、第 4 章として構成した。2 章や 3 章と違って応用面からの課題を踏まえながら、現在すでに実用化段階にある MEMS における材料技術と、研究開発段階にある MEMS/NEMS における材料技術に分類して報告した。現在すでに実用化段階にある MEMS は光 MEMS、RF-MEMS、圧力センサー、加速度センサー、ジャイロ、流量センサーとした。また研究開発段階にある MEMS/NEMS としては、フォトリソグラフィと NEMS の融合、CNT 使用デバイス、ナノ粒子応用、生体材料利用デバイス、ナノ共振器の高周波デバイス応用、スキャニングプローブのデータストレージ応用、センサーネットワーク、バイオ MEMS/NEMS マイクロ流路応用デバイスとした。それぞれの項目毎に、概要、最新の研究開発状況、応用分野の状況、新規材料への課題と期待、参考文献を記載することで、ナノ材料を含む新機能材料に関する課題や期待を記述した。

これらの調査研究の結果、MEMS/NEMS の材料技術と応用分野をロードマップとともに示すことができ、ナノ材料を含む機能性材料の開発と MEMS/NEMS との融合の必要性を明らかにできた。

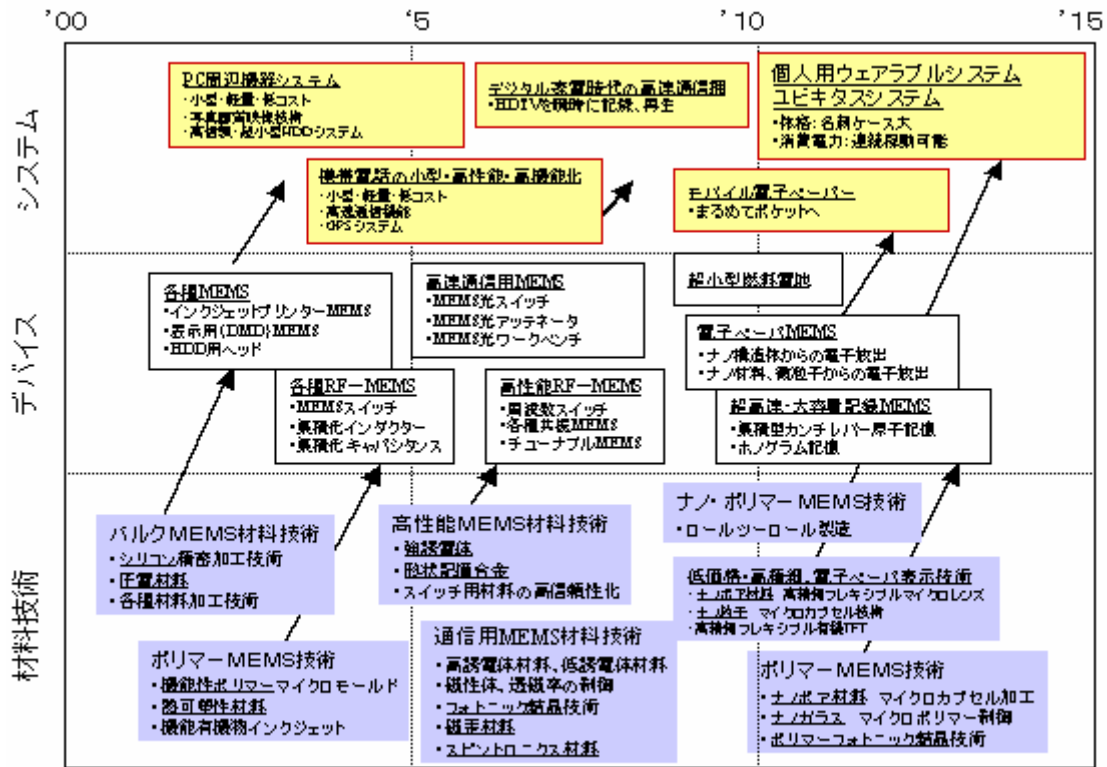
(まとめ)

ここではナノ材料を含む新機能材料を MEMS や NEMS 応用製品による要求側面

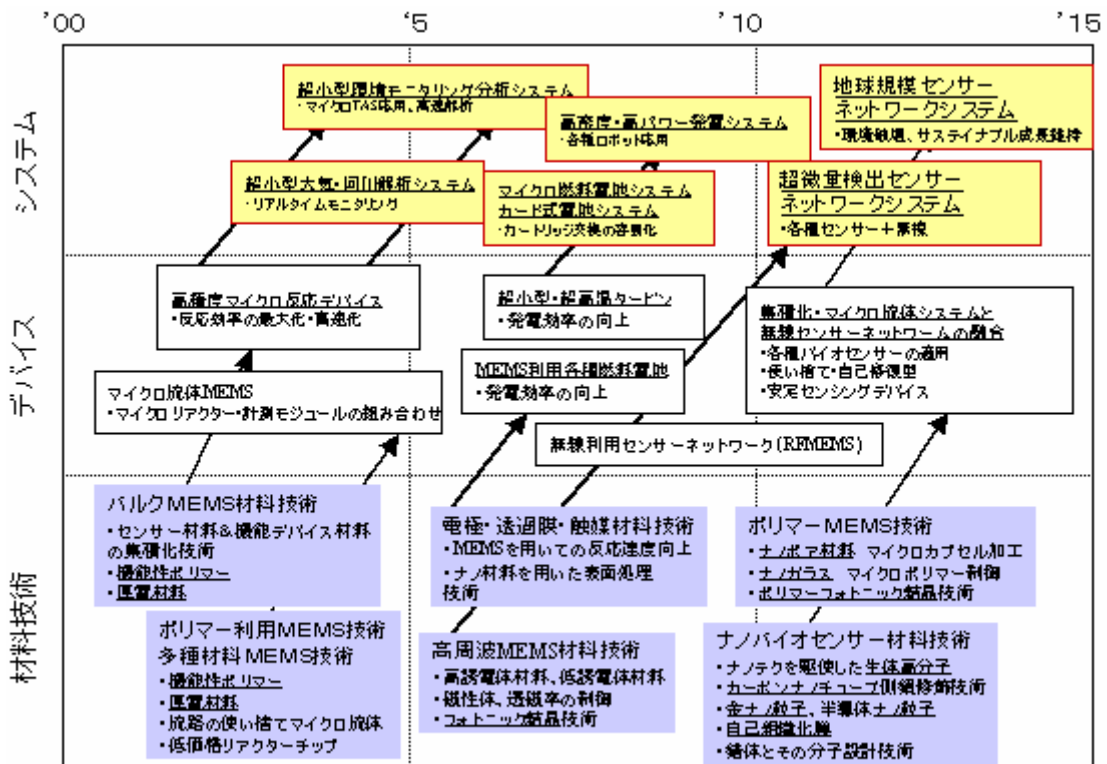
から、応用面からの課題を踏まえながら、現在すでに実用化段階にある MEMS における材料技術と、研究開発段階にある MEMS/NEMS における材料技術に分類して報告した。MEMS は既に 20 年以上の研究開発の歴史があるが、利用する材料は単結晶シリコン、ポリシリコン、窒化シリコン、シリコン酸化膜、各種配線材料等のシリコンプロセスとして使い慣れた材料であった。より機能を高めるために、1) 全く異なる機能材料基板を利用する場合、2) 機能性膜を積層する場合と、3) 生体材料と親和性を取るための表面処理等が考えられる。しかしシリコン系半導体製造のシリコンプロセスで使い慣れた材料以外の機能材料をプロセス親和性、統合性をとって使いこなすことは実際には容易ではなく、新材料の搭載は研究開発の域を脱せない MEMS が多かった。最後に新機能材料に関する将来展望を鳥瞰するために、システムからの要求、それに利用される MEMS や NEMS、更にそのデバイスを実現する機能材料、あるいは将来必要とされる機能材料をロードマップ形式で示した。この結果、現在開発中の MEMS や将来システムに必要となる MEMS/NEMS では、ナノ材料を含む機能材料の開発と MEMS との融合が必須であることが判明した。今後はこの分野において、産官学が一体となった取り組みが必要となるであろう。以下にロードマップを示す。



健康・医療領域で要求されるシステムと必要とされる材料技術ロードマップ



情報・通信領域で要求されるシステムと必要とされる材料技術ロードマップ



環境・エネルギー領域で要求されるシステムと必要とされる材料技術ロードマップ



## 5. 新機能性材料の NEMS への展開を促進するための提言

本項目は本論内容を踏まえて、新機能性材料とその加工・応用を取り巻く技術の将来展望と有るべき姿について検討され、第 5 章として構成した。

(提言)

材料、デバイス、システムは階層構造を構成しており、加工・アSEMBル技術はこれらを繋ぐ役割を担っている。MEMS はシステム化の技術であり、高度に発達したシリコン微細加工技術を駆使した加工およびアSEMBル技術によって、既存の材料をベースに、マルチディシプリナリー要素技術を複合・集積化することによって新しい機能を有するシステムを創出してきた。MEMS 技術のこれまでの進展は、特にシリコンの微細加工技術の進展によるところが大きい。

一方、ナノテクノロジーは究極的には元素をアSEMBルすることで新機能材料を創製することを目指している。材料をナノオーダで構造制御することによって始めて発現する量子効果などに起因する新物性・新機能は多い。

MEMS 技術はこのナノテクノロジーの進展と相まって、更なる微小化が積極的に進められ、NEMS へと発展・進化していくと予想される。しかし、実社会とのインターフェースを考えると、必ずしもシステム全体の小型化がメリットを生み出すわけではなく、システムサイズとしてはナノよりもマイクロの方が役に立つ局面は多い。期待されるのは、MEMS をプラットフォームとして、ここにナノテクノロジーによって創製された新物性・新機能を有する新機能性材料を積極的に融合することによって実現される NEMS である。

新機能性材料を NEMS に応用展開するためには、材料の研究開発と同時並行的に新機能性材料にふさわしい加工技術を研究開発することが必要である。しかし、種々の手法で創製される様々な新機能性材料の加工方法を、トップダウンアプローチの代表格であるシリコン微細加工技術のみで実現し、従来の MEMS 加工技術の中で統合しようと試みる事は得策ではない。

世界をリードできる体制で新機能性材料を応用した NEMS の研究展開を行うために、以下の 3 つを提案したい。

(1) 新機能性材料分野では、生体・バイオ材料から無機・有機・金属材料、デバイス、システム、その他異分野の研究者が従来の分野の枠を超えて議論をするよい機会が生まれつつある。この機会を積極的に促進することによって、産業革命に匹敵するような革新的な研究開発が行われる機運を高めるべきである。

(2) NEMS は、原子・分子を積み上げるボトムアップアプローチとトップダウンアプローチの双方向からの融合領域として捉えるべきである。新機能性材料の多くは、セルフアSEMBリなどの原理を用いて原子・分子レベルで構造を制御されている。これらの新機能性材料をそれぞれ最適な加工方法でコンポーネントレベルに加工し、これをトップダウンアプローチで製作した MEMS 技術にアSEMBルすることで NEMS を実現するアプローチを積極的に推し進めるべきである。

(3) 新機能材料の有する非常に大きな可能性を漠然と探索するのではなく、材料 - デバイス - システムの階層構造を社会ニーズからシステム デバイス 材料という順番に辿ることにより材料レベルでの目標仕様とその実現時期を明記したロードマップを作成・公表し、これに基づいた研究開発を行う体制を早期に立ち上げるべきである。

NEMS は 21 世紀の国家的な基盤技術の一つとして重要であり、上記提言内容の実現には、国家プロジェクトとしての取り組みが強く求められる。



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

