

平成 1 5 年度
新機能性材料の NEMS への展開
報告書

平成 1 6 年 3 月

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

序

戦後のわが国の経済成長に果たした機械工業の役割は大きく、また機械工業の発展を支えたのは技術開発であったと云っても過言ではありません。また、その後の公害問題、石油危機などの深刻な課題の克服に対しても、機械工業における技術開発の果たした役割は多大なものでありました。しかし、近年の東アジアの諸国を始めとする新興工業国の発展はめざましく、一方、わが国の機械産業は、国内需要の停滞や生産の海外移転の進展に伴い、勢いを失ってきつつあり、将来に対する懸念が台頭しております。

これらの国内外の動向に起因する諸課題に加え、環境問題、少子高齢化社会対策等、今後解決を迫られる課題が山積しているのが現状であります。これらの課題の解決に向けて従来にもましてますます技術開発に係わる期待は高まっており、機械業界あげて取り組む必要に迫られております。わが国機械工業における技術開発は、戦後、既存技術の改良改善に注力することから始まり、やがて独自の技術・製品開発へと進化し、近年では、科学分野にも多大な実績をあげるまでになってきております。

これからのグローバルな技術開発競争の中で、わが国が勝ち残ってゆくにはこの力をさらに発展させて、新しいコンセプトの提唱やブレークスルーにつながる独創的な成果を挙げ、世界をリードする技術大国を目指してゆく必要が高まっております。幸い機械工業の各企業における研究開発、技術開発にかける意気込みにかげりはなく、方向を見極め、ねらいを定めた開発により、今後大きな成果につながるものと確信いたしております。

こうした背景に鑑み、当会では機械工業に係わる技術開発動向等の補助事業のテーマの一つとして財団法人マイクロマシンセンターに「新機能性材料のNEMSへの展開」を調査委託いたしました。本報告書は、この研究成果であり、関係各位のご参考に寄与すれば幸甚であります。

平成16年3月

社団法人 日本機械工業連合会
会 長 相 川 賢 太 郎

序

先端加工技術が集約された MEMS/NEMS (Micro(Nano) Electro Mechanical Systems) は、インクジェットプリンターヘッドや自動車の加速度センサ等に実用化され、不況といわれるわが国の現状でも毎年大きな伸びを示す今日の代表的成長産業領域となっている。機械産業全体としても、IT革新によるネットワーク社会の成熟や、健康で安全な社会への要望から、軽量コンパクトで環境やエネルギー資源へも配慮した賢い機械として MEME/NEMS に期待がもたれている。

この成長分野の更なる展望を考えたとき、応用として医療やバイオ、環境分野等への多方面への広がりが望まれていると共に、次世代基盤技術としても、これまで研究が進んだ Si 以外の新機能性材料やナノテクノロジーとの融合による新たな付加価値の創出という観点での期待がもたれている。

MEMS/NEMS の最近の研究開発動向としても、ナノスケールからのボトムアップ技術や材料自体の特異性が注目されており、様々な新機能性材料の多分野への展開が検討され始めている。また MEMS/NEMS はナノテクノロジーを産業・民生に展開するための手段系の基盤技術としても注目されている。

このような状況において我が国が世界をリードして行くためには、単に従来の機械の小型化・軽量化を進めるだけでなく、独自性のある微細加工や素材そのものの特性を核とした高付加価値デバイス・システムの実用化に対して、機械工業の発展的将来像を想定した予見を持つことが重要である。

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、特に我が国として強みの出せる MEMS/NEMS 関連の新機能性材料や先端の加工・製造技術の現状、および応用の可能性を明らかにすべく調査研究活動を行ったものである。関係各方面において広く利用いただければ幸いである。

平成16年3月

財団法人 マイクロマシンセンター
理事長 下山敏郎

事業運営組織

本調査研究事業は財団法人マイクロマシンセンター内に「新機能性材料の NEMS への展開に関する調査研究委員会」を設けて調査研究活動を実施した。

- 委員長 田畑 修 京都大学 大学院 工学研究科 教授
(2003年9月まで 立命館大学 理工学部 機械工学科 教授)
- 委員 橋口 原 香川大学 工学部 助教授
年吉 洋 東京大学 生産技術研究所 助教授
丸山茂夫 東京大学 大学院 工学系研究科 助教授
小野崇人 東北大学 大学院 工学研究科 助教授
小原 拓 東北大学 流体科学研究所 助教授
磯野吉正 立命館大学 理工学部 機械工学科 助教授
澤田廉士 九州大学 大学院 工学研究院 教授
(2003年12月まで 日本電信電話株式会社 主幹研究員)
- 前田龍太郎 独立行政法人 産業技術総合研究所 グループ長
三原孝士 オリパス株式会社 未来創造研究所 上席研究員
吉村雅司 住友電気工業株式会社 主査
古田一吉 セイコーインスツルメンツ株式会社 技術本部 部長
八木 健 株式会社ニコン コアテクノロジーセンター
岡田亮二 株式会社日立製作所 研究開発推進本部 部長
入江康郎 株式会社富士総合研究所 主任研究員
平岡睦久 富士電機アドバンステクノロジー株式会社 グループマネージャー
深見達也 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 グループマネージャー
山下慎次 株式会社安川電機 開発研究所 担当課長
手塚信一郎 横河電機株式会社 先端技術研究所

事務局

- 青柳桂一 財団法人マイクロマシンセンター 専務理事
織田 誠 財団法人マイクロマシンセンター 業務部長
戸口洋一 財団法人マイクロマシンセンター 研究開発課長

「新機能性材料の NEMS への展開に関する調査研究事業報告書」

目 次

序	
序	
事業運営組織	
目 次	
総 論	i ~ v
本 編	
はじめに	1
第1章 調査研究の概要	2
1. 1 調査研究の目的	2
1. 2 調査研究の体制	2
1. 3 調査研究の内容	3
1. 4 実施結果	4
1. 4. 1 次世代 MEMS/NEMS に期待される新機能性材料	4
1. 4. 2 次世代 MEMS/NEMS に期待される新機能性材料の加工	7
1. 4. 3 新機能性材料を必要とする MEMS/NEMS の応用	8
1. 4. 4 新機能性材料の NEMS への展開を促進するための提言	11
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	13
2. 1 まえがき	13
2. 2 カーボンナノチューブ	14
2. 3 フラーレン	18
2. 4 ナノメタル	21
2. 5 ナノセラミックス	25
2. 6 ナノガラス	28
2. 7 ナノ粒子 (ナノクラスター)	30
2. 8 フォトニック結晶	33
2. 9 ナノポア材料	37
2. 10 生体高分子	40
2. 11 強誘電体	47
2. 12 low-k 材料	50
2. 13 スピントロニクス材料	52
2. 14 導電性ポリマー	56
2. 15 超塑性材料	60
2. 16 圧電材料	63
2. 17 超磁歪材料	66
2. 18 形状記憶合金	69
2. 19 自己組織化膜	72
2. 20 まとめ	77
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	80
3. 1 まえがき	80
3. 2 リソグラフィ技術	81
3. 2. 1 フォトリソグラフィ技術	81
3. 2. 1. 1 EUV リソグラフィ	81

3. 2. 1. 2	EBリソグラフィ	82
3. 2. 1. 3	X線フォトリソグラフィ	83
3. 2. 2	プローブナノリソグラフィ技術	84
3. 2. 2. 1	プローブ陽極酸化加工	84
3. 2. 2. 2	ディップペンナノリソグラフィ	86
3. 2. 3	ナノインプリンティング技術	87
3. 2. 3. 1	ナノインプリント	87
3. 2. 3. 2	ソフトリソグラフィ	88
3. 2. 3. 3	LISA(Lithographically induced self-assembly)	89
3. 3	エッチング技術	93
3. 3. 1	ビーム加工	93
3. 3. 2	プラズマ加工	96
3. 4	堆積技術	100
3. 4. 1	気相成膜法	100
3. 4. 2	液相法	102
3. 4. 3	特殊堆積技術	104
3. 5	研磨・切削・メッキ・乾燥・接合加工技術	107
3. 5. 1	研磨・切削加工技術	107
3. 5. 1. 1	EEM(Elastic Emission Machining)法	107
3. 5. 1. 2	超純水電気化学的加工法	108
3. 5. 1. 3	プラズマ CVM(Chemical Vaporization Machining)法	109
3. 5. 1. 4	原子間力顕微鏡(AFM)機構を利用した極微小切削加工法	109
3. 5. 2	メッキ・乾燥・接合加工技術	111
3. 5. 2. 1	無電解メッキ法	111
3. 5. 2. 2	超臨界乾燥法	112
3. 5. 2. 3	表面活性化接合(Surface Activated Bonding:SAB)法	113
3. 6	バイオ・化学を応用した加工技術	115
3. 6. 1	DNA・セルフアセンブル分子を利用した加工	115
3. 6. 2	DNA・蛋白チップアレイの作製技術	117
3. 6. 3	バイオミメティック構造の作製	119
3. 7	ナノ細線・ナノチューブの加工技術	122
3. 7. 1	ナノチューブ・ナノ細線の作製方法	122
3. 7. 1. 1	カーボンナノチューブ(Carbon Nanotubes,CNTs)の合成	122
3. 7. 1. 2	CNTsの径の制御	123
3. 7. 1. 3	CNTs以外のナノチューブの合成	123
3. 7. 1. 4	ナノワイヤの作製方法	124
3. 7. 2	機能性を発現するための加工方法	125
3. 7. 2. 1	CNTsの配向	125
3. 7. 2. 2	CNTsの分離	125
3. 7. 2. 3	ピーポッドの作製	125
3. 7. 2. 4	CNTsの磁気特性加工	126
3. 7. 2. 5	CNTsの化学修飾	126
3. 7. 3	ナノデバイス・ナノ電気機械に応用するための加工	126
3. 7. 3. 1	半導体ナノワイヤ超格子	127
3. 7. 3. 2	CNTsの接合構造形成	127
3. 7. 3. 3	CNTsプローブの作製	127
3. 8	まとめ	130
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		131
4. 1	まえがき	131

4. 2	実用化段階にある MEMS における材料応用技術	132
4. 2. 1	光 MEMS	132
4. 2. 2	RF-MEMS	136
4. 2. 3	圧力センサ	138
4. 2. 4	加速度センサ	141
4. 2. 5	ジャイロ	143
4. 2. 6	流量センサ	145
4. 3	研究開発段階にある MEMS/NEMS における材料応用技術	147
4. 3. 1	フォトリソグラフィと NEMS の融合	147
4. 3. 2	カーボンナノチューブ応用デバイス	150
4. 3. 3	ナノ粒子応用	162
4. 3. 4	生体材料利用デバイス	170
4. 3. 5	ナノ共振器の高周波デバイス応用	176
4. 3. 6	スキャニングプローブのデータストレージ応用	179
4. 3. 7	センサーネットワーク	182
4. 3. 8	バイオ MEMS	185
4. 3. 9	マイクロリアクタ	191
4. 4	MEMS/NEMS のロードマップと必要な新機能性材料	197
4. 4. 1	健康・医療分野でのロードマップ	197
4. 4. 2	情報・通信分野でのロードマップ	198
4. 4. 3	環境・エネルギー分野でのロードマップ	200
4. 5	まとめ	202
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		206
材料名による簡易索引		208