

平成12年度 先導研究報告書
NEDO-I T-0034

3Dナノテクノロジー

平成13年3月

新エネルギー・産業技術総合開発機構

エニール
NEDO 図書・資料室

(財) 製造科学技術センター



010018969-5

『3Dナノテクノロジー』

財団法人 製造科学技術センター

平成13年3月 193頁

調査目的

製品技術、製造技術の微細化（マイクロ化・ナノ化）の方向で、世界をリードできる画期的な技術革新を生むためには、これまでの超精密加工技術や微細加工技術、マイクロマシン技術等の研究成果に加えて、原子分子レベルの構造効果などナノメーター領域固有の機能を発現するナノ構造の広域集積化により、ナノ構造固有機能をマクロに発現させるという、新たな技術コンセプトの実証確立が不可欠である。

本調査研究では、このような3Dナノテクノロジー技術の技術動向を調査し、技術課題を抽出することを目的とする。

目次

まえがき	(i)
委員名簿	(ii)
概要 (英文)	(iii)
(日本文)	(iv)
第 1 章 調査研究の目的と進め方	1
第 2 章 研究開発動向と研究開発課題の検討	3
2. 1 3 D ナノ要素技術	3
2. 2 ナノ転写技術	6
2. 3 力覚と視覚を用いたナノマニピュレーションにおけるインタフェース技術	1 1
2. 4 レーザー微細加工技術	2 0
2. 5 プラズモンエンハンス近接場光素子を用いた微細加工技術	3 2
2. 6 ナノ粒子ビーム加工技術	4 0
2. 7 セラミックスの超微細・高精度加工技術	4 7
2. 8 ナノ構造の創製とマイクロメカニズムへの適用技術	5 4
2. 9 光スイッチ用ナノフィルム技術	6 0
2. 10 バイオテクノロジーにおけるナノ加工技術	6 6
第 3 章 ナノテクノロジー関連プロジェクトの動向	7 2
3. 1 材料ナノテクノロジープログラム	7 2
3. 2 次世代半導体材料・プロセス基盤技術プロジェクト	7 4
第 4 章 海外動向調査	7 5
4. 1 International Conference on Computational Nanoscience	7 5
第 5 章 ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム	8 0
第 6 章 今後の課題	8 7
付録 「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」 講演集	9 5

まえがき

製造技術、即ち「ものづくり」の技術は、近代産業社会を支える基盤技術であり、その発展は今後の社会発展を支える原動力である。現在我が国の製造業は世界的な競争力を持つに至っているが、景気の低迷に伴う我が国の技術開発余力の衰退、米国における製造技術の研究開発への関連な戦略、東南アジア諸国を中心とする発展途上国の急迫などにより、現在我が国の製造技術が有している対外的な伯仲状況または優位性をいつまで持続できるか、分からない状況にあるともいえる。

このような中、今後我が国の産業競争力を維持していくためには、製造業において我が国が世界に優位性を示すことができる技術革新を、産学官の連携のもと、強力に進めることが不可欠である。

従来、製造技術並びに製品としての価値の高度化は、大量生産化、高効率化、低コスト化、高性能化、またそれを可能にするために技術の精密化、微細化というような定量的尺度が重視されてきた。特に、微細化（マイクロ化・ナノ化）の方向は、今後さらに日米欧で激しい競争が続く技術分野である。事実米国では、「国家重要技術に関する 1995 年報告書」において「米国が長期的な国家安全保障または経済的繁栄を更に進めるために、米国が開発していくことが不可欠である技術」として、「製造技術区分」では「マイクロ／ナノ製造・加工」が「部品製造」、「連続的材料プロセッシング」となると重要技術領域に設定された。また、米国は、本先導研究のは始まった後であるが、2001 年の米国予算教書においてナノテクノロジーを重点化領域に取り上げ、「ナショナル ナノテクノロジー イニシアチブ」として、この分野の技術開発を国を挙げて重点的に推進することを宣言している。大統領の交代はあったが、共和党政権下でもこの政策は継続されるものと予想される。

我が国も、この重要な技術領域に対して、現在まで、10 年に渡って、「マイクロマシン」のプロジェクトを推進してきており、世界をリードする役割を果たしてきている。このマイクロの視点をさらにミクロな領域に押し進め、「マイクロ／ナノ」に関する技術開発を強力に推進することが重要である。そこにおいては、微細加工技術の精緻化、また現在重要かつ大きな分野になっているマイクロマシン技術の進化をめざすことはもとよりであるが、通常サイズの機械構成部品の重要性が減るわけではないので、マイクロ／ナノの視点で通常サイズの機械構成部品の高性能化、差別化をねらう開発視点が重要である。即ち、今後の世界をリードできる画期的な技術革新を生むためには、現在までに実施してきた超精密加工技術や微細加工技術、マイクロマシン技術等の研究成果を活かし、さらに発展させ、機能を発現するナノ構造の創製とその広域集積化により、マクロな新機能を発現させるという、新たな技術コンセプトの実証確立が不可欠である。

特に、ナノテクノロジーを活用する技術開発に対する期待は大きく、ナノテクノロジーの中でも、エレクトロニクス分野への展開、材料分野のナノ技術、バイオ分野への展開と共に、製造分野の革新のために必須なナノレベルの構造創製を可能にする超微細加工・組立技術の研究開発は、科学技術会議の「ナノテクノロジーの戦略的推進方策に関する懇談会報告書」（平成 12 年 12 月）にも、今後の重要な技術開発項目として明記されている。

このようなナノ・マニファクチャリング（ナノ製造技術、ナノ構造創製超微細加工・組立技術）に関する研究開発により汎用性のあるナノスケールの製造技術を確立することができれば、多くの分野において、新たな機能を発現する革新的製造技術の創製に結びつくと期待されており、そのための大規模技術開発の必要性が強く指摘されている。

こうした中、平成 11 年度からナノテクノロジーの製造技術への応用についての検討として、高機能を維持・発展させつつ構成要素をダウンサイジングし、これを広域に集積化したナノ構造・機能から構成される構造物の実現を目指し、3D ナノテクノロジー、即ち、広域 3 次元ナノオーダー構造制御による新機能の発現と機械技術の高機能化を目指す技術の動向調査を実施しており、本年度は、第 2 年度として、重要な技術開発課題を抽出することを目的とするものである。

3D ナノテクノロジー調査研究委員会
委員長 中島 尚正

3 D ナノテクノロジー調査研究委員会 委員名簿

委員長	中島 尚正	東京大学大学院 工学系研究科 産業機械工学専攻	教授
幹事	矢部 彰	経済産業省 産業技術総合研究所 機械技術研究所	企画室 室長
	尾崎 浩一	経済産業省 産業技術総合研究所 機械技術研究所	極限技術部
		量子技術研究室 室長	
	加藤 孝久	経済産業省 産業技術総合研究所 機械技術研究所	
		機械量子分子工学特別研究室 室長	
委員	小鍛治 繁	経済産業省 産業技術総合研究所 機械技術研究所	極限技術部
		部長	
	永寿 伴章	経済産業省 産業技術総合研究所 機械技術研究所	
		生産システム部 生産機械研究室 室長	
	三井 公之	慶応義塾大学 理工学部 機械工学科	教授
	川久保洋一	信州大学 工学部 機械システム工学科	教授
	下山 勲	東京大学大学院 工学系研究科 機械情報工学専攻	教授
	畑村洋太郎	東京大学大学院 工学系研究科 産業機械工学専攻	教授
	帯川 利之	東京工業大学 大学院 理工学研究科 機械制御システム専攻	教授
	村田 良司	東京理科大学 理工学部 機械工学科	教授
	三矢 保永	名古屋大学大学院 マイクロシステム工学専攻	教授
	橋本 秀紀	東京大学 生産技術研究所 第3部	助教授
	三宅 淳	経済産業省 産業技術融合研究所	
		三次元細胞組織モジュール工学グループ 首席研究官	
	星野 修二	石川島播磨重工業株式会社 技術開発本部	
		メカトロ総合開発センター 副所長	
	千葉 正毅	S R I インターナショナル 先端研究開発プロジェクト担当	
		本部長	
	林田 一徳	光洋精工株式会社 総合技術研究所 軸受研究部	グループ長
	竹田太四郎	株式会社 小松製作所 研究本部 中央研究所	所長
	かど野 勝	シャープ株式会社 生産技術開発推進本部 生産技術開発センター	
		精密加工センター	
	明石 友行	住友重機械工業株式会社 企画本部	主査
	柳沢 雅広	日本電気株式会社 機能デバイス研究所 記憶研究部	主管研究員
	河野 顕臣	株式会社 日立製作所 機械研究所 加工技術開発センタ	
		センタ長	

オブザーバー

経済産業省：

西畑 徹	産業技術環境局 産業技術ユニット	研究開発課
森下 泰	製造産業局 産業機械課	課長補佐
大川 龍郎	製造産業局 産業機械課	技術係

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：

阿部 聡 企画調整部 産業技術企画課 課長

小田 宏行 企画調整部 産業技術企画課 課長代理

日野 俊喜 応用技術開発室 主査

事務局

財団法人 製造科学技術センター：

梅垣 淳一 生産環境室

岡宗 秀一 F A オープン推進室

Outline

Micro- and nano-scale technologies are playing an increasingly important role and there is intense competition among Japan, America and Europe in this field. To ensure that the Japanese manufacturing industry remains competitive and pioneering, industry, academia and the government must work together to promote technological development.

With this technological trend, it is important to develop the emerging micro-machining and micro-machine technologies, as well as to enhance the performance of and differentiate ordinary-sized mechanical parts and products by utilizing micro- and nano-scale technology.

It is well known that at the nanometer or molecular scale, different phenomena from those at the ordinary scale appear, as atomic and molecular effects become dominant. In order to develop pioneering technology, we must conduct research and develop super-precision machining technology, micro-processing technology, and micro-machines. We must also develop new macro functions by creating and integrating new nano structures. These innovative technologies must also be field-proven.

The present series of studies is intended to apply various nano-scale phenomena to a wide area including machines of ordinary size, and to develop new technologies for creating mechanical elements that have wholly new functions. We therefore surveyed the status of promising new technologies, identified the tasks that lie ahead, and analyzed the effects on industry, in the technological fields of: fast atom beam micro-fabrication, chemo-mechanical machining technology, micro-molding replication, and levitated nano beam device technology. These technologies are basic processing technologies for disseminating wide-area ultra-fine processing techniques and for creating functional structures.

In this fiscal year, from the viewpoint of “nano-scale manufacturing” technology (Nano-structured creative ultra-fine processing/assembly technology) indispensable for its utilization and manufacturing, we investigated the present status, technical issues and extended manufacturing effects along with the trend of the related research and development.

We also investigated optical ultra fine processing technology, chemo-mechanical machining technology and nano-particle beam processing technology as the basic technologies to create the functional structure widely developing the ultra fine processing. Moreover, our research covered nano-structure transcription technology surpassing the present photolithography as the mass production technology that will realize effective manufacturing of nano-structure. There added some more researches: nano-manipulation technologies such as survey, evaluation, machining and fixing on the level of atom and molecule indispensable to application for biotechnology, creation of nano-structure and realizing nano-function. Then, our research focused on machinery component technology applying nano-structure and nano-function as well as structural technologies such as micro-actuator, and micro-mechanism of nano-function film. In this context, we determined the scope and directions of this research and development as the whole of “nano-manufacturing” technologies.

“International symposium on nano-manufacturing” was held in cooperation with researchers and experts from industry, academia and government to discuss objectives, issues and approaches to nano-technologies in the field of manufacturing technology.

In addition to that, the trend of the research and development in the field of related technologies was investigated through participation in the international meetings and lectures by leading researchers.

In conclusion, we suggested the issues on research and development, and approaches, “nano-scale manufacturing technology” in the future generalizing the results from the above mentioned investigations.

概要

今後我が国の産業競争力を維持していくためには、製造業において我が国が世界に優位性を示すことができる技術革新を、産学官の連携のもと、強力に進めることが不可欠である。一方、微細化（マイクロ化・ナノ化）の方向は、今後さらに日米欧で激しい競争が続く技術分野であるが、そこにおいて、微細加工技術の精緻化、また現在重要かつ大きな分野になっているマイクロマシン技術の進化をめざすことはもとよりであるが、マイクロ／ナノの視点で新たな機能を実現し、通常サイズの機械構成部品の高性能化、差別化をねらう開発視点が重要である。

ナノメートルオーダーあるいは分子の大きさの微細な領域では、原子分子レベルの構造効果等、通常サイズとは異なる諸現象が顕著になることが知られているが、今後の世界をリードできる画期的な技術革新を生むためには、現在までに培ってきた超精密加工技術や微細加工技術、マイクロマシン技術等の研究成果を活かし、さらに発展させ、機能を発現するナノ構造の創製とその広域集積化により、マクロな新機能を発現させるという、新たな技術コンセプトの実証確立が不可欠である。

本調査研究では、これらナノ領域で生じる諸現象を通常サイズの機械に対応する広い領域にわたって発現させ、従来にない優れた機能を持つ機械構成要素を創出する新たな機械技術の構築を目指すため、下記のように、幅広い技術分野において一連の調査研究を行ない、技術課題を抽出・整理するとともに、それらの産業的波及効果を調査・分析し、今後の研究開発課題を整理してきた。

今年度は、ナノテクノロジーの実用化、産業化に欠かせない「ナノ・マニファクチャリング」技術（ナノ製造技術、ナノ構造創製超微細加工・組立技術）という視点で、関連の研究開発動向も併せて現状と技術課題を調査した。

超微細加工を広域に展開して機能構造の創製するための基盤的な加工技術として、レーザー光や光近接場光による光利用微細加工技術、ケモメカニカル加工技術、ナノ粒子ビーム加工技術について調査した。ナノ構造の効率的な製造を実現する量産技術として、これまでのフォトリソグラフィを超えるナノ構造転写技術についても調査した。また、バイオテクノロジーへの応用やナノ構造創製、ナノ機能実現に欠かせない原子、分子レベルでの観察、評価、加工、固定などナノマニピレーション技術について調査した。さらに、ナノ構造、ナノ機能を応用する機械要素技術、構造体技術として、ナノ機能フィルムなどのマイクロアクチュエータやマイクロメカニズムについて調査した。併せて、「ナノ・マニファクチャリング」技術全体としての研究開発の方向性、指針についても整理した。

また、国内外から、産官学の研究開発者、有識者を集めて、「ナノマニファクチャリングに関する国際シンポジウム」を開催し、製造技術分野におけるナノテクノロジーの研究開発目標、課題と研究への取り組み方などについて検討した。

併せて、国際研究集会への参加や先端研究者の講演を通して、関連する技術分野の研究開発動向を調査した。

最後に、上記の調査検討結果を総合して、今後の研究開発課題「ナノ・マニファクチャリング技術」を提言し、そのすすめかたを提案した。

第1章 調査研究の目的とすすめかた

3Dナノテクノロジー、即ち、広域3次元ナノオーダー構造制御による新機能の発現と機械技術の高機能化を目指す技術として重要と考えられるものについて、個別技術毎に、現状の技術、技術課題を抽出・整理するとともに、それらの産業的波及効果を調査・分析することが重要と考え、平成11年度から「3Dナノテクノロジー」としての調査研究を実施している。

平成11年度においては、3Dナノテクノロジーの有効性を幅広い技術分野において明らかにすることが最重要であると考え、定性的であっても新しい視点のものは広く調査対象とした。そのため、各個別技術の市場規模、産業規模はどの程度であるか、という定量的説得性を今だ示し得ていない調査段階の技術も含まれていた。

特に重要な技術としては、レーザー加工の微細化、加工能率の高速化、さらには機能構造創製のための超微粒子作成技術を一段と進めるための高コヒーレンス量子ビームの発生技術及びそれによる量子ビーム加工技術があった。

また、3Dナノテクノロジーをエネルギー技術分野における技術革新に展開していくことも極めて重要であり、マイクロ・ナノ構造の機能活用による熱電変換素子技術などの革新的高度化、気液あるいは固液界面のマイクロ領域現象の制御による熱輸送技術の高効率化など、エネルギー変換技術分野における技術展開に関する調査を継続して実施していく必要性が指摘された。

さらに、機能発現マイクロ・ナノ構造の集積化技術に関しては、平成11年度の調査対象技術内容以外にも効果的な技術開発方向があると思われるので、その調査研究を継続する必要性も指摘された。

一方、バイオテクノロジーは「マイクロ領域の現象が高度なマクロ機能として発現する」という点において、3Dナノテクノロジーとの共通点があるうえ、今後、産業としても大きくなる分野である。従って、バイオテクノロジーの成果を3Dナノテクノロジーが取り入れる、逆に3Dナノテクノロジーの考え方でバイオテクノロジーの技術展開を図る、という双方向の視点から、バイオテクノロジー分野における調査研究をより幅広く継続的に実施していく必要性も指摘された。

本年度においては、上記のような検討結果を踏まえ、ナノテクノロジーを製造技術分野で実際に役立つ段階で実現することを目標に、議論を通して幅広い分野からの意見を聞きうるシンポジウムを中心に、広い視野からの検討を行った。具体的には、下記の技術項目を中心に技術動向調査等を行い、広域3次元ナノオーダー構造制御による新機能の発現並びに機械技術の高機能化を実現するための技術課題を抽出・整理するとともに、それらの種々の産業分野への応用について調査・分析することとした。

①技術的未詳領域の技術動向調査

- ・マイクロ・ナノ効果利用加工技術
- ・エネルギー変換素子技術
- ・機能発現マイクロ・ナノ構造の集積化技術

②実際の製品への応用可能性調査

- ・機能発現マイクロ・ナノ構造の種々の分野への応用
- ③プロジェクト化の適否検討
- ・さらなる開発技術目標の明確化と応用先の調査検討

実施体制としては、(財)製造科学技術センター内に、大学、国立研究所、民間企業等の学識経験者からなる「3Dナノテクノロジー調査研究委員会」を設置して、下記の調査研究を実施した。

- ①内外の研究開発動向の調査と研究開発課題の検討（第2章）
- ②ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトの調査（第3章）
- ③国際的な研究動向の調査：海外調査（第4章）
- ④内外各分野の研究者有識者からの意見の収集と分析：シンポジウム開催（第5章）
- ⑤研究開発プロジェクトの検討（第6章）

第2章 研究開発動向と研究開発課題の検討

2.1 3Dナノ要素技術

2.1.1 はじめに

3Dナノテクノロジーは、新しい時代の要請に応えるための新しいナノテクノロジーであり、今後、派生技術が無数に生まれ、大きな技術分野に育つのは想像に難くない。それでは、この未来開拓技術は従来技術の指向性と何が異なり、またどのような特徴を有するのであるだろうか。3Dナノテクノロジーの特徴を闇雲に定めることは却って技術の広がりを阻害する恐れもあるが、3Dナノテクノロジーの開発を効率よく推し進めるにあたっては、従来技術との指向性の違いを明確にし、新たな技術目標を設定することが非常に重要となろう。本稿では、これから具体化するであろう3Dナノ要素技術への要請事項について、特に著者の専門である創成加工技術の観点から議論することにする。

2.1.2 新しいナノ要素技術

ここでは、3Dナノテクノロジーの一つの技術分野として、機械的な要素を創成するためのナノ（マイクロ）テクノロジー（本稿では、3Dナノ要素技術と呼ぶ）を考える。さて、3Dナノテクノロジーに関する動向調査において、3Dナノテクノロジーと従来のナノテクノロジーの指向性の相違について、幾つかの示唆をみることができる。しかし、3Dナノテクノロジーに対する新たな技術的要求については、未だ明確ではない。3Dナノテクノロジーを、例えばMEMSの集積化技術、あるいは超MEMSのような、従来技術の進化形として捉える事もできるが、このような理解は、3Dナノテクノロジーの技術課題を明確化することにはならないであろう。

それでは、以下に、新しいナノ要素技術に対する要請事項を、挙げることにする。最初に挙げるべきものは、柔軟性であろう。マイクロメカニズムには、シリコンや圧電素子のように硬く脆い素材が多用されている。LIGAプロセスに代表されるように、イオンビームエッチングやエピタキシャルエッチングなどによって形状を創出するには、転位などの欠陥の少ない、シリコン単結晶が好都合であり、半導体プロセスを併用すれば、機構と回路を同じ素材の中に用意することができる。しかし、例えば、ナノテクノロジーの利用が期待される医用分野でのマイクロ・ナノメカニズムを考えると、シリコンは機構を構成する材料としては脆く信頼性に欠ける。そこでマイクロメカニズムに適し、しかも柔軟性と信頼性の高い素材の開発が必要となるだろう。また素材に合った微細加工プロセスの確立も必須となる。

実際には、微細化したときの要素の剛性と機構への力の与え方についても注意する必要がある。最も簡単な要素形状として片持梁を想定し、これを例として微細化に際しての剛性の問題を考える。幅 b 、高さ h の矩形断面を有する長さ l の梁の先端に集中荷重 W が作用する場合、梁の先端の変位 δ は次式で与えられる。

$$\delta = \frac{4Wl^3}{Eb h^3}$$

ここで梁の代表寸法を L として相似的に形状を微細化した場合、 $W \propto L^2$ となるように荷重

を与えることができれば、変位 δ は代表寸法 L に比例し、マクロな世界との対応が付けやすい。

次の技術課題として、ソリッドな構造、あるいは一般的なマイクロメカニズムの作成法であるドライエッチングやウェットエッチング等による削り出し一体構造から、内部空間等を有する接合・組立て構造への転換が挙げられる。これにより機構の選択の自由度が大幅に増大する。さて、ソリッドな構造に関する技術としては、例えば CMP による平坦化技術を用いて半導体の回路を三次元的に積層する技術の開発が進められている。CMP には、プラナリゼーションのための超精密加工技術が必要となるが、微細部品の接合・組立技術としては、CMP のような従来形のナノテクノロジーとは全く異なる微小部品のハンドリング技術が重要となるだろう。すなわち、微細な部品を確実に加工し、それらを見失うことなく正確な位置において組み立てるには、素材や微細な加工部品を保管する倉庫と、加工や組み立てのステーションとをハンドリング装置（位置決め・搬送機構を含む）で接続した、いわゆる、フレキシブル生産システム FMS が必要となるだろう。実際、微細部品の接合・組立てには、微細部品に対応させた生産のシステム化技術や接合技術（固相、液相とも可能性あり）を必要とするだろうが、これらを実用的なレベルまで高めることができれば、3D ナノテクノロジーの実現にかなり近づいたことになる。

3D ナノ要素技術の3番目の課題としては、素材と機構のその場創成を挙げることができよう。加工技術は、周知のように除去加工と付加加工とに大別できる。除去加工、例えばマイクロメカニズムで多用されるエッチングは、形状創成に大いに利用されている。一方、付加加工は、一般に能率の悪さが欠点となっているが、形状と素材の同時創成に利用できる。また付加加工によれば、異なる部品あるいは異なる素材の接合が可能であり、一つの部品に接ぎ木のようにして他の部品や異なる材料を成長させることもできる。このように素材と機構のその場創成の利点は、組立ての際の部品の紛失や位置決め精度の低下による組立て精度の低下などといった厄介な問題を避け、一体化した高精度要素を作り出せる可能性が高いことである。またマイクロレベルからナノレベルへの技術的なシフトがあれば、付加速度が遅いことは大きな欠点ではなくなるものと思われる。

ここで、代表的な付加加工であるコーティングにより部品を製作することを想定する。この場合、母材はサポート、薄膜が構造物、即ち部品となり、例えば、熱膨張率の異なる2層の金属からなる薄膜を作れば、機械的な部品としてのバイメタルとなる（実際には、熱膨張率の差が多少ともあれば、平板を作るのは難しい）。予め、除去加工、あるいは付加加工により、母材の表面を所望の形状とすれば、複雑な形状を有する機能膜ができる。しかし、コーティングによる素材と機構のその場創成はいまだ困難であり、他にも実用的な技術はみられない。除去加工は20年後に付加加工に置き換わるといった未来予測もあるが、このような技術転換は簡単には実現しそうにない。現状では多様な方法による能率のよい付加加工の開発が必須である。またサポート無しでのその場創成はカーボンファイバの製造を除けば不可能であるにしても、簡便に除去することのできるサポート材の開発とその除去方法の確立、あるいは、サポート材をメカニズムの支持材として組み込む方法の確立も必要である。

最後に材料的にも多機能なメカニズムを除去加工により作成する一つの方法について考えてみよう。例えば、種々のパターンで材料を分散させた層を CMP と同様の技術によ

り精密に積層した素材に、除去加工を施せば、任意の箇所に任意の材料を配したメカニズムが創出できる可能性がある。素材内の構成要素が十分に三次元的であれば、これに対応した三次元的な除去加工も価値あるものとなるだろう。ただし加工に際しての問題点は、シリコン単結晶のように、均一な材料ではないので、加工速度、加工方位の異方性と加工条件の関係を、予め調査し、加工の実現性について判断しなくてはならないことである。このような場合、マイクロなレベルであれば、機械的なマイクロマシニングが実現されつつあるので、これを利用することも現実的であろう。マイクロメカニカルマシニングでは、通常の微細加工よりも加工精度が高いので、比較的単純な形状の面を加工するにはむいているかもしれない。

2.1.3 加工技術

前節の議論は、必ずしもナノメカニズムを想定したものではない。そこで実際に、ナノレベルのメカニズムを創成することになれば、それに対応した加工技術が必要になる。基本的には二通りのアプローチが考えられる。一つはナノ要素固有の加工技術と呼べるものであり、もう一つはマイクロな加工技術のナノ化である。ナノ要素固有の加工技術としては、AFMなどのプローブの極微細な先端を用いた原子の操作や機械的な切削などがあげられる。一方、マイクロな加工技術の種類は多岐にわたるが、そのナノ化には、加工原理による制約を克服する必要がある。例えば、精度を重視したマイクロメカニカルマシニングには、工具の厚さによって決まる加工限界がある。しかし加工技術としては多様な方式が利用・選択できることが望ましい。

同様な理由により、積層造形などのマクロな三次元形状創成技術のマイクロ化など、マクロからマイクロへの技術改革を推進することが重要であり、これを軽視してはならない。また、多様なマイクロ加工技術を確立することにも力を注ぐべきであり、そうすれば、マイクロ加工技術にヒントを得て、新しいナノ加工技術の開発をいろいろなアプローチで進めることが可能となるであろう。

2.1.4 まとめ

機械的な3Dナノ要素技術への要請事項について、特に創成加工技術の観点から論じた。未だ確立していない技術を話題にしているので、抽象的な議論が中心であり、また著者の専門的関心より、機能より如何に作るかといったことにも重点を置いたが、何らかの役に立てば、幸いである。

2. 2 ナノ転写技術

2.2.1 まえがき

本節では、ナノサイズの 3 次元構造を転写する技術について報告する。

現在、超 LSI のための製造技術として、サブミクロンオーダーの線幅が製作可能なリソグラフィ技術の研究開発が盛んに行われている。従来のガラスマスクを用いたフォトリソグラフィは、マスク製作や、感光性レジストの条件設定、現像時にレジストの粉塵が出ないようにするなど、プロセスが複雑である。電子ビームを用いたリソグラフィは、約 10 nm 程度の解像度が実現できるが[1]、一本一本走査し描画しなければならないので、大量生産には不向きで、歩留まりも悪い。また、X 線を利用したリソグラフィは、20 nm の解像度を實現し、歩留まりも良い[2]。しかし、マスクを製作するプロセスは複雑であり、コストも高い。これら従来のフォトリソグラフィに代わる技術として、印刷技術や型成形技術を応用し、ナノサイズの 3 次元構造を転写する研究が行われている。実現すれば、歩留まり良く大量生産が可能で、コストも安く済む。ここでは、Nature 誌や Science 誌などを中心に近年報告されたナノ転写技術を紹介する。

2.2.2 インプリントリソグラフィ

S. Chou らは、圧縮成形による 3 次元ナノ構造の転写技術を報告している[3]。凸形状を有する型は、ガラスマスクを最小約 25 nm の解像度で電子ビームを使って直描し、RIE (Reactive Ion Etching) を用いて段差を作る。この型をシリコン基板上にスピンコートした PMMA (Polymethyl- methacrylate) に圧力約 13 Mpa で押し付け成形する。この際、PMMA に転写しやすくするために、200℃ 近くに熱しておく。型をはがし、残留した PMMA を RIE によって取り除く。PMMA はガラスとの密着性が悪く、はがれやすい。また熱による収縮

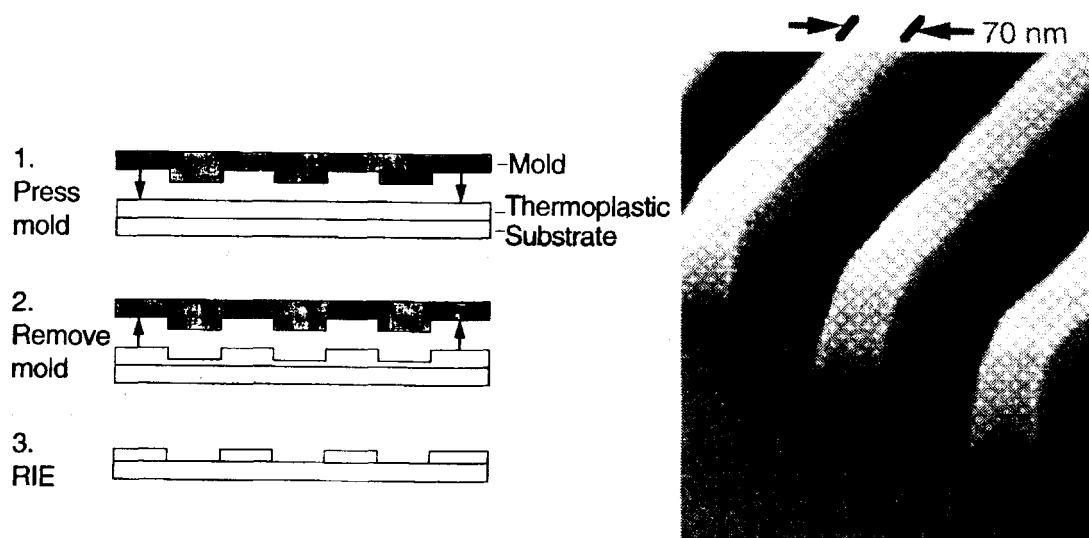


図 2.2-1 インプリントリソグラフィ法と、これを用いて転写された PMMA 樹脂。凸版印刷と同じであり、PMMA に型を押し付け、凹部を作る。その後全面を RIE によって残った薄膜を除去する。

率は 0.5% 以下と低いのが特徴である。従来のフォトリソグラフィに比べ、光による拡散がない、レジストの破片が飛散しない、現像液によるアンダーカットがないなどの点で優れている。また、25 nm の解像度で比較的大きな範囲を一度に成形できるため大量生産に適しており、高価なフォトリソグラフィの装置は必要ないため、製造にかかるコストも安い。

2.2.3 自己組織化膜を使用したマイクロコンタクトプリント

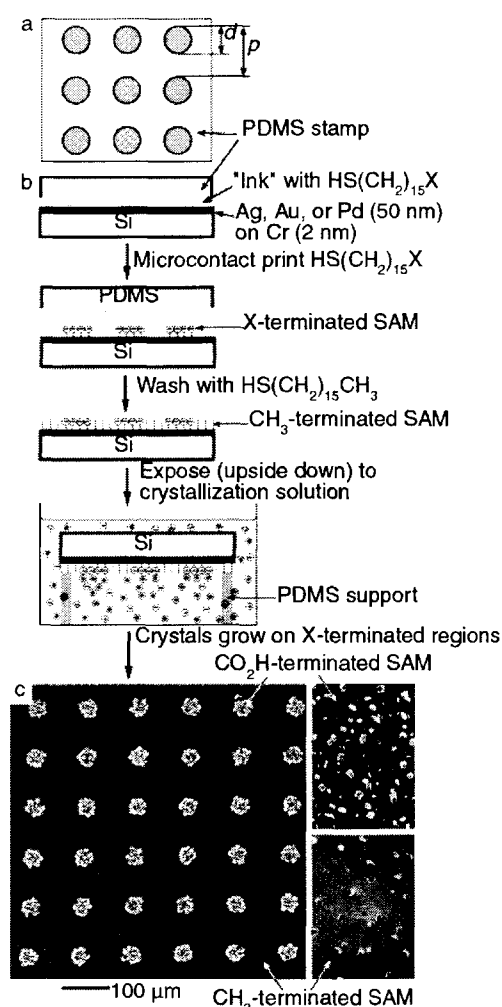


図 2.2-2 自己組織化単分子膜 (SAMs) を用いたマイクロコンタクトプリントとこれを用いて得られたパターンの SEM 写真

G. M. Whitesides らは、自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayers, SAMs) を使った転写法を提案している[4]-[6]。SAMs は一般に、金や銀などの金属の上に、エタノールや水に溶けたチオール基 (SH 基) を持つ分子が特異的に結合することによって形成される。図 2.2-2 に製造プロセスの概要を示した [4]。PDMS (polydimethylsiloxane) で凸形状を有する型を作成し、これに“インク”となる分子を塗る。シリコン基板に金属膜 (Au、Ag、Pd など) を成膜し、これに押し付ける。金属膜に押し付けられた部分だけに SAMs が形成される。以上の方法を、マイクロコンタクトプリントと呼んでいる。この方法によってナノサイズの 3 次元パターンが形成可能であり、歩留まりも良い。図 2.2-2 の下部に写真を示した。

また、図 2.2-3(a)のように、あらかじめ金属膜に段差をつけておき、そこに SAMs を成長させる方法も報告している[5]。このとき段差となる部分には、分子が不規則に並ぶため、その部分だけ特異的にエッチングが可能になる。この原理を用いて、線幅約 50 nm の溝を形成することができている (図 2.2-3(b)参照)。

さらに、マイクロコンタクトプリント法を応用して立体構造を製作する方法も行われている[6]。直径約 2 mm のガラス管にチタンを密着層として、銀を蒸着する。マイクロコンタクトプリント法によって、円周上に SAMs をパターンニングする。次に銀が露出した部分はフェロシアン化カリウム溶

液でエッチングし、チタンとガラス管はフッ酸で除去する。すると図 2.2-3(c)の 4)のような、細い金属ワイヤが露出するが、強度を上げるために、これに電気メッキを施す。最後に両端のガラス管を引っ張ると、図 2.2-3(c)の 6)のような立体構造が生まれる。以上の方法で試作した微細構造の写真を図 2.2-3(d)に示す。パターンを変えることによって、図の C

のような円筒状にメッシュを形成させることも可能である。

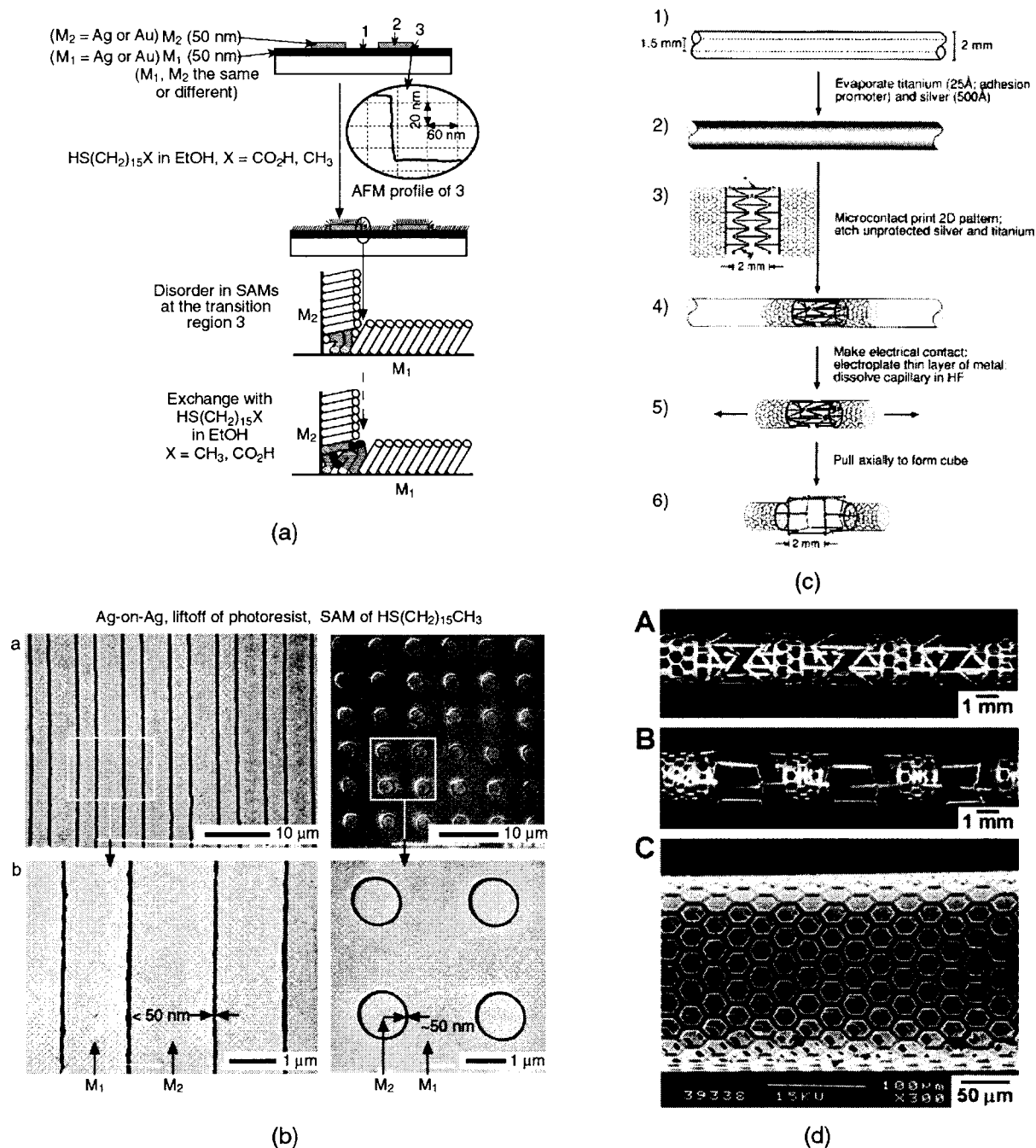


図 2.2-3 (a)自己組織化単分子膜を金属の薄膜構造に付着させると、段差の部分に不規則な並びの分子ができるが、これを置き換えることによって特異的なエッチングが可能になる。(b)この方法を用いてエッチングした幅 50 nm の溝の写真。(c)(d)ガラス管にマイクロコンタクトプリントを施し、3次元構造を製作するプロセスと写真。

2.2.4 その他の転写技術

P. Yang らは、凹版印刷のように、PDMS で作った凹版にゲルを注入することでナノオーダーのパターン形成を実現した[7]。

S. Tanaka らは、ガラスの型からとったアセチルセルロース製のレプリカを製作した[8]。使った型は、幅 50 nm の 2 本の溝が、100 nm~400 nm のピッチで平行に付いているもので、

電子ビームによって石英ガラスの上に塗布したレジストを露光させ、高速原子線 (Fast Atom Beam, FAB) でドライエッチングしたものである。これに、アセチルセルロースのシートを載せ、加圧せずに、わずかに表面を溶解させ、転写を実現した。これによって、10 nm オーダの凹凸まで転写することを示した。さらに、このレプリカを、レジストを塗布したシリコンに密着させ、凸部から漏れ出る近接場光によってレジストを露光させた。露光で用いた光の波長は約 442 nm であったが、現像後に凹部として 50 nm 幅の溝を転写できることを示した。

備前らは、射出成形したモジュール 40 μm (歯の高さで約 80 μm) の時計用歯車を製作した[9]。金型は、ワイヤ径約 30 μm のワイヤ放電加工で製作し、耐摩耗性を向上させるためにセラミックをプラスチックの中に混入させた。このセラミックの強化剤は、長さが 10 ~ 20 μm 、径が 200 ~ 500 nm の超微細繊維である。

2.2.5 まとめ

以上、近年報告されているナノ転写技術について調査した。微細な 3 次元構造を大量に生産するためには、従来のフォトリソグラフィに代わる新技術の検討も重要である。今回の調査で、ナノサイズの型を製作し、転写する方法には、凸版、オフセット、グラビア (凹版) などの印刷技術、型成形技術、あるいは、レプリカを作ってマスクとする技術などがあった。これらは、トライボロジー、フォトニック結晶、超 LSI、細胞生物学などへ応用が可能であり、今後ますます注目すべき技術である。

参考文献

- [1] P. B. Fischer and S. Y. Chou, "10 nm Electron Beam Lithography and Sub-50 nm Overlay Using a Modified Scanning Electron Microscope," Appl. Phys. Lett., vol. 62 no. 23, pp. 2989, 1993.
- [2] K. Early, M.L. Schattenburg, and H.I. Smith, "Absence of Resolution Degradation in X-ray Lithography for from 4.5 nm to 0.83 nm," Microelectronic Engineering, vol. 11, pp. 317-321, 1990.
- [3] Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, Preston J. Renstrom, "Imprint Lithography with 25-Nanometer Resolution," Science, vol. 272, pp. 85-87, 1996.
- [4] Joanna Aizenberg, Andrew J. Black and George M. Whitesides, "Control of Crystal Nucleation by Patterned Self-Assembled Monolayers," Nature, vol. 398, pp. 495-498, 1999.
- [5] Joanna Aizenberg, Andrew J. Black and George M. Whitesides, "Controlling Local Disorder in Self-assembled Monolayers by Patterning the Topography of Their Metallic Supports," Nature, vol. 394, pp. 868-870, 1998.
- [6] Rebecca J. Jackman, Scott T. Brittain, Allan Adams, Mara G. Prentiss, George M. Whitesides, "Design and Fabrication of Topologically Complex, Three-Dimensional Microstructures," Science, vol. 280, pp. 2089-2091, 1998.
- [7] Peidong Yang, Tao Deng, Dongyuan Zhao, Pingyun Feng, David Pine, Bladley F. Chmelka, George M. Whitesides, Galen D. Stucky, "Hierarchically Ordered Oxides," Science, vol. 282, pp. 2244-2246, 1998.

- [8] Shuji Tanaka, Masayuki Nakao, Yotaro Hatamura, Masanori Komuro, Hiroshi Hiroshima and Masahiro Hatakeyama, "Printing Sub-100 Nanometer Features Near-field Photolithography," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 37, no. 12B, pp. 6739-6744, 1998.
- [9] 備前良一, "モジュール 40 μ m の歯車を成形する," 日本機械学会誌, vol. 100, no. 943, pp. 14-15, 1997.

2. 3 力覚と視覚を用いたナノマニピュレーションにおけるインタフェース技術

2.3.1 まえがき

現在、遺伝子操作といった生物学方面や、半導体産業への応用が期待されるナノテクノロジー関連の研究がさまざまな分野で行われている。

ナノテクノロジーの背景には、顕微鏡技術の飛躍的な進歩があり、現在ではこの顕微鏡技術を用いて「実際にナノスケールの超微粒子を操作する」というナノマニピュレーションの研究も盛んになってきている。世界の動向としては、例えば、アメリカのNSF(National Science Foundation)で、従来のナノテクノロジー(半導体、物性分野)に加えナノマニピュレーションにも着手し始め、国規模のプロジェクトであるIT²(Information Technology for the Twenty-First Century)の一部として研究を推し進めている[1]。

ナノマニピュレーションの研究が盛んになってきた要因としてはナノスケールの新素材の発見が挙げられ、代表的なものとしてフラーレンとカーボンナノチューブが存在する。フラーレンとは、1985年に発見された、炭素が60個集まってサッカーボール状に結合してできた球状の新炭素分子のことである[2]。

カーボンナノチューブは、1991年に発見された、炭素だけから構成される一次元物質であり、六員環と五員環で編まれたネットワーク構造を基本としている。その構造は、直径1~10nm、長さ10~20 μ mの微小管である。ごく小さいうえに、非常に頑丈で、軽量かつ柔軟な特性も持っている[3]。

コンピュータの回路をより安く、小さく、なおかつ高速にするための新しいアプローチとしてフラーレン、カーボンナノチューブのマニピュレーションは位置付けられる。ナノマニピュレーションのアプリケーションとしてはその他にも、遺伝子の直接操作、種々ウィルスの操作、マイクロロボットの実現なども挙げられ、その期待は計り知れない。

しかし、ナノマニピュレーションはまだ発展途上にあるため、現在提案されているシステムの多くは操作者の経験や試行錯誤に頼らざるを得ない。このような現状から、ナノ世界の物理現象を深く理解することのできるツールを操作者に提供し、ナノ世界に特化したインタフェースを確立する必要があると考えられる。

2.3.2 マイクロ・ナノマニピュレーションにおける顕微鏡技術

本章では、ナノサイズからマイクロサイズまでを含めた微小物体操作を目指すシステムにおいて、イメージングデバイスとして頻繁に使用される種々の顕微鏡について述べる。またこれらの顕微鏡の比較、マニピュレーションのアプローチの分類についても述べる。

(1) 走査型プローブ顕微鏡：Scanning Probe Microscope (SPM)

走査型プローブ顕微鏡(以下 SPM)とは、微小なマイクロプローブを用いて試料表面を走査することにより試料の表面形状を測定する、今までの顕微鏡とは違う新しいタイプの顕微鏡の総称である[4]。SPMには、プローブと試料の間に流れるトンネル電流を一定に保つ走査型トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscope、以下 STM)と、プローブと試料の間の原子間力を一定に保つ原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope、以下 AFM)が存在する。

(2) 走査型電子顕微鏡：Scanning Electron Microscope (SEM)

走査型電子顕微鏡（以下 SEM）では電子銃で発生した電子線を数段の電子レンズで細く絞り、偏向コイルの磁界により偏向して試料表面を走査させることができる。

電子線照射によりビームが試料入射すると試料を構成する原子と衝突して、数種の放射線が発生する。二次電子は、検出器に印加された 10KV(通常 SEM 観察に用いられる加速電圧)の正の電位に引かれて、また反射電子は自らエネルギーで、いずれも検出器表面に塗布された蛍光面に衝突して光に変換され、この光は光電子倍增管(PMT)で増幅される。この信号はさらに増幅された後、観察用および撮影用の陰曲線管(CRT)に供給される。CRT 上では信号量の違いによりその輝度を変調することができる。試料表面上の電子プローブが位置するある点と、CRT 画面上の試料像の相当する CRT 内の電子ビームの位置は常に完全に正しい相対関係が保たれるので CRT の蛍光面上に SEM 像を得ることができる[5]。

(3) 顕微鏡の比較

先に述べたマイクロ・ナノマニピュレーションのイメージングデバイスとして頻繁に使用される AFM, STM, SEM と、主にマイクロマニピュレーションに使用される OM の特性を表 2.3-1 にまとめる。

表 2.3-1 顕微鏡の比較

顕微鏡 特性	AFM	STM	SEM	OM
最高分解能	0.1 nm	0.1 nm	～ 5 nm	～ 200 nm
対象物	導体 半導体 絶縁体	導体 半導体	導体 半導体	導体 半導体 絶縁体
センシング インタラクション	near-field contact non-contact	near-field non-contact	far-field non-contact	far-field non-contact
使用環境	大気中 液中 真空中	大気中 真空中	真空中	大気中 液中
原理	原子間力	トンネル電流	電子線照射	光反射
次元	3 次元	3 次元	2 次元	2 次元

1 μ m 以上の領域では、CCD カメラを内蔵した OM を使用することができ、30～100 frames/sec のスピードでリアルタイム映像を得ることができる。しかし、サブマイクロ領域で OM を使用するのは非常に困難であり、従ってこの領域になると AFM, STM, SEM が使用される。

SEM は真空状態での使用が必要であり、得られる映像は二次元であるという制限がある。更に使用できる対象物は導体、半導体に限られ、この制限は STM にも当てはまる。

ビジョンセンサーの種類で顕微鏡を分類すると、ファーフールド・センシングとニアフィールド・センシングに分けることができる。ファーフールド・センシングではマニピュレータと対象物のイメージを同時に得ることができるのに対し、ニアフィールド・センシングは操作時にビジョンセンサーとして使用することができない。よってファーフールド・センシングはマニピュレーションにおける視覚情報として非常に有効であるが、

数ナノメートルサイズのマニピュレーションでは使用できないという問題がある。

(4) マイクロ・ナノマニピュレーションのアプローチ

マイクロ・ナノマニピュレーションのアプローチには、図 2.3-1 に示すように大きく分けて 4 つの側面がある。

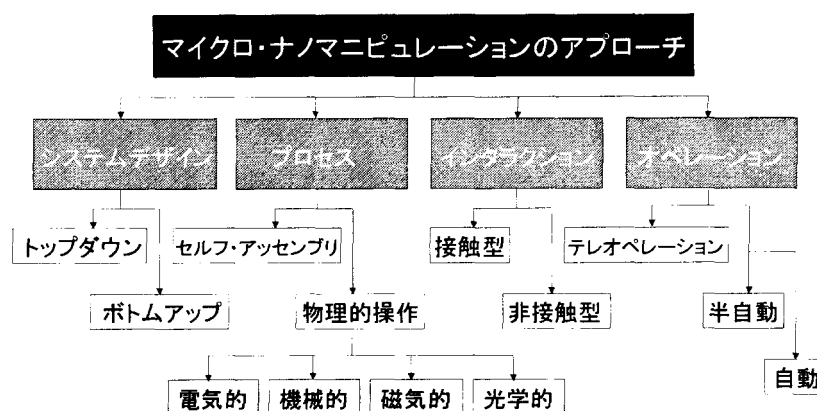


図 2.3-1 マイクロ・ナノマニピュレーションのアプローチ

システムデザイン

システムデザインはマニピュレーションを行うシステムが、原子や分子を STM, AFM などにより操作し、より大きな部品を組み立てて行こうというアプローチであるボトムアップ[6]であるか、マクロスケールの対象物の操作からはじめ、徐々に対象物のスケールを小さくしていき、同時に操作の正確性も高めていくトップダウン[7]であるかの分け方である。現在、ボトムアップ方式のシステムは、原子スケールの対象物操作に焦点をあわせており、複雑な構造（マイクロ部品などの三次元構造）の組み立てには至っていない。

一方トップダウン方式のシステムで行われたマニピュレーションとしては、Codourey[8]らによる Nano-Robotics というプロジェクトで行われた、光学顕微鏡(以下 OM)使用下のダイヤモンド(直径 50 μm)の pick & place や、Koyano[9]らによる視覚フィードバック(SEM を使用)ベースの双腕型マイクロマニピュレータシステム[10]を使用したポリマー粒子(直径 2 μm)からなるピラミッド型の三次元構造組み立てなどが挙げられる。

プロセス

プロセスに基づいたアプローチで分類すると、主に化学、生物学の分野で取られているセルフ・アセンブリと、電気力、磁気力などの物理現象を利用し、局所的に選択した超微粒子を高精度にマニピュレーションすることを目的とする物理的操作に分けられる。セルフ・アセンブリは対称性、反復性の高い物質への応用が期待されている。

一方物理的操作としては、STM プローブと試料表面間の電気力の制御による pick & place, プッシング[11]や、AFM チップをマニピュレータとして利用し対象物にかかる機械的な力を制御することで、ナノ粒子のプッシング[6]や DNA の切断[12], 繊維組織の切断[13]などを行ったものがある。その他、井上[14]らによる磁界を利用したマイクロ粒子の操作、佐々木[15]らによるレーザートラッピングを利用した光学的アプローチもある。

インタラクション

次に対象物とのインタラクションによりマニピュレーションを分類すると、非接触型と接触型に分けられる。

非接触型のマニピュレーションには、山本[16]らによるレーザートラッピングを利用し

た DNA の切断や、Stroschio[11]らによる STM プローブと表面原子間の電気力を利用した Xe, Ni 原子のマニピュレーションが挙げられる。接触型のマニピュレーションとしては、AFM のプローブを粒子に直接ぶつけてプッシングを行うものがある[6]。

オペレーション

オペレーションに基づいた分類としては、テレオペレーション(遠隔制御)を用いるものと自動的に操作を行うものに分けられる[17]。

マイクロ・ナノ世界の物理現象や化学現象には不明瞭な部分が多く、そのため、初期の自動的なマニピュレーションシステムやテレオペレーション技術はこれらの不明瞭な部分を理解するための道具として期待され、現在も盛んに研究が行われている。

テレオペレーションシステムにおいては、操作者が直接制御ループに入り込みマニピュレータの操作を行うもの(direct teleoperation)と、操作者が各段階に分けたタスクをマニピュレータに指示し、最終目標に向けてそれぞれのタスクを自動的に達成していくシステム(task-based/semi-autonomous teleoperation system)の二種類に分けることができる。

Hollis ら[18]は STM プローブをスレーブロボットとし、マスタ側に Magic Wrist と呼ばれる六自由度の動作を実現するデバイスを使用することで、原子レベルのトポロジーを操作者の手に感じさせることを実現した。またノースカロライナ大学の nanoManipulator グループでは、Taylor[19]らにより市販の AFM と実時間の触覚ディスプレイであるハプティックインタフェースを用いたシステムが構築された。彼らは力覚フィードバックのため表面とプローブのモデル化を行っているが[20]、マイクロ・ナノ世界の物理現象については議論していない。

2.3.3 Tele-Nanorobotics System

(1) Tele-Nanorobotics System に要求されるアプローチ

前章で述べた顕微鏡の比較とマイクロ・ナノマニピュレーションのアプローチ、そして、ナノマニピュレーションが期待される応用分野を検討すると、あらゆる環境下(大気中、液中、真空中)において全てのタイプのナノ粒子(導体、半導体、絶縁体)の機械的操作を実現する、接触型のシステムの構築が求められる。これを実現するには、マニピュレータとして AFM を使用する必要がある。更には、依然として不明瞭な部分が多いナノ世界の操作を行うにはテレオペレーション技術を用いるのが最善であると考えられる。

(2) システムの概要

本節では、上に述べたアプローチを取ったシステム (Tele-Nanorobotics System) の概要を述べる[21][22]。本システムでは、マクロ世界とナノ世界の物理現象が著しく異なることを考慮し、表面とマニピュレータのモデル化だけでなく、ナノ世界の力学のモデル化を行うという新しいアプローチを取っている。

Tele-Nanorobotics System は大きく三つの部分に分けることができる。一つ目は対象物のあるナノ世界、二つ目は操作者のいるマクロ世界、そして三つ目はそれらの世界を結ぶ部分である。システムの概略図を図 2.3-2 に示す。

AFM は試料の表面を走査し三次元の形状情報を測定する。測定された形状情報はグラフィクス化され (3D Nano Graphics)、操作者に提示される。AFM はその他に、ナノ世界の物質を操作するためのスレーブとしても使用される。このようにビジョンセンサーと

置情報をもとに微小力学モデルによって反力もしくは吸着力が計算される。この力情報は位置情報と同じく共有メモリに書き込まれ、PHANToM に三次元の力覚として返されるとともに、グラフィクス上でコーン形状として提示される。図 2.3-7 はシミュレータ環境下でチップを粒子に対し垂直に接近させた例で、吸着力を赤、反力を青で示している。



図 2.3-7 3D Nano Simulator (進行状況：左上→右上→左下→右下)

2.3.5 まとめ

本報告書では、昨今注目されているナノマニピュレーションの研究開発動向を示し、その中の一つとして、Tele-Nanorobotics System について説明を行った。また Tele-Nanorobotics System によって実現されたマニピュレーションについて示し、これに基づいてナノ世界に特化したインタフェースの提案を行った。

今回提案したインタフェース技術がナノマニピュレーションの一つのツールとして利用され、この分野が今後更に発展していくことを期待したい。

参考文献

- [1] National Science Foundation: <http://www.nsf.gov/>
- [2] 谷垣 勝己, 菊地 耕一, 阿知波 洋次, 入山 啓治: “フラーレン・魅惑的な新物質群, C₆₀ とその仲間達 -”, 産業図書株式会社, 1992.
- [3] 飯島 澄男: “カーボンナノチューブの挑戦”, 岩波新書, 1999.
- [4] 森田 清三: “走査型プローブ顕微鏡のすべて・原子や分子を見て動かす・”, 工業調査会, 1992.
- [5] 山田 満彦: “ミクロの芸術”, 日本機械学会誌, Vol.100, No.943, pp.26-27, June 1997.
- [6] D.M. Schafer and R. Reifengerger and A. Patil and R.P. Andres: “Fabrication of two-dimensional arrays of nanometric-size clusters with the atomic force microscopy”,

App. Physics Letters, 66, pp.1012-1014, Feb.1995.

[7] T. Kasaya and H. Miyazaki and S. Saito and T. Sato: "Micro Object Handling under SEM by Vision-Based Automatic Control", In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2189-2196, 1999.

[8] A. Codourey and W. Zesch and R. Buchi and R. Siegwart: "A Robot System for Automated Handling in Micro-World", In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.185-190, 1995.

[9] K. Koyano and T. Sato: "Micro Object Handling System with Concentrated Visual Fields and New Handling Skills", In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2541-2548, 1996.

[10] H. Miyazaki and T. Sato: "Pick and Place Shape Forming of Three-Dimensional Micro Structures from Fine Particles", In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2535-2540, 1996.

[11] J.A. Strosio and D.M. Eigler: "Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope", Science, pp.1319-1326, vol.254, no.5036, Nov.1991.

[12] R. W. Stark and S. Thalhammer and et al.: "The AFM as a tool for chromosomal dissection - the influence of physical parameters", Appl. Phys. A, pp.579-584, vol.66, 1998.

[13] T.Ondarcuhu and et al.: "Combing a Nanofiber in a Nanojunction", Nanotechnology, 1998.

[14] T. Inoue and K. Iwatani and et al.: "Micromanipulation Using Magnetic Field", In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.679-684, 1995.

[15] K. Sasaki and H. Fujiwara and H. Masuhara: "Optical Manipulation of a Lasing Particle and Its Application to Near-Field Microspectroscopy" J. Vac. Sci. Technol. B, pp.2786-2790, vol.15, no.6, 1997.

[16] M. Washizu: "Manipulation of Biological Objects in Micromachined Structures", Proc. of the IEEE Micro Electro-Mechanical Systems Workshop, pp.196-201, 1992.

[17] M. Sitti and M. Hoummady and H. Hashimoto: "Trends on Mechatronics for Micro/Nano Telemanipulation: Survey and Requirements" IFAC Information Control in Manufacturing, pp.235-240, 1998.

[18] R. L. Hollis and S. Salcudean and D. W. Abraham: "Toward a Tele-Nanorobotic Manipulation System with Atomic Scale Force Feedback and Motion Resolution" In Proc. of the IEEE Int. Conf. on MicroElectromechanical Systems, pp.115-119, 1990.

[19] M.R. Falvo and R.M. Taylor II and et al.: "Nanometer-scale rolling and sliding of carbon nanotubes", Nature, pp.236-238, vol.397, 1999.

[20] M. Guthold and M.R. Falvo and et al.: "Controlled Manipulation of Molecular Samples with the nanoManipulator" IEEE/ASME International conference on Advanced Intelligent Mechanics, 1999.

[21] M. Sitti and H. Hashimoto: "Teleoperated Nano Scale Object Manipulation" Recent Advances on Mechatronics, pp.322-335, edited by O. Kaynak, S. Tosunoglu,

and M.J. Ang, Springer Verlag Pub., 1999.

[22] 堀口 智史, メティン・シッティ, 橋本 秀紀: “AFM によるナノ操作のための VR インタフェースの検討” 電気学会論文誌部門 C, 118 巻, 第 1 号, 1998.

[23] M. Sitti and H. Hashimoto: “Force Controlled Pushing of Nanoparticles: Modeling and Experiments”, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.5, no.2, pp.199-211, June 2000.

[24] N. A. Burnham and A. J. Kulik: “Surface Forces and Adhesion”, Handbook of Micro/Nano tribology, ed. by B. Bhushan, CRC Press, Dec 1997.

2. 4 レーザー微細加工技術

2.4.1 概要

ICプロセスの発達とそれに続くマイクロマシン技術の成長によって様々なマイクロパーツ、マイクロシステムが生み出されてきた。オプトエレクトロニクス、バイオメディカル、センサー等、その応用分野は多岐に亘っており、それぞれのシステム、構造体の要求に応じた製作手法も開発されている。表2.4-1はNEXUSの市場調査結果を示しているが、それによると、1996年にはインクジェットプリンタヘッド、HDDヘッドを始めとして、既に15兆円の市場が存在しており、2002年には光スイッチ、バイオチップなど将来的な伸びが予想されるパーツ、システムを加えて、36兆円レベルへの伸長が見込まれている[1]。

表2.4-1 マイクロマシンデバイスの世界市場動向（文献[1]より転載）
(a) 市場既投入のマイクロデバイス (b) 近未来的マイクロデバイス

Existing products (million)					Emerging products (million)				
	1996		2002			1996		2002	
Product	Units	US\$	Units	US\$	Product	Units	US\$	Units	US\$
HDD heads	530	4500	1500	1200	Drug delivery	1	10	100	1000
Inkjet heads	100	4400	500	0	Optical switches	1	50	40	1000
Heart pacemakers	0.2	1000	0.6	1000	Lab on chip	0	0	100	1000
In vitro diagnostics	700	450	4000	3700	MO heads	0.01	1	100	500
Hearing aids					Projection valves	0.1	10	1	300
Pressure sensors	4	1150	7	2800	Coil on chip				
Chemical sensors	115	600	309	2000	μ -relays	20	10	600	100
IR imagers	100	300	400	1300	μ -motors		0.1	50	100
Accelerometers	0.01	220	0.4	800	Inclinometers	0.1	5	2	80
Gyroscopes	24	240	90		Injection nozzle	1	10	20	70
Magnetic sensors	6	150	30	800	Anti-collide sensors	10	10	30	30
μ -spectrometer	15	20	60	430	Electronic nose	0.01	0.5	2	20
	0.006	3	0.15	360		0.00	0.1	0.05	5
				60					
				40					
Totals		14330		34400	Totals		107		4200

マイクロマシン技術は、本来ICのリソグラフィーパターン転写技術から派生しているが、各種マイクロデバイスではメカニカルな機能性が要求されるため、ICの2次元配線パターンニングとは異なる3次元造形性が要求される。マイクロマシン分野において一般的な、X線深照射にメッキ技術を組み合わせたLIGA技術では、アスペクト比が100を超えるような構造体も実現されている[2]。しかしこれらは、平面パターンが転写されたプリズミックな構造体に留まっており、いわゆる“2.5次元”加工の域を出ていない。一方、マイクロデバイスの高機能化、オプトエレクトロニクス、フルイディックス等の複合化が進むに連れて、マイクロパーツの形状3次元性への要求も高まっている。その中でレーザーマイクロマシニングは、比較的安価な装置コストで複雑

3次元マイクロパーツの製作を可能にする製作ツールとして、マイクロ放電加工などと共に注目を集めている。代表的な応用例としては、アブレーション除去加工による各種型並びにパーツ製作、光造形法、レーザLIGA、さらにはレーザCVDを援用したマイクロ接着などが挙げられる。本節ではこれら代表的な適用例について、加工技術紹介及び評価を行う。

2.4.2 レーザアブレーション

短パルスの紫外光レーザを高分子固体に照射すると、固体表面に励起分子や種々の活性種が高密度に生成される。この時、分子がレーザ光から受け取った分子を構成している化学結合エネルギーよりも大きい場合には、化学結合が切断され、切断された分子は噴出し、除去加工が可能となる。こうした高エネルギー密度のレーザ光で、レジストに直接型彫りを行う技術は、高分子レーザアブレーション加工と呼ばれている。YAGレーザ基本波加工のように赤外域を用いる加工では、材料を加熱、熔融させて除去するため、加工部周辺が熱損傷を受け、組成が変質したり、炭化物が溶着したりする。また、レーザ光が材料に対して深く入り込むため、深さ方向での加工精度維持が難しい。これに対して紫外域を用いるエキシマレーザのアブレーション加工では、樹脂の分子結合を光分解に近い形で切断することができるため、加工部周辺の熱損傷が少なく、分解能の高い加工が実現できる。しかも、多くの材料で吸収深さが浅いため、レーザパルス毎にサブミクロン単位($\sim 0.1\mu\text{m}$)での加工深さ制御が可能になる[3]。

実際のアブレーション成形では、マスク投影法が一般的に用いられる。マスクとしてはクォーツ基板にクロム薄膜でパターンニングしたものがよく用いられるが、クロムマスクのダメージ閾値は $100\text{ mJ}/\text{cm}^2$ であるので、それ以上のエネルギー密度が要求される場合には、誘電多層膜マスクなどが必要となる。図2.4-1には、一般的なマスク投影法の原理模式図が示されている。ホモジナイザーによって、一定強度分布に成形されたビームは、マスクを通して、ワーク上に縮小投影される。マスク投影法の利点としては、1)マスクが加工領域から遠く、デブリなどの影響を受けない。2)縮小投影を採用することによって、マスク製造の難しさが緩和される。3)縮小投影によって、マスク上でのエネルギー密度を減少させることができ、マスク寿命を延長できる。4)マスクーワーク間距離が、一般に大きいため、マスクの独立した動きが可能となり、種々のイメージパターンニングが可能となる。5)マスク付け替えのみで、種々の積層構造を形成できる、といった点を挙げるができる。マスク投影法でマイクロパターンを形成するには、1)マスク、ワークとも静止、2)マスク、ワークの一方が移動、或いは、3)マスク、ワークの両者がシンクロナイズされて移動する場合の3種類がある。図2.4-2に、各種パターンニングの結果を示す[3]。(a)はスタティック投影による各種溝加工例を、また(b)はワークドラッグングによって、深さ方向に形状の変化する、種々のチャネル製作例並びにマイクロレンズアレイの製作例を示している。同様の効果はマスクドラッグングによっても得られ、(c)には、同手法によって形成された各種ランプ構造体が示されている。

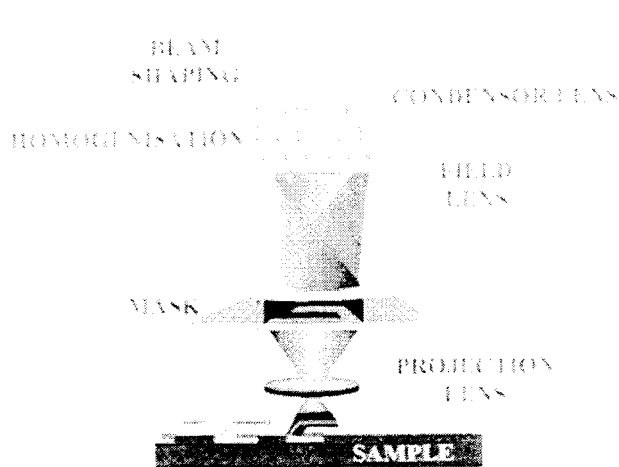
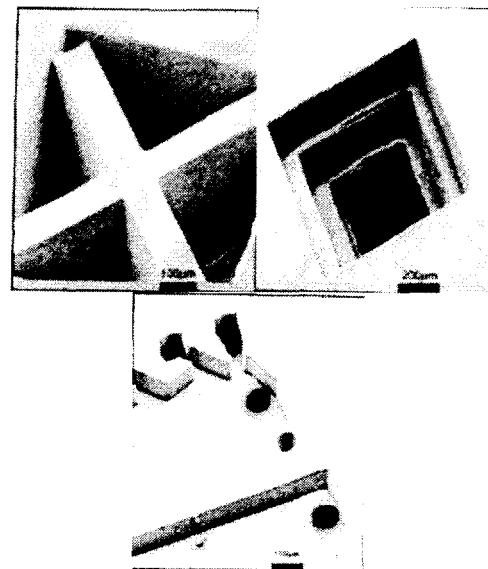
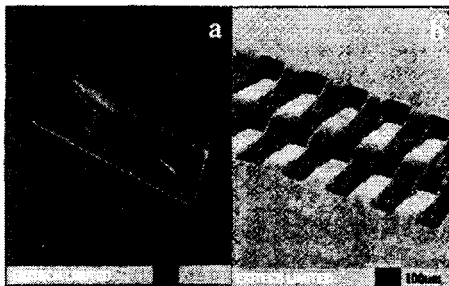


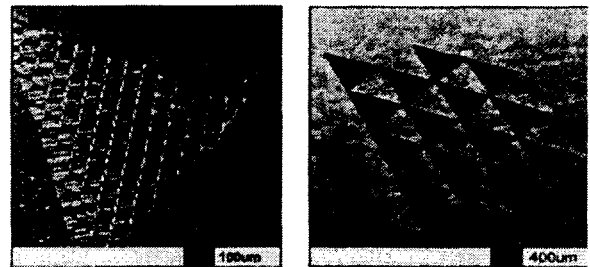
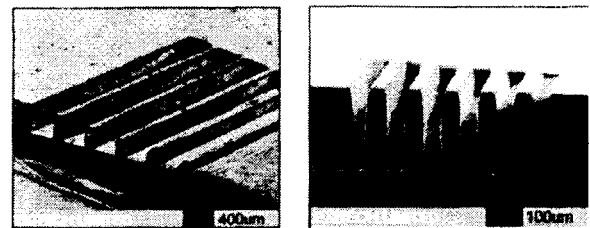
図2.4-1 マスク投影法の原理模式図（文献[3]より転載）



(a) マスク、ワークとも静止



(b) マスクまたはワークの一方が移動



(c) マスク、ワーク両者がシンクロナイズされて移動

図2.4-2 マスク及びワークドラッグによる各種パターンニングの結果（文献[3]より転載）

図2.4-3は、KrFエキシマレーザによるアルミナセラミックスの各種加工例を示している。加工結果から、エキシマレーザアブレーションが、セラミックスに対しても、材料への熱影響を最低限に抑制して、複雑なパターンニングを、行い得ることが分かる。加工表面粗さについては、 R_{max} で約3 μm まで抑えることが可能であるとしている。金属材料については、Ti:Sapphireの第2高調波によるCuシートの加工例が紹介されている[4]。図2.4-4は極超短パルスレーザによる100 $\mu\text{m}\phi$ 穴加工例を示しているが、パルス幅がnsオーダーの場合には、多くの熱影響領域(Heat Affected Zone: HAZ)が現われるのに対して、fsオーダーの場合にはHAZが最低限に抑えられ、非常にシャープな加工エッジが実現されている[5]。さらに図2.4-5は、KrFエキシマレーザによるガラスの回折レンズ加工結果を示している[4]。加工条件は、パルス幅:20 ns、フルエンス:3.5 J/cm^2 であり、加工表面粗さとしては、 $R_a=0.2 \mu\text{m}$ を実現している。

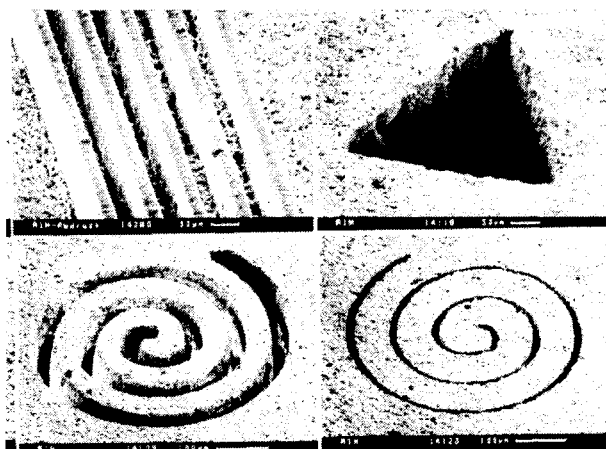


図2.4-3 KrFエキシマレーザによるアルミナセラミックスの各種加工例（文献[4]より転載）

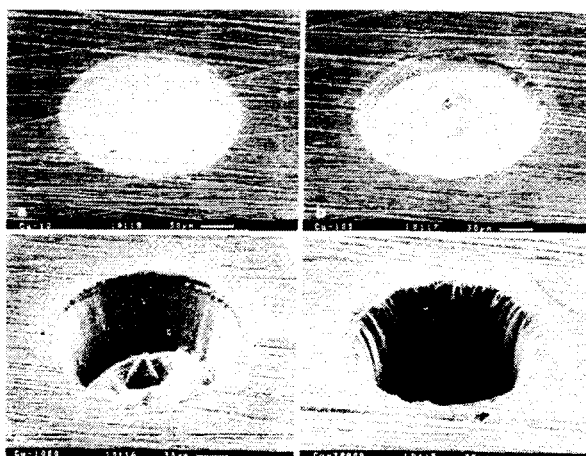
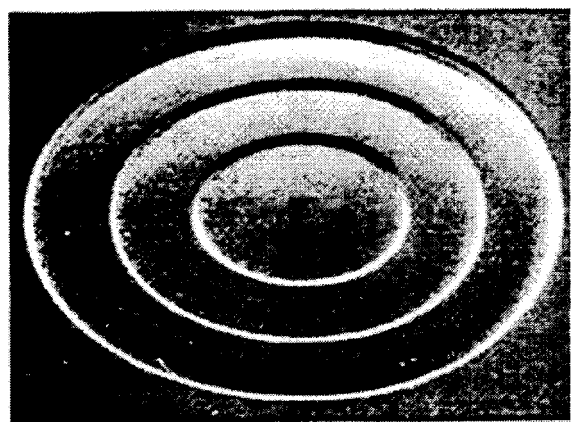


図2.4-4 極超短パルスレーザ(Ti:Sapphire第2高調波)によるCuの100 $\mu\text{m}\phi$ 穴加工例（文献[5]より転載）



0.65mm Glas:

図2.4-5 KrFエキシマレーザによるガラス回折レンズ加工結果（文献[4]より転載）

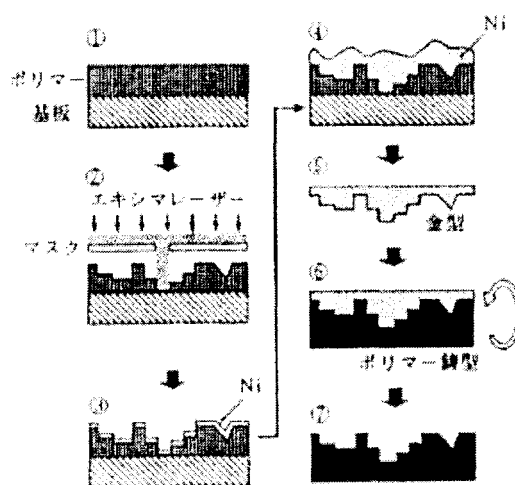


図2.4-6 レーザLIGAの典型的プロセスシーケンス（文献[7]より転載）

2.4.3 レーザLIGA

LIGAは、独語のLithographie、Galvanoformung und Abformungの略語で、リソグラフィー、メッキ及び射出成形を組み合わせた、いわゆるバッチ処理による微細構造物量産技術を表わす造語である。本技術は、1980年頃、ドイツのカーlsruhe原子核研究所(Kernforschungszentrum Karlsruhe)において、シンクロトン放射光(SR光)から得られる軟X線によってレジストを露光、現像し、さらに電気メッキを施して金型を製作する、一連のマイクロ成形加工法として開発された。1982年にウランアイソトープのマイクロ分離ノズルが、最初のLIGA製品として発表されて以来、サブミリ領域で容易に平面寸法、高さ寸法の得られるマイクロ加工技術として定着している[6]。しかし一方で、SR装置設置コスト、維持運営の難しさなどが障壁となって、部品及びデバイスメーカーまで浸透するには至っていない。また、X線ビームプロファイルの加工や引き回しの困難さから、パターン転写の結果は、アスペクト比こそ高いものの、単純な柱状構造物に留まっている。

これに対して、エキシマレーザアブレーションによるマスク加工によって、レジス

ト材の直接型彫りを行う手法は、レーザLIGAと呼ばれている。SR装置に比して、レーザ装置は手軽に得られ、制御性や再現性も良いので、操作や維持が簡単であり、X線LIGAに替わるマイクロ3次元加工技術として注目されている。図2.4-6は、レーザLIGAの典型的プロセスシーケンスを示している[7]。まず1)基板上にポリマーを塗布する。2)このポリマーにエキシマレーザでアブレーション加工を行う。この時、マスクを使って、レーザ照射時間やエネルギー密度を場所によって変化させることにより、3次元微細加工を行う。3)さらに、真空蒸着法により、電気メッキの下地層を付着させる。4)電気メッキによって、微細加工面を金属厚膜で埋め尽くし、金属レプリカを作る。5)次に、金属層をポリマーから剥がし、6)この金型を用いてマイクロ射出成形法によって、ポリマー鑄型を作製する。7)最後に金型を剥がせば、ポリマー微細加工部品が出来上がる。6)、7)のプロセスを繰り返すことによって、マイクロパーツの大量生産が可能になる。X線LIGAほどの精度は実現できないものの、平面製作精度として約1 μm 、深さ方向制御性としてはサブミクロン、平面粗さとしては、 $R_a=0.1 \mu\text{m}$ 程度が、一般的に達成できる。アスペクト比は、X線LIGAの最高100程度に対して、約10が最大とされている[8]。

2.4.4 3次元光造形法 (ステレオリソグラフィー)

シリコン-ガラス技術を中心とするMEMS技術にしても、深X線照射を用いるLIGA技術にしても、製作されるマイクロ構造体形状は2次元的な平面形状に留まっている。それに対して、3次元光造形法(ステレオリソグラフィー)は、数 μm 厚さの構造物積層によって、種々の3次元構造を作製するもので、高い形状任意性を有している。一般には、図2.4-7に示すように、紫外線硬化樹脂槽内で、z方向制御されたテーブルを上下させ、He-Cdなどの紫外線レーザを照射することによって、順次積層構造物を製作して行く[9]。図2.4-8は、このような積層型造形手法を並列化することによって、さらに量産化を図ったシステムの例を示している[10]。図2.4-9は、ウシオ電気製のマイクロ光造形実験機を示しているが、光源にはHe-Cdレーザ($\lambda=325 \text{ nm}$ 、パワー: 3 mW)を用い、ビームスキャン方式(X-Yプロッター方式、XY分解能: 1 μm)で3次元造形を行っている[9]。マイクロマシン技術の分野でも、放電加工と並んで

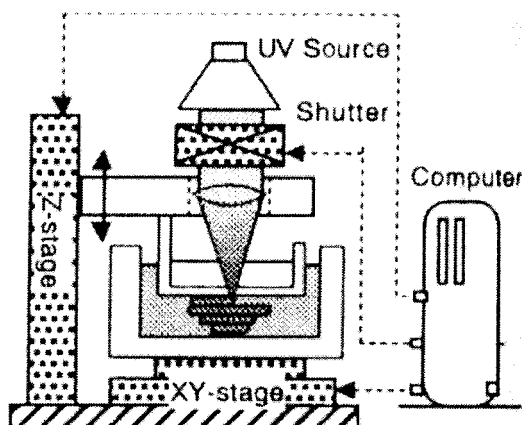


図2.4-7 3次元光造形法による積層構造物製作の模式図 (文献[10]より転載)

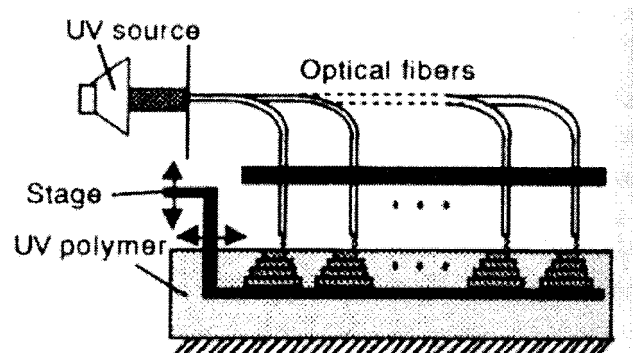
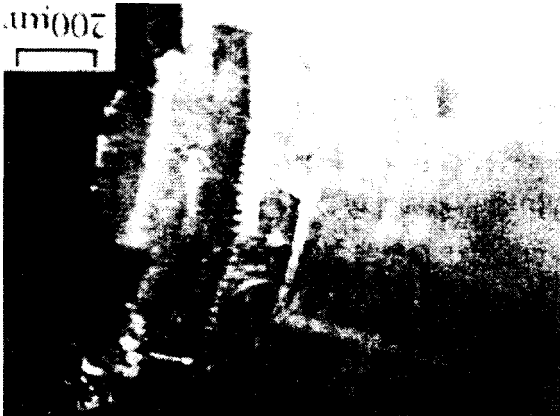
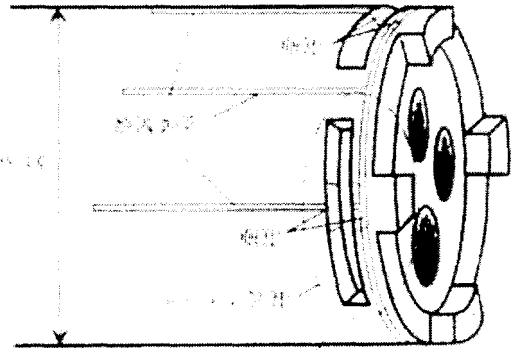


図2.4-8 3次元光造形法の並列化量産システムのコンセプト図 (文献[10]より転載)

図2.4-10 高機能カテーテルに装着される触覚センサーの構造 (文献[14]より転載)
図2.4-11 レーザCVDによってCrパターンをカテーテル上に形成した例 (文献[14]より転載)



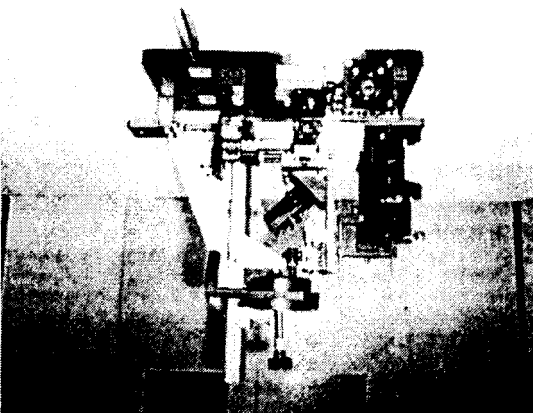
レーザCVDは、レーザ光により原料ガスを分解し、膜堆積を行う技術であり、レーザ照射部に選択的に堆積が行えるという特徴がある。従来のマイクロマシン技術では、既存立体構造物上に金属配線などのパターン形成することは、困難であった。しかしレーザCVDの選択堆積の特徴を活かして、そうしたパターンニングを行う例が報告されている。江刺らは有機金属ガスのレーザCVDを用い、高機能カテーテルの配線を実施した[14]。図2.4-10は、同カテーテルに装着される触覚センサーの構造を示しているが、直径1.8 mm、肉厚100 μmのポリウレタネチュ

2.4.5 レーザCVD

現している。Ti:Sapphireレーザが用いられており、パルス幅は130 fsとして造形が行われている。二光子吸収を利用して、光硬化が焦点内の一部でしか起らない為、回折限界を超え、硬化を防ぐ目的から、レーザパワーを硬化開始閾値以下に落とす必要があったのに対して、今回はその制約が無く、大パワーでの製作をも可能にしている。結果的にスキヤニングレーザーを、従来の10倍程度にまで上げることが可能となり(100 mm/s)、造形時間の大幅短縮を実現している。

された構造物の製作精度を低下させるとい問題があった。これに対して河田らは、極短パルスレーザを用いたスレソグラフィによってサブミクロンレベルの可動構造物製作に成功している[13]。平面造形精度としては、0.36 μm、厚さ方向精度としては、1.0 μmが達成されている。光源には30 mW、波長710 nmのTi:Sapphireレーザが用いられており、パルス幅は130 fsとして造形が行われている。二光子吸収を利用して、光硬化が焦点内の一部でしか起らない為、回折限界を超え、硬化を防ぐ目的から、レーザパワーを硬化開始閾値以下に落とす必要があったのに対して、今回はその制約が無く、大パワーでの製作をも可能にしている。結果的にスキヤニングレーザーを、従来の10倍程度にまで上げることが可能となり(100 mm/s)、造形時間の大幅短縮を実現している。

図2.4-9 ウシオ電気製マイクロ造形実験機 (文献[9]より転載)



高い3次元造形性を有する手法として、光造形法は注目されているが、1)複雑形状の製作が可能、2)製作装置として安価、3)使用材料の幅が広がる、等のメリットがある。実際、3次元光造形法によって製作された3次元マイクロ構造物は、静電アクチュエータやマイクロ流体システムなどの製作に応用されている[11]、[12]。

ところで、このような積層造形法では、深さ方向製作精度が積層ポリマーの厚さによって制約を受け、或いは液体紫外線硬化樹脂の表面張力が、造形

ープで製作されており、側面に幅100 μm 、長さ700 μm の4つのスリットが設けられている。突起部が血管壁に接触すると、両持ち梁が撓み、スリット内電極が接触し、血管壁面接触を検知する。図2.4-11には、 $\text{Cr}(\text{CO})_6$ を原料として、Crのパターンを前述の触覚センサーを備えたカテーテル上に形成した例が示されている。KrFエキシマレーザ($\lambda=248\text{ nm}$)を光源とし、100 μm のピンホール像を1/6に縮小投影して、堆積点上に16 $\mu\text{m}\phi$ のビームスポットを形成し

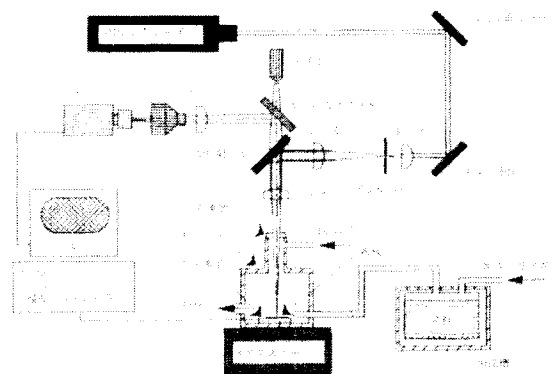


図2.4-12 Ar+レーザ第2高調波によるレーザCVDシステム（文献[15]より転載）

ている。レーザCVDにより堆積したCr膜は、抵抗値が高いため、配線として使用することはできないが、下地にNiなどの膜を堆積しておけば、堆積したCrパターンをマスクとして、下地金属のパターニングを行うことができるとしている。

金属膜堆積による配線に加えて、絶縁膜堆積によるマイクロアセンブリングへの応用も試みられている。江刺らはまた、Arレーザの第2高調波によるレーザCVDを用いて、有機系接着剤の3次元マイクロアセンブリングへの適用を図っている[15]。図2.4-12に、開発されたレーザCVDシステムが示されている。光源はBBO結晶によって波長変換されたAr+レーザの第2高調波(波長238、248、257 nm、連続発振)であり、ビーム径は約100 μm 、 N_2 ガスをキャリアとしてポリマーが堆積される。アクリル酸メチル、メタクリル酸メチル、酢酸ビニルの中から、堆積速度、堆積物硬度等に鑑みて、酢酸ビニルを選択している。同原料に対して波長257 nm、照射部レーザパワー26 mWのレーザを照射、堆積速度の温度依存性を調べた結果が、図2.4-13に示されている。基板温度を20 $^{\circ}\text{C}$ から6.5 $^{\circ}\text{C}$ まで下げると、堆積速度が約8倍、約10 $\mu\text{m}/\text{min}$ となっている。基板温度5 $^{\circ}\text{C}$ 以下では、酢酸ビニルは基板表面で液相となり、良好な堆積層が得られていない。次に図2.4-14は、堆積速度のレーザ波長及びレーザパワー依存性を示している。吸収の無い458及び514 nmでは堆積が観察されなかったが、238、248、257 nmでは堆積が得られた。ポリマー硬さは、波長が長くなるに連れて増大し、257 nmの波長で堆積したポリマーの重合度が最も高かったとしている。堆積速度は各波長においてレーザパワーの増加に連れて増大するが、一定値を過ぎる

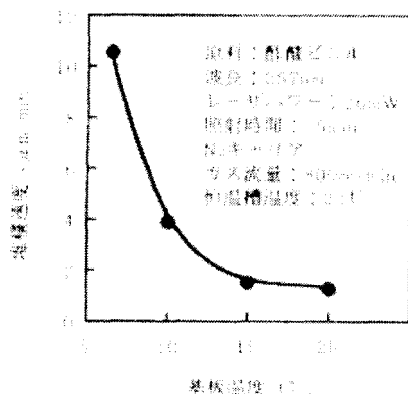


図2.4-13 酢酸ビニルのレーザCVD堆積速度の基板温度依存性（文献[15]より転載）

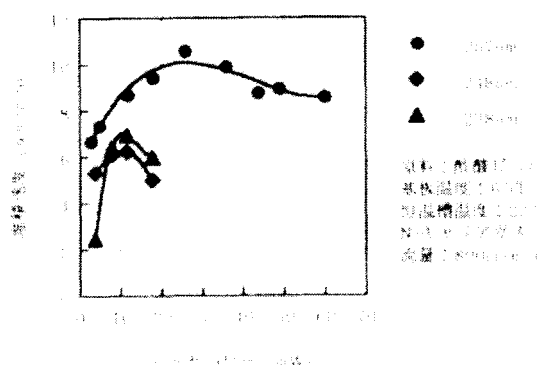


図2.4-14 酢酸ビニルのレーザCVD堆積速度のレーザ波長、パワー依存性（文献[15]より転載）

と減少傾向を見せた。これはレーザー光の熱エネルギーによって堆積ポリマーが加熱され、酢酸ビニルの凝縮度が下がったためであると説明している。

2.4.6 レーザアシストエッチング

結晶軸によるエッチング速度の違いを利用したアルカリ溶液中での異方性エッチングは、単結晶シリコン上の立体的機械構造体製造に欠かせない技術となっている。このようなシリコンモノリシック構造体は、信号処理回路を同時に集積化できるため、圧力センサー、加速度センサーなどの製作に多く用いられている。このような立体的構造は、結晶軸によるエッチング速度の違いを利用した、アルカリ溶液中での異方性エッチングなどにより製作されている。しかし、センサーが多機能化され、さらに実用的なものが求められる中で、このような立体的構造の一部をさらに加工したいといった要求が出てくる。立体的構造体の付加的加工は、平面基板上での微細加工を本領とするフォトリソグラフィ技術では不可能であり、ビームによるアシスト加工技術が必要となる。レーザーアシストエッチングは、その様な立体構造体の直接加工に適している。図2.4-15は、YAGレーザーを用いたシリコンアシストエッチングシステムの概略図を示している[14]。エッチングチャンバーにはガラス窓があり、YAGレーザー光は、エッチングチャンバー内の試料表面に集光される。試料表面でのレーザースポット

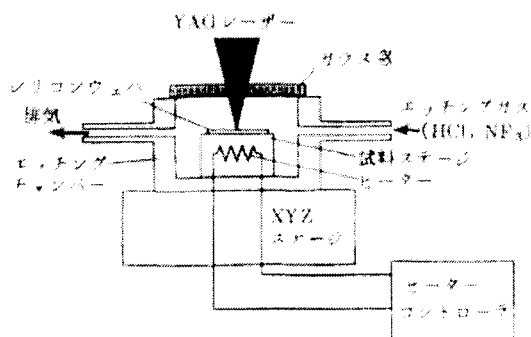


図2.4-15 YAGレーザーを用いたシリコンアシストエッチングシステムの概略図（文献[14]より転載）

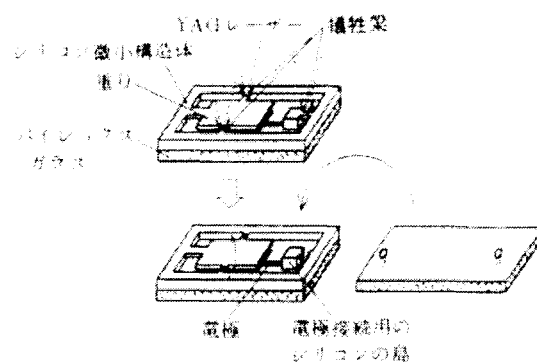


図2.4-16 シリコンレーザーアシストエッチングの加速度センサー作製への応用例（文献[14]より転載）

径は、7 μm となっている。このエッチング技術はHCl、 NF_3 など、シリコンと反応性を持つガス中で、加工部位にレーザー光を照射し、熱反応によりシリコンを揮発性の反応生成物として除去するものである。レーザーアシストエッチングでは、気相中で、パーティクルの発生無しにシリコンをエッチングすることが可能である。従って、液体の表面張力による可動部の破壊、ダストによるクリアランスの減少等を防ぐことができ、可動部を有する構造体の局所加工に、特に適している。図2.4-16に、加速度センサー作製への応用例を示す。加速度検知用プルーフマスや周囲のシリコンから電気的に絶縁さ



図2.4-17 シリコンウェハー上レーザーアシストエッチング溝加工の断面SEM写真（文献[14]より転載）

れている電極接続用のシリコン島を作製する場合には、衝撃による重りの破壊を防ぎ、シリコンの島を正確にガラス基板上に位置決めすることが必要になる。このためにはシリコンの重りや島を、犠牲層でシリコン枠から支持された構造にしておき、ガラス板に陽極接合した後、YAGレーザアシストエッチングにより犠牲層を切断することが行われる。図2.4-17は、シリコンウェハー上溝加工の断面SEM写真を示している。厚さ400 μm のシリコンウェハー上に、HClガス中で、レーザ焦点をずらしながら、6回の繰返しエッチングを行った結果で、溝深さは約350 μm と計測されている。

2.4.7 レーザ微細加工の現状課題及び競合技術

マイクロデバイスの高機能化に伴って、従来の、単独基板上にシステムを組み合わせるモノリシック構成ではなく、複数素子を3次元的に集積するハイブリッド集積技術への要請が高まっている。また、電気的素子だけではなく、光、流体などのデバイスを組み合わせた多機能MEMSへの要請も高まっており、その中では、マイクロコネクタなど、3次元性の高いパーツ製作への要望がある[16]。

マイクロマシン技術において、3次元性の高い、高アスペクト比加工が可能なものとしては、マイクロ放電加工、X線LIGA、深堀のイオン反応性エッチング(Deep Reactive Ion Etching: DRIE)、レーザマイクロマシニングなどがある。マイクロ放電加工では、最小穴径5 μm 、表面粗さ $R_a=0.1$ μm 程度の結果が報告されている[17]。放電加工の場合、加工精度、表面品質は、一般に加工時間に逆比例する。図2.4-18は、単結晶シリコンウェハーに幅50 μm 、深さ200 μm の貫通穴をマイクロ放電加工によって製作した例を示しているが、表面粗さは $R_a=2\sim3$ μm 程度、加工時間は約6時間であった。マイクロ放電加工では、極めて3次元性の高いプロトタイプングが可能であるが、レーザ加工に比して、製作時間が問題となる。

DRIEでも極めて高いアスペクト比の加工ができるが、加工壁面は垂直、若しくは傾斜壁面にかぎられ、曲面などを有する3次元的加工には適さない。図2.4-19は、シリコンウェハー上に幅20 μm 、深さ100 μm 程度の溝加工を施した結果を示しているが、加工側壁面、ウェハー表面とも、デブリフリーに仕上がっているのが分かる。加工時間はおよそ1時間程度であり、レーザ加工よりは、時間が掛かるものの、製作

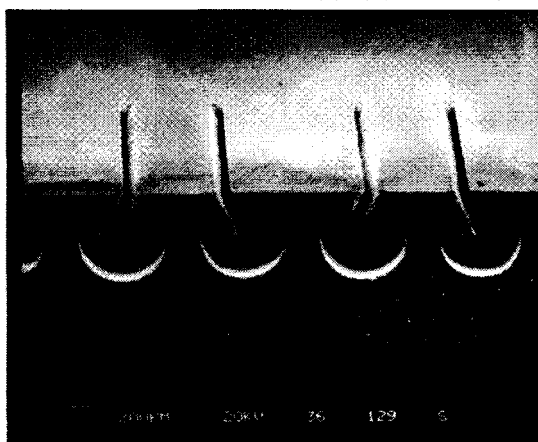


図2.4-18 単結晶シリコンウェハー上のマイクロ放電加工による50 μm 幅貫通穴加工結果

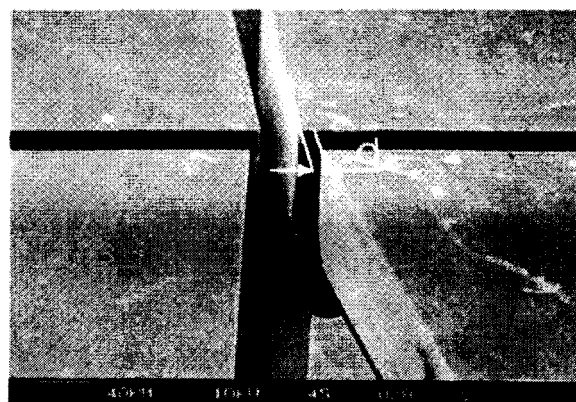


図2.4-19 シリコンウェハー上のDRIEによる20 μm 幅溝加工結果

精度はサブミクロンレベルを実現している。さらにDRIEによって、光ファイバースイッチのミラーを製作した例では、壁面粗さ $R_a=36\text{ nm}$ を実現している[18]。

また、X線LIGAとレーザLIGAを比較した場合、最大アスペクト比は、X線LIGAでは100程度に達するのに対して、レーザLIGAでは10前後に留まる。また表面粗さも、レーザLIGAでは、X線LIGAに比して、多少の低下を免れないが、レーザLIGAは、装置コスト、操作容易性、加工柔軟性などにおいて、X線LIGAよりも優れている。そのため、近年では様々なラピッドプロトタイピング、或いはマイクロパーツの量産に用いられている。X線LIGAとレーザLIGAの比較をまとめ、表2.4-2に示す。

以上の比較から、レーザマイクロマシニングは、加工精度、表面粗さなどの面では、X線LIGAやMEMS技術に比して、若干劣ることが分かる。さらに加工ワークへの熱影響を抑制するためには、短波長化、短パルス化の流れが進むであろうが、現状では、最小造形サイズとして、数100 nmレベルが限界となっている。また、ビーム加工を行う場合には、加工平面のテーパが、またマスク加工の場合には、回折干渉縞の壁面品質への影響などが問題となるケースも出て来ると考えられる。しかし大規模、高価なMEMS、X線LIGA等の設備に比べて、レーザ装置の低コスト性、操作容易性等々は大きなメリットである。また、レーザマイクロマシニングは、複雑3次元マイクロパーツ製作への高い適応性を有しており、マイクロデバイスの高機能化に伴うパーツ形状の3次元化に際しては、無くてはならない加工技術であるといえる。最後に、代表的なマイクロマシン技術とレーザマイクロマシニングの比較を表2.4-3に示す。

表2.4-2 X線LIGAとレーザLIGAの比較

	X線LIGA	レーザLIGA
マスクタイプ	Crマスク、中間マスク。ワーキングマスクが必要	マスクレス加工。露光量調節用アパチャーのみ。
マイクロパーツの形状定義性	垂直及び傾斜壁面。一定深さ。	任意3次元形状。
平面方向精度	数100nm	数 μm
アスペクト比	>100	<10
加工最適分野	量産分野	ラピッドプロトタイピング、量産分野

表2.4-3 代表的マイクロマシン技術とレーザマイクロマシニングの比較

	平面加工精度	表面粗さ	壁面垂直度	アスペクト比	特徴
X線LIGA	数100nm	数10nm	89.5° 以上	100程度まで可能	3次元性には劣る。2.5次元の柱状構造物。装置高価。
ウェットエッチング	数100nm ～数 μm	数10nm ～数100nm			結晶方位性による制約大。3次元性小。
ICP、DRIE	数100nm ～数 μm	数10nm ～数100nm	89° 以上	50程度まで可能	結晶方位性による制約は無いが。3次元性少。装置高価。
マイクロ放電加工	数 μm	数100nm ～数 μm		10程度まで可能	3次元性大。加工時間短縮が課題。
レーザマイクロマシニング	数100nm～ 数 μm	数100nm ～数 μm		10程度まで可能	3次元性大。熱影響域の低減が課題。

参考文献

- [1] S. Marshal: Micromachine Devices, Cahners, Vol. 3, No.10, (1998), 1.
- [2] E. W. Becker et al.: Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoforming, and Plastic Moulding (LIGA Process), Microelectronic Engineering, **4**, 1986, 35.
- [3] Rizvi, N. H.: Production of Novel 3D Microstructures Using Excimer Laser Mask Projection Techniques, Proc. SPIE, **3680**, (1999), 546.
- [4] Tönshoff, H. K., Wagner, T. et al.: Precision Machining Using UV and Ultrashort Pulse Lasers, Proc. SPIE, **3680**, (1999), 536.
- [5] Chichkov, B. N., Momma, C. et al.: Femtosecond, Picosecond and Nanosecond Laser Ablation of Solids, Appl. Phys., **A63**, (1996), 109.
- [6] Becker, E. W. et al.: Production of Separation-nozzle Systems for Uranium Enrichment by a Combination of X-ray Lithography and Galvanoplastics, Naturwissenschaften, **69**, (1982), 520.
- [7] 吉田: マイクロ成形加工(LIGA), 塑性と加工, Vol.38, No.437, (1997), 2.]
- [8] Abraham, M., Arnold, J., Ehrfeld, W. et al.: Laser-LIGA: A Cost Saving Process for Flexible Production of Microstructures, Proc. SPIE, **2639**, (1995), 164.
- [9] 見目: 光造形法によるマイクロマシン実験機, 光アライアンス, 1995.3, (1995), 32.
- [10] Ikuta, K., Maruo, S. and Kojima, S.: New Micro Stereo Lithography for Freely Movable 3D Microstructure, Proc. MEMS 98, (1998), 290.
- [11] Ikuta, K. and Hirowatari, K.: Real Three Dimensional Micro Fabrication Using Stereo Lithography and Metal Moulding, Proc. MEMS 93, (1993), 42.
- [12] Ikuta, K. and Hirowatari, K. and Ogata, T.: Three Dimensional Micro Integrated Fluid Systems (MIFS) Fabricated by Stereo Lithography, Proc. MEMS 94, (1994), 1.
- [13] Maruo, S. and Kawata, S.: Two-photon-absorbed Near-infrared Photopolymerization for Three-dimensional Microfabrication, J. MEMS, Vol. 7, No. 4, (1998), 411.
- [14] 南, 江刺: マイクロマシンと光技術, 光技術コンタクト, Vol.32, No.6, (1994), 314.
- [15] 杉原, 南, 江刺: 連続紫外レーザによる高速CVDを利用したマイクロアセンブリ, 電気学会論文集E, Vol.117, No.1, (1997), 3.
- [16] Toshiyoshi, H., Mita, Y., Ogawa, M. and Fujita, H.: Silicon Micro Motherboards for Three -dimensional assembling of Micro Systems, T. IEE Japan, Vol. 188-E, No. 10, (1998), 444.
- [17] Heeren, P.-H.'s, Beuret, C., Larsson, O., Bertholds, A., Reynaerts, D. and Van Brussel, H.: Microstructuring of Silicon by Electro-Discharge Machining (EDM) - Part II: Applications, Proc. 10th Eurosensors, (1996), 255-258.

- [18] Marxer, C., Grétilat, M. –A., de Rooij, N. F. et al.: Vertical Mirrors Fabricated by Reactive Ion Etching for Fiber Optical Switching Applications, Proc. MEMS 97, (1997), 49.

2. 5 プラズモンエンハンス近接場光素子を用いた微細加工技術

2.5.1 近接場光を利用した加工技術動向

光の回折限界を突破する近接場光の技術は、超高密度光ディスクなど多くのナノ構造デバイスや微細加工技術、あるいは微小領域の検査技術に応用される可能性を有している[1][2][3]。近接場光を直接利用するには、先端を先鋭化し先端に穴を開けた金属被覆光ファイバーを加工対象物面に近づけ、光ファイバーの最前面に開けられた穴から漏れ出た近接場光によって光加工を行う(図 2.5-1)。例えば、図 2.5-2 に示すような近接場プローブにより図 2.5-3 に示すようなパターン描画が報告されている。しかし近接場光は極めて微弱であり、それを補うために強力な光源を用いると熱により近接場光素子が損傷を受ける欠点があった。

2.5.2 プラズモンエンハンス効果を用いた新しい近接場光加工素子の提案

穴を透過する光は、図 2.5-4 に示すように穴径(d)と波長(λ)の比が小さくなるほどその光透過効率は急激に減少する(穴直径の4乗で減衰)。一方、図 2.5-5 のような穴の周辺の金属表面に窪み(ディンプル)アレイを設けた構造を作ると、金属表面に発生するプラズモンの共鳴現象(プラズモンエンハンス効果)により2乗の減衰にとどめることが出来ることが当社北米研究所(NEC Research Institute)で発見された[1-6]。例えば波長248nmのKrFエキシマーレーザーの場合、波長の1/10(25nm)の穴を通すとその光強度は50万分の1に減衰してしまう。しかし上記構造により、500分の1の減衰に留めることが出来る、すなわち1000倍の増強効果が期待できる。これにより近接場光の実用性が大きく高まったといえる。この効果はディンプル形状、配置、誘電体材料、金属膜材料などの最適化によりさらに透過効率が高められると期待される。

また本近接場光から発生する伝搬光の増幅効果や高いコヒーレンス性および波長フィルタ効果なども見られ、メカフリー微細加工用光源としても期待される。

以下にプラズモンエンハンス近接場光素子の構造と設計について述べる。

2.5.3 プラズモンエンハンス近接場光素子の構造と設計

波長より小さな径をもつホールアレイの光透過現象は3年前に発見された[4]。

図 2.5-6 に示すように波長 λ の光をアレイ状の穴を有する金属膜を通す場合、さきに述べたように穴径 d が波長 λ より小さい場合、透過光は光の回折限界のため穴径の4乗で急激に減衰してしまう。図 2.5-7 に白色光を膜厚0.2 μm の銀膜に収束イオンビーム法により開けられた直径0.15 μm 、周期0.9 μm のホールアレイに膜面に対し垂直に照射した時の透過光のスペクトルを示す。波長326 nmに鋭いプラズモンによるピークが観察された。穴径よりも長い波長の成分が何本か見られるが、これらは金属と SiO_2 の界面からの光である。

透過光の強度増加は金属膜両サイドに発生するプラズモンの共鳴によって生じると考えられている[5]。光の最大透過率は穴の単位面積当たりに直すと1を越える。光の透過効率は穴の直径には無関係で、単位面積当たりの数に比例する[6]。走査型近接場光顕微鏡で観察した図 2.5-8 に示すような四角形配列のホールアレイでは図 2.5-9 に示すようにホー

ルアレイの間隔（格子定数）によって透過率が大きく変化する。格子定数が穴の直径に近づくほど透過率が大きくなることから、穴近傍に発生する表面プラズモンの波長と同程度になると共鳴が生じることが考えられる。また図 2.5-10 に示すように、ヘキサゴナル配置のホールアレイではさらに透過率が増加しており、より対称的な構造ほど共鳴効果が大きいことを示している。また透過効率は誘電体材料によっても異なり図 2.5-11 に示す例ではサファイアでは石英ガラスよりも透過効率が增加する。

ホールとディンブルの組み合わせアレイ（図 2.5-12）でも同様の効果が観察され、スペクトルによってはホールのみの場合よりも組み合わせアレイの方が透過効率が良い場合もある（図 2.5-13）。

図 2.5-14 は光ファイバー断面のコア部に設けられた、ディンブル構造の中心のホールからの透過光の写真を示す。図 2.5-15 に示すようにシングルホールであってもまわりにディンブルアレイ構造を設けることによってプラズモンとの共鳴が生じ、透過効率が增加することが観察された。この効果は先に述べたように波長に対し穴径が 10 分の 1 の場合 1000 倍にもなることが確認された。また共鳴条件を最適化することによりさらに高い透過効率が期待される。

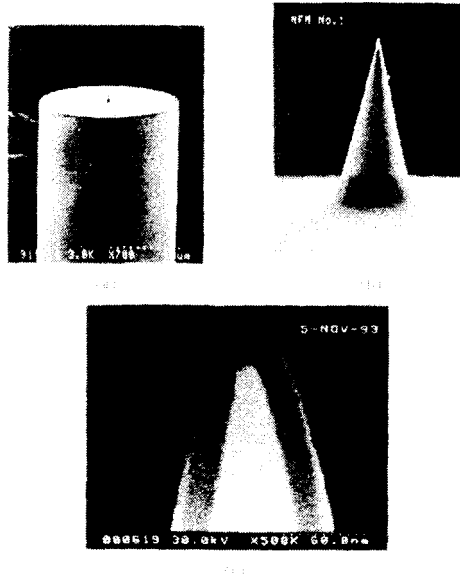


図 2.5-1 近接場プローブ（出典：文献[2]）

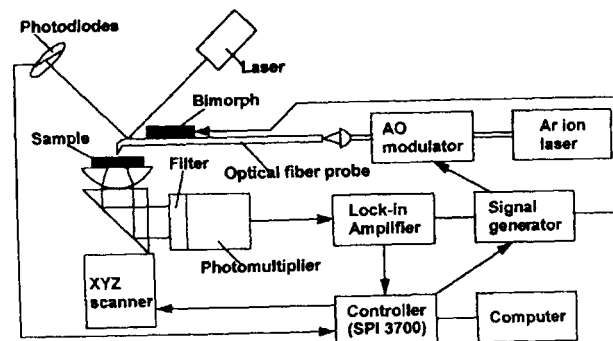


図 2.5-2 走査型近接場光プローブを用いた描画装置（出典：文献[4]）

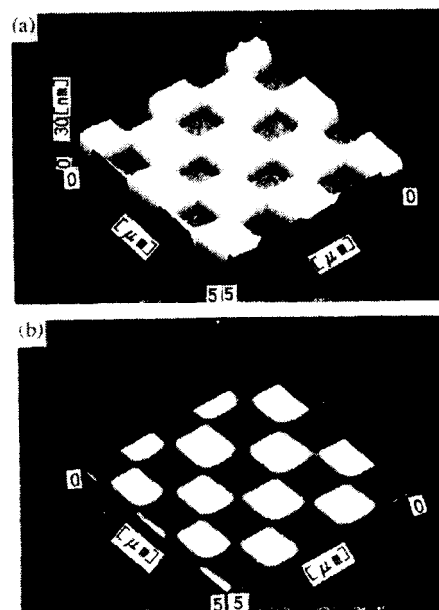


図 2.5-3 走査型近接場プローブによる描画パターン（出典：文献[4]）

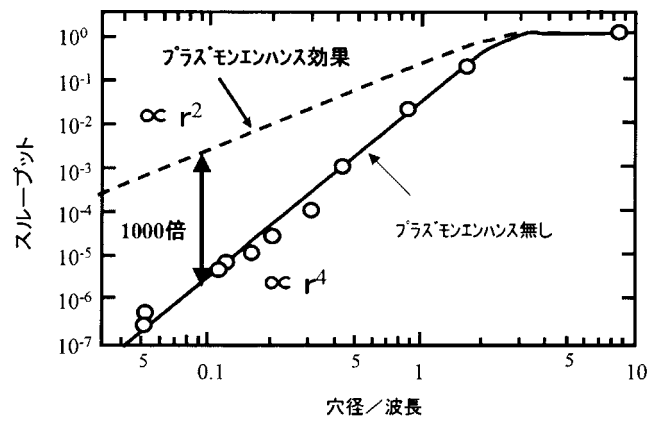


図 2.5-4 穴を透過する光の透過効率と穴径／波長比の関係

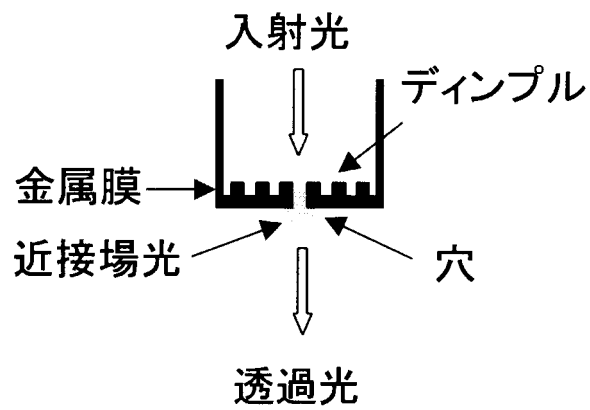


図 2.5-5 プラズモンエンス効果を用いた近接場光素子の構造

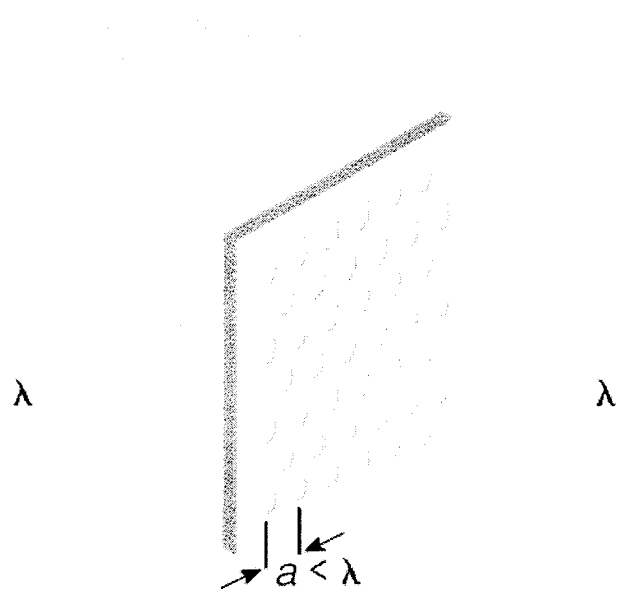


図 2.5-6 ホールアレイを透過する光

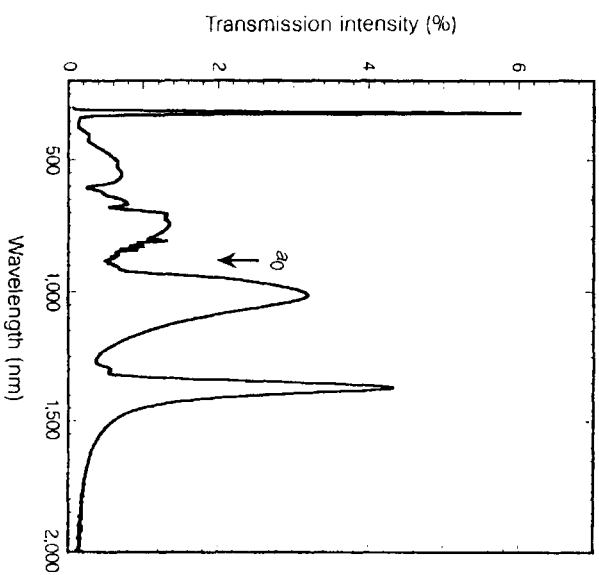


図 2.5-7 ホールアレイを透過した光の透過スペクトル (出典：文献[5])

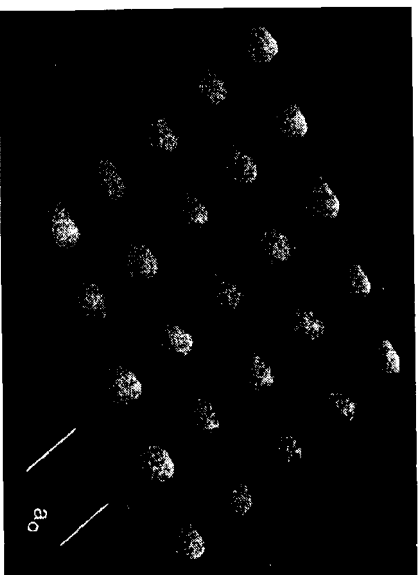


図 2.5-8 走査型近接場光顕微鏡で観察したホールアレイ (出典：文献[5])

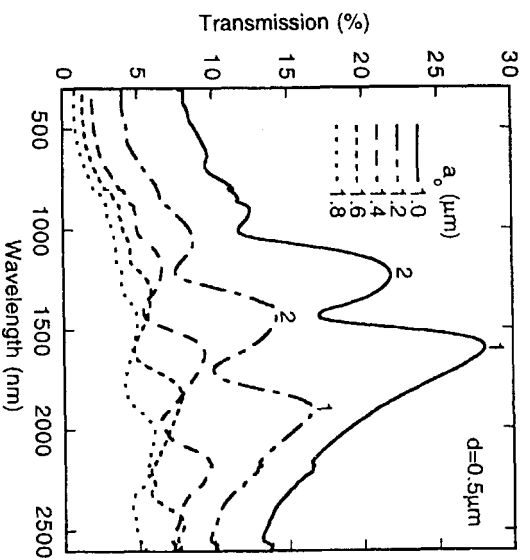


図 2.5-9 格子状ホールアレイの透過光スペクトル (出典：文献[5])

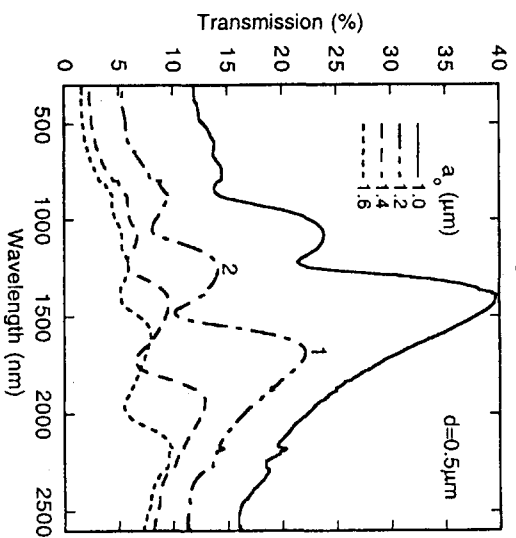


図 2.5-10 ヘキサゴナル状ホールアレイの透過光スペクトル (出典：文献[5])

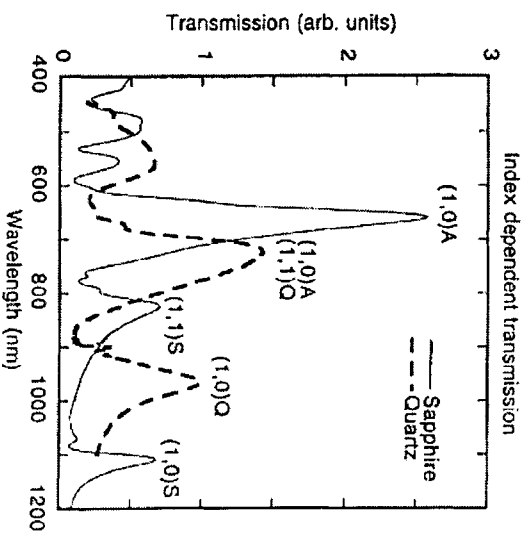


図 2.5-11 ホールアレイからの透過光スペクトルの誘電体材料による違い(出典：文献[9])

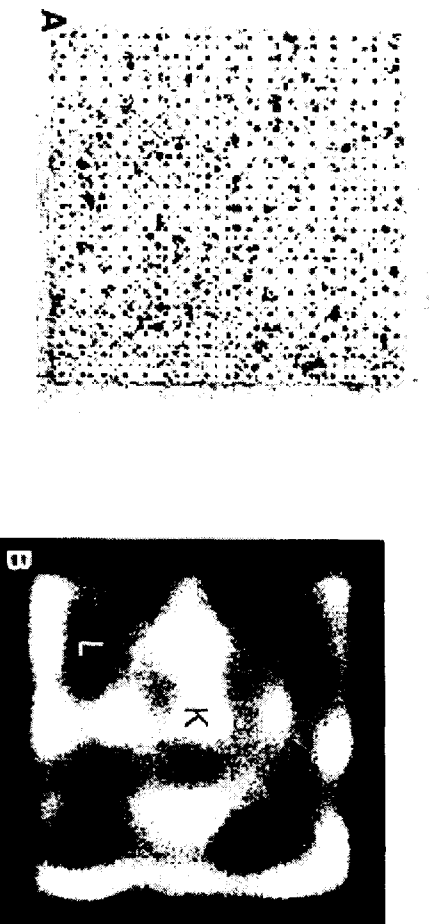


図 2.5-12 ホールおよびダイヤモンドアレイ (A) からの透過光イメージ (B) (出典：文献[7])

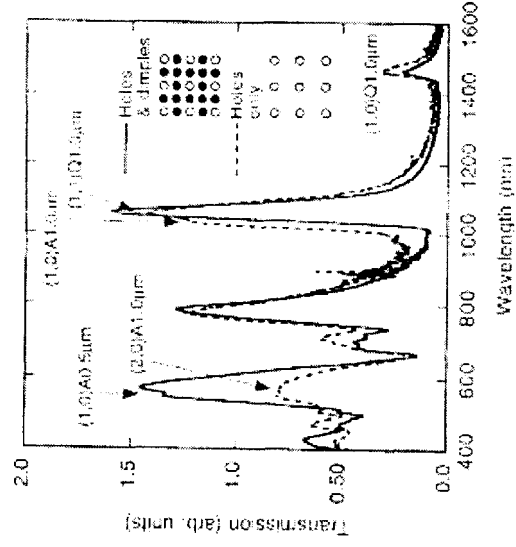


図 2.5-13 ホール-ディンブルアレイ (実線) およびホールアレイ (破線) からの透過光スペクトル (出典：文献[7])

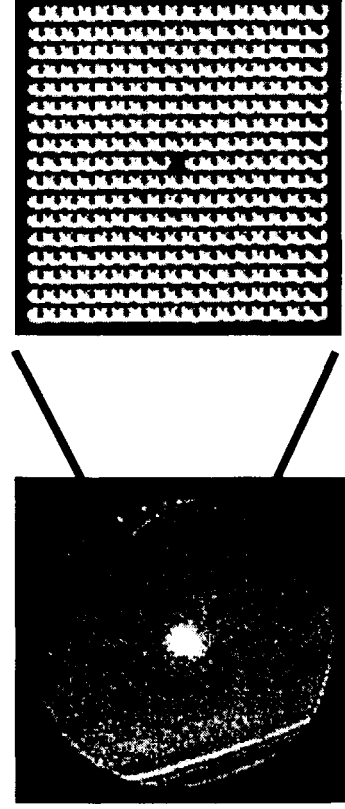


図 2.5-14 光ファイバー断面に作られたディンブルアレイに囲まれたシングルホールからの透過光 (出典：文献[10])

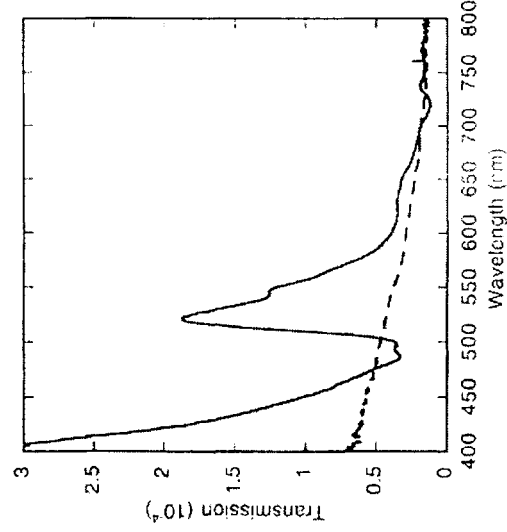


図 2.5-15 シングルホール (破線) とディンブルアレイに囲まれたシングルホール (実線) からの透過光のスペクトル (出典：文献[8])

参考文献

- [1] 3Dナノテクノロジーの調査研究, 平成11年度先導研究報告書「NEDO-PR-9918」, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成12年3月, 48-55.
- [2] ナノ・フォトニクス, 大津元一, 米田出版
- [3] 超解像の光学, 河田聡, 学会出版センター
- [4] K. Nakajima, H. Muramatsu, N. Chiba, T. Ataka, and M. Fujihira, "Optical Processing by Scanning Near-field Optical /Atomic Force Microscopy", *Thin Solid Films* 273 (1996) 327-330.
- [5] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary Optical Transmission Through Sub-Wavelength Hole Arrays", *Nature*, 391, 12 Feb. (1998) pp. 667-669.
- [6] H. F. Ghaemi, T. Thio, and D. E. Grupp, T. W. Ebbesen, and H. J. Lezec, "Surface Plasmons Enhance Optical Transmission Through Subwavelength Holes", *Phys. Rev. B*, 58, 11 (1998) pp. 6779-6782.
- [7] T. Thio, H. F. Ghaemi, H. J. Lezec, P. A. Wolff, and T. W. Ebbesen, "Surface-Plasmon-Enhanced Transmission Through Hole Arrays in Cr Films", *J. Opt. Soc. Am. B*, 16, 10 (1999) pp. 1743-1748.
- [8] D. E. Grupp, H. J. Lezec, T. Thio, and T. W. Ebbesen, "Beyond the Bethe Limit: Tunable Enhanced Light Transmission Through a Single Sub-Wavelength Aperture", *Adv. Mater.*, 11, 10 (1999) pp. 860-862.
- [9] T. J. Kim, T. Thio, T. W. Ebbesen, D. E. Grupp, and H. J. Lezec, "Control of Optical Transmission through Metals Perforated with Subwavelength Hole Arrays", *Optics Lett.*, 24, 4 (1999) pp. 256-258.
- [10] T. Thio, H. J. Lezec, and T. W. Ebbesen, "Strongly Enhanced Optical Transmission through Subwavelength Holes in Metal Films", *Physica B*, 279 (2000) pp. 90-93.

2. 6 ナノ粒子ビーム加工技術

2. 6. 1 概要

ナノスケール粒子を有するレビテーションビームは、反磁性レビテーションに基づくもので、各種ナノスケール分野への応用が可能と思われる。本報告書は、レビテーションビームを用いて蒸着、切削、穴あけ作業等が可能になるシステムを検討した。検討した典型的なシステムは主として二つのサブシステム、1) 粒子の生成、2) 粒子の加速および制御である。粒子生成サブシステムは、適正なサイズの粒子を供給する。粒子は、グラファイト（炭素）、金などの金属、セラミック、高分子を含む広範囲の反磁性材料を利用可能である。粒子の種類とサイズは用いる蒸着手法や切削手法によって変わるが、典型的なサイズは10ミクロンから10ナノメートル以下までを考えている。粒子加速サブシステムは、粒子を浮揚させて加速し、基板上に精度良く粒子を衝突させることができる。本報告書において、レビテーションとレーザーや集束イオンビームといった競合技術と比較検討し、また他のレビテーションナノスケールの応用例を簡単に紹介した。

2. 6. 2 開発すべき技術

図2.6-1にシステムの概念図を示す。このシステムは、従来の粒子供給、粒子生成、粒子加速という主要な三つのサブシステムから構成されている。

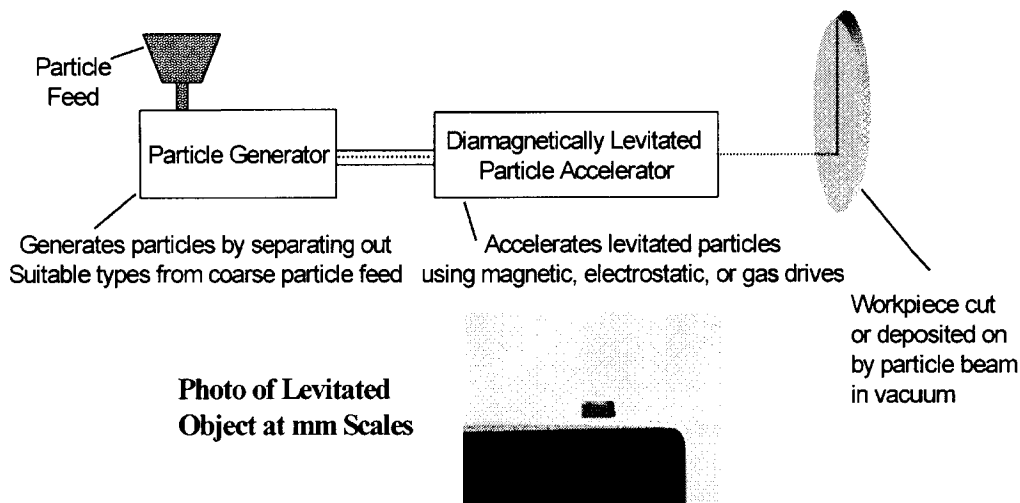


図 2. 6-1 レビテーション粒子ビームシステムの概念図

従来技術を用いた粗粒子供給システムは、希望する材料の粒子を粒子生成システムへ送り込む。この供給システムは、粒子の流動を作り出す振動装置をベースにしている。この供給システムに適切なサイズの粒子も送り込まれるが、大きすぎたり小さすぎたり、不規則な形状の粒子、あるいは必要な磁氣的性質等をもたない粒子も含まれる。粒子生成システムは、反磁性レビテーションを用いて粒子を浮揚させる。レビテーションは受動的（動力不要）で、安定であり、レビテーションの位置を維持するためのセンサーも必要としな

い [1, 2, 3]。一旦浮揚すると、磁氣的応答（磁性による分類）、気体流動的応答、電氣的応答、光応答などの種々の方法を用いて、希望する粒子を分類できる。摩擦や吸着によって基板上に残存している粒子とは異なり、粒子の運動を制限する固体表面がないため、レビテーションを用いた粒子の分類が可能となる。

粒子生成装置は希望する粒子のレビテーション流動を作り出す。マルチビームを用いた多重流動も考えられるが、本報告書では、単一流動のみ検討した。浮揚された粒子流動は粒子加速サブシステムに入り、そこで粒子は必要な速度まで加速される。サンドブラスタのような従来の固体粒子加速方法とは違って、加速粒子は浮揚し、運動が磁氣的に制約されているため、正確な経路を進む。粒子は加速器の両側または片側の面に接触しないため、その速度と出口の位置を正確に制御できる。種々の加速装置を検討し、有望な方法を選択し、さらに開発を進める必要がある。加速装置として、磁性、静電性、低圧気体、または光（レーザー）による方法等が考えられる。

粒子加速装置は粒子ビームも生成できる。「ビーム」という言葉は、ご承知のとおり、粒子が正確な軌跡をもつことを意味し、特に選んで使用した。粒子は構造体の側面に接触せず、正確な経路を通るように磁氣的制約を受けるため、本システムでは、これが可能となる。粒子ビームはシステムを出て、目的の基板に衝突する。衝突の結果は制御される粒子の性質によって決まる。剛体粒子の高速（例えば、300 m/秒）ビームは基板を切削し、低速（例えば、1 m/秒）粒子ビームは蒸着用に基板に付着する。

このようなシステムを製作するために、下記の要素技術を開発する必要がある。

- 1) マイクロ・ナノ粒子のレビテーション
- 2) サイズ、形状、磁性等の性質によるレビテーション粒子の分離
- 3) レビテーション粒子の加速と制御
- 4) いろいろな種類の粒子ビームを用いた蒸着と切削

2.6.3 技術の必要性、意義

この種のシステムには、受動的レビテーションの活用が重要である。小型粒子の加速はよく知られている（例えば、サンドブラスタ技術）が、現行の競合技術では粒子とシステム壁の相互作用のため、粒子の速度と位置を制御することができない。表面からマイクロ・ナノ粒子が飛び出す工程でも、表面吸着に広範囲の変化があるため、粒子の速度も大きく変動する。一旦浮揚すると、速度の変動は気体、磁気、あるいは光ダンピング等を用いることにより解決できるため、受動的レビテーションではこの問題を避けることができる。しかし、これらの方法は非レビテーションシステムでは有効に利用できない。それは非レビテーションシステムが効果を発揮させるために十分な時間粒子が表面に接触しないようにする必要があるためである。また、受動的レビテーションも蒸着に必要な比較的遅いスピードの粒子ビームの生成も可能である（この場合、速度が早すぎると粒子の一部は基板から飛び跳ねてしまうであろう）。

レビテーション粒子ビーム技術は広範囲の分野に影響を及ぼすと思われる。代表的な例を上げると、チップの修理やマイクロマシニングへの応用である。ここで重要なのは、1 μm 以下のスケールで処理が可能で、しかも高い蒸着速度でかつマイクロマシニングの高速化が可能になるようなツールである。競合技術市場は既に存在するため、これが最

も必要かつ重要な事項となると思われる。さらに、最新技術のチップは急速に、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下に進みつつあり、 $0.10\sim 0.25\text{ }\mu\text{m}$ 以下のスケールでチップを診断するツールが早急に必要となる。このようなツールが開発されなければ、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の良好な構造を有するチップの開発は遅れてしまう。

中期的には、粒子ビーム技術は同一構造物の中に複数の材料を用いた新しい3Dマイクロ加工・組立に応用できる。その機能を十分に応用できる事例は一般的にMEMS分野と考えられる。いくつかの事例では、その機能を利用できることがわかっているが、まだ実用化されていないため、本技術の重要性は中期的なものと評価されている。従って、3D複合素材の組立に活用するための新しい種類のMEMSデザインが重要視されるであろう。今すぐにでも応用可能な技術例は、プロトタイプを迅速に製作するMEMSツールであろう。MEMSデバイスはCADシステム上で設計され、デスクトップ粒子ビームデバイスによって組み立てることができると思われる。粒子ビームは、毒性のCVD気体を使用せずに多種類の材料を蒸着できるため、本応用における最も重要な長所である。粒子ビームシステムは、たとえ高いアスペクト比であっても、複合3Dマイクロ構造を組み立てるために、相互にその材料上に別の材料を蒸着することができる。また、LIGAのような多くの競合技術とは異なり、粒子ビーム蒸着面は均一な断面である必要もない。

長期的に、レビテーションナノ技術はもっと多くの開発意義を有すると思われる。レビテーション粒子ビームは最初のサブミクロンレビテーションの応用例となるだろう。原子顕微鏡やバイオテクノロジー、センサーなどの多くの応用分野に、マイクロスケールからナノスケールまでのレビテーション技術が多大な利益を我々にもたらすであろう。レビテーション粒子ビームを集散的に開発することで得られる技術の大部分は、将来、他の分野や他のデバイスへ速やかに応用開発が拡張される可能性が大である。

2.6.4 基礎となる従来技術と技術的傾向

レビテーション粒子ビームの競合技術は、主としてレーザーと集束イオンビーム(FIB)である。電子ビームデバイスもある種の応用では競合している。

しかし、ナノ技術はいずれも材料を直接蒸着する方法ではない。むしろ、化学蒸気雰囲気を用いて単に蒸着できるだけである。レーザーもFIBも、銅や金のような物質を蒸着するために化学蒸気雰囲気を使用するのである[4, 5]。イオンビームやレーザービームのエネルギーは化学蒸気を分解して物質を蒸着させている。

レーザー化学蒸着(LCVD)はレーザーシステムと同時に蒸着される物質にも依存している。固体状態UVレーザーを現在研究中である[6]が、通常はエキシマレーザーが用いられる。数ミクロンの断面積の金属線は $100\sim 1000\text{ }\mu\text{m}$ /秒の速度で蒸着が可能で[7]、銅のような物質では $25\text{ }\mu\text{m}$ /秒以上の速度が一般的である[8]。分解能は種々の光学的スプレッドや蒸着効果があるため、通常 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ である。ニアフィールドオプティクス(近視野光学)を用いた 15nm 以下の高精度が報告されているが、この技術はまだ実験段階であり、基板の近傍にプローブか他の構造物が必要となる。FIB蒸着は分解能は高いが、蒸着速度は遅く、LCVDの速度に比べて約2桁程遅い[7]。最適条件では、線幅は $5\sim 10\text{nm}$ 以下となりうる。

レーザもイオンも切削やマイクロエレクトロニクスに使用できる。しばしばレーザトリ

ルやイオンミルがチップ診断に用いられており、システムは市販化の段階に達している[10]。例えば、マスク用に外側の不動態層を除いて下敷きのトレースを露出させるため

にイオンミルを使用することがよくある。チップ診断ツールは新規にチップ設計した後、デバッグを行うためにも重要である。レーザの熱またはイオンのスパッタリング効果は、基板から原子を蒸発させるか、あるいはスパッタさせる。両技術とも基板に穴を開けるか、あるいは切削用に使用されている。レーザアブレーションは $1\sim 2\mu\text{m}$ のスケールまで適用でき[11]、イオンミルよりもずっと早い。レーザドリルと切削は、インクジェットノズルの穴を開けや、回路キヤリブレーション用レジスタをトリミングするた

めに使用される。これらのは多くは $1\sim 10\mu\text{m}$ スケールではなくむしろ $10\sim 50\mu\text{m}$ スケールで使用されている。イオンが直接基板に衝撃したり、またはより早く材料を除去するために、イオン補助エッチングを使うことができる[12]。FIB蒸着と同様に、イオンミルは高い分解能を達成でき、 $5\sim 10\text{nm}$ 以下にも適用可能である。

電子ビームリソグラフィなどのリソグラフィもある分野では競合する。リソグラフィは適切なレジストの後にUV、X線、電子ビームに露光させる必要がある。レジストは通常露光面積（あるいは、レジストの種類によっては露光されていない面積）に穴を開けるために開発されている。材料は穴を通して蒸着されるか、より一般的には、以前に蒸着されたフィルム穴を通してエッチングする。多くのリソグラフィではマスクが必要である。リソグラフィが適用できる場所では、多数のデバイス加工する場合、一般にリソグラフィが選択されている。

最後に、レベエーションノイズは、正確に位置と速度を制御できかつクロな距離を高速で移動できるデバイスと考えると、現在競合している技術は存在しない。最も近い競合技術は、原子顕微鏡チップを用いた分子や小粒子の輸送である。原子顕微鏡（走査型トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡など）は一般にピエゾ電氣を用いて $5\sim 100\mu\text{m}$ の範囲を移動させている。速度は通常 $1\sim$ 数 $\mu\text{m}/\text{秒}$ である。ピエゾエレクトロニクス・アクチュエータは実際にはより早く動かせるが、大型顕微鏡構造の共鳴が正確な高速運動を妨げている。

2.6.5 現状技術における課題

レーザもイオンも第一に光学、第二に電荷と気体の衝突効果のためにビームが固有に拡散してしまう。これに対して、レベエーション粒子ビームは固有拡散の影響を受けにくい。レベエーション粒子ビームは、確かに熱運動や加速による変動による拡散の影響を受けない。レベエーション粒子ビームの広がりはゼロである。理想的な条件では、レベエーション粒子ビームの広がりはゼロである。理想的な条件がどの程度現実に近いものかということは今後の研究における重要なテーマであるが、あまり広がらないビームは利用する上において大変魅力的である。

実際にビーム技術を選択する際、スループットも重要である。原理的には、複数のビームを用いるFIBデバイスとレーザのスループットは改良できる。また、複数のレーザも基本的に同じチップと基板に対して同時に働くことができるが、しかし実際には光学的にもコスト面でも複数のビームの扱う技術開発はうまくいっていない。多重イオンビーム

では、1 ビームが近くのビームと静電的に干渉しあうという点で同様の問題がある。これに対して、レビテーション粒子ビームでは複数のビームが干渉せずに近接して使用することができ、また複数ビームを発生させる光学パーツをコンパクトに詰め込む必要がない。

二つの競合プロセス（レーザーおよびFIB）は蒸着にプレカーサー気体を必要とする。この気体の多くは毒性があり、安全性のためにさらにコストと複雑さを必要とする。また、基板は1 回に1 種類の気体にだけ曝されるため、1 回に1 種類のみしか蒸着できない。これに対して、マルチレビテーション粒子ビームは複数の異なる材料を同時に蒸着できる。例えば複数のレビテーション粒子を用いて異なる材料を交互に積み上げた構造を作りあげることができる。これはMEMS 用プロトタイプの迅速設計ツールとして特に魅力的な特徴である。

分解能については、レビテーションビームはレーザーよりもずっと精度が良く、FIB と競合できる。レーザーは近年特に注目されるサブミクロンチップ構造処理に厳しい制約がある。FIB はサブミクロン構造の処理が可能であるが、速度は制限され、帯電効果もいくつかの応用例において課題が残る。FIB による幅 $5\mu\text{m}$ 、長さ $200\mu\text{m}$ 、厚さ $0.35\mu\text{m}$ のタングステントレースの蒸着に45 分を要する[10]。レビテーション粒子ビームは速度と分解能の両方が優れていると思われ、イオンのような固有の帯電メカニズムはない。

既に述べたように、粒子ビームがマクロな距離にわたって高速、高分解能で浮揚するマイクロ・ナノスケールの対象物を輸送するためのデバイスとして見なされるならば、最も近い競合技術は原子顕微鏡である。原子顕微鏡は、提案しているレビテーション粒子ビームよりも数桁遅い速度であり、巨視的な距離を動くこともできない。プローブチップが位置決めの対象物を損傷する危険も、プローブチップ自体が損傷する危険もないため、位置決めや配置のためにマイクロ・ナノスケールの対象物のレビテーションも原子顕微鏡に比べて魅力的である。

2.6.6 産業への波及効果

レビテーションナノデバイス、特にレビテーション粒子ビームは、マイクロチップ産業へ大きな衝撃を与えられると思われる。サイズはもはやレーザー分解能以下に急速に縮小されている。これは、チップの修理や多方面におけるチップ診断（例えば、テスト用トレースを露出するための切削絶縁）に、FIB やニアフィールドオブティックス、レビテーション粒子ビームなどの別のツールを使用する必要があることを意味している。FIB やニアフィールドオブティックスの制約は既に考察した。チップの修理や診断の技術がなければ、サブミクロンエレクトロニクスの発展は遅れるであろう。チップの修理・診断装置の市場規模はあまり大きくないが、新しい精密な構造のチップを導入する速度に影響を与えるため、改良されたツールの影響は事実上大である。精密構造チップの市場規模は巨大（何十億）であるため、レビテーション粒子ビームのような改良ツールの影響はより大きくなると予想される。

もうひとつの可能性のある領域は、オンデマンドで蒸着する複数材料を用いたMEMS 3D 構造の加工/組立である。この機能はまだ実用化されていないため、短期での影響を判断することは難しい。しかし、成功した使いやすいデバイスに対して、長期的な影響はとて大きくなると思われる。組立デバイスは製造工程で使われるが、すぐに応用できる

分野としては、プロトタイプ迅速製造用 MEMS デバイスである。例えば、銅と高分子絶縁体、粉末磁性材料の組み合わせを考えると、その場で電磁マイクロモータを組み立てることができる。アスペクト比や複合材料のような既存のマイクロ組立の制約によって、モーターは制限されている。通常、MEMS 高速プロトタイプデバイスはレーザーをベースとすると考えられているが、既に述べたように、レーザーは一般に $1\mu\text{m}$ 以下の分解能には適用できない。これは多くの MEMS デバイスには対応するかもしれないが、いくつかの応用分野ではデバイスの全体サイズよりもかなり高い精度が要求される。例えば、わずか $1\mu\text{m}$ の分解能をもつ $10\mu\text{m}$ のブッシングの性能は非常に低い。サブミクロン MEMS における今後の関心事になるであろう。

また、各種のレビテーション粒子ビームは環境にもユーザーにも優しいということに注意してほしい。レーザーや FIB のような既存の競合技術は、単一材料についてさえ蒸着には毒性の気体を必要とする。また、このような毒性物質を用いるために必要な安全装置を加えることによりコストがかかり、また副生成物の廃棄や漏れがある種の環境問題となる。さらに、材料の毒性や関連コストの問題が、市場に新たに参入したいと考えている小規模事業者の意欲を阻害してしまう。

2.6.7 まとめ

レビテーション粒子ビームは、切削やマイクロマシンニングと同様に異なる材料の蒸着に使用できる。レビテーション粒子ビームの主要な競合技術は、レーザーや集束イオンビーム (FIB) である。レーザーと比較すると、レビテーション粒子ビームは数 10nm という、レーザーの $1\mu\text{m}$ よりもずっと高い分解能が期待できる。また、レビテーション粒子ビームは異なる材料を同時に蒸着することが可能で、蒸着のための毒性気体も必要としない。FIB と比較すると、マイクロマシンニングと蒸着の両操作をずっと速やかに行うことが期待される。FIB には蒸着用の毒性気体が必要で、また近傍では相互に静電的に干渉し合う。そしてレーザーやイオンビームは固有の焦点のぼけがあることにも注意すべきである。レビテーション粒子ビームが熱運動や加速の変動により実際にある程度のビーム拡散が予想されるが、このメカニズムは固有のものではない。即ち、理想的な状態ではレビテーション粒子ビームは全く広がらない。

レビテーション粒子ビームは産業、特にマイクロチップ産業に大きな衝撃を与える可能性がある。マイクロエレクトロニクスチップのサイズはレーザーの分解能の範囲以下に収縮し、より精密な新しい構造のマイクロチップの開発がなされるために、新しいツールが必要である。レビテーション粒子ビームはこのようなツールに可能性をもたらす。他の応用例としては、複数の材料から成る 3D MEMS の加工/組立や、(例えば、インクジェット、またはマイクロバイアス用) ミクロな穴のドリル開け、トリミングの操作のような一般的ではあるが重要な応用がある。

参考文献

- [1] Boerdijk, A., "Technical Aspects of Levitation," *Philips Res. Rep.* 11, 1956, pp. 45-56.
- [2] Geim, A., "Everyone's Magnetism," *Physics Today*, September, 1998, pp. 36-39.

- [3] Pelrine, R., "Room Temperature Open-Loop Levitation of Microdevices Using Diamagnetic Materials," *Proceedings Micro Electro Mechanical Systems*, 11-14 February 1990, pp. 34-37.
- [4] Herschbein, S., et. al., "The Challenges of FIB Chip Repair and Debug Assistance in the 0.25 μ m Copper Interconnect Millenium," *Proceedings from the 24th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, 15-19 November 1998, Dallas, TX, USA, pp. 127-130.
- [5] Lee, R., Cecere, M., "The Usage of Focused Ion Beam Induced Deposition of Gold Film in IC Device Modification and Repair," *Proceedings from the 23rd International Symposium for Testing and Failure Analysis*, 27-31 October 1997, Santa Clara, CA, USA, pp. 121-123.
- [6] Gitin, M., "UV Lasers: State of the Art is All Solid State," *Photonics Spectra*, September, 1998, pp. 136-139.
- [7] Shaver, D., et. al., "Laser Induced Metal Deposition and Laser Cutting Techniques for Fixing IC Design Errors," *SPIE vol. 1596 Metallization: Performance and Reliability Issues for VLSI and ULSI* (1991), pp. 46-50.
- [8] Leppavuori, S., et al., "Utilisation of Cu(hfac)tmvs Precursor Gas in LCVD Integrated Circuit Repair System," *Applied Surface Science* 138-139 (1999), pp. 123-129.
- [9] Lerner, E., "Lasers Carve Precision Microscale Features," *Laser Focus World*, September 1999, pp. 87-91.
- [10] see, for example, the Hitachi Focused Ion Beam System FB-4080A at <http://www.hitachi.co.jp/Div/keisokuki/english/seihin/ele/beame.html>
- [11] Remes, J., "Enhancing IC Repairs by Combining Laser Direct Writing of Cu and FIB Techniques," *Microelectronics Reliability* 39 (1999), pp. 997-1001.
- [12] Ximen, H., Talbot, C., "Halogen Based Selective FIB Milling for IC Probe-Point Creation and Repair," *Proceedings of the 20th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, 13-18 November 1994, pp. 141-150.

2. 7 セラミックスの超微細・高精度加工技術

2.7.1 はじめに

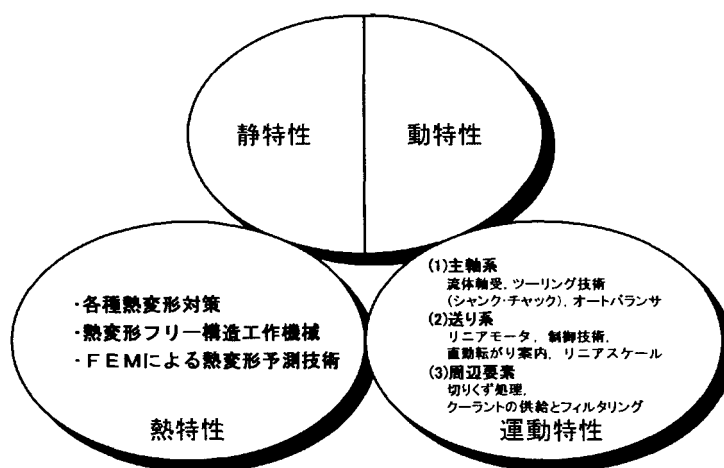
情報・通信、環境・エネルギー、航空・宇宙、バイオなど先端的な分野の基盤材料として重要な役割を担うセラミックスの日本の国際競争力は高く、産業規模は2兆円弱まで急速拡大しており、その波及効果は50兆円ともいわれている¹⁾。

セラミックスは我が国産業の活性化に大きく貢献する新材料であるが、昨今の半導体、情報機器をはじめとする高精度・微細化要求やウェーハの大口径化に対応し、機械加工技術を維持するためには、既存の加工技術を高精度化するだけでは乗り越えられない技術課題が存在する。セラミックスの国際競争力を継続して維持するためには、革新的な加工技術に重点をおいた研究・開発と実用化を強く押し進める必要がある。

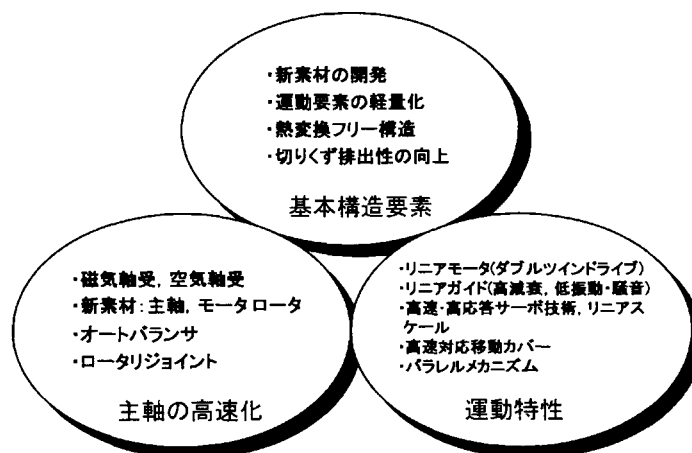
半導体集積回路（LSI）に代表される微細加工技術の高度化のための研究・開発が繰り返されているが、加工対象が平面基板であることから限定された領域にしか加工技術が適用・展開できないという根本的な課題が存在する。中小企業も含めた製造業のものづくり基盤技術を支える機械加工技術の高度化を押し進めるためには、複雑形状を対象にした3D広域部品を加工対象とすることが特に重要で、革新的機械加工による超微細・高精度加工技術の開発と製造技術の開発を横断的に進める必要がある。その成果は、セラミックスへの適用のみに留まらず先端ものづくり基盤技術としてわが国製造業の活性化と持続的発展の基盤技術となる。

上記、技術開発の重要性を指摘する報告書に国家産業技術戦略検討会報告書機械分野素形材産業技術戦略の重要素形材技術に革新的加工技術として「セラミックスの超塑性加工」が取り上げられている。

また、図2.7-1に示すように工作機械産業技術戦略では高精度化、高速化、高機能化技



<工作機械高精度化のための技術課題>



<工作機械高速化のための技術課題>

図2.7-1 工作機械産業技術戦略²⁾

術開発として主軸・送り機構の高速化に対応した位置決め装置（軸受含む）の重要性が示されている。さらに、科学技術会議政策委員会報告では製造技術の中で微細加工（精密部品加工技術、超精密計測技術、精密研磨技術、マイクロマシーン）と機械加工（超精密金型転写技術、射出成型技術）の重要性が記述されている³⁾。

このようにセラミックスの超微細・高精度加工技術は、わが国の基盤技術の深耕として不可欠な技術であり、また欧米技術との差別化を強化し、競争力を向上するための重要技術といえる。

2.7.2 現状技術の課題

「ファインセラミックスは金属に比べて耐熱性、耐食性、硬質性等に優れ、電磁気的特性、光学的特性、生物・化学的特性など、他材料にない機能を有す。反面、金属のような延性材料と異なり、脆性材料であることが最大の弱点になっている」⁴⁾（表 2.7-1）⁵⁾とあるように優れた特性を持つセラミックスの飛躍的な適用・普及拡大を抑制する因子に脆性材の加工の難しさが大きく関わっていることを指摘している。

表 2.7-1 セラミックス（窒化けい素）と金属（軸受鋼）との特性比較⁵⁾

項 目	単位	セラミックス (Si ₃ N ₄)	軸受鋼 (SUJ2)
耐 熱 性	℃	800	180
密 度	g/cm ³	3.2	7.8
線 膨 張 係 数	1/℃	3.2×10 ⁻⁶	12.5×10 ⁻⁶
ビッカース硬さ	HV	1400～1700	700～800
縦 弾 性 係 数	GPa	310	210
ポアソン比		0.29	0.3
耐 食 性		良	不良
磁 性		非磁性体	強磁性体
導 電 性		絶縁体	導電体
素材の結合状態		共有結合	金属結合

難切削材であるセラミックスの切削・研削加工は脆性破壊となることから、欠陥、微細き裂クラックが生じ易く強度、耐摩耗性、耐食性の低下をまねく。精密部品を製造するためには寸法・形状を高精度に維持する必要があるため加工方法の工夫や加工速度の制限を加えることが多い。また、現状加工法では部品形状に依存した加工精度に限界があり、製造コストは加工時間と研削砥粒費が増える分高価となる。具体的事例は、以下に示すとおりで、セラミック加工の高効率化、高精度化、低コスト化が重要な課題となっているのが現状である。

〔具体的事例〕

- ・焼結したままのセラミックスでは、寸法・形状精度を得られないため、荒加工と仕上げ加工が必要である。高精度に仕上げるには、研削条痕の除去等が必要で、ダイヤモンド砥石を使用した超仕上げ加工をほどこす。

- ・焼結後は非常に硬く（窒化けい素の場合、ビッカース硬さHv1500程度）、脆いため金属材料のような延性加工ができない。
- ・微小部分では塑性変形加工となるため、切込み量を大きくするとクラックが発生し破損するので、むやみに切込み量を大きくできない。

2.7.3 技術開発課題

昨今の機械システム・装置の高度・高性能化要求を満たすためには、機械駆動機構の中で重要な役割を果たす位置決め装置のさらなる高精度・高機能化が必須となる。また、セラミックスは半導体、計測装置をはじめ高精度位置決め機構を構成する上で軽量化と高剛性化に優れた材料であることからふんだんに用いられており、工作機械の主軸・送り機構の高速・高精度化を実現するためにも不可欠な材料となっている。

図 2.7-2 は精密・超精密位置決め装置の現状と将来予想を示したものであり、加工精度を1桁小さくするのに20数年を要していることがわかる。

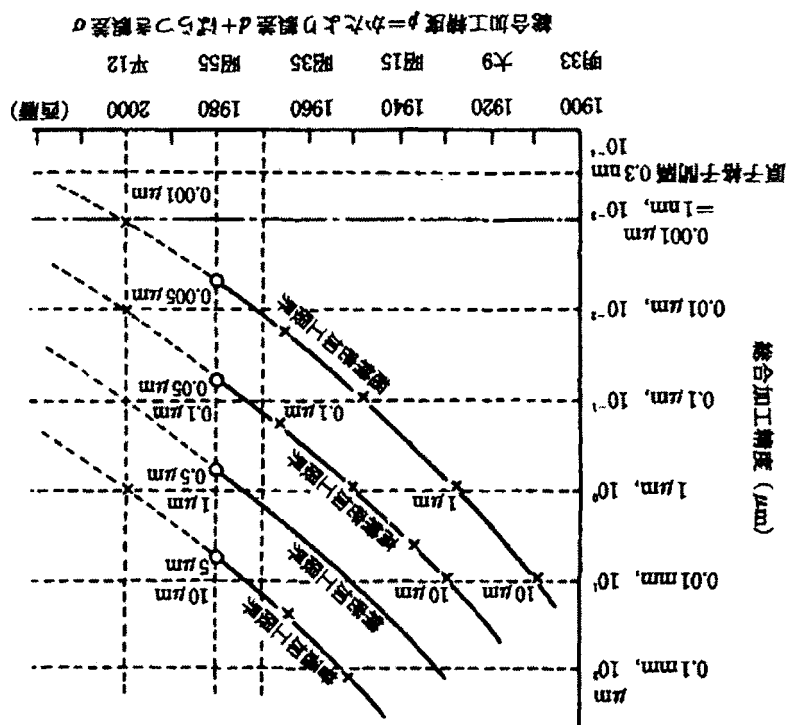


図 2.7-2 20 世紀の機械加工精度推移⁶⁾

高度情報化社会に代表される高精度・高速位置決め要求へ対応するためには、位置決め機構に使用される要素部品の機械加工精度を飛躍的に向上させる革新的加工技術の開発が最も重要であり、要素部品の構成材料であるセラミックスの超微細・高精度加工を実現しなければならぬ。

そのための具体的加工方法として延性加工を可能にするケモメカニカル加工があり、以下に本加工法の特徴を記述する。

ケモメカニカル加工とは、図 2.7-3 に示すように化学反応と高精度加工技術の相乗効果により、セラミック脆性材料表面に生じる塑性変形領域を量子力学的な効果で拡大し、クラックの発生領域を最小にする革新的な加工方法である。

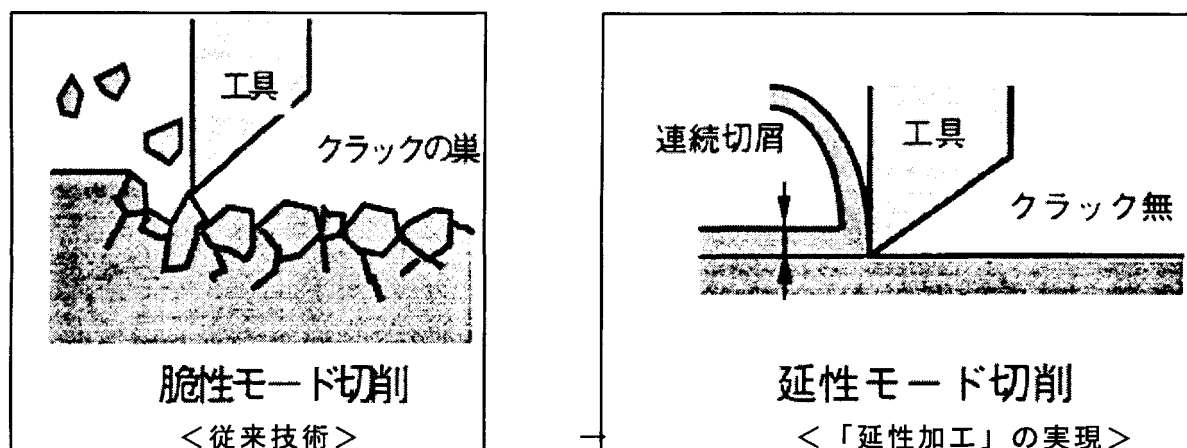


図 2.7-3 ケモメカニカル効果を活用した脆性材料の切削加工⁷⁾

セラミックスへ本加工法を適用することで、以下に示すように高効率加工と高精度加工を実現することが可能となる。

〔高効率加工〕

- ・セラミックスが破壊することなく一度に μm オーダーで加工が可能である。
- ・セラミックスの切削・研削加工が延性加工となり、切削表面に微小クラックが発生しない（連続切屑）。

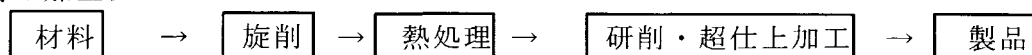
〔高精度加工〕

- ・延性加工により、微小クラックが発生しないため任意の超微細加工と複雑形状加工が可能となる。
- ・短時間で nm オーダーの加工制御ができることから高精度加工が可能である

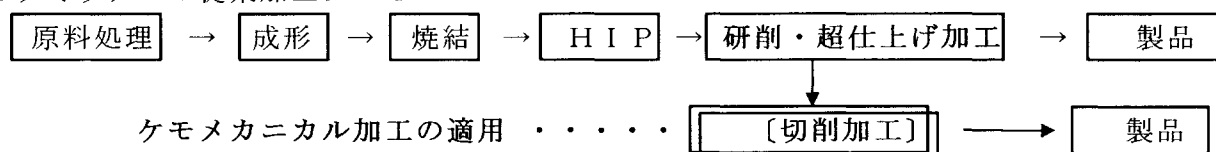
製造プロセスとしては、一般の鋼材の場合、材料、旋削、熱処理、研削・超仕上げのプロセスとなる。一方セラミックスの場合は、原料処理、成形、焼結、HIP、研削・超仕上げ加工のプロセスとなり、ケモメカニカル加工を適用すると研削・超仕上げ加工がケモメカニカル加工で代用でき、上記に示したような高効率・高精度加工が可能となる。

〔精密部品の製造プロセス〕

鋼材の加工プロセス



セラミックスの従来加工プロセス



次に適用対象製品としては、以下に示すようなものが考えられ、特に超精密位置決め装置（図 2.7-4）やそこに使用される各種転がり軸受（図 2.7-5）やリニア要素（図 2.7-6）が、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下のデザインルールを狙った半導体関連設備で必要不可欠となることは言うまでもない^{8) 9) 10)}。

〔適用対象製品〕

- ・ 超精密位置決め装置：回転機構（各種転がり軸受）、直動機構（リニア、ボールねじ）等
- ・ マイクロアクチュエータ：マイクロモータ、ナノタービン発電機、マイクロセンサー
- ・ 既存材料による精密部品・機械・装置に対してセラミックスの適用・普及を拡大

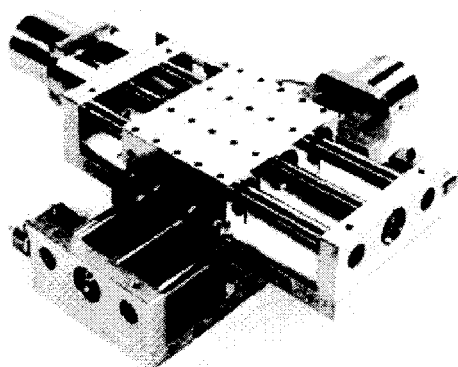


図 2.7-4 超精密位置決め装置^{11) 12)}

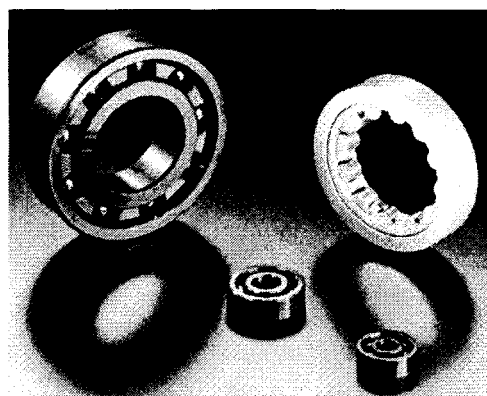


図 2.7-5 転がり軸受^{11) 12)}

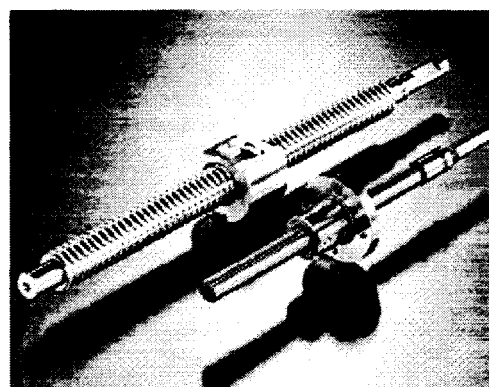
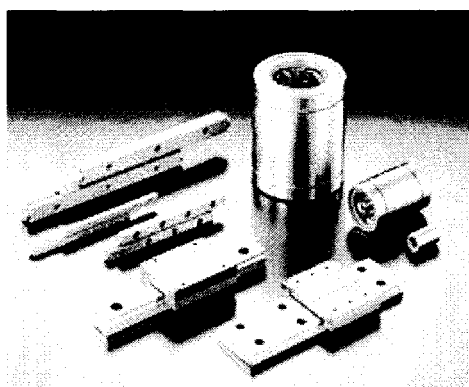


図 2.7-6 リニア要素（リニア玉軸受、リニアウェイ、ボールねじ）^{11) 12)}

最後にセラミックスの特性を把握した革新的機械加工技術を構築するためには、基礎研究～開発研究～ナノ加工装置開発までの一貫した開発推進が重要となる。基礎研究と開発研究の課題は、以下の通りである。さらにナノ加工装置開発としては、高速・高精度の加工機開発が必要で、同時に複雑三次元形状の非接触高精度計測技術開発も必要となる。最終的には、製造プロセス全体の高度化を進めることが重要であり、小型・省エネを可能にする製造プロセスの開発や安価で高効率な製造技術と量産化技術の開発も必要になる。

〔基礎研究課題〕

- ・延性加工の最適加工諸条件を明確にする。
- ・延性加工の再現性、加工効率の要因・条件を把握する。
- ・加工後の材料強度、耐荷重性、耐摩耗性、耐食性等の材料諸特性を把握する。
- ・新たな技術体系（加工現象の科学的解明）を整備する。
- ・加工技術・設計・製造データベースを構築する。

〔開発課題〕

- ・セラミックスの超塑性加工技術を開発する。
- ・加工後に生じる材料変形や表面粗さを制御し、加工による材料表面のダメージ改善と高品質表面（鏡面、高機能摺動表）を創製する。
- ・広域寸法部品への適用技術を開発する。
- ・曲率等を持つ3D複雑形状部品への適用技術を開発する。
- ・超微細・高精度部品の性能評価試験（寿命試験等）を実施する。

〔超微細・高精度ナノ加工装置開発〕

- ・高速・高精度加工機の開発と複雑三次元形状の非接触高精度計測技術を開発する。
- ・安価な高効率・高精密加工装置を開発する。

〔製造プロセスの高度化〕

- ・高効率で安価な製造技術と量産化技術を開発する。
- ・小型・省エネを可能にする製造プロセスを開発する。

2.7.4 まとめ

機械加工の革新的技術開発を行うことは、製造業のものづくり技術基盤を高度化することであり、世界に先駆けた新しい技術を確立する上で極めて重要な開発課題である。新材料として優れた特性を有するセラミックスを飛躍的に適用・普及させ国際競争力を継続維持するためにも高精度で安価に加工するための延性加工を実用化し普及させなければならない。そのためには、産・官・学が連携して基礎研究～装置開発までの一貫した開発を強力に推進することが重要である。

参考文献

- 1) FINE CERAMICS REPORT Vol.18 No.12 (2000)
- 2) 国家産業技術戦略 国家産業技術戦略検討会 H12年4月10日
- 3) 科学技術基本計画に関する論点整理 科学技術会議政策委員会 H12年3月24日
- 4) 『我が国機械産業に資するファインセラミックス産業技術競争力及び技術シーズマップ
作成調査研究報告書』日本機械工業連合会 (1999)
- 5) 光洋精工(株) Koyo. E. J. 145 特殊環境用 EXSEVベアリング及び関連機器
特集号 (1994)
- 6) N. Taniguchi : Nanotechnology, Oxford University Press (1996)
- 7) 『3Dナノテクノロジー分科会報告書(Ⅱ)』日本機械工業連合会 (1999)
- 8) 半導体産業計画総覧 2000年度版 産業タイムズ社 (2000)
- 9) 『半導体・デバイス分野における技術戦略』日本機械学会誌 Vol.104 No.986 (2001)
- 10) 図解精密位置決め機構設計 工業調査会 (1996)
- 11) 光洋精工(株) Koyo. E. J. 139 特殊環境用軸受及び関連機器 特集号 (1991)
- 12) 光洋精工(株) セラミック軸受・EXSEV軸受 総合カタログ (1998)

2. 8 ナノ構造の創製とマイクロメカニズムへの適用技術

2.8.1 バイオテクノロジーからナノ構造創製へ

ー トップダウンアプローチとボトムアップアプローチ ー

バイオテクノロジー分野では、DNAの発見以来、分子生物学が急速に進歩し、世界的プロジェクトのヒトゲノムプロジェクトに先駆けて米国のバイオベンチャー：セレーラ・ジェノミクス社は本年2月に約30億個といわれるヒトゲノムを構成するDNAの配列をほぼ全て解読したと発表した。このように、この分野の技術は予測を遙かに越えるスピードで進んでおり、さらにあらゆる物質の本質となる原理と物質創製技術の探求のために、複数のサイエンス領域（生物、化学、量子力学、…）を巻き込んで融合しつつある。従って本分野で得られたナノ領域での融合技術は、バイオ以外の分野でも計り知れない貢献ができるものと期待されている。

また、情報技術（IT）を支えるコンピュータ分野においても、技術進歩は目覚ましいものがあるが、これまでのデバイス性能（計算・動作速度、記憶容量密度、省エネルギー）向上のペースをこれからも維持し続けるためには、現在のサブミクロンレベルの加工技術をさらに精密にしたナノ領域での加工技術を確立しなければならない。このようなサイズダウンによる技術開発はトップダウンアプローチと云われている。

また、原子レベルに目を向けると、原子間力顕微鏡（AFM）、走査型トンネル顕微鏡（STM）が開発され、いまや原子単体での観察と自由なハンドリングが可能になりつつある。しかし、目標とする分子レベルのナノの領域で、ナノ構造・機構を構築する術は未だに確立されていない。また、この領域での技術が工業的に意味を持つためには、少なくともその効果の及ぶ範囲がcmオーダーかmオーダーになる必要があり、さらに安価なコストで実現できることが要求される。これが本3Dナノテクノロジープロジェクトの主な目的の一つでもある。

一方生物界では、生物体内で必要な分子：タンパク質を大量にかつ効率よく加工・製造することが遙か太古の地球で実現しており、数十年前に人類が初めてこの生物タンパク質の製造メカニズムに気いた。そして現在、科学者たちは生物という自己組立、自己複製・増殖のできる、巧妙かつ精巧無比なメカニカルシステムを真似て、分子レベルで物質の製造を自由にコントロールできる人工的なナノシステムを創り上げようとしている。これは原子を自由に操り、作りたい分子を大量に効率よく複製・製造するシステムを構築しようとするものである。このように原子・分子レベルの操作技術を確立して自由なナノ構造を創製しようとする試みはボトムアップアプローチと呼ばれている。

ナノテクノロジーの重要性とその発展性は益々強く認知され、今や米国、日本、ヨーロッパの最高レベルの科学者たちだけの学究的なテーマとしてだけでなく、産業的にも非常に注目を集めており、特に米国ではIT、バイオに続いて国を挙げての戦略プロジェクト（NNI：National Nanotechnology Initiative）に取り上げられるようになった。（米国の2001年度の研究予算は2000年度の倍となり500億円レベルとなっている。）

2.8.2 ナノ構造創製への挑戦

(1) 米国での取り組み

ナノテクノロジー分野における米国での現在の情熱的とも言える取り組みを語る前に、米国がそして世界がナノテクノロジー分野に進んできた歴史を少し振り返ってみる。米国では今から約40年前(1959)に量子理論でノーベル賞を受賞したリチャード・ファインマン博士が「There's Plenty of Room at the Bottom」という題の講演を行った。[1] その中で博士は「もし原子の振る舞いを表している(規定している)言葉(原理)を翻訳(理解)できれば、分子を精密に設計・製造すること、即ち原子を一つ一つあるべき場所へ配置することにより、この世で最も小さな人工の加工品を創り上げることが出来るだろう。」と仮定した。また博士はさらに想像を膨らませて、その技術により「分子ドクター」をつくり、それが人間の体内に入って細胞の健康度を調べて修理して完全な健康体を創り上げることができる夢を語った。

この時代を境に、人々は大きなものより小さなものにより大きな価値を見だし始めた。そして、このとき部屋一杯の大きさだったコンピューターが、それからたった40～50年間で現在の大きさ(デスクトップ～パームトップ)になってきたのである。

それ以後、ファインマン博士の夢は人工知能の父と云われるマルビン・ミンスキー博士に引き継がれて、彼はその伝道師として活動していた。そこへ当時学生のエリック・ドレックスラー博士(現在ナノテクノロジー・パイオニアと呼ばれている)がやって来てファインマン博士の夢を聞かされ、深く感銘を受け、その可能性の探求をテーマとすることにした。それから彼は研究を続け、その夢を実現するためのナノ領域での技術を「ナノテクノロジー」と名付けた。そして、1986年には「The Coming Era of Nanotechnology」、1992年には「Nanosystems」を出版し、一般の人々にナノテクノロジーの意義を説明すると共に、具体的なナノ世界のイメージとして分子で造る機械類：ギヤ、ロータ、モータなどを表した。[2][3][4]

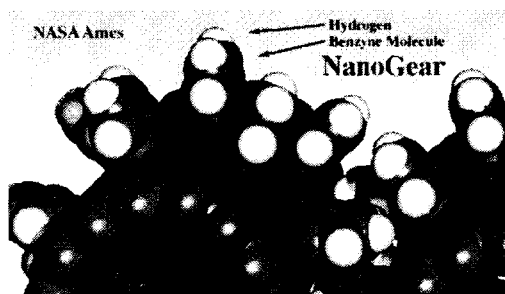


図2.8-1 ナノギヤ [5]

ドレックスラー博士らのナノテクノロジーには、(まだこの世にはなく、概念として)2つの重要なデバイスがある。一つはナノコンピュータでもう一つはナノアセンブラである。ナノコンピュータはプログラムに従って命令を実行して行き、計算結果を出すもので、イメージとしては現在のマイクロプロセッサとは異なるが、中世に造

られた機械式コンピュータに似ており、ロッドとレジスタが加算機を構成し、その性能はこれまで造られたマイクロプロセッサに比べて、大きさは百万分の一で、動作速度は10億倍くらいとなると予測している。

ナノアッセムブラはその中心にナノコンピュータをコアとして持ち、プログラムに従って必要な原子を必要な場所へ正確に配置していき、所定の分子を製造することができる。もし、このナノアッセムブラが実現すれば、あらゆるものを合成することができるようになる。生物で言えば、このナノアッセムブラに相当するものは細胞内のリボゾームであり、リボゾームはDNAの情報をコピーしたRNA上の情報から必要なアミノ酸を集めてタンパク質を製造している。

また、ドレックスラー博士はナノアッセムブラとして多くの機能原子を集めて造った一分子のロボットアッセムブラアームを考案している。このアームは、原子を掴むハンドを原子間に異動し、幾つかの原子を所定の場所に移動させて新たな分子機械を製造する。またさらに、この分子機械が新たな分子機械を・・・というように増殖させて行くことも可能で、必要な分子を自動的に大量に製造することが出来るため、今まで自然界に存在しないか、存在したとしてもあまりにも高価で手が届かない貴重で有用なもの例えばダイヤモンド、カーボンナノチューブ、フラーレンなども安価に大量に造ることが出来るようになるとしている。

ただし、この技術の実現は、あらゆる有用な可能性を示唆するものであるが、一方では大きな危険性もはらんでおり、取り扱いを間違えると地球生物に取って有害なものが無尽蔵に造られ、取り返しのつかないこと（人類滅亡）になる可能性もある。これは、最近のバイオテクノロジーの危険性（有害な微生物の大量発生などへの危惧）とよく似ている。従って、このような物質の根元を利用する技術開発では、いかに自己破滅の道を選ばないようにするか、最新の注意を払う必要がある。

（2）日本での取り組み

上記に述べたように、米国では最近、産・官・学をあげてナノテクノロジーとその応用分野の研究が盛んに行われるようになってきている。また米国ではこの研究を加速するべく、膨大な国家予算だけではなく、その年にナノテクノロジーに最も貢献した科学者（個人・チーム）に対して特別な賞：ファインマン賞を設けている。この賞は、実験部門と理論部門とにそれぞれ贈られる物で、日本からは2000年度実験部門のファイナリストとして青野大阪大学教授（理化学研究所 主任研究員）が選ばれた。[6]

青野教授の研究テーマは、「原子制御プロセス領域」に関するもので、その究極の目的を「原子を一個ずつあたかも指先で摘むように任意に操作して、材料の究極的に微細な構造制御を行う。」ことに置いており、そこから期待される波及効果としては、我々の世界を支配している基本力学のより深い理解を可能にするなど、計り知れないものがあると理化学研究所HPの紹介にあるが、これは米国のドレックスラー博士率いる研究チームの目的と当然一致している。[7]

また、理化学研究所 表面界面工学研究室の青野正和教授のチームは、科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業の研究テーマ「人工ナノ構造の機能探索」の一環として、導電性の分子の鎖を“ナノワイヤー”として用いて、任意の点と点を自由に配

線できる技術を世界で初めて開発したことが報道された。これは現在の半導体デバイスに変わる究極の微少化技術の一つとして期待されており、本分野の世界に通じるナノテクノロジー技術の研究が、日本においても実を結びつつあることを示している。

次に、日本国内で、米国のNNI戦略プロジェクトに相当（規模は相当に異なるが）する産官学でとりくむプロジェクトの一つとしてアトムテクノロジープロジェクト（原子分子極限操作技術：プロジェクトリーダー 田中一宜 オングストロームテクノロジー研究機構常務理事）があるがこれは、工業技術院の産業科学技術研究開発制度の下、10年間の総予算250億円の予定で1992年度にスタートし、第1期（6年）が終了し、1998年度から第2期（4年）に入った。

このプロジェクトは、やはり原子や分子を、個別的にあるいは集団的に自在に操作し、新しい物質や素子を生みだすための、基本技術、基本概念を確立することを目指したプロジェクトで、第1期は基礎研究プログラムとして、半導体ナノ構造の作製、表面初期酸化過程の実験・理論両面からの解明、DNAの高次構造の直接観察、マンガン酸化物単結晶における超巨大磁気抵抗効果の発見などの成果をあげてきた。第2期は、これらの成果、およびこの間の産業界を取り巻く環境の変化等を考慮にいれ、重点研究分野を、① 原子分子識別操作技術、② 表面界面ナノ構造形成制御技術、③ スピンエレクトロニクス技術、④ 原子分子動的プロセス理論解析技術の4分野に絞って、プロジェクト運営を展開して行くこととしている。

このアトムテクノロジープロジェクトは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託を受けた技術研究組合オングストロームテクノロジー研究機構（ATP）と産業技術融合領域研究所（NAIR）を母体として、アトムテクノロジー研究体（JRCAT）という産官学の集中共同研究体制によって実施されており、JRCATがNAIR内に設置され、産官学の研究者100名が常駐している。

また、「JRCATは、産官学研究者のイコールパートナーシップの象徴であり、また、研究者の任期性やプロジェクトリーダーの権限強化など、新しい時代に備えた柔軟で活力のある実験的な組織でもある。内外の研究機関や民間会社との共同研究も積極的に推進し、将来の産業応用を視野におさめつつ、新しい概念に基づく国際レベルの基礎技術開発を目指して行きたいと考えている。」とのHPでの紹介もある。[8]

このように日本においてもナノテクノロジーへの取り組みは活発のように思えるが、特に米国と比較すると幾つかの取り組み上の問題の指摘がある。一つは、日本の縦割り組織の問題で、今まで述べてきたようにこのナノテクノロジー分野の開発は異分野の融合技術が必ず必要となるが、日本では上記のアトムテクノロジープロジェクト以外に融合技術を持って開発に取り組んでいる組織は数少ないのが現状である。[9]

2.8.3 ナノ構造からマイクロメカニズムへ

これまでは、ナノ構造の創製について米国と日本の取り組みを述べてきたが、比較的近い将来この技術を利用してどのようなことが可能になるか、マイクロメカニズムへの適切的を絞って考察してみる。

まず、どの程度の大きさを考えるかでマイクロメカニズムに必要な技術も変わってくるが、ここでは数ミリから数十ミリのマイクロロボットを想定してみる。この大き

さのロボットは今後産業界におけるあらゆる分野のメンテナンスで要求が大きくなると予測されており、マイクロマシーンプロジェクトにおいても、小径管内検査ロボットの研究テーマにも取り上げられている。ただし現状の技術では明らかに限界があり、特に10mm以下の小径管では、実用的な物はまだ開発されていない。この理由は、機械部品加工技術も限界（現在ではサブミクロンがやっと）による機構部の信頼性低下、可動部メカニズム組み立て技術の限界およびエネルギー供給・通信手段の限界などがある。

翻って自然界に眼を向けると、昆虫などの小動物が非常に小型ながら自立的に行動しており、マイクロメカニズムで是非同じようなことができないか挑戦したいと思えてくる。また、昆虫は生物であり、生まれながらに細胞内のDNAの命令に従ってタンパク分子を巧みに操って、生物としてのシステムの一部としてメカニカルシステムを構築している。そこで、ナノテクノロジーによるナノ機構創製技術を用いてマイクロメカニズムを構築し少なくともメカニズムでは昆虫と同じサイズで同じような性能をもつロボットも実現できるものと期待できる。最も、ファインマン博士は昆虫より遙かに小さな、「分子ドクター」と呼ぶ超小型ロボットを夢見ており、米国ではその実現性を真剣に論じているグループがある。



図2.8-2 原子で作られたロボットアーム [10][11]

また、超小型のマイクロメカニズムへの適用技術は、大型のメカニズムにも応用できる物も多い。例えばアクチュエータ技術で、生物の持つミオシンとアクチンのような分子機械による人工的な筋肉が実現できれば、生物ではこの筋肉が大型動物（恐竜～鯨）でも全く同じものであることから、この技術の適用範囲は非常に広い物と考えられる。更に構造材料でも、日本人（NEC：リーダ 飯島澄男氏）が発見し、最近世界中で話題になっているカーボンナノチューブが安価に（現在約\$50/gと云われている。）製造できれば、ダイヤモンドを凌ぐかもしれないと云う強度と金属にも半導体にもなると言う性質を利用する事で、その恩恵を被る範囲はマイクロ機構構造から大型構造物まで数知れない。[12] また、カーボンナノチューブは現在の化学プラントで大量に安く作れるようになる可能性もあるが、マイクロメカニズムへの適用の

ためには、ナノテクノロジーによるカーボンナノチューブをナノ機構創製の基本材料として活用することも考えられている。例えば、米国のドレクスラー博士らはこのカーボンナノチューブを、分子機械としてのギヤなどの基本材料として用いることを考えている。

このように、生物の体内で日常行われている、分子の製造と複製技術をヒントに、ボトムアップによるナノ構造の創製とトップダウンによるマイクロ・ナノ超精密加工技術が融合し、マイクロメカニズムを自由に構築できれば、これから人類にとって計り知れない恩恵をもたらすものと期待できる。そのためには、産官学を越え、また国際的な協力の元に学問領域を融合した研究体制を速やかに構築し、将来技術を見据えた政策戦略を立案・実施する事が非常に重要である。

参考文献

- [1] <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [2] <http://www.foresight.org/FI/Drexler.html> : Foresight Institute HP “Drexler”
- [3] K. Eric Drexler “Nanosystems: molecular machinery, manufacturing, and computation”
(576 pp., 200+ illustrations. Wiley Interscience, 1992, hardcover or paperback)
- [4] <http://www.zyvex.com/nanotech/nanosystems.html> : Zyvex HP “Nanosystems”
- [5] <http://nanozine.com/nanogear.htm> : Nanotechnology Magazine HP “Nano Gear”
- [6] http://www.foresight.org/FI/fi_spons.html : Foresight Institute HP “Feynman Prizes”
- [7] <http://www.riken.go.jp/jhome.html> : 理化学研究所 表面界面工学研究室 HP
- [8] <http://www.jrcat.or.jp/jindex.html> : Joint Research Center for Atom Technology HP
- [9] 田中一宜：“ナノテクノロジーの世界動向と研究開発のあり方”，ナノインテリジェント材料ワークショップ－Nanotechnology 2000－，pp.4 - 7
- [1 0] <http://nanozine.com/boot.htm> : Nanotechnology Magazine HP
“This is a model for a robot arm that can build with individual atoms.”
- [1 1] <http://www.nas.nasa.gov/Groups/Nanotechnology/gallery/> : NAS HP
“NAS Nanotechnology Gallery : Images and Videos NASA Ames Developed Components”
- [1 2] 飯島澄男：“カーボンナノチューブの挑戦”，岩波科学ライブラリー，110P，1999

2. 9 光スイッチ用ナノフィルム技術

2.9.1 概要

情報技術等の分野では、光を電気信号に変換せず効率的に切り換え、直接再発信する機能がますます重要になってきている。このような光スイッチングデバイスはすべて MEMS アレイ、非線形光学材料等の新たなスキームをベースとして提案されてきたが、これらの方法のいずれも、コスト、過剰な光減衰、制御のしやすさ、スイッチング速度、信頼性、スケーラビリティ等の点で何らかの欠点がある。しかし、ナノスケールの誘電エラストマフィルムを用いたデバイスは、この欠点の多くを補う可能性を秘めている。誘電エラストマアクチュエータは、高分子フィルムの上部と底部に取り付けてあるコンプライアンスな電極に電位差が生じると静電力により、高分子内に生じる大きな歪みを利用する。この技術により、多数のスイッチの配置が可能になる。ここでは、反射、屈折、導波管などのエラストマを用いた新しいデザイン等の研究課題の検討を行った。また、ナノスケールのフィルムの厚さや表面等考慮した誘電エラストマ駆動技術に関する課題にも焦点を当てた。このようなフィルムは、光スイッチに要求される低い駆動電圧と高速応答が必要となる。この問題に対処するために、誘電エラストマデバイスの大型アレイ化を実現する最新技術を用いる必要がある。

2.9.2 開発する技術

ナノスケールの厚さを有する高分子フィルムの電気機械的性質と機械光学的性質を基に、新しい光スイッチ技術について検討した。

現在、ある数種類の誘電エラストマフィルムにおいて 1 kHz 以上の周波数において大きな歪み変形を生じ、光学的性質を変調させることが明らかにされた[Kornbluh et. al. 2000]。また、光学的に透明な物質では 200%を超える歪みが観察された[Peirine 2000]。図 2.9-1 は、どの程度大きな歪みを用いれば物質の光学的性質に影響を与えることができるかを示している。他にも、誘電エラストマアクチュエータに用いられるものと類似の透明エラストマ材料を用いて、ナノスケールで光学的性質が実際にパターン化されることも明らかにされた[Xia et. al. 1996]。このような機能を組み合わせることにより、広範囲にわたる電気機械的にコントロール可能な光デバイスを作成できることが示唆される。

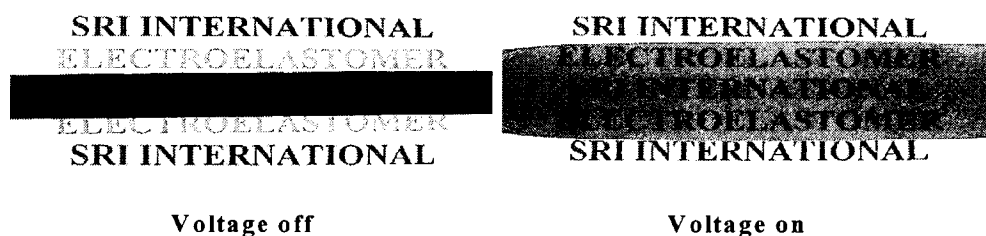


図 2.9-1 電圧を印加すると、誘電エラストマフィルムの変形による透明度の変化。アクチュエーションにより黒いバンドの幅が広がる。

スイッチ用電気光学デバイスは、おおまかに分類して、反射、屈折、導波管に分けられる。反射デバイスでは、光の方向を制御するためミラー表面が位置決めされている。屈折デバイスでは、材料の表面構造、バルク構造、または光学的性質が入射光ビームの角度の曲げに影響する。導波管型デバイスでは、構造、位置または表面接触の変化が光ビームの方向に影響を与える。誘電エラストマは透明度が非常に高く、同時に構造を急速かつ著しく変えることができるため、上記3種類の光デバイスすべてを製作することが可能である。屈折デバイスと導波管デバイスにおいては、多重光ビームのいろいろな周波数を別々に方向づけることもできる。

下記に示す既存システムにおける設計の欠点を克服する要素技術を開発する必要がある。

- ・ 製造コスト
- ・ 過剰な光減衰
- ・ 電力消費量
- ・ 制御性—入力から出力までのスイッチ機能
- ・ スイッチ速度
- ・ 信頼性
- ・ スケーラビリティ—多数の入力-出力処理機能
- ・ 電子制御システムとのインテグレーション

デバイス自体の設計に加えて、低電圧駆動に必要なナノスケールの厚さを有するデバイスの加工/組み立て技術の開発も重要である。低い電圧での駆動は、既存の電子制御システムとのインテグレーションにも適している。このような超薄膜のアクチュエーションが成功した事例はまだ示されていないが最近、このような薄膜のアクチュエーションが可能であることがSRIの自主研究で判明しつつある。あるアクチュエーション手法を用いることにより、ある種のデバイス設計に必要な完全に透明な電極も製作可能になるとと思われる。

2.9.3 技術の必要性、意義

光ファイバーを介して伝達されるデータ量は、9ヶ月毎に倍増している[Walsh 2001]。従来のエレクトロニクスを用いてこのデータを切り換えるには、光を電気信号に変換した後、再度光に変換し直さなければならない。この方法では、光のパワーの大部分が変換中に失われるため、変換速度はかなり遅くなり、パワー・インテンシブな作業となる。

スイッチが切り換えられる前に信号を電気信号へと変換しなければならない方法と比べて、光スイッチの方がより速く、より大量の情報を伝達することが可能で、しかも少ないパワーですむため、光と電気の間でビームの情報が変換されないような光スイッチが望ましい。高速光ネットワークの急増により、光ビームを変換する能力は不可欠な技術となってきた。

一般に今日の変換方式では、256個の入力を256個の出力に変換できる。しかし、1024個の入力-出力の間の変換が可能な新しいタイプの方式も出現しつつある。データ速度とライン数が増加するにつれ、スイッチ技術に対する需要はより厳しいものとなっている。多数の入力-出力間の変換を、コスト効率の良い信頼できる低電力で迅速に行うことのできる技術は、技術の裾野をさらに広げるであろう。例をあげると、光の大型アレイをうまく変

換する技術は、非常に明るいかつとても安価な新型の大面積ディスプレイに応用できると思われる。また、その他のユニークなフォトリソグラフィデバイスも応用可能である。

2.9.4 基礎となる従来技術と技術的傾向

既に述べたように、現在の方法では、光を電気信号へ、さらに光に戻すという変換が一般的に行われている。スイッチ作業は電子回路で行われ、この回路は光ファイバーの処理速度でデータ処理を行うことができないため、本手法はデータのボトルネックとなっている。さらにこのスイッチングはエネルギー・インテンシブな作業である。エネルギーがエレクトロニクス自体で消費されるだけでなく、光ビームを再生するためにも必要である。また、これらのスイッチシステムはコストがかさむ。

送信時に光信号を電気信号に変換する必要のない光学システムでは、電子スイッチの欠点の多くを克服することができる。現在、このような光スイッチやこれに関連する方法が、多くの企業や研究所で研究・開発されている。

全ての光スイッチの中で最も発達したものは、ニオブ酸リチウムなどの固体状態の材料をベースとするもので、これは屈折性を電場（通常 20～30V）によって制御できる強誘電性結晶である [Pepe]。Lucent Technologies 社などの企業は、この技術を組み入れた導波管をベースにスイッチの開発を実施している。

光学機械デバイスをベースにする方法では、固体状態スイッチの問題点のいくつかを解決できる。一般的にこのデバイスは、傾斜ミラーのアレイを用いる MEMS ベースのデバイスである [Bishop 2001]。通常これらのミラーは静電的に操作されている。このようなデバイスは数年間にわたって研究されてきた [Akimoto 1997, Marxer 1997]。ミラーは一般にシリコン上で組み立てられる。約 0.1～0.5 ms のスイッチ速度が実証されている。傾斜ミラーをベースに作られたスイッチは、これまでに知られている多数の小型ミラーを用いた MEMS ディスプレイに類似している。最もよく知られた例は、Texas Instruments 社によって製造・販売されているもので、約 100 万個の静電的に操作されるミラーで作られている。これらのミラーはビデオや TV の画像を投影するために用いられる。Texas Instruments 社のミラーはオン／オフ型デバイスである（特定の出力ファイバーに照準を定めることはできない）。この技術に基づくスイッチでは、入力と出力を相互に接続できるように、より高度な制御とフィードバックが必要である。その他、ビーム偏向が変えられる光ビームまたは他の電磁気ビームを操作できる MEMS デバイスが組み立てられた。一例として、[Burns 1997] で報告されている可変型ブレード格子がある。通常、静電アクチュエータのストロークは制限されるため、静電アクチュエータをベースにしている大部分の既存 MEMS デバイスでは、偏向が比較的小さい。他の光学機械的 MEMS デバイスでは、静電気の代わりに圧電性セラミックスを用いている。

その他多くの技術が光スイッチのために検討されつつある [Bishop 2001]。これらの方法は、物質の屈折率または導波管の経路が変化するデバイスを基本としている。例として「泡スイッチ」があり、光ビームの経路に泡を注入するためにインクジェット技術が用いられる。熱-光スイッチでは、光材料の温度変化によって有効屈折率を変化させることができる。液晶スイッチは、偏光を効率的に切り換えることができる。

2.9.5 現状技術における課題

最大 48 個までの入力と出力が可能なニオブ酸リチウムをベースとする固体状態スイッチが実証されている[Bishop 2001]が、いくつかの問題があるために、入出力数に制約がある。

導波管では長い物理的長さが必要であり、これが大型の集積を困難にしている。クロストーク、特に高密度波長分割多重送信(Dense Wavelength Division Multiplexing)などの複数の周波数が用いられる場合に問題がある。大量の電力を必要とし、過熱が起きる可能性のある物質では、過剰な光減衰が起きる。この物質は熱的不安定性の影響を受けるため、高度の熱管理が必要である。さらに、エレクトロニクスによる制御が比較的遅く、光スイッチのボトルネックとなっている。

静電 MEMS デバイスをベースとする光メカ型スイッチは、小型でエネルギー効率が良く、損失が少ない一方、いくつかの欠点があるが、これはナノフィルムを用いたデバイスによって解決することができる。

エアギャップ型静電デバイスは、空気による電気の絶縁破壊強度によって制限されているため、ナノフィルムよりも力/質量が本質的に低い。この弱い力が、応答速度をかなり制限している。例えば、現在の応答時間は、光ビームを切り換えるのに十分な大きさの動きに対して、通常約 0.2 ms のオーダーである。測定データを基にした 100 μ m 幅のナノフィルムアクチュエータでの反応時間は 0.01 ms と計算されている。ナノフィルムデバイスでは、(フィルムの厚さに等しい)有効ギャップがマイクロサイズのエアギャップデバイスの値よりも小さいため、強い力を生成できるだけでなく、低い電圧で駆動することができる。

既存の MEMS デバイスも、その代替デバイスと比べるとかなり大型である。一般にアクチュエータのストロークは、デバイスのサイズのわずか 5~20% である。この小さな歪みは単一のスイッチでは問題ではないが、多数のアクチュエータを小さな面積に詰め込まなければならないようなスイッチアレイ等のデバイスでは大きな問題となる。これとは対照的に、厚い人工筋肉ではすでに 200% を超える歪みを示すため、ナノフィルムを用いると、デバイスをかなり小型化できる可能性がある。

MEMS デバイスのもう一つの問題は、比較的成本のかかるマイクロ加工が必要なことである。エアギャップ型静電デバイスは、サブミクロンギャップを用いて作動させるが、これは通常電気のショートを避けるため慎重にパターン化しなければならない。広い範囲にわたって高い精度を維持することが不可能なため、現時点では MEMS 技術を用いた大面積デバイスは困難である。これに対して、ナノフィルムはそれ自体がギャップを設定するため、ギャップの形成には平らな表面上でのフィルム蒸着というシングル・ステップが必要なだけである。厚いフィルムを用いて、点欠陥に対するフィルム精度を上げる研究から、いくつかの新しい技術も得られているため、ナノフィルムを用いた大面積デバイスの製作も可能であると確信している。

圧電デバイスでは、精巧なゾル-ゲル組立工程が必要で、大面積を作るにはコストがかかるであろう。圧電性セラミックスは、高い歪みを繰返し加えると亀裂が入る傾向にあるため、このデバイスの長期間の信頼性は問題になる。

泡スイッチ、熱-光スイッチ、液晶スイッチなどの新しい技術の多くは、用いたデバイスにそれぞれ魅力的な特徴があるが、その実証は完全ではない。このデバイスの多くで、光

信号の減衰が予想以上に起きている。さらに、このデバイスの多くは N^2 乗デバイスである。即ち、これは単純なバイナリスイッチであるため、出力数と入力数を掛けた値と同じ数が必要になる。泡スイッチや熱-光スイッチといったデバイスの中には、操作に大量のエネルギーを必要とするものがあり、より大量の入力-出力を行うことが可能な規模のシステムを製作することがむずかしいかもしれない。

2.9.6 産業への波及効果

光と電気の間でビーム内の情報変換が行われない光スイッチは、インターネットや他の通信ネットワークにおけるデータ転送におけるボトルネックを軽減することができる。これらのスイッチはネットワークの転送速度を上げ、コストを下げるだけでなく、現在まだ送ることができない新しい種類のデータを転送できるようになるかもしれない。これらのデータには、オンデマンドのリアルタイムビデオ、分散型コンピューティング、テレプレゼンスなどが含まれる。また、光の大型アレイをうまく切り換える技術は、非常に明るく、かつ安価な大面積ディスプレイに使用できる。その他、各種のユニークなフォトニックデバイスも可能である。これらのデバイスは、工場のオートメーションや計器の加工/組立だけではなく、消費者用電子機器に重大な影響を及ぼすであろう。

2.9.7 まとめ

ナノフィルムは、全ての光スイッチにおける既存方法の限界を克服する可能性を有し、これによって光通信ネットワークの著しい進歩を可能にし、またナノフィルムをベースとする広範囲にわたる光学機械デバイスも作製されると思われる。ナノフィルムはまだ実証されていないが、これを加工・組み立て、駆動させるために必要ないくつかの技術が既に実証されており、ナノフィルムをベースとするフォトニックデバイスが現実のものとなりつつある。

参考文献

Kornbluh, R., R. Pelrine, Q. Pei, S. Oh, and J. Joseph, "Ultrahigh Strain Response of Field-Actuated Elastomeric Polymers," *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials 2000: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Y. Bar-Cohen, ed., 3987, pp. 51- 64, 2000.

Pelrine, R., "High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater than 100%," *Science*, Vol. 287, Feb. 4, 2000, pp. 836-839.

Xia, Y., E. Kim, X. Zhao, J. Rogers, M. Prentiss and G. Whitesides, "Complex Optical Surfaces Formed by Replica Molding Against Elastomeric Masters", *Science*, Vol. 273, July 19, 1996, pp. 347-349.

Walsh, S., "Microsystems, micromachines and optical networks: The Second Wave",

Micromachine Devices, Vol. 6, No. 1, January, 2001, pp. 4-6.

Pepe, J., "Photonic Switching and Multiplexing" ,
http://www.voicenet.com/~jpepe/photonic_switching.html#Introduction

Bishop, D., C. Giles, S. Das, "The Rise of Optical Switching" , *Scientific American*,
January, 2001, pp. 88-94.

Akimoto, K., et. al., "Evaluation of Comb-Drive Nickel Micromirror for Fiber Optical
Communication," *Proceedings of the Tenth Annual International Workshop on Micro
Electro Mechanical Systems*, Nagoya, Japan, Jan. 26-30, 1997, pp. 66-71.

Marxer, C., et. al., "Vertical Mirrors Fabricated by Reactive Ion Etching for Fiber
Optical Switching Applications," *Proceedings of the Tenth Annual International
Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Nagoya, Japan, Jan. 26-30, 1997, pp.
49-54.

Burns, D., Bright, V., "Micro Electro Mechanical Variable Blaze Gratings,"
*Proceedings of the Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical
Systems*, Nagoya, Japan, Jan. 26-30, 1997, pp. 55-60.

2. 10 バイオテクノロジーにおけるナノ加工技術

2.10.1 概要

バイオテクノロジーの分野では、生体での機能を人工的に取り出そうとした時に発生する多くの問題がある。例えば遺伝子組み換え技術によって、有用なタンパク質を生産しようとする時に、デザイン通りの目的のタンパク質を大量に生産できる可能性は高くない。また、生体から有用な分子を取り出して人工的に機能を利用しようとする場合も極度の能力低下を覚悟しなければならない。これらは、我々が生体分子の本来あるべき状態や構造に関する知識に乏しいことから、生体分子を完全に理解し、制御していないことが原因である。タンパク質をある一定方向に並べようとするときに、X線構造解析の情報は必要十分ではないということである。このように、バイオテクノロジーは生体分子をより詳細に調べる技術、生体分子をより適切な状態で利用するための加工技術を必要としている。

バイオテクノロジーにおけるナノテクノロジー分野、すなわちナノスケールの精度で制御可能な技術で生体分子を取り扱う研究は、近年非常に注目されており、発展を遂げてきている。高精度な原子間力顕微鏡（AFM）や、レーザートラップの技術を用いて、遺伝子、蛋白質などの生体分子の単一分子を直接操作するという分子操作技術に発展してきており、全く新規な遺伝子組み換え技術やタンパク質の相互作用解析などを可能にすることが期待されている。

このように近年の技術発展をふまえ、生体分子自身を加工するもしくは生体分子用の足場となる材料をナノスケールで加工、作製する3つの技術開発を提案する。

- (1) 生体分子の直接測定技術
- (2) 生体分子の直接加工技術
- (3) 生体分子の足場加工技術

生体分子の直接測定技術では、一分子の生体分子を取り扱い、分子の持つ剛性などの物理量を測定する。生体分子の直接加工技術では生体分子を直接物理的に伸展、切断など加工を施し、機能の改変、向上を行うことを目的とする。また、生体分子の足場加工技術では3次元的な生体分子、細胞などの精密な固定化材料を作製する。このような材料は、生体および生体分子の機能を最大限に引き出し、また生体分子を半永久的に使用するためのものである。生体分子としてはペプチド、タンパク質、核酸などを対象とする。

2.10.2 研究開発の意義

(1) 生体分子の直接測定技術

提案する技術は、原子間力顕微鏡（AFM）や分子間力顕微鏡（MFM）を用いるナノテクノロジーによって、単一の生体分子に力学的操作を行うことにより、生体分子を解析し、なおかつ加工する技術である。

従来の技術ではAFMを用い、基板と探針の間に固定された生体分子を物理的に引き伸ばすことが主な操作であるが、崩壊に関する力情報しか提示されておらず、その解釈については十分な検討が不可能であった。生体分子の引き伸ばし過程で得られるフォースカーブは生体分子の状態、構造に関する重要な情報を含んでいると考えられ、様々な条件で生体分子を引き伸ばし、フォースカーブを精密に測定、解析することによって、1分子レベルで

生体分子の情報を得ることが出来る。

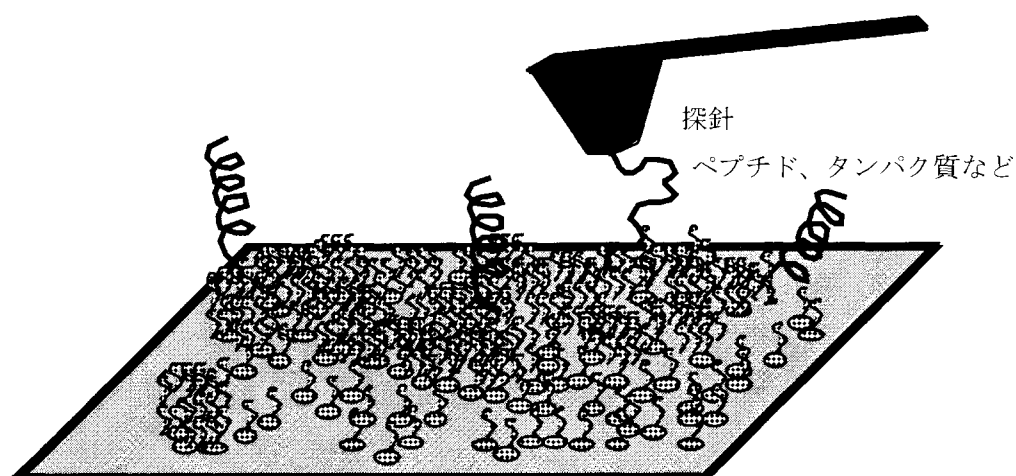


図 2.10-1 分子間力顕微鏡による生体分子の物理測定

(2) 生体分子の直接加工技術

上記技術をさらに発展させることによって、生体分子を直接加工する技術を開発する。これは生体中でしか起こり得ない生体分子の構造変化を人為的に物理的に行うことを意味する。ある種のタンパク質は、配列の一部が切断されることで成熟化（活性化）し、機能を発現する。このような構造変化は、生体中の特殊な条件下においてのみ行われ、人工的な系では成熟型を得られないことが多くある。このような生体分子の構造を人工的に加工し、機能の発現を制御する技術を開発する。このような生体分子の加工技術は、生体分子の利用において新たな可能性を提示するものである。

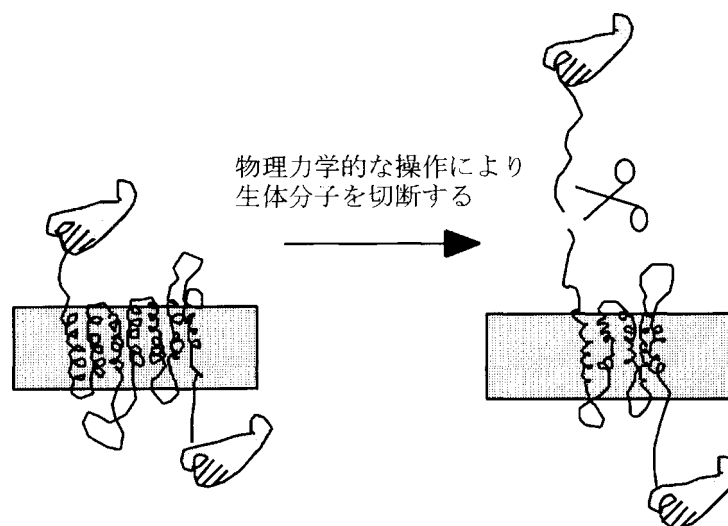


図 2.10-2 生体分子を物理的に加工する概念図

(3) 生体分子の足場加工技術

従来タンパク質などの生体分子は変性、分解等の問題点が多くあり限られた用途でしか工学的なデバイス開発に用いられることは無かった。タンパク質を安定な構造を維持できる3次元的な空間を提供する材料があれば、変性や分解などの障害から隔離され、また、その機能を常時最大限に引き出す機能性材料と組み合わせることが出来れば超高機能デバイスとして用いることが出来る。特に膜タンパク質は生体中で脂質二分子膜中に配向した状態で組み込まれている。このように機能的に注目されるが取り出して応用すること難しいが生体分子は数多く存在する。タンパク質のサイズは概ね1〜50 nmであり、タンパク質の配向・配列技術は、すなわちナノサイズの取り扱い技術、加工技術を必要とするテクノロジーである。このような生体分子の構造に適合した足場を加工する技術は、分子の能力を最大限に発揮させるための技術である。

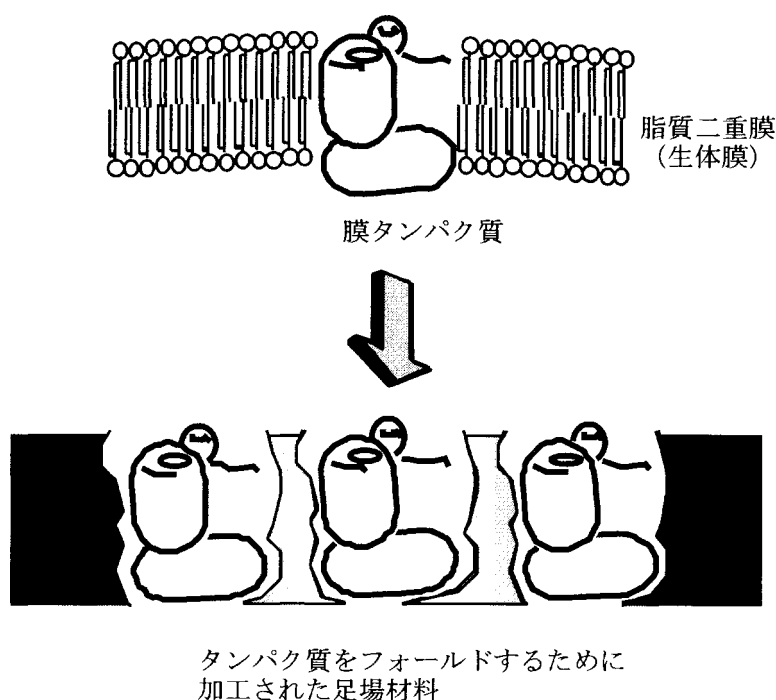


図 2.10-3 膜タンパク質を安定に保持するための足場

2.10.3 研究開発の内容

(1) 生体分子の直接測定技術

例えば、従来は旋光測定 (CD 測定) によって、ペプチド、タンパク質の α ヘリックス含量を測定している。得られる情報はバルクの分子集団の平均化された情報であり、個々の分子の状態や観察時空間における挙動変化は、全く不明である。単一の分子を正確に測定することで、このような情報を得ることが出来ると考えられる。AFM を用いてフォースカーブを観察することにより、1 分子操作を分子の動きをモニターしながら行うことが可能である。また、生体の微量のタンパク質の状態や基質を認識したときの 1 分子レベルでの状態を知る方法としての応用も期待される。また、探針を磁気で振動させることにより生体分子の剛性 (ヤング率) を直接測定し、従来、生体分子では考慮されなかった分子の堅さの

情報が得られる。このように生体分子の状態、構造に関わる物理特性を測定する技術を開発する。

(2) 生体分子の直接加工技術

1 分子の生体分子を引き伸ばすことで、位置特異的切断を行ったり、立体構造を変化させる。基板上に固定化したタンパク質、核酸などを AFM の探針を用いて部位特異的に操作する。操作する部位は特定の配列導入によって特定することが可能である。例えば、あるタンパク質の成熟化には部位特異的切断が必要であるが、試験管内の酵素的反応では不可能な場合がある。このような分子に対して、AFM の探針によって引き延ばし、この過程において部位特異的切断を行うことにより、活性型の成熟タンパク質を得る分子加工を行う。また、遺伝子工学的に発現させたタンパク質はミスフォールディングによって不活性な封入体を形成することが多くある。このような封入体を AFM の探針による加工によって活性型に加工する技術を検討する。その他には、活性中心の操作によるタンパク質の改変など、物理的な操作による生体分子の構造、機能の変化を目的とした加工技術を開発する。

(3) 生体分子の足場加工技術

細胞の固定化する場合を 3 次元的にナノスケールで加工する技術である。また、生体分子を所定の位置に正確にナノスケールで制御し固定化する技術。生体分子の固定化技術は、インプリントポリマーの加工技術などを応用することで、精密な加工と固相合成を行う技術を考案する。光合成のタンパク質が行う光／電子エネルギー変換の量子効率 は 現存の太陽電池の効率を遙かに凌駕するが、このタンパク質は生体においては脂質二分子膜中に常に同じ方向に配置されていることで高度なエネルギー変換を可能にしている。この他にも水素／プロトンなどエネルギー的に重要な反応を触媒する生体分子は多く存在するが、現在の技術ではこのようなタンパク質を生体内と同様の状態で人工的に取り扱うことは難しい。タンパク質の構造をゆがめることなく 3 次元的に固定化される環境を人工的な材料で提供することが出来れば、タンパク質の配向性を確保し、変性の問題も解決することが出来ると考えられる。足場材料の加工に関してはインプリントポリマーの技術や、ナノキャビティを有するカーボン材料を応用することで可能となると考えられる。生体分子に限らず細胞や組織などのマクロな生体を材料とした場合にも同様のことが期待できる。

2.10.4 生体分子とナノ材料に関する研究の動向

生体分子を取り扱う技術においてナノスケールの加工技術、ナノスケールの材料を使用する技術が開発されている。以下に、最近報告されている技術を概説する。

生体試料ラベル化剤として量子ドットと名付けられたバイオコンジュゲートが開発されている。光学的電気的で構造的にユニークな特性を持ったナノメートルスケールの半導体特性をもつ金属微粒子を開発し、これをプローブとしてバイオテクノロジーに応用している例がある [1, 2]。蛍光性微粒子は Quantum dot (量子ドット) と呼ばれている。

インディアナ大学の Nie らのグループはスルフィン化亜鉛にセレン化カドミウムを用いた半導体を閉じこめて作製し、この量子ドット表面にでているカルボキシル基を介して抗体を固定化し、抗原抗体反応を顕微鏡化で確認している。この量子ドットは、UV 領域に吸

収域を全く持たず、蛍光特性においてバックグラウンドを押さえる事ができ、また蛍光のピークは、典型的な蛍光色素ローダミンのものよりも鋭く得られ3分の一以下の波長幅であった。これは強度で20倍強く、光退色性は100倍であり非常に安定な物であった。

また、比色アッセイにバイオコンジュゲート金微粒子が用いられている。ナノメータースケールの金コロイド粒子を用いてナノ粒子-DNA コンジュゲートを作製し、DNA チップを開発している例がある[3-8]。金コロイドとは金のごく小さい粒子が溶液や固体の中に分散している状態で、粒子のサイズは数ナノメートルから数百ナノメートルくらいである。通常、金はいわゆる「金色」をしているが、金のコロイドは赤や赤紫の非常にきれいな色をしており、凝集すると青紫に変化する。ノースウエスタン大学の Mirks らのグループは、オリゴヌクレオチド修飾ナノ金コロイドナノ粒子プローブとスキャナーを用いて、組み合わせ DNA アレーを解析する方法を構築している[3-6]。この方法は蛍光プローブではなく、ナノ金粒子でオリゴヌクレオチド標的を標識することで、アレー基質と標的の融解特性が大きく変化し、オリゴヌクレオチド配列と標的のヌクレオチド1つのミスマッチの判別が、蛍光標識した標的を用いる場合より3倍以上高い選択性で行うことに成功している。

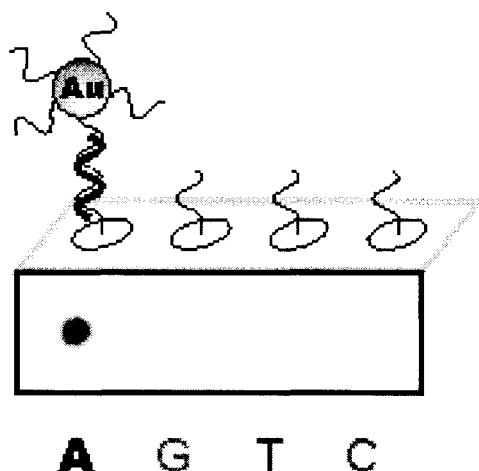


図 2.10-4 膜タンパク質を安定に保持するための足場

(<http://www.chem.nwu.edu/~mkngrp/dnasubgr.html>より引用)

光応答性薬物伝達システムとして金ナノシェルポリマー複合材料が用いられている。大きさが直径50～1,000ナノメートルの微小な粒子、金属ナノシェルが、可視光および赤外線を吸収したり、分散させたりして、変化をさせるということは1950年代から研究されてきた。しかし、精密なコントロールができるようになったのは、ごく最近で、Rice大学のNaomi J. Halas教授らの研究チームが、ナノシェルの大きさ、機能を正確にする方法を発見した[9-12]。この粒子は、中心に絶縁性の核があり、その周りに導電性金属がシェルとなる構造を持つ。彼らは絶縁性の核としてアクリルアミドゲルを用い牛血清アルブミンを閉じこめた。そして赤外線をあて、熱による分解で牛血清アルブミンを溶出させることに成功している。このアクリルアミドゲルは体温より少し高い温度で溶解することから、これを薬物伝達システムに用いることができるかもしれないと述べている。

コーネル大学のナノバイオテクノロジーセンターはこの分野を先導している研究所の一

つである。Craighead らのグループは、このナノバイオチップでの分離方法にゲル電気泳動のようなやり方ではなく、分子の大きさによってふるい分けることが出来るように、深い部分と浅い部分の流路を作って分離を行っている。彼らはこれをエントロピー的手法を用いた方法と述べている[13]。

生体分子とナノ材料における研究で、コーネル大学の研究のように生体分子のサイズ特性を活かしたナノ材料の利用は実際には少ない。また、本提案のように生体分子の機能を引き出すためのナノ材料技術は例を見ない。

参考文献

1. Aliviatos A.P. et al., "Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels", Science (1998) 281, 2013
2. Nie, S.M. et al., "Quantum dot bioconjugates for ultrasensitive nonisotopic detection" Science (1998) 281, 2016
3. Taton, T.A. et al., "Scanometric DNA array detection with nanoparticle probes" Science, (2000) 289, 1757
4. Mirkin, C.A. et al., "A DNA-based method for rationally assembling nanoparticles into macroscopic materials", Nature (1996) 382, 607
5. Storhoff, J.J. et al., "What Controls the Optical Properties of DNA-Linked Gold Nanoparticle Assemblies?", J. Am. Chem. Soc. (2000) 122, 4640
6. Elghanian, R. et al., "Selective colorimetric detection of polynucleotides based on the distance-dependent optical properties of gold nanoparticles", Science (1997) 277, 1078
7. Möller, R. et al., "DNA probes on chip surfaces studied by scanning force microscopy using specific binding of colloidal gold" Nucleic Acids Research (2000) 28, 911
8. Reichert J. et al., "Chip-based optical detection of DNA hybridization by means of nanobead labeling", Anal Chem (2000) 72, 6025
9. Serksen S.R., et al., "Temperature-Sensitive Polymer-Nanoshell Composites for Photothermally Modulated Drug Delivery" J. Biomedical Materials Research, (2000) 51, 293
10. Averitt R.D. et al., "Plasmon resonance shifts of Au-coated Au₂S nanoshells" Physics Review Letters (1997) 78, 4217
11. Oldenburg S. et al., "Nanoengineering of Optical Resonances", Chem. Phys. Lett. (1998) 288, 243
12. Serksen, S. R. et al., "Temperature-Sensitive Polymer-Nanoshell Composites for Photothermally Modulated Drug Delivery", J. Biomedical Materials Research (2000) 51, 293
13. Han, J. and Craighead, H.G., "Separation of Long DNA Molecules in a Microfabricated Entropic Trap Array", Science (2000) 288, 1026

第3章 ナノテクノロジー関連プロジェクトの動向

平成13年度、経済産業省、NEDOが中心となって実施される予定の主なナノテクノロジー関連プロジェクトは、表3-1のとおりである。

表3-1 ナノテクノロジー関連プログラム・プロジェクト

分野	プログラム・プロジェクト	概要
材料	★材料ナノテクノロジー ・シナジーセラミックス ・スーパーメタル ・炭素系高機能材料技術 ・独創高機能材料創製技術	・物質構造の原子・分子レベル制御による新機能発現材料の開発 ・複数の特性を同時実現するセラミックスの構造制御技術開発 ・結晶粒を微細化、アモルファス化による革新的金属材料創製技術 ・新しい炭素系物質の合成技術開発 ・新材料分野の戦略的、機動的な研究開発
エレクトロニクス・デバイス	★次世代半導体材料・プロセス基盤技術 ・原子・分子極限操作技術 ・フェムト秒テクノロジー ・ナノメータ制御光ディスク ・クラスターイオンビームテクノロジー	・極微細半導体デバイスに必要な材料、プロセス、計測、解析技術開発 ・原子・分子1個1個の観察・操作技術の開発 ・フェムト秒領域での光と電子の制御技術開発 ・高速高密度の光メモリの要素技術開発 ・大電流クラスターイオンビーム発生・照射技術と材料プロセス技術の開発
計測・加工	・フォトン計測加工技術	・高品質レーザービームの高効率発生技術と計測加工技術の開発

★印は、平成13年度新規プログラム／プロジェクト

このうち、「材料ナノテクノロジープログラム」と「次世代半導体材料・プロセス基板技術開発プロジェクト」は、平成13年度からの新規プログラム・プロジェクトであり、本調査研究が対象とする製造分野とも相互連携や領域分担など密接な関係が予想されることから、これら2つのプログラム・プロジェクトの動向について調査した。

3.1 材料ナノテクノロジープログラム

情報、環境、安全、安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術において、物質の構造を超微細に制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る「材料ナノテクノロジー」の基盤的研究開発を行う研究開発プログラムで、8つのプロジェクトから構成されている。

3.1.1 プロジェクトの概要

(1) 「精密高分子技術」プロジェクト

- ・有機高分子材料の性能・機能の飛躍的な高度化および環境調和化を目指し、高分子の一次および高次構造を精密に制御する技術の基盤を構築する。

(2) 「ナノガラス技術」プロジェクト

- ・無機非晶質材料の原子・分子レベルでの構造を制御して新機能を付加したり、異質相を材料表面や材料内に並べる技術等の開発を行うことにより、ナノガラスに関する新材料開発に必要な技術の基盤を構築する。

(3) 「ナノメタル技術」プロジェクト

- ・金属材料の組成、組織を超精密・超微細に制御することで機械的特性（強度、耐食性等）、電気的特性等を向上させるとともに、これらの知識を体系化し、ナノメタラジーを構築することによって新規金属材料創製技術の基盤を構築する。

(4) 「ナノ粒子の剛性と機能化技術」プロジェクト

- ・ナノ構造の創製やナノ機能の発現に重要なナノ粒子の合成技術及びナノ粒子への機能付加プロセス技術等の基盤を構築する。

(5) 「ナノコーティング技術」プロジェクト

- ・無機材料、金属材料などの基板材料に新機能を付加するため、コーティングにおけるナノ構造を制御する技術の基盤を構築する。

(6) 「ナノ機能合成技術」プロジェクト

- ・ナノスケールにおける構造と機能との相関を明らかにすることにより、光機能、電子・スピン機能及び分子機能を設計・合成する技術を開発する。

(7) 「ナノ計測基盤技術」プロジェクト

- ・構造設計・プロセス技術研究開発の各プロジェクトに共通な超微細・高精度な計測基盤技術を構築するとともに、新たな標準物質を開発する。

(8) 「材料技術の知識の構造化」プロジェクト

- ・「構造設計・プロセス技術の研究開発プロジェクト」、「ナノ計測基盤技術研究開発プロジェクト」で開発した技術、得られたデータ、知識（既存の知識を含む）について、構造、機能、プロセスの視点から構造化、体系化を図り、知識基盤を構築する。

3.1.2 ナノ機能合成技術プロジェクト

(1) 目的

ナノ機能合成技術プロジェクトは、有機分子、金属、半導体、磁性体、酸化物等において、ナノメートルスケールの人工構造を導入することで、従来に比して飛躍的な超高密度・超低消費エネルギー機能特性を実現する機能材料を開発することを目的としている。とくに、ナノ構造を人為的に構成することで初めて発現する新機能を“機能合成”の観点から、理論・シミュレーションを駆使しながら開拓し、実験的に実証するという一連の研究開発によって、材料の側面から、21世紀における情報技術等の飛躍的発展へのブレークスルーをもたらすことを目指している。

(2) 開発目標

- ・熱揺らぎ程度の超低消費エネルギーで単位情報処理（演算、蓄積、伝達）を行う機能
- ・自己診断、自己修復などのインテリジェント材料機能
- ・磁場、電場、電流、光子等を量子限界に迫る高感度で検出する機能

(3) プロジェクトの構成

a. ナノ構造・機能相関の設計・制御・評価技術

- ・ナノ構造物性シミュレーション技術、ナノ構造作製技術、走査プローブ技術、ナノ構

造材料統合実験シスラムの開発

- b. 光機能合成ナノ材料技術
 - ・超高効率・超高速光記録ナノ材料の開発
 - ・フォトリソグラフィ・光増幅機能ナノ材料の開発
- c. 電子・スピニ機能合成ナノ材料技術
 - ・室温において高い磁場応答性を示す金属・半導体ヘテロナノ構造材料の開発
 - ・高度なスピニ編極伝導効果を実現する金属・半導体ヘテロナノ構造材料の開発
- d. 分子機能合成ナノ材料技術
 - ・構造的な連携反応を示す機能性超分子の開発
 - ・励起状態が連携反応を示す機能性超分子の開発

3. 2 次世代半導体材料・プロセス基盤技術プロジェクト

本プロジェクトは、国際半導体技術ロードマップ（ITRS）で示されているテクノロジノード70nm以下の極微細なデバイスに必要な高誘電率ゲート絶縁膜材料・計測・解析技術、および低誘電率層間絶縁膜材料・計測・解析技術を中心として、将来のデバイスプロセス技術に必要なリソグラフィ・マスキ関連計測技術、デバイス回路構成技術、およびトランジスタ形成に必要な技術等の開発を行う研究開発プロジェクトである。

(1) 高誘電率ゲート絶縁膜材料・計測・解析技術開発
漏れ電流が極めて少なく、シリコン基板との界面特性に優れ、欠陥が極めて少ない高信頼性のゲート絶縁膜用高誘電率（High-K）材料の開発を行う。また、高誘電率材料選択の指針を与える指導原理を明らかにし、成膜技術および成膜装置の考案および開発を行う。加えて、当該材料を用いたゲートスタック構造、及びトランジスタ構造の作成を行うとともに、作成された各構造の各種評価技術の確立を行い、トランジスタ動作を検証する。

(2) 低誘電率層間絶縁膜材料・計測・解析技術開発
配線遅延を極小化できる低誘電率（Low-K）材料の開発を行い、層間絶縁膜としての成膜法の提案・開発を行う。具体的には、低誘電率材料開発の指針を明らかにし、低誘電率層間絶縁膜材料、及びその成膜法の開発、提案を行う。加えて金属配線材料の低誘電率材料内での拡散メカニズムを解明し、耐拡散性を有する材料を設計、開発する。また開発した低誘電率層間絶縁膜材料単体の、反応ガス、プラズマ、各種雰囲気、溶液、温度、圧力、機械的応力等による変化を評価した上で、これらとの相互作用制御を行うことにより、最適な低誘電率層間絶縁膜の成膜プロセス技術を確立し、配線モジュールプロセスを構築する。

(3) 将来のデバイスプロセス基盤技術開発
50nm以下のテクノロジノードに向けて、微細加工技術、回路構成技術や材料計測解析技術をはじめとするあらゆる技術分野で直面することが予想される様々な物理的、工学的限界に対応する革新的な技術開発を行う。

参考文献

- [1] 「ナノインテリジェント材料ワークショップ」予稿集, Oct.2000
- [2] NEDOホームページ, <http://www.nedo.go.jp/>

第4章 海外動向調査

4. 1 International Conference on Computational Nanoscience (ICCN2001)

2001年3月19日から21日にかけて、サウスカロライナ州ヒルトンヘッドアイランドにおいて開催された International Conference on Computational Nanoscience (ICCN2001)について報告を行なう。

4.1.1 会議内容

ICCNにおける中心研究分野 Computational Nanoscience の主目的は、分子構造を計算することによって材料の機能解析を行なうことである。親水性、疎水性といった物質表面状態の計算や、神経細胞のイオンチャンネルのモデル化、匂い物質の選択的な吸着性の決定、感光性バクテリアの体内反応などのさまざまな現象が分子レベルの現象として計算されている。さらに、遺伝子構造の解析を行なうバイオインフォマティクスも重要な関連分野である。本学会では、関連項目および応用分野として以下の以下の3項目をあげている。

Computational Biology：分子構造のモデリング、タンパク質構造、遺伝子構造など

Computational Materials：トライボロジ、金属材料構造、半導体構造など

Computational Chemistry：結晶構造、高分子材料、表面性質など

これらの異なる分野が、分子のスケールで見ることによってすべて同じ種類の物理現象として語ることができる、というのがナノサイエンスのいわば「売り」である。本会議に参加していたのは、主にコンピュータサイエンスに携わる研究者たちであり、計算による予測と、実際の応用との関連に関しては現状ではさほど深く語られておらず、今後の議論を待つところであろうが、分子構造の「機能」

設計において今後このような手法が必要になることは確実であり、発表者からも、そのような新しい分野における研究への意気込みが伝わってくる学会であった。

本学会は、マイクロマシンのシミュレーションに関する国際学会 MSM: Fourth International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems との合同で行なわれた。MSM における中心課題はコンピュータサイエンスの立場からマイクロマシンの解析を行なうことであり、有限要素法による機械要素、熱流体、電磁場の解析、設計手法など、マイクロマシン分野で実際に試作されているマイクロ機械要素やセンサの解析にかかわるものが中心である。MSM と ICCN 双方において、中心課題となっている現象のスケールは大きく異なっており、解析手法も大きく異なるが、SPM: Scanning Probe Microscope の特性解析や結晶構造による導電性、内部応力分布など、今後ナノテクノロジーとマイクロテクノロジーの間を結ぶ現象、技術に関する報告もあり、コンピュータサイエンス分野に関しては、すでに双方を縦断する全スケールエンジニアリングは始まりつつあると予感させた。

4.1.2 発表論文数の状況

米国において開催された学会であるということもあり、全般に米国からの発表が多かった。ICCN においては、発表論文52件中、米国3に対し、欧州1程度の論文の発表数であった。日本からの発表はなかった。一方 MSM においては200件を越える発表があり、

日本からも 7 件の論文発表が行なわれた。

4.1.3 各分野の発表内容

(1) 発表全般

キーノートスピーチはカリフォルニア工科大学の W.Goddard 博士によるもので、重点は、高分子材料の分子構造からの機能予測におかれていた。分子シミュレーションによって、化学、生物、様々のスケールにおける現象の機能設計を統一したルールによって行なうことができる、というものである。

この手法によって、分子構造の段階から機能素子の設計を行なうことができれば、究極の微小機械技術となるだろう。ただし、現状では、分子機械のための製造技術、といった位置づけでこの研究分野を捉えているものはみられなかった。もちろん金属表面性質や結晶構造の導電性など、微細加工技術と直接にかかわる現象に関する発表は、今後の 3D ナノ構造のシミュレーションにおいて重要分野の一つとなるであろう。

(2) 薄膜および表面化学

図 4.1-1 は分子力学のシミュレーション手法を用いて銅表面上に滴下した液体の銀の液滴形状を計算したものである。上が 1 2 7 5 K、下が 1 0 0 0 Kにおける計算結果である。温度の高い状態では、金属が合金化するため、形状も複雑になる。

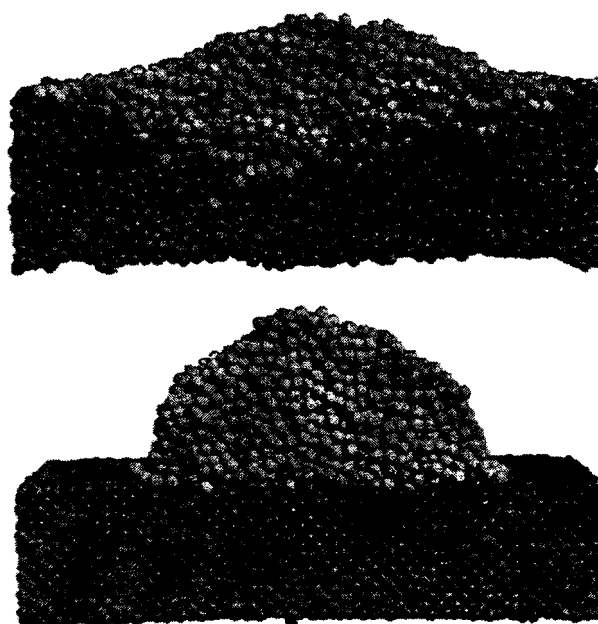


図 4.1-1 金属液滴の形状シミュレーション

(3) 分子生物学分野

図 4.1-2 はラット肝細胞のカルシウムイオンによる信号伝達をシミュレートしたものである。確率論的モデルを導入することによって、決定論的モデルを導入した場合よりも実験結果に近い伝達信号が得られたとしている。

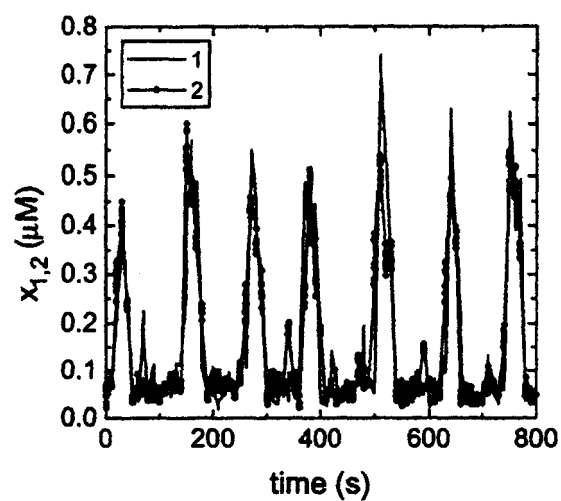


図 4.1-2 肝細胞間の信号伝達シミュレーション

また、イオンチャネルの分子モデルの構成は、この分野の最も大きい研究内容の一つである。本学会においても、神経機能の最も特徴的要素を、「物理学的」な手法で解析できる手段として、このモデル化に取り組んだ発表が目立った。図 4.1-3 はモデル化をしたイオンチャネルの図である。

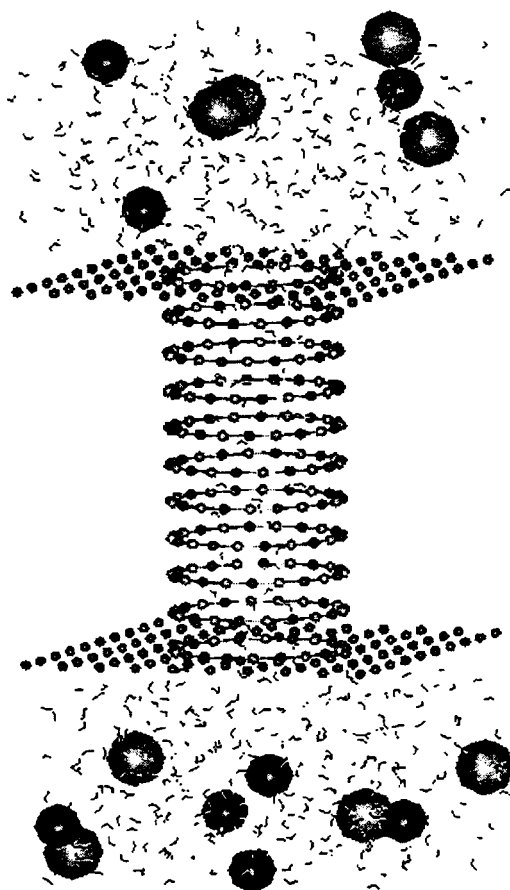


図 4.1-3 イオンチャネルの構造モデル

(4) その他

若干特徴のある内容としては、光エネルギーを化学エネルギーに変換するタンパク質である、バクテリオロドプシンの波長選択性のシミュレーションを行なった論文がある。Silftenらのグループでは、バクテリオロドプシンを実際に成膜した図 4.1-4 に示すような光センサを試作している。波長の異なる光、すなわち異なる色の光に対する感度を、シミュレーション結果との比較を行なっている。

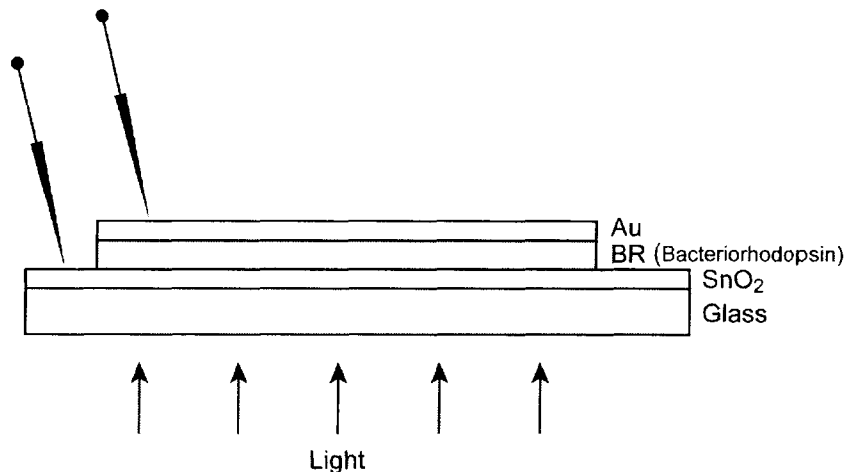


図 4.1-4 感光性タンパク質バクテリオロドプシンを用いた光センサ

4.1.5 まとめ

ICCN は、いまだ、マイクロマシンの学会である MSM と比較すると規模の面で若干小さい存在である。非常に広い範囲の物理現象にかかわる分野であることから、逆に、それぞれの専門分野における活動のほうが現状では重視されているということもあるだろう。今後、ナノサイエンスがどのような形で発展していくかのひとつの形として計算によるナノサイエンスの今後も注目される。

参考文献

- (1) D. Henderson *et. al.*: Simulation Study of Channels in Biological Membranes, Technical proceedings of ICCN 2001.
- (2) T.A. van der Straaten *et. al.*: Three-Dimensional Simulation of Biological Ion Channels, Technical proceedings of ICCN 2001.
- (3) W. Nonner: Mechanisms of Selectivity in biological ion channels, Technical proceedings of ICCN 2001.
- (4) B. Eisenberg: Ionic Channels as Biodevices, Technical proceedings of ICCN 2001.
- (5) L. Lensu *et. al.*: Towards Color Sensitivity of Protein Based Artificial Retina, Technical proceedings of ICCN 2001.
- (6) M. Frydrych *et. al.*: Model of Photovoltage Response of Bacteriorhodopsin in PVA Films, Technical proceedings of ICCN 2001.
- (7) M.E. Gracheva *et. al.*: Stochastic Simulations of Cell-Cell Signaling in

Hepatocytes, Technical proceedings of ICCN 2001.

- (8) P. Silfsten et. al.: Color Sensitive Biosensors for imaging, Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition (1996).

第5章 ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム

5.1 開催目的

ナノテクノロジーを活用する技術開発に対する期待は大きく、ナノテクノロジーの中でも、エレクトロニクス分野への展開、材料分野のナノ技術、バイオ分野への展開と共に、製造分野の革新のために必須なナノレベルの構造創製を可能にする超微細加工・組立技術の研究開発は、科学技術会議の「ナノテクノロジーの戦略的推進方策に関する懇談会報告書」（平成12年12月）にも、今後の重要な技術開発項目として明記されている。

このようなナノ・マニファクチャリング（ナノ製造技術、ナノ構造創製超微細加工・組立技術）に関する研究開発により汎用性のあるナノスケールの製造技術を確立することができれば、多くの分野において、新たな機能を発現する革新的製造技術の創製に結びつくと期待されており、そのための大規模技術開発の必要性が強く指摘されている。

こうした中、平成11年度から実施してきたナノテクノロジーの製造技術への応用についての検討の成果も踏まえ、「ナノ・マニファクチャリング」の製造技術分野における役割、重要性、またその技術開発課題について議論することにより、研究開発の方向性を検討するため、国内外の幅広い研究者、技術者を集めて、国際シンポジウムを開催した。

5.2 開催概要

1) 開催日：平成13年2月16日（金） 9：30～17：50

2) 場 所：TEPIAホール（青山TEPIA4階）（同時通訳有）

3) シンポジウムテーマ：ナノ・マニファクチャリングの技術開発課題と研究開発のすめかた

4) プログラム

09:30～09:40 開会挨拶：辰田昌功（新エネルギー産業技術総合開発機構・企画調整部長）

09:40～09:50 来賓挨拶：増田優（経済産業省製造産業局・次長）

司会：矢部彰（産業総合研究所機械技術研究所・企画室長）

09:50～10:20 「ナノ・テクノロジーおよびナノ・マニファクチャリングへの産業界からの期待」

秋元勇巳（三菱マテリアル（株）・会長）

10:20～10:50 「マイクロマシンからナノ・マニファクチャリングへ」

下山勲（東京大学・教授）

10:50～11:20 「マイクロマシン、ナノ・テクノロジーのバイオ系への応用について」

藤正巖（政策研究院・教授）

11:20～11:50 「ナノ・マニファクチャリングとコヒーレントビーム技術」

植田憲一（電機通信大学・教授）

昼食休憩

13:00～13:50 “National Initiatives in Nano Science and Technology :Challenges to Innovation in the United State.”

ダンカン T. ムーア（米国大統領行政府科学技術政策局・次長）

13:50～14:40 “Trend of Micro-Optics and its Future”

ハンス P. ヘルツィヒ（スイス ニューシャテル大学・教授）

休憩

15:00～15:30 「ナノ・マニファクチャリングの製造分野における応用」

潟岡泉（日本航空電子工業（株）・中央研究所長）

15:30～16:00 「光デバイスのナノ・マニファクチャリング」

神谷武志（文部科学省大学評価・学位授与機構・教授）

16:00～17:25 総括討論

「ナノ・マニファクチャリングのロードマップとナノ・マニファクチャリング技術開発の重要性」

宮沢和男（新エネルギー産業技術総合開発機構・産業技術開発室長）

矢部彰（産業総合研究所機械技術研究所・企画室長）

下山勲（東京大学・教授）

植田憲一（電機通信大学・教授）

潟岡泉（日本航空電子工業（株）・中央研究所長）

神谷武志（文部科学省大学評価・学位授与機構・教授）

藤田博之（東京大学・教授）

17:25～17:30 閉会挨拶：林秀行（製造科学技術センター・専務理事）

5) 参加者

・参加申込 3 5 8 名、当日出席者 2 3 1 名

参加者内訳

	申込者	出席者
官庁・行政	3 4	2 6
国研等公的研究機関	3 3	2 2
大学	3 4	2 3
企業	2 3 3	1 4 5
団体	2 4	1 5
合計	3 5 8 名	2 3 1 名

5. 3 講演内容

1) 「ナノ・テクノロジーおよびナノ・マニファクチャリングへの産業界からの期待」

；秋元勇巳講師

・ナノテクノロジーによる効果

・評価指数＝[「マテリアル」「エネルギー」「情緒」としての機能、社会への貢献]
÷ [必要な資源量、機器の大きさ]

・人類に貢献する実質的な果実を生むことが重要

2) 「マイクロマシンからナノ・マニファクチャリングへ」；下山勲講師

・超精密加工による機能発現

・支配法則が変わる

・小さい時定数

・ノイズ低減

・多くの応用分野（光学、バイオ…）

- ・製造プロセスもネットワーク型が重要
- 3) 「マイクロマシン、ナノ・テクノロジーのバイオ系への応用について」；藤正巖講師
 - ・ナノの世界のunderstandingが最重要課題である
 - ・今ある技術を使って実用化を目指すならば、ニーズをしっかりとつかむことが大切
(現場からニーズをつかめ)
 - ・機械で欠けているミクロン程度の世界に挑戦せよ
機能を持つ赤血球
- 4) 「ナノ・マニファクチャリングとコヒーレントビーム技術」；植田憲一講師
 - ・光の利用を考えてみても、3次元のサイエンスとしての理解が、まず重要である
 - ・粒子性と波動性、量子効果等で新たな学問体系を作っていくことが重要
- 5) “National Initiatives in Nano Science and Technology :Challenges to Innovation in the United State.”；ダンカン T. ムーア講師
 - ・10年先の社会を考えて、National Nano technology Initiative は作られた
 - ・メモリーの分野が最初に実用化されてくるだろう
- 6) “Trend of Micro-Optics and its Future”；ハンス P. ヘルツィヒ講師
 - ・光学製品はマイクロ化は進んでおり、マイクロレンズや機能デバイスが作られている。そのための製造技術手法は、多くのナノ・マニファクチャリングに応用可能である。
- 7) 「ナノ・マニファクチャリングの製造分野における応用」；潟岡泉講師
 - ・汎用フォトニック素子を自在に作り上げる装置、製造技術が大切である
- 8) 「光デバイスのナノ・マニファクチャリング」；神谷武志講師 1
 - ・システムの研究；設計、プロセス、計測

5. 4 総括討論

「ナノ・マニファクチャリングのロードマップとナノ・マニファクチャリング技術開発の重要性」

- 1) 各講演のポイント整理
- 2) ナノ・マニファクチャリングのロードマップ
 - ・議論の出発点として、ナノ・マニファクチャリングなどについて、共通のコンセンサスを持つことが重要。
 - ・製造技術自体はニーズを持たないので、シーズ先行型開発のアウトプットの考えかたも議論がある。
 - ・ナノ・サイエンスとナノ・テクノロジーは、2人3脚で進める必要があるので、それぞれと、その関連がロードマップのなかで示されると良い。
 - ・全体的なビジョンとバランスが重要。
 - ・研究スタイルのバラエティを入れて、技術の選択の柔軟さも考えたい。
- 3) ナノ・マニファクチャリングの可能性・我が国の強み・弱み
 - ・微細構造や微細なものに対するプロジェクトは成果をあげているが、技術のあるところとニーズのあるところの一体化はこれから。
 - ・ポテンシャルは十分にある。学問分野間、産学が融合して、力を合わせる必要が

要。

- ・技術と産業の連携という点で、危機感のある分野もある。
- ・横のつながりをプロモートするような共同研究システム体制が必要。

4) マイクロマシン、MEMSからナノシステムへ

- ・トップダウンとボトムアップの両方のアプローチを使うことによって、ナノからマクロまでを階層的に接続するような機能を融合したナノシステムができる。
- ・ナノからマイクロまで含むようなMST（マイクロシステムテクノロジー）の設計・解析・製作に関する一連の技術を、工業生産規模や工業生産品質で提供できる組織が、研究開発の効率化、負担・リスク軽減、ベンチャー育成に欠かせない。
- ・研究試作センター、ファウンドリーのような研究の基盤技術やサービスを提供する仕組みが重要な役割を果たす。
- ・我が国の強みは連携の良さ。共同研究センターのようなシステムを国がサポートすることが必要。
- ・みんながアクセスできて、情報を共有し、相互刺激できるシステムはどうしても必要。
- ・生物系の目的達成志向のアグレッシブな態度が勉強になった。チームを組んだり、試作機能を分担したりして、他の成果や機能を活用してでも、さらに先へ進めていかないと間に合わない。
- ・マイクロマシンは、基礎から、実用化を目指す段階で、ナノ製造のプログラムの中にも取り入れるべきテーマである。
- ・ナノのレベルでも共同試作センターは必要。
- ・新しいデバイスを自在に作り上げられるような新しい技術への挑戦も必要。

5) ナノ・マニュファクチャリングの研究開発のすすめかたと提言

- ・米国では、全体的なゴール（分野や目標）を決めて、いろいろなプロポーザルの中から選別していく。産学間のコラボレーションや経済的なデバインドへの影響などが考慮される。
- ・物理、化学、生物の統合のため、他分野の理解や協力が重要。
- ・米国では、民間主導で、バイオエンジニアリングが注目されている。
- ・欧州でも、共同研究体制の選定には、競争原理を導入している。そのうち1つが、センターオブナノサイエンスになる。
- ・産学の研究者のネットワークや納税者への宣伝も重要。
- ・他分野の研究者との協調が必要。
- ・マイクロメカトロニクス国際研究センターや化学とマイクロシステムの研究会など、徐々に進んでいる。ネットワークづくりは、ボトムアップがよい。
- ・出口をよく見て設計、加工、システム化まで含めた統合的な区分も入れておきたい。
- ・ある程度の領域を定めて、その中で研究者の発想が伸ばせる提案制度で新しいアイデアをあつめて、選別していくとよい。
- ・研究の中にあるエネルギーをうまく生かすためには、いろいろなアイデアがでて百花繚乱になってくるのをあまり止めなくても良い。
- ・違った技術分野の融合はすごく重要。

- ・費用対効果の点でも、国民の納得が得られる説明が必要。
- ・研究成果の適正な評価システムや助言、誘導の仕組みも必要。

5. 5 アンケート集計結果

1) プログラム、時間配分、会場設備

ー略ー

2) 特に有益だった講演、討論と内容

- ・ムーア講師：アメリカにおける戦略的で緻密な政策決定の過程
- ・藤正講師：理論がまずあるべき、また現場との密接な交流が最重要という切り口。ナノテクノロジーの支配力学が古典物理と量子物理の境界領域にあるという示唆。
- ・下山講師：ナノ・マニファクチャリングの全体像がわかりやすかった。
- ・植田講師：光技術とナノテクノロジーとの関わり方。ナノテクノロジーが進歩するには時間がかかる。
- ・ヘルツィヒ講師：マイクロ光学素子のトレンド
- ・潟岡講師：フォトリソグラフィの製造
- ・神谷講師：光デバイスの最先端技術の開発状況。設計、製造、評価の連携。
- ・総括討論：

3) ナノ・マニファクチャリングのすすめかた

- ・産官学の連携や、材料、プロセス製造、評価から応用分野まで広い範囲からの有機的連携、集中研究
- ・ニーズを把握し、応用・ビジョンを提示しながら、基礎技術研究・インフラ整備をすすめる
- ・「こんなことができるはず」という理論にもとづいた仮説・可能性の提案をお願いしたい。
- ・競争原理の導入も必要。
- ・ターゲットの絞り込みが必要。
- ・分散のむだを避け、統一したリーダーシップですすすめるべき。
- ・強いテーマはノルマ明確にして伸ばすとともに、弱いテーマは（自由な発想で）チャレンジ。
- ・ナノフラットネス加工などの精密機械加工技術、計測評価技術の研究も重要。

4) 今後研究（応用）したい技術と、応用分野、製品イメージ

- ・フォトリソグラフィ、光学素子、光 I C
- ・センサ
- ・バイオ・医療系材料、デバイス
- ・微小機構の加工、組立、評価
- ・ウェアラブル機器
- ・ナノ構造、ナノ平滑構造の加工、評価
- ・無害化効果、触媒材料
- ・ナノセラミックス

- ・貴金属ナノ粒子応用
- ・ナノ空間のシミュレーション

5) その他

- ・有益だった。役に立った
- ・将来の製品イメージ、応用の具体的なアイデアがほしい
- ・概念、理論、応用とも漠然としていて、まとまった議論ができない
- ・材料系など複数の研究分野との有機的連携が重要。
- ・シミュレーション技術、評価技術が遅れている。
- ・近く成果が期待できるストレージ分野も入れるべき。
- ・電気化学分野への応用、ビッグサイエンスへの応用の考慮すべき。
- ・他の「ナノ」テーマとの重複は避けるべき。
- ・日本独自のアプローチで長期的に取り組むべき。

5. 6 まとめ

1) ナノ・マニファクチャリングの役割

ナノテクノロジーを活用した機能を組み込んで実用化した製品、サービスを、産業上有効なものとして提供するため、ナノレベルの機能構造の創成と広面積な発現の両方を実現するナノレベルの製造技術、ナノ・マニファクチャリングの重要性が認識されている。

一般に、ナノテクノロジーを活用するナノシステムは、ナノ機能を実現する構造とその構造を支持しナノ機能発現の基盤となるナノの精度を持ったマクロな構造の融合したものと考えると、このナノシステムを機能させ、ナノ構造固有のナノ機能を取り出すためには、このミクロとマクロの両方の構造のナノ・マニファクチャリング技術が不可欠である。

特に、種々の分野へのナノテクノロジーの応用展開を考えると、材料や雰囲気の制約条件の少ない加工方法を実現することが極めて重要である。

2) 異分野との融合、協力、分担の重要性

ナノテクノロジーは、物理、化学、生物が複合した技術分野で、その応用も電子電気材料、デバイスから、医療システムまで幅広い領域で期待されている。このため、ナノテクノロジーの研究開発では、各専門分野間での技術、情報、人材の交流、協力、役割分担が不可欠であり、これら各分野が融合した研究開発体制で、具体的なニーズを把握しながら、研究開発を進めることが必要である。

また、研究の共通基盤技術や開発ツールとなるような研究試作機能、計測評価機能、情報共有化機能などについては、ナノレベルの加工、計測装置の価格が高価になり、かつ短い期間で性能改善が行われることを考えると、共同利用のセンターを設置して、研究者のリソース、リスクの負担を軽減することで、開発リードタイムを短縮し適時な成果達成を実現するとともに、自由な発想からの研究の芽を育てていくことも重要である。

3) ビジョンとストーリーの必要性

今後開発競争が激化する中、我が国の産業競争力を維持発展していくためには、新産業創出につながる新技術の開発・実用化を他に先駆けて推進することが必須であり、公的機関からの資金援助、産業界からの積極的な研究開発投資を、適時に活用することが有効である。このためには、実用化製品のイメージや社会経済的効果やそれを実現するための手

段、費用などを具体的にわかりやすい形で提示することで、税金を負担している国民全体の理解・支援を得るとともに、行政や企業経営者への適正な判断材料を提供することも重要である。

4) 「ナノ・マニファクチャリング」技術研究開発の提言

このような観点からは、ナノテクノロジーの実用化により、情報分野のメモリーに必要な体積が大幅に減少すること(角砂糖1個分に図書館全部の情報が入る)が代表例であり、ナノ・マニファクチャリングの実用化も情報分野への応用から広がっていくと予想される。

以上の検討および討論により、「ナノ・マニファクチャリング」技術について産官学の英知を結集して、技術的可能性を実証する研究開発を、強力に推進することが重要であるという提言をまとめることができた。

第6章 今後の課題

6. 1 調査研究のまとめ

先導研究「3Dナノテクノロジー」は、2年目を迎え、調査研究の結果をプロジェクトの形にまとめることを検討した。

まず、ナノテクノロジーに関して、平成12年度にプログラム化を実現した材料ナノテクノロジープログラムと次世代半導体エレクトロニクスについての調査・検討を行った。その結果、材料ナノテクノロジーに関しては、新しい機能を持った材料を作り上げることが目的であること、また、次世代半導体エレクトロニクスに関しては半導体の回路の線幅をサブミクロンオーダーで従来の半分程度にした時に生じるであろう問題の解決を中心にしたプロジェクトであることが判明した。

また、ナノテクノロジーを製造技術の分野に適用することの重要性を主張し、またこの重要性について多くの有識者と議論するために「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」を開催した。産学官のメンバーによる発表と総合討論、および、米国のナショナルナノテクノロジーイニシアティブの作成プロセスの説明を受け、ナノ・マニファクチャリング技術開発の重要性、また、研究開発プログラムとしての「ナノ・マニファクチャリング」のあり方が議論された。

特に、ナノ・マニファクチャリング技術に関しては多くの材料に対して汎用的に使用でき、かつ任意の形状の加工が可能な、ナノ加工装置を作り上げ、エレクトロニクスを中心にバイオ、環境エネルギーの分野での実用化研究に応用することが重要であることを明らかにすることができた。

また、本先導研究で行われた調査内容については、ナノ加工装置を作り上げるプロジェクトに関与するものばかりでなく、マイクロマシンの応用としてのバイオ分野等への実用化研究を目指すべきもの、さらには、ナノテクノロジーの進展にとって重要な現象の解明とそれに基づく応用の展開としての提案、公募的な基礎研究として進めるべきものに分類でき、それぞれが重要な課題であることが明らかになった。

6. 2 施策制度の必要性

首相の主催した「ものづくり懇談会」では「産学官の連携によりものづくり産業の発展に資する先端的な製造技術等の技術開発を促進する」ことが提言されている。本技術開発は、この提言に沿った技術開発であり、日本の強い「ものづくり」を引き続き維持していくために必要な施策である。

「今後、我が国が国際競争の中で生きていくために、高コスト構造の中でも存立し得る高付加価値分野への一層のシフトが求められる」（ものづくり懇談会提言）中で、社会的なニーズに適合した従来にない新製品を生産するための基盤技術となる革新的な加工プロセスを、欧米諸外国に先駆けて開発する必要がある。

高度情報化社会・高齢化社会に対応する機器を製造するために、現在ナノスケール領域に達してきた微細加工の高度化への要請に拍車がかかることは明らかである。しかし、既存の技術では限界が見え始めており、形状加工される個々の要素にナノスケールの構造から生じる機能を付加するという全く新しい加工技術を開発する必要がある。この考え方の

重要性、新規性を世界に対して宣伝すると共に、産学官の英知を結集して、将来の産業技術としての成立性を見極めるべく国が主導して研究開発を実施することが必要である。

一方、米国では、2000年予算教書において、「第二の産業革命に向けて」ナノテクノロジーの研究を米国の戦略的分野にすることを打ち出した。このプロジェクトの中でもナノ構造体の作製技術の開発は、重要な課題となっている。欧州においても、EU及び各国のレベルで、ナノ機能構造体の作製技術に関連する研究開発推進体制を強化しつつある。現在はまだ、ナノ構造体創成技術の実現可能性について見極められる段階には至っていないが、技術の適用範囲の広さと、研究開発のチャレンジ性を考えると緊急に研究開発を開始することが必要である。

6. 3 ナノ・マニファクチャリング技術開発の目的と課題

日本のGDPを支える製造業においては、高コスト構造の中でも存立し得る高付加価値分野へのシフトが求められており、そのため、欧米諸外国に先駆けて従来になかった新製品を生産するための基盤技術となる革新的な加工プロセスを開発する必要がある。

高度情報化社会においては情報通信機器の高速化、高密度化、大容量化への要求が一層増していくとともに、高齢化社会においても現在よりもはるかに小型で個人のニーズにあったオーダーメイド仕様のウェアラブル機器等のニーズが高まっており、こうした機器を製造するために、現在ナノスケール領域に達してきた微細加工の高度化への要請に拍車がかかることは明らかである。その場合に、種々の材質や雰囲気の中でナノ加工を実現できるナノ加工装置を研究開発することが重要である。また、形状加工される個々の要素に、ナノスケールの構造から生じる機能を付加するという新しい機能付加工技術を開発する必要がある。

このため、ナノ構造創製加工プロセス技術の研究開発では、機能付加工が可能であるとともにクリーンかつドライで拡張性・制御性・生産性に優れた加工技術であるレーザープロセス技術のナノスケール加工への展開を図る。これは、ナノメートルオーダーの形状とともに、レーザー微細加工装置と構造により発現する機能を部材に付加する加工を可能とする加工技術から構成されており、それぞれの技術開発内容の具体例を以下に説明する。なお、技術競争力強化の視点での目的を明確化したマイクロマシン応用技術や、技術シーズ確立を目的としたバイオ分野での3Dナノテクノロジーの研究も、ナノマニファクチャリングの重要な構成要素となる。

(1) ナノ加工装置技術（新レーザー工作機械開発）

微細領域の機能付加工の実用化に不可欠な高制御性・高速・超微細工作機械、すなわち、機械的な可動部分を極力排除したメカフリー・ビームスキャンニング超微細レーザー加工装置を開発する。この加工装置は従来の電子線描画装置に対応するものであるが、加工雰囲気が自由であること、マスクレス加工が可能であること、機能をもったマスクの作製ができるため、半導体製造プロセスにおいてマスクの枚数が大幅に削減できる等の波及効果の大きい特徴をもっている。

加工機（工作機械）の高精度化・高速化のために、加工機の熱的・力学的変形の防止と、工具と加工物の相対位置制御を課題として技術開発が行われてきた。しかし、加工による

反力による変形は加工材料や加工形態により大きく異なるために、変形制御の最終的解決法を見出すのは困難とされている。また、互いに相対運動するものを安定に位置制御することは極めて困難である。さらに、従来の工具は剛性が低く、摩耗を伴うために、機械加工では微細加工に限界があることも明らかである。従って、ナノメートルオーダーの加工に対しては、可動部を持たず、加工反力や摩耗を生じない工具を利用した加工機が要求される。レーザーを微小な点に集光する技術、機械的な運動によらずに光を走査する技術等の光制御技術を用いることで、この要求に対応可能な加工機が実現できる。

・高コヒーレンス完全固体レーザー発振器

微小な点に集光するためには、干渉性のよい(高コヒーレンス)レーザーが必要である。また、加工装置に用いるためには、小型で制御性・安定性のよいレーザーである固体レーザーであることが重要である。このため、半導体レーザー(レーザーダイオード)を用いた光の加算増幅(コヒーレンス加算)技術と固体レーザーの温度制御技術を開発して、高コヒーレンスでパルス幅等の制御が容易なレーザー発振器を開発する。また、コヒーレンスを維持したままで波長変換できる新たな光源(光パラメトリック発振器、OPO)を開発する。

・メカフリー・ビームスキャンニング微細加工機

明るい(開口数の大きい)マイクロレンズを開発するとともに、干渉性のよい光を特殊なレンズを用いて集光することで光の波長以下のサイズの領域に大きなエネルギーを集める技術(超解像技術)を開発して、ナノメートルオーダーの領域にエネルギーを集める。また、新たな光制御素子(ダイナミックホトニック素子及びホログラム素子=光機能集積デバイス)の作製法を開発し、これを用いて、光の走査等の制御等を行う。これらを統合して、可動部を極力排除した新たなナノメートルオーダーの微細加工機を開発する。

(2) 機能付加加工技術(ナノスケール構造制御技術)

レーザー加工においては、従来の形状付加中心の加工にない、機能付加加工を実現できる。しかし、その局所加工場の状態制御が行えなければ、たとえ加工機があっても実際の加工はできない。従って、本技術開発では、レーザー加工場のモニタリング技術とそれに基づいた局所的な加工場の状態制御技術を確立することで、単独で機能をもつナノ構造体を作製するための技術、すなわちナノスケールの機能付加加工技術を開発する。

この加工技術を実証する事例として、光発電素子としての機能や光触媒等の機能を持つ次世代ナノ構造機能半導体デバイス作製技術を開発する。

・加工場モニタリング・制御技術

加工場を、短パルスレーザー光等による光その場計測を用いて診断することにより加工場の状態をモニタリングするとともに、加工結果の分析を行って、加工制御に必要なパラメータを抽出する。この結果に基づいて、加工場の局所状態制御技術を開発する。

・機能付加加工技術

従来の機械加工は加工物に形状を付与することが中心であった。一方で、表面改質（CVD、PVD等で産業として実現されている）は表面の耐食性や耐摩耗性等の機能を付与する加工形態となっている。本プロジェクトの加工は後者と同類のエネルギー加工であるが、寸法的にナノスケールであること、エネルギー密度が極めて大きいことが、従来の加工と大きく異なっている。またここでは、機械的な機能ではなく、ナノスケールの構造から生じる機能（この一つである光の関わる機能）を付与することを目的とした研究開発を行う。

・機能デバイス作製技術

ナノスケールの構造を持つ酸化物半導体（マグネリ相酸化物）を用いた光発電素子（太陽電池）や光機能触媒を加工技術の適用事例として開発する。これらに紫外線を当てた際の機能はすでに検証され、排気ガス分解用の触媒などとして一部実用化されようとしている。しかし、機能付加加工により、元素の結合比等のナノ構造の制御が可能となれば、可視光で動作するデバイスを作製できる。この技術は、極めて社会的な波及効果の大きなデバイスの実用化に繋がる。特に、光発電素子としては、シリコン系太陽電池に比べて、非常に生産エネルギーの低い、従って、生産コストも小さい高効率素子の実現できる。また、紫外線のない室内でも使用できる、室内用発電素子、室内環境清浄化触媒や生活空間での抗菌デバイスとしても利用できる。

6. 4 想定される選択肢及び各選択肢間の比較

ナノ構造創製基盤技術開発は、加工の高付加価値化という製造技術の競争力を維持するための必要不可欠な技術開発である。特に、製造技術の競争力維持は、国の繁栄の生命線であり、国が主導で実施すべき技術開発課題である。

コア技術は国研で育成されてきているものの、これを継承する独立行政法人組織内での研究開発では、将来の産業技術としての成立性を見極めることが困難であること、非常に時期が遅くなることが予想される。また、逆に民間のみに任せただけの場合には、技術の実現は不可能であると予想される。このため、コア技術を有する独立行政法人（現 国研）を中心として、企業、大学が有する関連技術を融合させ、絞り込んだ目標・事例に対する集中資源投資による一点突破的な技術開発が必要である。

米国においても、欧州においても、国家的な研究開発推進体制を強化しようとしていることに鑑みれば、今ここで日本が主導的に取り組むことは極めて重要である。

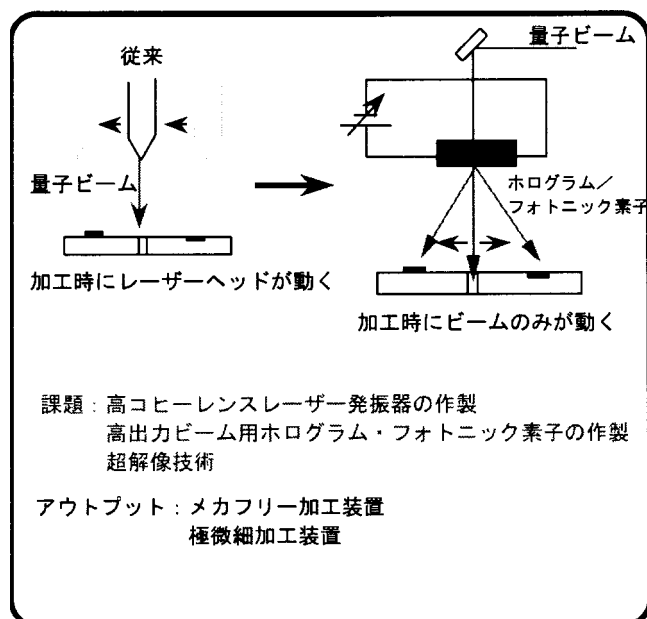
また、製造技術は、サイエンス（科学）、技術（工学）、技能の3つの要素が重要であるが、デジタルマイスタープロジェクトにおいては、技能と技術（工学）の融合による製造技術の高速化を主眼とするのに対し、ナノ構造創製加工プロセス技術研究開発プロジェクトにおいてはサイエンス（科学）と技術（工学）の融合による高付加価値化を主眼としている。さらに、デジタルマイスタープロジェクトでは実用化技術開発が中心であるのに対して、ナノ構造創製加工プロセス技術研究開発プロジェクトは産業技術成立性見極め技術開発であり、フェーズが異なるが、この2つのプロジェクトは製造技術の研究開発における車の両輪の役割を果たすものと考えている。

また、ナノの構造、機能を実現する製造技術が出来上がってはじめてエレクトロニクス

情報分野を中心に発展しつつあるナノテクノロジーを汎用加工技術を提供することにより、バイオやエネルギー、環境分野に広く適用範囲を広げることが可能となる点は極めて重要である。そのプロセスにおいて、材料分野、バイオ分野、環境分野、化学分野等と製造加工分野が融合し、新たな機能を発現し、革新的技術シーズを確立することが期待できる。

以上の点からも、「ナノ・マニファクチャリング」技術研究開発を産学官の英知を結集してプロジェクト的に取り組むことが重要であり、強く提言するものである。

【ナノ加工装置技術】



【機能付加加工技術】

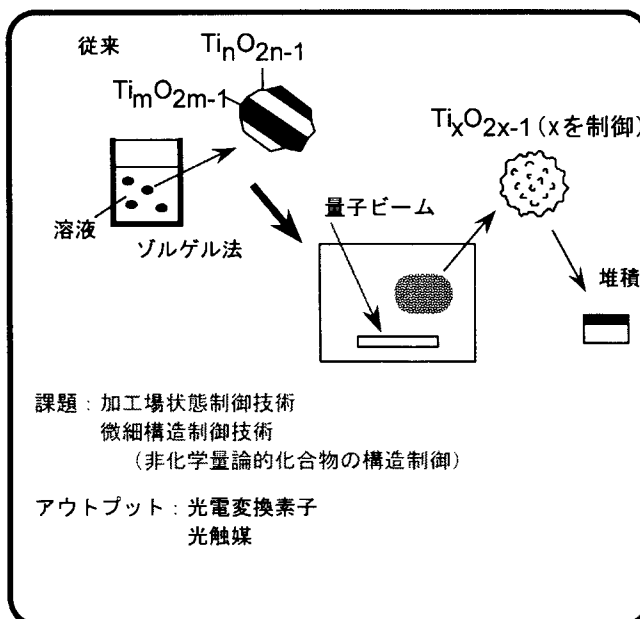
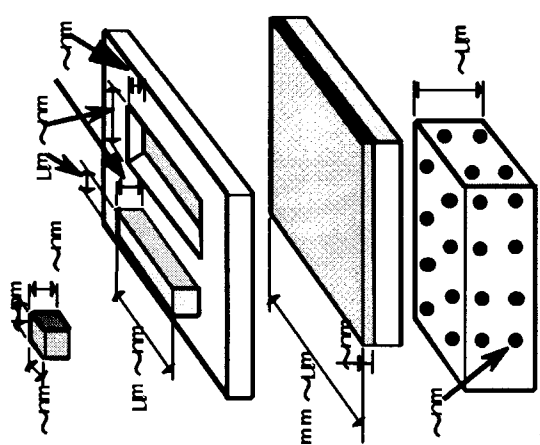


図 6.4-1 研究開発課題

表 6.4-1 ナノ加工方法とその特徴

ナノ加工		機械加工		エネルギー ビーム加工	原子操作に よる加工
	独立3次元加工	×	×	○	×
	基板3次元加工	△	△	△	○
	基板2次元加工	○	○	○	△
	構造体作成加工	×	×	○	△
生産性		○	○	○	×

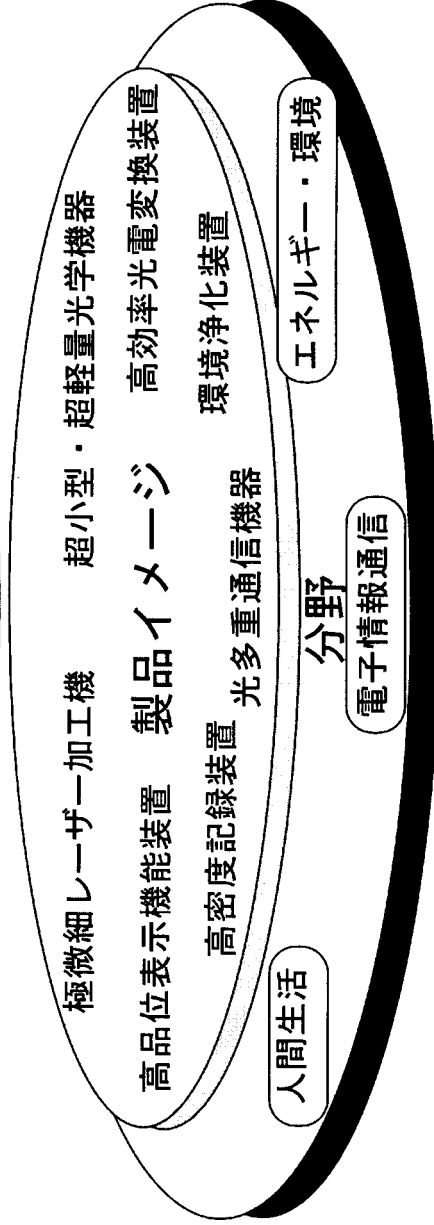
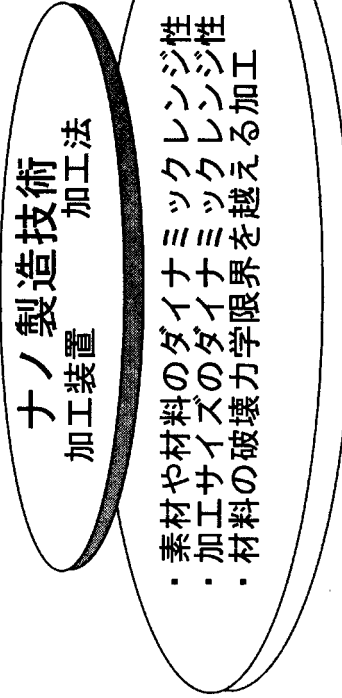


図 6.4-4 ナノ製造技術と産業応用分野

付録：「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」講演集

「ナノ・テクノロジーおよび ナノ・マニファクチャリングへの産業界からの期待」 秋元勇巳（三菱マテリアル（株）・会長）	9 7
「マイクロマシンからナノ・マニファクチャリングへ」 下山勲（東京大学・教授）	1 0 3
「マイクロマシン、ナノ・テクノロジーのバイオ系への応用について」 藤正巖（政策研究院・教授）	1 1 2
「ナノ・マニファクチャリングとコヒーレントビーム技術」 植田憲一（電機通信大学・教授）	1 2 0
“National Initiatives in Nano Science and Technology :Challenges to Innovation in the United State.” ダンカン T. ムーア（米国 大統領行政府科学技術政策局・次長）	1 2 8
“Trend of Micro-Optics and its Future” ハンス P. ヘルツィヒ（スイス ニューシャテル大学・教授）	1 4 0
「ナノ・マニファクチャリングの製造分野における応用」 潟岡泉（日本航空電子工業（株）・中央研究所長）	1 5 2
「光デバイスのナノ・マニファクチャリング」 神谷武志（文部科学省大学評価・学位授与機構・教授）	1 6 0
総括討論 「ナノ・マニファクチャリングのロードマップと ナノ・マニファクチャリング技術開発の重要性」	1 6 6

「ナノテクノロジーおよびナノマニュファクチャリングへの産業界からの期待」

三菱マテリアル株式会社会長・秋元勇巳

1) 緒言

ナノテクノロジーの歴史は、1959年にファイマンが原子一個一個のレベルから物質、素子や機械を作り上げることが、いずれ可能となることを示唆したのが始まりといわれています。一方半導体の高集積化が際限なく進み、電子同士が固体中を衝突せずに走れる距離の構造体・いわゆるメゾスコピック構造体の成形が検討されるなど、マイクロエレクトロニクス技術は、ナノスケール領域の構造体を要求するまでに進歩をして参ります。「ナノテクノロジー」と言う言葉は、1974年に、当時、理科大におられた谷口教授が、ナノスケール領域の超精密加工技術が必要となると言う意味合いで、提唱されたのが最初と言われますが、これは大きなものから加工していったナノスケールの構造体を形成するという意味で、いわゆるトップダウン型のナノテクノロジーに属すると思われます。

その後1980年頃から、アトムテクノロジー・プロジェクトなど、ナノ領域に関する国家プロジェクトが日本でも開始され、トップダウン、ボトムアップを含め、ナノテクノロジーに関する萌芽的研究は、各所で進められていましたが、なんといってもナノテクノロジーが、今日のように世界の注目を集める端緒となったのは、アメリカのクリントン大統領が昨年の年頭教書で発表した科学技術政策、NNI (National Nanotechnology Initiative) であります。この政策立案までに、米国はナノテクノロジーに関する世界的調査を行い、またファイマン提唱のボトムアップ型ナノテクノロジーを推進してきた、ドレックスラー博士を呼んで、公聴会等を行ったと聞いております。この背景には、今後の科学技術開発の中で、ナノテクノロジーがパラダイムシフトを起こすほどにインパクトが大きく、世界をリードするには、ナノテクノロジーの研究開発が必須である、という認識があったと考えられます。

今日は、なぜナノテクノロジーが21世紀のキーテクノロジーとされる必然性を持つのかを、今日までの文明の流れを辿りながら考えてゆきたいと思います。

2) 20世紀文明

私たちが、丁度、47日前に行過ぎました20世紀は、一言で云うと、機械ベースの物質文明であったといえると思います。それはまた、高度に発達した大量生産・大量消費の世紀であったといえます。すなわち、20世紀には、アメリカで始まった生産技術の革新、即ち、フォード方式に代表される量産技術が引き金となり、自動車、飛行機等、交通手段の高度化がエンジンとなって、機械文明は急速な進展を遂げました。日本についてみますと、明治開国以来の文明開化政策によって、人力車から世界トップの自動車生産国へと、20世紀の間に西欧の2世紀分を体験しています。

このように高度に発達した文明を支えるのは、「マテリアル」、「エネルギー」、「情報」の3要素であります。ところが我々が生活する地球環境は、物質的には閉鎖系であり、「マテリアル」の大量消費は、当然環境的な限界に突き当たります。一方、太陽光が地表に燦々と降り注ぎ、電波が宇宙を飛び交う事に見られるように、「エネ

ルギー」も「情報」も、地表なる閉鎖系に拘束される存在ではありません。「エネルギー」あるいは「情報」的に見た地球は、宇宙に向かって開かれた開放系ですから、その意味では、将来の文明社会が更にエネルギー依存、情報依存を強めても、依然地球はそれを受け入れる余裕があると考えられます。しかし残念なことに、人類は「マテリアル」を仲介としなければ、「エネルギー」も「情報」も、人間に役立つ形として取り出し、運び、利用することが出来ない。「エネルギー」も「情報」も、「マテリアル」と独立ではあり得ず、物質閉鎖系としての地球の制約を受けざるを得ないのです。

3) 21世紀文明

人類は、このように資源的、環境的に限界の見え始めた物質閉鎖系である地球上で、これら「エネルギー」、「マテリアル」、「情報」の3要素を伸長させ、明るい21世紀文明を築くことを目指さねばなりません。資源、環境の限界を突破し、さらなる発展を支えるためには、どのような戦略が考えられるでしょうか。

まず最初に考えつくのは、自然環境と文明社会の接点、入り口、出口での「マテリアル」の流れを抑えることです。文明社会が発展して行くためには、それ相応の「マテリアル」は必要ですから、社会内部におけるマテリアルフローは維持したいとなれば、極力リサイクルを行い、「マテリアル」の製造に必要な投入天然資源量を下げ、かつ文明社会から自然に戻される廃棄物量を極力下げる。このようなりサイクル社会を築くためには、生産者から消費者に向かう流れだけではなく、消費者から生産者へと戻るいわゆる静脈産業の育成が重要となります。

もう1つの戦略は、「エネルギー」、「マテリアル」、「情報」の3要素各々についての対資源生産性を上げることです。対資源生産性は、分子にアウトプットである「エネルギー」や「マテリアル」、「情報」をとり、分母にそれに使用される資源量をとるとしますと、①分子である「エネルギー」、「マテリアル」、「情報」の量を画期的に増やす技術開発、即ち従来とは異なる資源を利用する革新的な技術により、同じ重さの資源から従来は何千倍、何百万倍ものアウトプットを取り出す。あるいは逆に、②同じアウトプットを取り出すために必要な資源量、「分母」を限りなく小さくして行く技術開発。の2通りの方法が考えられます。前者の典型例が原子力発電、後者の典型例がマイクロ・エレクトロニクスといえるでしょう。

もちろんこの両極の間にも、文明の3要素の資源生産性を高めるには、いろいろの知恵があるわけで、これをナノ・テクノロジーの視点で眺めてみることにします。

まず、「マテリアル」について考えてみましょう。

マテリアル：

ナノテクノロジーは、より軽く、より強い材質の開発に、有効であると予想されています。ナノ構造金属体等の超強力材料、超高性能機能材料が開発されれば、従来よりはずっと少ない物量で、構造物を建て、製品を生産出来ます。長寿命化による資源使用量の低減も期待できるでしょう。また、ナノ粒子による高精度・低コスト印刷や、ナノスケールの炭化物等による耐熱性・耐磨耗性に優れたナノコーティング、さらに

は超塑性を示すナノセラミック材料なども、マテリアルの体資源生産性を画期的に高める効果を、発揮するでしょう。

また、炭素系材料については、フラーレンの発見以来、カーボンナノチューブ、さらに最近では、これらとは異なる構造の新カーボン物質の発見も報告されていて、カーボンナノ材料としての新しい展開が期待されます。カーボンナノチューブは、物質としての比強度は鉄鋼の10倍以上、また、物理的性質では、分子構造の違いによって金属性を示したり、半導体性を示したりします。これらのカーボン材料に加え、機能性ナノ高分子材料についても、その将来への期待は、大きいものがあります。

次に、エネルギーについて考えます。

エネルギー：資源依存性の抑制で環境問題回避

①太陽光は、資源依存性のない、地球閉鎖系外からのエネルギーで、植物はこのエネルギーをフルに利用しています。しかし人類が天然エネルギーを、その文明活動に利用するためには、望みの形（例えば電気）に転換しなければなりません。ここで「マテリアル」が絡まざるを得なくなるのですが、太陽光のエネルギー密度はあまり高くなく、変動も激しいので、たとえ太陽電池の変換効率が画期的に向上したとしても、太陽光補集のために必要な構造体は巨大にならざるを得ず、総合的には必要資源の分母が大きくなってしまいます。エネルギー生産性はあまり高くないのが泣き所です、

しかし、地球外からのエネルギーソースを有効に利用することは大変重要ですし、系統電力の手の届かないようなニッチな分野では、大きな力を発揮するでしょう。ナノテクノロジーは、高効率太陽電池や燃料電池等を実現させるための有力な技術の一つとされており、エネルギーの蓄積・生産に寄与すると期待しています。

②原子力発電は、原子のエネルギーを使いますので、資源重量当たりのエネルギー発生量は、火力発電に比較して100万倍と大きく、これを有効に利用することは極めて重要と考えます。原子力発電では、放射線環境問題がついてまわりますが、これに関してナノテクノロジーは、ナノロボットやインテリジェント・システムの開発によって貢献が出来る、と期待されています。例えば再処理や高レベル廃棄物処理、処分にナノロボットなどを活用すれば、より効率的かつ安全な操業が可能となるでしょう。その他、原子力発電に関しては、原子燃料の生産におけるアイソトープ分離濃縮用ナノフィルター、原子炉の冷却効率を高めるナノ流体、汚染物質除去用ナノ粉末、原子力保安のためのナノスケール・シミュレーションなどのナノテクノロジーに、期待がもたれています。

次に、情報について考えてみます。

情報：文明の基礎は情報

ヒトゲノムの解析など分子生物学が発達するにつれ、生物の進化が、DNAを介した情報の再生産、伝達を基盤として行われてきたことが明らかにされつつあります。いわば情報は、生命が成立するための、最も基本的な条件であるといっても良いといえます。文明社会も、生命体の知恵にならって情報システムを作り上げ、それが文明進化の最も強力なドライビングフォースとなってきました。

文字は生命体におけるDNA、文章は遺伝子に相当する働きをします。ゲーテンベルグによる印刷技術の完成は、人類がゲノムと同様の情報複製機能を獲得したことを意味します。さらに電信、電話によって、人類社会は神経系統を発達させます。生命体と文明社会の情報に関するアナロジーは、これに尽きるものではありませんが、この双方のシステムの最も大きな違いは、情報を載せるマテリアルの関わり具合であった、といえるのではないかと思います。

石に文字を刻んでいた太古の時代は別格として、現代の国会図書館の規模からもうわかるように、情報を印刷物として蓄積し伝達するためには、相当の物量を必要とします。コンピュータの時代になっても、最もスペースをとり、物量を要したのは情報のメモリーでした。

一方生命体の情報は、生命発現の昔から、ナノレベルのDNAの上に刻まれてきました。生命体が地球全体を一つの自己組織体としてその環境を支配するほどの力を持ち得たのも、極限まで情報生産性を高めた生命の情報システムのおかげと云っていいでしょう。生命体の持つ情報システムこそが、ドレクスラーらが目指すボトムアップ型ナノテクノロジーが具現された、一つの理想型といえるのです。

現在情報分野では、マイクロテクノロジーの発達により、単位情報あたりの必要物量が驚異的なスピードで低下しつつあります。それに呼応して情報機器の可能性が限りなく広がり、情報ネットワークの拡充が新しい需要を生み、これが更なるマイクロ化推進のエンジンとなると言った、ポジティブ・フィードバックが働いてあります。この流れの究極は、生命体のもつ情報の知恵を人類社会に写し植える、ボトムアップナノテクノロジーとなるでしょう。

このように情報社会の進化は、生命力基盤の文明へのパラダイムシフトを伴います。分子生物学の進歩は、20世紀の終わり頃に急激に発達した情報科学技術（コンピュータ科学技術）によって実現しましたが、今後情報技術は生命科学から、自己組織化、自己創出など、ナノテクノロジー実現に必要な多くの知恵を受け取ることになるでしょう。機械工学、情報工学が生命工学と相乗効果を発揮することによって、文明社会の劇的に進化が始まります。そのキーワードこそがナノテクノロジーです。

ナノテクノロジーの情報技術分野への寄与は、大変大きなものであると予想します。たとえば、ナノ構造マイクロプロセッサやデバイス等が実現すれば、コンピュータの効率（ゲートあたりの消費電力）を100万倍のオーダーで改善できると予想されています。コンピュータの周辺技術である記録媒体としても、超高密度磁気ディスク（現在の磁気ディスクの容量に比べて、100倍もあるテラビット級磁気ディスク）や超高感度磁気ヘッドの開発にはナノテクノロジーが、キー・テクノロジーであります。

高度通信技術に関しても、高周波数帯域（少なくとも現在の10倍）デバイス・システムや光スベクトルの効率利用のためのデバイス・システムの創出にはナノテクノロジーに対する期待が大きいのがあります。

これらの情報・通信技術の実現は、全世界を覆い尽くす双方向通信ネットワークの発展と相まって、社会生活を大きく変えるでしょう。10年・20年後の、ボーダーレス水平ネットワーク型社会では、情報の共有化が限りなく進み、企業も学校も行政も今日的形態を止めていないでしょう。情報通信技術の高度化は、グローバル化を引

き起こす一方で、自宅にて仕事のできる仕組みいわゆるSOHOのようなローカリゼーションの原動力ともなり、「バイオ」や「医療」の進歩と相まって、個人のライフスタイルも、価値観も劇的に変化するでしょう。

このような変化の原動力となるのがナノテクノロジーなのです。

4) 結語

ナノテクノロジーは、最終的には人類が筋力を使わずに生活する社会を実現する可能性がある、ドレクスラーたちは主張しています。しかしこれは科学者に有り勝ちな、狭視野の楽観主義といえないでもありません。大体ナノロボットにかしづかれる生活が、人類にとって幸せといえるのでしょうか。科学者の善意を疑うわけではありませんが、技術は常に両刃の剣であることを忘れてはならないでしょう。

ナノテクノロジーは極めて多くの便益を社会にもたらすでしょうが、一步使い方を誤れば大きな災厄を招く危険性もはらんでおり、社会や経済に与えるインパクトも極めて多面的なものになると考えます。従ってナノテクノロジーは、従来のいわゆる縦割りの科学技術を越え、更には従来の自然科学の枠をも越えて、自己回帰の世界を包含するホリスティックな科学の上に構築される必要があります。また科学技術と人文社会学をつなぐ、学際的な共同作業と、それを統括する強力な戦略が必要となります。

政府は、本年1月に従来の科学技術会議に替わり、本年1月に総合科学技術会議を発足させましたが、そこでは社会学も含めた研究開発戦略を検討し指導する構想となっています。ナノテクノロジー研究開発に関しては、総合科学技術会議も重点テーマに取り上げ、戦略立案および成果の評価をすることになっており、これに呼応して産業界でも、総合的観点からバックアップする体制を整えようとしています。

最後に、ナノテクノロジーを含め、今後の国家の研究開発の進め方につきコメントをしたいと思います。日本は、1980代には、科学技術の多くの分野において、世界のフロントランナーとしての地位を占めるようになりました。しかしそれが直ちに産業や経済を押し上げる力となり得ず、1990年代に入ってから、経済も失速状況になり、技術プロジェクトの失敗や事故が重なるなど、ミスマッチが目立っています。

それに較べて米国は、まれに見る経済成長を示しました。この理由の1つには、米国の産・学をつなぐ強い知的基盤の伝統があると考えられます。米国は、新しい科学分野の開拓とその成果を技術に繋げ、ITやバイオ産業のような新しい産業の創出を行ってきました。日本では個々の分野では優れた研究が報告されても、それを技術的成果、新しい産業へとつなげる知的基盤が確立されておらず、総合的戦略も希薄な恨みがあり、これが日米の差を広げる一つの原因となったのではないかとの思いを強くしております。日本も科学技術の分野で、もはや先人のいないフロンティア領域に入ったことを認識し、強い知的基盤の構築を行うことが必要です。知の先導者たる学・官に対する、産業界の期待は大変に大きなものがあります。新しい知の創出は、学・官の研究者皆さんの研究成果が技術を押し上げ、さらには新しい産業へと繋がって、初めて完結します。どうか、この会が、産・学・官をつなぐ新しい知的基盤の創出に向けた第一歩となりますよう祈念し、第二期科学技術基本計画が多くの実を結ぶよう

期待してお話を終わらせていただきたいと思います。

以上

「マイクロマシンからナノ・マニファクチャリングへ」

下山 勲（東京大学・教授）

本稿は、平成13年2月16日（金）に開催された「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」における下山勲講師の講演内容を事務局が文書化したものです。

先程の秋元会長のお話は材料からの立場というのが非常に大きかったと思いますが、私は少しトップダウンという立場から、マイクロマシン、あるいはナノ・マニファクチャリングということでお話しさせていただきます。

（以下スライド併用）

○これは、今から10年前に始まったマイクロマシンセンターのプロジェクトの成果の一つをお借りしてきたのですが、このマイクロマシンと呼ばれているものは長さが1センチとか数センチのオーダーです。この話が出るときにいつも我々が思うのは、一番最初に「ミクロの決死圏」というのが非常に大きなインパクトでありまして、「マイクロマシン＝ミクロの決死圏」という考え方がかなりあったと思います。

ところがこの中に埋め込まれているいろいろな技術というのは、例えばこの光エネルギーの伝送デバイス、あるいはマイクロ波エネルギーの伝送デバイスというのは、マイクロテクノロジーが非常にここに入っているわけです。あるいはこのマイクロCCDカメラ、あるいはこのレンズ、あるいは焦点を調節するような機構、こういう機構自体、この中身のコンポーネント自体は非常に最先端の小さなテクノロジーが入っている。ただ加工精度が大体1ミクロンぐらいから上があるのだな、そういう意味で、このようなものはマイクロテクノロジーを利用したマシン（略してマイクロマシン）と認識されていると思います。

○ところがMEMSとかMSTと呼ばれているここですが、欧米ではこの10年でいったいどうことが起こったかという、オプティクス（光）、ケミカル、あるいはバイオロジー、このようなものと積極的に結びついて、新たな先端的な複合領域が形成されつつあると考えております。私も6年ぐらいMEMSというカンファレンスのプログラム委員会で論文をいろいろ読ませていただきましたが、そのときにもオプティクスとか、あるいはここにあるOptoMEMSとか、あるいはその下にある μ TAS、小さな流路を掘ってその中でケミカルな、あるいはバイオロジカルなことをいろいろやってみよう、あるいはLabOnAChipと呼ばれるようなものになったりしています。さらにBioMEMS、そこで遺伝子を解析したりと、非常にターゲットを絞った研究開発が行われています。それは、ある意味で今までの製造科学の人たちの発想ではないような発想の人たち、つまりニーズを持った人たちと積極的に結びついて、そういう領域を切り開いていったと考えることができます。

さらに設計や加工の役割分担が進んできて、一つは設計の支援ソフトウェアがそろそろ出回ってきています。こういうものを利用したら、設計の部分とファブリケーション、あるいはファウンドリの部分を切り離して、どんどん先に進んでいく、人の成果の上に立ってさらにアドバンスなことができていく、こういうことが可能になってきているのではな

いかと思います。それともう一つ、この対局ですが、ファウンドリサービスが充実してきている。つまり役割分担がはっきりしてきて、人の成果の上に立ってさらにどんどん進歩していく、そういう枠組みができてはじめてきたと考えています。

ベンチャーの成功例がどれぐらい出てきているかわかりませんが、こういうことも可能性としてある。大きな企業ではなかなか初めの一步が踏み出せないようなところでも、ベンチャー企業ですとリスクを負いながらも、ハイリスク・ハイリターンということでやりはじめてきたと考えています。

○この2つをまとめてみますと、こちら側がMEMSやMSTという語感から来るアウトプット、こちらがマイクロマシンという語感から来るアウトプットです。これはいずれも1ミクロン程度の寸法精度の微細加工技術と、それからほとんど同義かもしれませんが、半導体加工技術。ただし微細加工技術とは別に半導体に拘束されるわけではなくて、メカニカルな3Dのストラクチャーを作るとか、そういうことも含めて微細加工技術が非常に役立っている。それからさらに少し統合した要素技術としてのセンサ、アクチュエータ、こういうものを基盤として立っているのだけれども、マイクロマシンは検査機械とかマイクロファクトリというような語感を持っていて、MEMS、MSTはオプティクスとかケミカルなもの、あるいはバイオロジカルなものという方向にターゲットを絞ってきたアウトプットであるような語感を持っています。しかし、全体をひっくるめて見たら、やはり同じような土台に立って、同じような発想で研究開発がされてきていると考えています。

○そこでナノテクノロジーという言葉を考えてみますと、大きく3つに分かれると思います。一つは先程からお話がありましたような、物理的なナノ操作技術というものです。原子・分子のマニピュレーション。代表的な例は、STM/AFMを使って非常に冷たい状態、活動がないような状態で1個1個マニピュレートしていくというものから始まる、原子・分子のマニピュレーションです。

それから新しい物質の生成技術で、例えばカーボンナノチューブとか導電性ポリマーとかタンパク質合成。こういったものは、今までと比べて製造技術のテクノロジーとして格段のアドバンストなものがあるとは必ずしも思いませんが、しかし出てきたこういう材料自体、物質自体が今までにないような非常にうまい機能を発現してきている。さらにそのスケールが非常に小さくなってナノまで考えているということで、こういう物質、材料の生成技術が非常に重要だろう。

さらに3番目ですが、超微細加工。ここで超微細加工というのは、今まで我々の業界では「大体1ミクロンぐらいが加工精度の限界かな。それぐらいで紫外線露光も大変になってくるし、X線を使うのはちょっとね」という状態だったわけですが、さらにナノのオーダー、1ナノから1ミクロンの間ぐらいのまでの超微細加工、それに伴う組み立て、測定、位置制御技術、こういったものをナノ・マニファクチャリングと呼んでいいのではないかと思います。本日のタイトル、「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」の「ナノ・マニファクチャリング」とは、私のディフィニションですが、こういうところに位置づけられるのではないかと思います。

具体的な加工技術というのは、一番典型的な例がエネルギービーム加工と呼ばれるもの

です。これはいろいろあって、フォトリソもこの中の一つであると思いますが、それ以外にもたくさんビーム加工はあるでしょう。後程そういうお話があると思いますが、こういったものを使って超微細加工、あるいはこういったものやっこ。

そうしたときに、産業化、つまり産業になるのはいったいどういう時期に起きるのかと思って、書いてみたのです。これはいいかげんな図ですが、例えば超微細加工組み立て、こういったところは比較的ニーズもはっきりしているし、やれば何とかなりそうです。それから物質生成もいろいろなものが出ていますが、こういうものは比較的近い将来産業として大きくブレイクしていくのではないかと私は考えています。原子・分子のマニピュレーション、あるいは例えば遺伝子の中にある1原子を切ったり貼ったりというようなものは、産業としてブレイクするにはまだしばし時間がかかるだろう。ずっと時間をためておいて、いろいろな成果が出てきて、あるいは研究者・開発者の層が厚くなって、ニーズがはっきりしてきたときにどんとブレイクするような技術ではないかと考えています。

○例えば、これはポンチ絵ですが、ナノマニファクチャリングの具体的なイメージとしてどんなものがあるかということです。これはAFMあたりのカンチレバーの先にある非常にとがったプローブの先端ですが、この先端を非常にファインにナノオーダーで加工してあげようというのが、典型的なナノテクノロジーの始まりではないかと思っています。

ただ、このあたりの精度自体はナノかもしれないけれども、さらにこういうふうに集まってカンチレバーを作って、それから先、外にいろいろなものを持ち出さないと、こういうものは人が使えないわけです。いくらナノで原子・分子を1個マニピュレートできても、それがある程度の大きさを持たないと我々の使う製品、あるいは産業化としてはできないのではないかと。そうすると非常に微細な加工からある程度大きな、我々が今まで経験してきたところを通して、例えば寸法が1～2センチぐらいの我々の手でハンドリングできるぐらいのパッケージに入って、そういったものが出てくると考えられます。

あるいはこれはいいかげんに書いたレンズですが、このレンズ自体は例えば光を扱いますからそれなりのミクロの大きなあたりのスケールを持つと思いますが、その表面加工自体をナノオーダーでやってやると、例えば加工精度から来るノイズを抑えることができるということも考えられると思います。それからこれは有名になりましたが、DMD、ミラーを直接駆動してプロジェクターみたいなもの、あるいは最近だとデジタル映画館に応用していこうというのですが、このミラーの表面精度をきれいに仕上げるということ一つを考えても、ナノスケールで加工ができていくことは非常にメリットが大きいと考えられます。

○ナノ・マニファクチャリング、つまり1ナノ～1ミクロンぐらいまでをターゲットにした超微細加工が可能になってくると、いったいどういう機能が出てくるか。一つには、これはよくいわれることですが、だんだんとスケールが小さくなってくると支配法則が変わってきます。例えば我々の世界だと重力が支配的だけれども、だんだん落ちてくると例えば静電気力が支配的になったりとか、さらに落ちてくるとどうだという、そういった支配法則が変わってくる。

それに伴って例えば熱の容量が小さくなったり、あるいは弾性が非常に大きくなって、

マスの影響が小さくなって時定数が小さくなるとか、あるいはRFを扱うときに非常に広帯域のデバイスができるというようなことが出てきます。さらにその表面、あるいは加工技術がナノスケールでできてくると、加工から来るノイズを低減していくこともできるわけですが。さらに高密度や高集積にいろいろなデバイスを集積化することが可能になってきますから、例えば高密度に見られるようなディスプレイができるとか、あるいはいろいろな機能が1つのディスプレイ上にたくさん集まっているというような、高密度高集積なデバイスもできるだろう。あるいは最近の有機系の材料とナノ・マニファクチャリングが結合すると、非常に薄いデバイスができる、あるいは柔らかいデバイスができる。つまり紙の厚さで文字や映像が3次元で出てくるようなディスプレイもできて、紙がいらないような世界が来るのではないかと考えられています。

さらにこの一番最後ですが、新機能で小さなところにいけば量子効果をはじめとしたいいろいろなナノ独特の機能が発現してくるわけですが、これをいかに例えば1センチなら1センチのプロダクトとして取り出していくかというのも大きな機能の発現で、興味のあるところですよ。

○以上をまとめてみますと、マイクロマシンやMEMS、MSTというのは、僕は基本的には同じものである、つまり1ミクロンから上ぐらいの微細加工技術と、微小部品と、それらを組み合わせたシステムデバイスの技術であると考えられます。それに対して今日ここでいわれているナノ・マニファクチャリングという言葉は、私の語感では加工精度がナノメートルオーダー、つまり1~1000ナノぐらいまでの超微細の加工技術であるというふうに、私なりに定義してみました。

○こういう技術が可能になってくると、トップダウンに考えてどんなニーズが出てくるのでしょうか。いいかげんにさらさらと書いていただけてすべてを覆い尽くしているわけではありませんが、例えば大きく分けて情報通信とか、あるいは環境とか医療福祉に非常に大きなインパクトが出てくる。一つには高速光通信ネットワークデバイスということで、例えばファイバーが家までやって来たときの幹線系とのスイッチとか、あるいはどこまで光で来るかは知りませんが、家の中まで来たときのそこから先のスイッチなどです。それから光通信系（オプティクス）ですべてやっていこうというような話も出てきています。つまり、どこでもだれでも、場所を選ばずにいつでもというような高速な光通信ネットワークを安く提供する一つのキーテクノロジーとして、ナノ・マニファクチャリングがあるでしょう。

それから先程も申し上げましたが、今のところコンピュータのディスプレイというのはごついわけですが、非常に薄いディスプレイを作っていく技術が出はじめています。それをまとめていくと非常に発光素子の密度が高い、かつ非常に薄い、例えば100ミクロンぐらいのディスプレイで柔らかいといったものが出てくる可能性が非常に高い。

また、ウェアラブルとか、モバイルのデバイスも小さくなり、あるいは体に巻きつけるなり、ある程度小さくなれば非常にうれしいようなデバイスになってきますが、こういうものに対してもナノテクノロジーは大きなインパクトがあるのではないかと。

それからインターフェイス、あるいはデータストレージもAFMで原子・分子1個1個

というようなデータストレージも考えられていますが、こんなものに対して非常に大きなニーズがあると思います。

環境問題については、例えばコンピュータ1台についても、そのコンピュータがどういう来歴を持っているか、どういうプロセスで作られて、中の材料はどうか、これを分解するにはどうしたらよくて、どのような廃品が出て、あるいはリサイクルをしていくかというようなことを、ずっとタグに収めていくようなチップ。あるいは環境情報、あるいは人の身体、生体情報も含めてですが、そういったものをセンサとして取ってネットワークしていくようなセンサネットワークというものも、このナノ・マニファクチャリングが大きく貢献できる、というかナノ・マニファクチャリングが要求されている分野であると考えられます。

さらに医療・福祉で見ると、例えば細胞を利用してこういうタンパクが来たらどういう反応が起こるかといったような診断チップから始まって、ドラッグデリバリーシステム（DDS）。昔の「ミクロの決死圏」はその中がマシンだったわけですが、そうではなくて要求仕様をきっちりと満たすような、夢物語ではなく、きちんと患部に行ってドカンというタイプのDDSも考えられてきています。さらに機能とか組織再生、ティッシュエンジニアリングも含めた、ナノスケールオーダーで発現してくるメカニズムを利用して、最終的には人間が触れるようなものができると考えられるわけです。

○次の表は少し小さいのですが、ナノテクノロジーのマップを私なりに書いてみました。どういうふうに分けたかという考え方だけなのですが、縦軸をマテリアル（材料）、ファブリケーション、どんな機能が出てくるかといったファンクション、最後がどういう最終製品、プロダクトが出てくるかというふうに取り、横軸にメカニカルなもの、それからオプティカルなもの（なかなか区別はつかないのですが、多少1つ2つ右左、あるいは前後にずれるのはお許しください）、それからいわゆる電子技術、フィジカルなもの、ケミカルなもの、それからバイオリジカルなもの、メディカルなもの、こんなふうマトリックスを作ってみて、いったいどんなものがナノテクノロジーの中に入るかと考えてみました。

○これは大きくしたのですが、ナノテクノロジーとしてどういう材料が考えられるかということです。ずっと横で見ると、例えば金属、ガラス、シリコン、ナノ磁性体、超伝導材料、カーボンナノチューブ、導電性ポリマー、有機材料、DNA、タンパク質。こういうものが考えられるわけですが、これ自体ナノ・マニファクチャリングとしてどういう材料を使うか、おそらく材料を使う立場になってくると思いますが、そういったものを使っていきましょうということです。

○それに対して、マニファクチャリングのメインは加工だと思います。例えば削るとか組み立てる、変形する、表面を改質する（例えば親水を疎水にしてやるなど）。あるいはある程度大量にいろいろなものを生産しなければいけない場合には、原子・分子を1個1個マニピュレートするよりは何か型を作っておいてその型の情報を転写していくような、従来からメカニカルな加工として行われていたものをさらにナノスケールに展開していくことは、大いに可能性のあることだと私は思っています。

さらに光を利用したレーザーとか近接場光とか、リソグラフィを利用したようなこういうオプティカルなファブリケーション、あるいはケミカルなDRIEとか、エネルギービームはフィジカルな話ですが、原子・分子マニピュレーション、あるいはLIGA、ケミカルなものでCVDとかMBEとかたくさんあります。それから生物学的な加工としては自己組織化・組み立て・増殖、さらには遺伝子から何かが発現してくるか、あるいはタンパク質が合成できるかというように、非常に大きな加工のエリアがあると考えられます。

○さらにそれを積み上げて機能として発現させるときには、3次元の機能、例えばこれ一つ取ってもオプティクスで結晶構造を作るという非常にうれしい機能が発現してくる。あるいはアクチュエータ、ナノモータ。アクティブプロービングというのは、例えばAFMのカンチレバーだけを取ったときに、ある程度パラレルにいろいろなことをやってやろうとしたら、カンチレバー自体を少しアクチュエートしていかなければいけないだろう。パラレルにいろいろな情報をざっと読み取るなり、あるいは書き込むなりするとき、一つ一つのAFMのカンチレバーを動かしていかなければいけない。そういうふうにアクティブにプロービングしていくような技術です。あるいはスキャニングといってもいいですが、そんなものです。

コネクタも重要です。いくらナノスケールのオーダーでいろいろなことができて、それを外界に出して我々が使うためには、センチメートルオーダーまで持ってくるには必ずコネクタが必要になってきます。それから物質移動ですが、ナノスケールの物質移動としては、例えば1ミリのところ、あるいは数百ミクロンのところで μ TASというのを考えていますが、それがナノスケールになったときにどういう物質移動があるかはまだ非常にアンノーンなわけです。ただ細胞の中ではそういうことが行われる。微小力の計測、精密位置決めというのも非常に重要なことだと思います。

あるいはレンズ、ミラー、導波路というようなオプティクスなデバイスをどういうふうにナノスケールで正確に作っていくか。それから全部フォトニックデバイスとして、エレクトロニクスを使わないでやってみようという話も当然出てくる可能性はあります。発光素子、ホログラム、それからセンサ、トランスデューサ。エネルギーの供給もナノスケールになってきたらとどうなるかということも、非常にチャレンジングなテーマです。それから量子効果デバイス、量子ドット、さらに有機EL、有機太陽電池、あるいはタンパク質を利用したような匂いセンサ、あるいは流体の移動、それからナノバイオマニピュレーション。このように非常に幅広い機能がナノの中で発現して、これは必ずしも量子効果だけではないわけです。あと5年や10年で考えるときのアウトプットは重要なことであると私は思っています。

○そういうものを積み上げて、製品としていったいどんなものができるか。よくいわれるのはデータストレージとかウェアラブルなもの、ヒューマンインターフェイス、あるいは五感に代わるようなセンサ、あるいはいろいろなファンクションがインテグレートされたようなインターフェイス、RFのデバイス、光スイッチ、光ネットワークのデバイス、それから薄くて柔らかいデバイス、3次元にいろいろなものが見えるディスプレイ（めがねがなくても見えてしまうもの）。情報コンセントも、今のようにいろいろな、例えば電話の

コンセントとか、あるいはもう少ししたら何のコンセントが出てくるか知りませんが、デジタル何とかのコンセントというものではなくて、1つのコンセントにしておいて、そこから先はデバイスで処理していくようなマルチ情報コンセントというものもあるだろう。それから超LSI、スキャニングマイクロスコプ（SEM、STMなど）、超小型の計測機器、LabOnAChip、並行にいろいろな反応ができるような反応器。マイクロトータルアナリシスシステムと呼ばれているようなもの（ μ TAS）、DNAチップ、ポストゲノムチップ、細胞チップ、ドラッグデリバリーシステム（DDS）、診断チップ、遺伝子治療。機能・組織再生、あるいは人工の聴覚や視覚という医療まで、情報から医療まで幅広い製品が可能であろう。ただ、何をやるかというのはまた話が別になると思います。

○そういうことを考えて、例えば光通信のロードマップを書いてみるとそれなりに書けてくるわけです。フォトリックのクリスタルなどを利用したようなもの、あるいはフォトリックのルータとか、こういうものをずっと考えていくと、将来の情報化の大きなキーテクノロジーとなっていくだろう。

○あるいはこういうディスプレイを中心としたような*TGシステム*ですが、例えば電子インクとか、電子ペーパー、フレキシブルなディスプレイ、3次元ディスプレイ、こういうものを目指して、例えばホログラムとか、あるいはそれ以外のめがねなしでも見えてしまうような3Dの表示、そういうものに向かってずっとロードマップが書けていくと考えられます。

○これは私感ですので、よくわからないとか反対意見もいろいろあると思いますが、こちらを時間軸に取りまして、こちらに産業化度というものを取って考えてみると、初めの一步というのはやはり大学、研究所、あるいはデザインセンターのようなところが中心となって、日本全体でやっていこうという機運をどんどん盛り上げてアウトプットを出していくだろう。そうしてくると、やがて産業・企業のネタは近い将来必ず出てくる。そういうものを使って専門性の高いベンチャー企業が容易に興せるような仕組みを作っておく。さらに専門性の高いベンチャーが、ここでももちろん製品にしてもいいし、企業に産業化の提案を行って企業でやってくださいと特許、知的所有権とかたちで売っていくこともあります。なかなか企業の中でナノテクノロジーをいちにのさん、でやりはじめようというのは、敷居が高いところもまだあるとは思いますが。そういうところで大学に向けて、あるいはベンチャーに向けて、例えば人、あるいは面積・設備といったものを利用しながら、産学官協同でこういうプロジェクトを進めていったらいいと思います。

そうしたときに、やはり時間がたないと産業というのは出てこないだろう、企業の中でナノテクノロジーを利用した自律的な製品開発が行われるにはまだしばらく時間はかかるだろうけれども、それを待っていたらいつまでもスレッシュホールドを越えないと思うのです。ずっと中にたまってきたエネルギーが、ある日突然スレッシュホールドを越えて爆発するということが必要だろう。そのためのエネルギーを蓄えていく段階として、こういう仕組みを作って三位一体で研究を進めていく。ただし、そのときに非常に注意しなければいけないのは、どういうニーズがあるかということをしっかり見ていかなければいけな

いだろう、単にナノテクノロジーの技術開発をS Fでやってはいけないと考えています。

○まとめてみますと、こちら側がスケーリングになっています。1メートル、1ミリ、1ミクロン、1ナノです。最終的な製品は、やはりセンチメートルオーダーのものが出ざるをえない。あるいはミクロンのものをもらっても、子どもが飲んだらいったいどうするのだということになるわけです。使いようがない。最終製品は使える、人間がハンドリングできる範囲で、やはりセンチ、あるいは高々ミリぐらいで、例えばネットワークデバイスとかディスプレイ、ウェアラブルモバイル、データストレージ、あるいは環境支援デバイスとか、あるいは医療のいろいろなチップ、こういうものが出てくるに違いない。そうしたときに、今までマイクロマシン、MEMS、MSTと呼ばれていたものは、1ミクロン程度で加工して、1ミリちょっと下ぐらいの100ミクロンあたりの部品寸法を持っていて、最終のパッケージになったものは例えば1センチぐらいのオーダーを持っている。それに対してこのナノ・マニファクチャリングが入ってくると、その1ナノ～1ミクロンの間の加工精度がここで保証される。でもそのアウトプット、出ていき方としては、ここで蓄えられた技術が部品なり製品になってくるということで、いわば今まで培われてきたマイクロテクノロジーと、ナノ・マニファクチャリングというこれから大きく期待されているテクノロジーをうまく融合させていくことが、産業化の大きなキーポイントであると考えています。

○そのときにどんなことを注意していかなければいけないかというと、ニーズを必ず指向しなければいけないだろう。結果としてのナノ・マニファクチャリングとはいったいどんなものかとしっかり見きわめて、研究開発を進めていくことになると思いますが、そのときにどこかで組織ができたとして、その組織自体が閉じていてはいけないだろう。ニーズを持った人が容易にこの分野に入ってきて、協調して製品開発なり、あるいはいろいろなプロトタイピングができるようにする仕組みがぜひ必要だろう。それから機能要素、あるいは要素を組み合わせたシステムプロトタイプまで作らなくてはいけないのではないかな。いくらナノで何かが動きましたといっても、ただだけではナノ・マニファクチャリングとはいえず、ある意味で機能要素まで、あるいはプロトタイピングまでしていかななくてはいけないのではないかと考えています。それはどうしてかというと、ニーズを指向していくからです。

それから組織間の壁を越えた活動のネットワークのオーガナイズが必要だろう。企業の壁はなかなか厚いようなところも見受けられますので、それを低くできるようなネットワークのオーガナイズが必要になってくるのではないかな。また、アイデアと元気のあるベンチャーのサポートで、こういうところで知的所有権にかかわるようなものをどんどん出して企業に提案していくだろうと思います。それから専門教育を充実したり、研究室の層を厚くして、知的な財産を日本の中でどんどん増やして、ある日突然ブレイクするかたちにぜひ持っていかなければいけないだろう。

最後になりましたが、この中には当然アプリケーションの中ですべてをやるわけではないと私は申しましたが、例えば環境問題や倫理の問題で、やるかやらないか、やっていいのかどうかという検討はずっと続けていかななくてはいけないと考えています（拍手）。

質疑応答

(矢部) かなり幅広い範囲のご説明をいただいたように思います。一つだけ私からお願いします。ベンチャーのイメージをずいぶん出されていましたが、マイクロマシン、MEMSというのはかなりベンチャーのイメージが強いのですが、ナノ・マニファクチャリングになったときに、ナノの加工をしたりするのでかなりしっかりした大きな装置というイメージと、出来上がる製品がかなり小さいからベンチャーでもできるというイメージ、そういう2つのイメージがあり、うんと大きな会社がやらなければいけないのか、あるいはベンチャーでもできるのか、2つのイメージのどちらも持てるような気がするのですが、先生はその辺はどのようにお考えでしょうか。

(下山) 初めの一步については、今日話題にしようかと思いつながら時間がなくてできなかったのですが、だれでもできるよういわれるインフラ、それがどこかにファウンドリがあるのか、あるいはネットワーク型でここに行けばそういうことはやってもらえるというようなシステムかわかりませんが、とにかくそのような作るためのインフラをきちんと整備しないと、こういうことはベンチャーどころか大企業もやっていけないだろうと考えています。

(矢部) わかりました。ではネットワークに基づいた新しい製造システムという意味ですね。

(下山) そのためには、壁をずっと落としていかなければいけないと思います。

(矢部) どうもありがとうございました(拍手)。

本稿は、平成13年2月16日(金)に開催された「ナノ・マイクロマシンに関する国際シンポジウム」における藤正巖講師の講演内容を事務局が文書化したものです。

今日は「ナノテクノロジー 見えない機械への挑戦」という題を持ってきたのですが、私は今、具体的にこの世界で仕事をしている人間ではありません。今から十数年前にマイクロマシンを立ち上げた人間です。マイクロマシンプロジェクトを立ち上げるときに、私は生物系です。当然のことながらナノの世界に興味を持って始めたのです。今まで山下先生ほかからナノ・マイクロマシンプロジェクトという話をされましたが、私はナノの機械の話をします。マイクロマシンのプロジェクトを立ち上げたときの反省もあるのですが、向が今までとずいぶん違うということを少し申し上げたいと思います。

ご存じのように、ナノテクノロジーの話は、今日の午後ダクン・ムーアさんが話されましたが、アメリカのナショナル・ナノテクノロジー・イニシアチブが9月ごろに入スタートしたので、日本の政府がナノテクノロジーをやらなければいけないと大騒ぎになったというきっかけがあります。それみたことかと僕は思っているのですが、それでいろいろなジヤールのいろいろな予算を持っているところが全部並列にナノテクノロジーをやろうという日本らしいのだと、これは私にとっても非常に不愉快な領域になっております。それでもナノテクノロジーが重要であるというのはいけません。今年初頭に財務省の次官と幹部20人ぐらいのところに呼ばれて、ナノテクノロジーがどういふものかというふうになるのかという話をしろということで、わかりやすく説明してきました。財務省が興味を持っているぐらいですから、当然のことながら各省庁は非常に興味を持っており、エッジニアリングのサイドの方も興味を持っておられるということです。

(以下スライド併用)

○私にとってナノテクノロジーの最初は、今から15～16年前、細胞が急速凍結乾燥法によって中が見えるようになったところから始まります。左の上の図です。私は生物系ですから、生物は機械だと思っで今までずいぶんいろいろなことをやってきました。この写真は「セル」*から取っているのですが、*広川*さんという解剖の教授がくれたこの写真を見たときに、私はこれは大変だと思いました。理由は、生物はまさに機械で、ここにある細長い横の棒の幅が10ナノメートルぐらいの細胞の骨格です。その間に橋渡しになっているブリッジがあります。そして、ここにもものを運んでいるものがあります。これが全部モーターとかというタンパクで、この部分の長さが100ナノメートルあります。この100ナノメートルのタンパクが機械を動かしているという構造が全部の生物に共通であるということを知りました。もちろん、筋肉があつてとか、髪の毛があつてという話はいいのですが、それよりも小さいところにエンジンがあつた。これが非常に奇異なのです。

私は、これは何だろう、共通の理論があるのかと考えました。この世界から何か我々が

エンジニアリングに転用できるものがあるかなというのがそもそも考えはじめた基礎です。ちょうどそのころこの技術ができはじめて、ものが見えはじめたものですから、細胞の中が徹底的に調べられました。それから、皆さんご存じのように、今度の「サイエンス」が人間のジーンの 100%の報告号です。今度の「サイエンス」はぜひともお買いになることを勧めます。そのように人間の設計図が全部わかる時代が今こようとしているわけです。

そのときに、その設計図から作られたモータタンパクというタンパクが、これはモータタンパクのミオシンの分子ですが、機械としてどういう意味を持っているかというのが、我々の次の世代のエンジニアリングを作るのに非常に大きな意味があると私は思ったわけです。何も生物がどう動いているかということを理解しないでよろしい。生物がこの寸法で動かしている原理は何があるか。これを理解すればいい。それによって機械を作ればいい。機械を動かす原理にすればいい。それはできるのかできないのか。それをまず決めなければいけないということです。

いまだにミオシンのヘッドと、ここにアクチンという細胞骨格がありますが、その間で相互反応が起こって筋肉の収縮が起こっているという説が取られています、どうもこれは化学反応ではないらしいという話が非常に強いわけで、まだはっきりした確証はありません。

○ナノテクノロジーの登場の背景は2つあると思います。1つは自然を観察する立場からスタートする。生物というのは自然の作ったナノの機械である。これは非常に柔軟で環境適応性にすぐれており、しかも自動的にできる (Auto-assemble)。それから、発熱が非常に少ない。エネルギーの効率が非常によろしい。我々の筋肉でもほとんど発熱しないわけです。機械はすぐ熱くなるのですが、それがない。というわけで、新しい機械の設計原理があるはずだ。その原理を人の作る機械 (人工物) に使えるはずだ。

ただし、このときに注意していただきたいのは、生物はこう動いているよと言うと生物学者にもものすごく反対されます。なぜ反対されるかというと、論理がはっきりして、きちんとした答えが出て、モデル系ができればいいのですが、できませんからそういうことができないわけです。ですから、生物からこういう原理が取り出せる、こういうふうに動いているのかもしれないという原理が見つかってそれで機械が作ればいいわけです。飛行機を作るのに何も鳥のまねをしないでいいのと同じです。そういうことが私はナノテクノロジーの世界では重要だと思っています。

○ご存じのように、筋肉は上腕二頭筋から始まり、小さく分解していきすと最終的に細胞骨格のアクチンとミオシンという繊維のモータタンパクの束になります。これが相互作用して、何十セットとそろった中で、幅 2.5 ミクロンのサルコメアが2割縮んで2ミクロンになる。それだけで収縮が全部起こるわけで、これは生物の種によって変わらないわけです。今から 15 億年前に全部できてしまったのです。

類推を考えてみると、ミオシンのモータタンパクは 100 ナノメートル×10 ナノメートルのエンジンのピストンである。それに対して構造体の方はアクチンという細胞骨格タンパクで、10 ナノメートルより小さいタンパクですが、無数につながっています。もう1つ重要なのは、サルコメアという単位がありますが、そのサルコメアでできた筋肉そのものが

1立法ミリメートルの中に 10^{13} 個ぐらいの素子が入っています。これは非常に重要な意味深のところで、 10^{23} 個というアボガドロ数になりますとマクロの世界に入ります。これは古典物理学が効くわけです。そうかといって1個、2個の原子で電子系の世界は量子の世界、不確定の世界で、はっきり量子力学で解ける。ところがこのちょうど中間、 10^{13} 個のところあたりはどちらでもないというところが非常に重要で、ちょうど今、電子素子の量子素子が入っている世界とちょうど同じです。だから、ここに新しい論理があるかないかというところが非常に重要です。普通、マクロの人たちは、ナノ・マニファクチャリングをやろうと上から下りてくるとそのまま古典物理学が使えるのではないかと思っている。しかし、私はそうはならないと思っているわけです。

もう1つ重要なのは、エネルギー源が何かというのがいまだにわからないのです。ATPだといわれています。長い時間かけて熱平衡の世界ではATPです。これはエネルギーの保存則がちゃんと成り立ちます。熱平衡が成り立つのです。学士院賞をもらった阪大の柳田さんあたりがいろいろなことをやってみると、1 ATPのエネルギーを与えても決してこのATPに見合うだけの力学動作が起こらない。ときには倍の仕事が起こるということがあり、この世界は確実に違う世界で、たぶんATPとほかの力がうまく相互利用されているのだというようなことがあるわけです。そういうところから私は入りました。

○細胞を見てみると、非常にはっきりするのは、タンパクが非常に重要である。タンパクをコーディングしているのは遺伝子である。DNAである。だからDNAの設計図が全部わかるのだから、それからいろいろなものがわかるだろう。モータタンパクはヘッドを細胞骨格の上に置いて、長さが10ナノメートルぐらいですが、一步一步歩いている。ただし、筋肉の収縮の場合はその10倍のスピードで動く。いったいどうしてそう動くのかわからない。1 ATPサイクルで1歩動くのではなくてその10倍も動いてしまう。これは何なのだろうということがあります。

まさにDNAは設計図で、4つの塩基（アデニン、グアニン、シトシン、チミン）で書いてある。読み取るのはDNAポリメラーゼです。これは完全な機械で、テープリーダーのようにDNAを読んでくれます。その部材は20種類のアミノ酸でしかない。自動加工できる機構です。機能部品はタンパクで、それがすべてをコントロールしています。製造機械はリボソームという核酸とタンパクの複合体です。それで膜の表面で一生懸命作っています。そういう過程が非常によくわかりはじめたところです。

○工学系の方も今一生懸命やっています。ポリメラーゼが、ちょうどテープリーダーで読むようにDNAの鎖を読んで複製していきます。しかも、それは非常に複雑に何回もコイルを巻いたDNAの長いコイルの中から作るということです。

○今は生物から考えましたが、ここの世界、皆さんのいらっしゃる世界は違う世界になります。これは人の作る機械の立場からスタートしています。これはナノの寸法の加工技術ができそうだからで、先端加工技術の開発競争が今始まっているといえると思います。主流はシリコンの加工技術を利用するということです。ナノの世界は当然のことながら電子を含めると量子、波動力学の現象を含んでいます。その世界は新しい機械の作動原理が

登場する領域であると思っています。新しい量子素子ができるのではないかと考えています。

○例えばメモリの世界では、機械的に読む世界ではもうサブミクロの世界へ入ってしまっているわけです。A F Mのチップのような読み取り装置が次々と作られはじめて、どんどんメモリ容量が増えていくわけです。昔は100ギガのディスクがこんな小さなパッケージに入るとは思っていませんでした。そういうことからいってもナノテクノロジーは当然産業界には存在する。

○一方、生物系を見て、機械系、いわゆるエンジンを使った機械を見てみると、ない領域がある。それはいわゆるマイクロマシンの世界から下、人が作るいろいろなタンパク分子から上の部分です。この領域は何もない世界だった。ところが生物系では、例えば赤血球は7ミクロンですからこの辺にありますし、1ミクロンのところにバクテリアがいて、その下にモータタンパクとかあらゆるタンパクはそこから数ナノの世界に分散しています。これは全部機能素子なわけです。その素子はDNAで作られる。生物はまさに我々が作ってこなかった世界でエンジンを作り、その世界で動く機械を作り、やってきたわけです。だから、この世界を理解しようと思ったら、1つは生物を見ることであるというのは確かなのです。一方、電子系ではすでにもっと細い世界に入っており、いろいろなカンタム素子の話が次々に登場しています。

○実はこの話のそもそもの始まりは1980年代の終わりごろ、「There's Plenty of Room at the Bottom」という有名なリチャード・ファインマンの言葉から始まっています。1959年にアメリカの物理学会でリチャード・ファインマンが言ったのですが、「小さい世界には十分な技術開発空間あり」ということです。ドレクスラーはその感化を受けた人です。ファインマンは、大きな加工機械で小さなものを作り、その小さな加工機械からもっと小さな機械を作る。そうやっていくといつかは非常に小さな機械ができるというトップダウンのテクノロジーを主張したわけです。

○1990年ごろからこの研究が始まったのですが、彼は有名な『ファインマンの物理学』を書いているわけで、『ファインマンの物理学』にあの左の絵が書いてあります。私が論文を投稿すると、たいがいこれに抵触するというので生物物理学会などからリジェクトされますが、要するにランダムな熱振動によってエネルギーを熱の場から取り出すことができないという理論です。

ところが最近になって、このラチェットにあたる分子が見つかりました。要するに、カンタムの世界では素子は熱の場からエネルギーを取り出すことができるということがわかりはじめています。そういう論文ができはじめています。そういう世界が登場した。

○私もそういう世界でただ1つだけ仕事をしたのは、この論理計算をやって、小さな素子を作ったということがあります。熱振動で動く機械ができないかと思ってやったことがあります。それがただ1つの私のこの世界でやった仕事です。いくら論理計算をやっ

て、動くと言ってもどこも受けつけてくれません。

○そのころちょうどドレクスラーが登場して例の『Engines of Creation』で、相沢さんが訳した本がありますが、ナノテクノロジーを主張しました。私の感じている彼の一番いいところは、エンジニアリングが従来の工学と探検的工学と2つに分かれるということを言ったことです。ナノテクノロジーという世界は、従来の日本の得意な機械技術をどんどん精巧にして機械の方から攻めていって、unknown だけど何が作ったらものができるという世界ではなく、論理からスタートして新しいものを作る世界だということを彼は言ったわけです。その中にナノテクノロジーがある。従来の工学はあとから論理がついてきます。またはその基本的に出来上がった論理でものを作る。しかし、論理を先に考えてものを作ろうという世界は別の世界です。私は、日本が本気になってやるのであればまず理論の方からちゃんとやっていった方がいいと思っています。それをやらないでナノテクノロジーをやると結局アメリカに負けてしまうと私は思っています。

○最初のナノテクノロジーシンポジウムをやり、それから日本でナノテクノロジーの会を先端研でやったことがあります。そのときに*ナカジマ*さんやいろいろな方が来てくれました。これはホーサイトでやった第1回目のシンポジウムです。そのときにAFMがもう登場してデモしていたのを覚えています。彼はこういう絵を書いたために、今、ナノロボットを作るやつだというので非常にたたかれています。そういう世界がナノテクノロジーの私の印象です。

○ナノテクノロジーのアプローチは3種あります。1つは従来のマイクロマシニングからスタートしてどんどん小さくしていく世界です。これはトップダウン・テクノロジーといえます。これは十分可能です。既存技術です。

一方、ドレクスラーが言ったのは、原子・分子の操作技術からのアプローチです。これはプローブ走査型の顕微鏡などの原子操作技術を使います。ボトムアップ・テクノロジーといえます。原子をつまんで作る。ドン・アイグラーが作っているアトム・コーラルができる世界です。

この2つ以外に、私が10年前にやったあと出てきたのは、分子の自動複製技術が最近になっていろいろできてきたということでしょう。これはバイオテクノロジー類似技術で、セルフ・アSEMBルと彼らはいっていますが、セルフ・アSEMBル・テクノロジーです。

○多少、医療のことをお話しした方がいいと思いますので絵を持ってきました。このアフィメトリックスのDNAチップがその代表例で、これはナノとはいませんが、入っているDNAのプローブは完全にナノの世界ですから、ナノのチップだといえましょう。これは完全にフォトリソミたいな方法でGTACを次々下から積み上げていく方法ですが、20個ぐらいが積み上がるということです。特許が出ています。現実にはDNAの断片を置いておいて、それを患者のばらばらにしたDNAの断片の液の中へつけますと、反応したところに発光するかゲインが変わるというシステムの素子です。この素子は今いろいろな方向で使われようとしています。

○ただし、これも重要なことですが、もし医療にこれを使うのであれば、現場に人がいて、需要が起こって、それがエンジニアに伝わって、エンジニアが作ったものが現場にいて、またフィードバックされてということが成り立たないと絶対作れません。だから日本は1回もうまくこういう世界で仕事をしたことがないのです。日本では、私がやっていた人工心臓は一応ちゃんと産業になり、臨床は使いましたが、今外科へ行ってご覧下さい。ほとんどの機械は外国オリジンの機械です。日本オリジンの機械はほとんどありません。ナノの世界でもそうならないようにするには、現場に人を送り込んでください。病院にです。

何を言いたいかというと、ナノの世界でもしこれをやるのだとすると、たぶん遺伝子の治療器を作ることです。現実インシュリンを投与する注射器があります。これはノボという会社が作っているのですが、直径100ミクロンの針に穴を開ける技術が日本にはなかった。それからその材料がなかった。だからその特許はノボが持っていて大量に売れるわけです。しかも在宅で注射を打つ。痛くない。左の写真は、それと同じように、現実には今、脳外科では、頭を開けて腫瘍のところにDNAの操作のためのものを注射しています。DNAで測るのはいいのです。測ったあとどうやってそれを治療するのかというのは、治療法を見つけなければいけない。そういうところが非常に重要だということを言いたいのです。

○3年ぐらい前から、医療生体工学(BME)の国際学会へ行きますと、アメリカからたくさんこういう注射器のタイプのものが出てきています。

○特に驚いたのはこの針です。長さが1ミクロンしかない。頭が切れている。藤田先生などもお作りのようですが、どこかに刺しますとそこから大量にタンパクなどを入れることができる。これは点滴とほとんど同じぐらいだといわれているわけです。こういうものももし小さなプローブになって、どこかターゲットの素子を見つけて、そこへ行ってDNAを直接ターゲット器官に挿入できるような方法があるとすると、それを1週間に1度、1か月もやると遺伝子はすっかり書き変わってしまいます。治療法が劇的に変わります。確実な需要があります。にもかかわらず、臨床側からそういう声が出てこない。臨床へ行ってやらないと絶対にこれはだめです。

○我々も手元にマイクロマシンからスタートした道具を持っています。例えば、このプロジェクションしているものです。これがそうかどうかはわかりませんが。私が使っているものはDLPですから非常に小さなミラーがついています。そのミラーなども小さくなるいろいろなことができるようになる。これはこの間の「サイエンス」のナノテクノロジーの特集に載っていたものですが、カンチレバーです。これが500ナノメートルですから非常に細いわけですが、その上に分子を置くとどうなるか。例えばDNAの断片、プローブを置くとどうなるか。こういう話がありますよという話です。

○すべてのものが小さくなっていく。小さくなっていくのですが、ベッドサイドでオンチップラボ、*マイクロタス*などが作られようとしています。こういうものを作るときは

必ず現場へ行ってやってください。現場へ行ってやらないと何もわかりません。

○こういうふうにはマイクロ化、アレイ化が進んだものもたくさん出ています。

○先程、加工法のうちでレプリカ法を使う、バイオの方から出てきたいろいろな技術では、高分子の材料でナノ構造を作ることにも可能だし、非常に安くできます。しかし、必要なのはその中での原理です。

○特に計測で注意しなければならないのは、いろいろな人がこのごろ言いはじめていますが、マイクロの世界は、小さくしていったらナノの世界に入った途端に溶液の分子が何個1つの素子に入るかという問題が起こってきます。例えば1ナノモルの液体ですと、1辺が10ミクロンあたりからおかしくなる。1ミクロンになると1個入るか入らないかなのです。こういう問題をきちんと解いてからいろいろなことを始めないと、作ったはいいいけれども何も測れなかったということが起こります。非常に濃い溶液でさんざんやっても医療の世界ではナンセンスです。

○もう1つ。万能細胞または特定の細胞をそのまま計測する方法も、マイクロからナノに落として作っていただきたい。表面のタンパクは全部ナノの世界です。だから医療の世界はこれからのバイオテクノロジーの進み方をよく見て、その世界でいろいろなことをやっていただきたいと思います。

質疑応答

(矢部) 実際に企業がやって数年後に何とか実用化したいというものは？

(藤正) そんなものはありません。それはあまいです。既存の技術があるものはいいですよ。例えば今のメモリ装置を小さくするというのはいくらでもできますし、それはナノの世界をいくらでもおやりいただければいい。新しいものを作ってどうこうしようと思ったら、この世界はまず技術も重要ですけども理論も重要です。特に機械を動かそうと思ったら理論をちゃんとやらないで動くものができるのはとても思えません。だから科学的発見の方が先で、それを皆さんさぼっている。この間の「サイエンス」のナノテクノロジーの特集号でも理論のことは1つも書いてありません。世界中どこも見ていないのです。そこが重要で、そこはちゃんとやってください。そこからスタートした方が私は早道だと思います。

(矢部) 逆に、ニーズをちゃんとつかみなさいともおっしゃっていただいたわけで、それは現場に入ってニーズをつかんで・・・。

(藤正) それは既存技術を使いますから、その世界は、先程のカンチレバーを使うなりというのはあるわけです。それはどうフィードバックできるか。それをどうやって加工機

として大量生産するかというようなことをちゃんと現場で絶えずフィードバックして、よく*ハタムラ*さんの言う技術スパイラルを上げていく必要があると思います。それをしていないで、ナノテクノロジーはうまくいくという絵のようなことを言ってもナンセンスだと私は思います。

「ナノ・マニファクチャリングとコヒーレントビーム技術」

植田 憲一 氏（電気通信大学教授）

本稿は、平成13年2月16日（金）に開催された「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」における植田憲一講師の講演内容を事務局が文書化したものです。

私に与えられたテーマは「ナノ・マニファクチャリングとコヒーレントビーム技術」ということです。おそらくレーザーとの関係などといったことを期待されたと思うのですが、なかなか自分自身でやっていないものを考えるのは難しいものです。先ほど、例えばナノテクノロジーの中では理論が大事だとおっしゃいましたが、やはりそれが大事で、まずはアンダースタンディング、そこから進むべきだと私自身は思っておりまして、今のところ、アメリカをはじめとした世界で行っているナノテクノロジーと、ナノ・マニファクチャリングは若干違うのではないかと考えています。

（以下スライド併用）

○そういう点では物理、化学、生物、基礎科学というものと、物を作るという技術をどうつなげるかということ、これはすぐに行けるかどうかかわからないと思います。私の問題意識はそこに書きましたが、かなりいろいろ揺れているなと思われることでしょう。実際に、ナノスケールで起こることをどうやって我々が住んでいるマクロな世界に発現するのかというと、すごく難しい問題です。同時に、このようなことを国家プロジェクトのようなかたちでやるということは、ある種飛躍を求めているわけです。飛躍を求めているなかには、これまでの連続でできることと非連続でなくてはいけないということと、両方あると思っています。そういうことを少しお話ししたいと思います。

○最初に少し逸話ですが、この間OSAのリーダーシップ会議に行っていました。物理のドクターを持っている下院議員がアメリカには2人おられまして、そのうちの1人がお話をされました。こんなことを政治家が言うとは信じられないぐらいのすばらしい話で、「科学とは何だといえ、問いかけをすることであって答えを出すことではない」とおっしゃるのです。彼のお母さんから、彼は科学する心を学んだと。普通のお母さんは、学校から帰ってきたら「今日は何を習ったの」と小学校の子どもに聞くのですが、それはだめで、彼のお母さんは「今日は学校でどんな質問をしたの」と聞いた。「それから私は科学する心を学んだ」というふうにおっしゃっていました。

そういう点でいうと、ナノテクノロジーも同じようなところがあって、我々はまず「こういうことが大事なのだろう」と問いかけをすることが大事なのであって、必ずしも「こうしたらうまくいく」ということが大事ではないのではないかと少し思いました。

○私はレーザーの研究者ですから、レーザーの研究者としてふだん考えていることと関係づけてお話をしたいと思います。ナノスケールにいけば必ず量子現象は出てきます。しかし、皆さんはこの世界で量子現象を使いたいのですから……。もちろん信号のメモリの

ようなものだったらそのまま使えるかもしれませんが、量子現象の小さなサイズのものをどうやってマクロの世界に出してくるかということが重要です。量子現象をマクロの世界で我々が直接見ているものは、実は液体ヘリウムの超流動とレーザー現象ぐらいしかないような気がします。

レーザーの現象は、普通の光が伝搬しているのも同じなのですが、実際の光を出しているのは全部、原子です。個々の原子がバラバラと出してくる光は、インコヒーレントで、そのままでは互いに消しあってしまうわけですが、実際にはそれが全部、位相も合う、周波数も合うというかたちでコヒーレントに加算されるから、我々の世界の中に出現してくるわけです。ですから、ナノスケールのお話をしたり、オングストローム単位のお話をしたりしているときに、それを人間の世界に役に立てるといえるときには、いかにしてコヒーレント的な現象を見つけるかということが大事だと思うのです。

○光の宣伝もしないといけません。実は私は重力波天文学の研究をしていて、国立天文台に300メートルの巨大な干渉計を作りました。巨大な干渉計の中で、今、歪み感度は 5×10^{-21} にまでなりました。光が他と本質的に違うというのは、量子限界に達したときには、光はやはり量子限界的には必ず低いのです。ですからこれを使わないで極微の世界を見るのは、かなり難しいことです。

○そういう見方で、私の知り合いがやっている光の現象の中で細かいことがどんなふうにいけるかということのを少し見てみました。これはナノではなくてマイクロですが、マイクロ3次元加工というものについては、3Dのマイクロマシニングは2光子顕微鏡の中で今行われます。もちろんメモリに使うこともできれば、3次元的な液体の中で固化していくこともできます。

○ですから例えば阪大の河田さんのグループなどは、今は2ミクロンぐらいのものまでできていると思います。非常に小さな3次元的な自由形状のものを作り上げる。物体の中まで光を入れて、そこで多光子過程で物を変化させていくということは非常に優れた技術です。電子ビームのようなものでは、表面加工はできますが、物の中に作るのはかなり難しい。そういうことの延長がどこまでいくかということ、もちろん興味あることです。

ただ同時に、このような多光子顕微鏡が非常に大きく進歩している一つの理由は、生物学の方が入ってこられたからです。生物学のように非常に強い要求を持っていて、ある意味では技術に対して呵責がないというか、今までの常識を持っておられない方は目標に対してバンと進むものですから、従来非常識と思われるようなことであってもやってしまうわけです。そうすると新しいレプリカの方法であるとか、タンパクを通じた、もしくは発光、さらに何か現象を見るのはそのものを見るのではなくて、その機能がどこかに移ったところを見た方がもっと見やすいというようなことは、目的指向的な議論からどんどんできてくるわけです。光学という世界は非常に長い歴史を持っていますから、ある意味では今までの常識に縛られているところがあったのですが、そういうことについては非常に新しい目を開かされています。

○河田さんたちや東工大の天津さんのように、近接場光学（ニアフィールド・マイクロスコプ）をずっとやってこられた方たちは、今までのかたちで物を見る顕微鏡と違う光学技術を開発してきました。例えばここにあるようなチップ、ファイバーのプロープによる近接場を使うのです。近接場光というのは普通の光とは少し違います。普通は自由空間を伝搬していく光ですが、近接場光は局所化した光、つまり伝搬はできない、その代わりにそこにはポテンシャルがあって、原子など非常に小さな粒子をトラップしたりコントロールしたりマニピュレートしたりすることができます。ですからそういう中でファイバープロープでトラップをし、その中にはよりはっきりした性質を持った原子を作り上げる必要がありますから、真ん中にある原子ファネルで上から落とした原子が衝突を繰り返しながら近接場の光の壁で、ある意味では跳ね返りながらエネルギーをそろえていつて落ちていく。そうするとだんだんとここにはそろった原子が出てくる。そろった原子を今度は中空ファイバーで誘導してやって、自分の欲しいところに持っていく。そのような意味ではマニピュレーション技術は、現在できてきているわけです。さらに近接場で原子の中に出来上がってきたものを測定することもできます。

○同じようなことは阪大でも行われていて、非常に小さな微粒子であればそれを浮遊させて駆動する、ドライビングしていくということがあります。最近では単に計測などを扱うだけではなく、こういうものをいかにして応用につなげるかという議論が進みはじまりました。ですから、そういう方向にこれから進んでいくのだらうと思います。

○天津さんがやっているようなかたちからいえば、従来のところからいえばナノフォトンクスというかなりまだ大きなものから、アトムそのものをプロープの先にくっつけて、アトム-アトムインタラクションをさせながら新しい物質創成をしていくということも、視野に入ってきたと聞いています。

○ただし、こういうものを一つ一つ作っていたのではなかなかうまくいきません。ナノだとかオングストロームだとかいうふうに非常に微細なものができるということは、同時にその数が増えなければあまり意味がありません。同じ数だけ小さくしただけでは大したことではない。そうすると生産性がうんと上がらないといけないわけで、そこには連鎖反応であるとか、連鎖的な仕事ができないといけない。

ごく最近、理研の青野さんがおやりになった仕事は、ナノワイヤーです。1分子のワイヤーができました。つまりこの場合は導電性ポリマーですから白川先生と同じですが、導電性ポリマーのところに、これは光でやったのではなくて、おそらく走査型トンネル顕微鏡か原子間力顕微鏡か何かで押したのだと思いますが、そこにポンと刺激を与えると、将棋倒し型にバタバタとその1列に対して完全な1分子の幅を持ったワイヤー、電気をつなげるものができます。こういうことは、特異現象として今のところあります。

例えば、光の中では周期的分極反転をさせた二オブ酸リチウム結晶があります。やはり一番端のところに電圧をかければ、そこで二オブ酸リチウム結晶の分子がパタンとばねのようにひっくり返ります。それが隣を押していつて、端から端まで非常にアスペクトの高い分極ドメインを作ることができます。それは、やはり人工的に、いわゆる自然結晶では

できないような機能の中に作り上げるという機能です。

ただし、それを1つやったらあと100個できるとか1万個できるというふうにしないと、エネルギー収支効率は非常に悪い。そういう点でいうと、物理とは少し違った考えがいのではないかと思います。物理は1個1個に対して全部エネルギーを与えてイオン化させて何とかということをする、小さいからといって必ずしもエネルギーが小さくてすむということにはなかなかないというところがあります。

○やはりナノの問題を考えていくときには、当然物が小さいというところに話がいったまうのですが、粒子と波動、それから局在と広がりということは、実は両方は分離できない性質だということを我々は頭では知っています。ただ、フィーリングとしてはあまりよくわからない。そういう意味ではナノテクノロジーを局所的な性質だけに限定して考えることは、問題があるのではないかと私は思います。

私は光の波動をやっていますから、波動をやっている者からいうと、例えば光の共振器がありますと、ここに反射が100%の鏡があってここに100%の鏡があったら、光が入ってきたら全部その共振器の中に入って、もし損失がなければ全部向こうへ抜けていく。物事の性質がこの鏡100%では決まらないということです。離れたところに存在している鏡があるかないかによって変わるわけです。つまり、そういう意味では物事には2面があって、局所的な性質ですべての決着がつく問題と、離れたところとの相関で物事が決まるものがある。私たちは波というものは昔からよく知っているように見えますが、実はそれほど理解がよくできているわけではない。ですから科学で理解をするということから製造するというところに発展させようとする、実感がその中に生まれてこないアイデアは出てこないのではないかと思います。

○そういう点で、新しく粒子の中にコヒーレンシーが出てくる問題を少しご紹介します。今まではコヒーレントなものは光だけでしたが、コヒーレントな粒子ができるようになりました。ここにあります Bose-Einstein Condensation というのは、原子、特にボーズ粒子の原子ですが、それはある密度である温度まで下げれば、水蒸気が水になるように、いわゆる相変化を起こします。従来はどんどん温度を下げていったら、ゼロに限りなく近づくかもしれないけれどもゼロにはならないのですが、実はアインシュタインが70年前に予言したように、それはきちんと $T=0$ になります。ですから、あるところでパッと分布が変わってしまうわけです。すべての原子が同じ波動関数を持つようになって、そういう意味では1つの波としての性質を表すようになります。そういうふうになると、原子は波動性を持った量子ビームとして扱うことができますから、現実にはプログラムができます。

○これは原子の波動性を利用することで、我々の研究室でもやっていることです。これまで物質波の干渉を使うのが難しいのは、光というのは特別な存在で光速一定なのです。青い光でも赤い光でもみんな同じ速度を持っている。ところが物質波の波長は実はその粒子の速度によって変わるわけです。遅いと波長は長い、速いと波長は短くなります。したがって、同じ粒子であっても同じ波長を持たないために、波動性は全部消えてしまっている。ところが温度がゼロになる、もしくは温度が十分に冷えると、物質波がきちんと見えるよ

うになります。今、室温の原子を使うのは非常に難しい、つまり室温ぐらいの速度ですが、非常に難しいと思うのは、ド・ブROI波長というのはオングストローム以下にならないと原子が粒子として存在しませんから、そうなります。

○実際にそういうようなものを実験室の中で作ります。例えばここにある赤い点は、真空中にレーザーで冷却をしてきて、ネオンの原子を準安定状態で真空中にためます。それを初めは光と磁場で閉じ込めてありますが、あるとき全部のポテンシャルを外しますと、当然重さがありますから重力で落ちます。このところでフリーフォール（自由落下）実験がありますが、こういうホログラムを間に入れてやりますと、その間のこの穴を通った原子と原子の間に量子干渉を起こして、このような波動性が出てきて、字が書けたり絵が書けます。

○このように、もう少し複雑なものを作ることはできます。ですから、このような量子ビームを加工に使えるのはかなり遠い話だとは思いますが、ただしそれは理解としては重要なことになるのではないのでしょうか。

○もう一つ、分子モーターを例にして、分子のレベルのことを少し考えてみようと思います。やはり分子は物理屋さんではなくて化学屋さんなものですから、化学の分野で、これは78個の原子でできた分子モーターです。ここにあるものとここにあるものの間で、若干の化学反応をしながら回転していくというものが、もうすでに作られております。

○物理屋が作る分子モーターとはこんなものです。これは今年の夏に「Physical Review Letters」に出たコーカムたちの仕事ですが、ここに2原子分子が存在します。実際に実験をしたのは塩素の2原子です。ここに直線偏光で光を与えてやりますが、直線偏光とは実は2つの円偏光の重なり合わせですから、こちらとこちらの円偏光の周波数を若干ずらします。そうするとこの偏光成分がグルグルと回ります。ちょうど周波数が自然に変化していくような超短パルスを使ってやりますと、レーザーの電界によって生じた分子内のダイポール（双極子）との相互作用で、分子に回転力が生じますので、分子回転が誘導されます。グルグルと回りますが、非常な速度まで回すことができます。そうすると実は遠心力が働いておりますので、これは回転量子数でいうと $J=400$ ぐらいまで上げてしまうわけですが、そのぐらいまでいくと分子結合が切れてしまうのです。機械的にちぎってしまったということです。これ自身は何かの役に立つのかよくわかりませんが、本当の意味で分子が回転させているものを光でコントロールしていることは事実です。これを動力源として取り出せるのかどうかはわかりませんが、原理的には分子モーターの一つであります。

○もう一つ分子モーターの中で、先程も話がありました阪大の柳田先生との話をすると、やはりここには僕たちが今まで知っている知識とは大分違うものがあります。非常に拡散的な、ダイバージをしていったような情報伝達がされている。あるところからあるところに情報を流すときに、1対1で直結した情報の方が効率的かどうかはわからないということです。実はここから出かけた情報は、届かないものは戻って来たりいろいろするわけで

すが、最終的にはきちんと届いて動くのです。

そのときに、これは私が予稿メモに書きましたが、昔、光化学と熱化学で非常に苦勞をした問題が関係します。紫外線レーザーを作ったら光化学がすごく発達するだろうと思っただけで、なかなかそうはいかなくて、いまだに熱化学の方がずっといいのですが、こういうものもある意味では選択的で、量子的に物事を操作させるのは、そこだけ見るとすごくいいのだけれども、結局生産というのはトータルで決まってしまうのだということです。この点でも、やはり何らかのコヒーレンスのようなものが関係するのかなという気はいたします。

柳田さんの話では、例えば人間の関節のようなところでも、ロボットの関節は1～2個のモーターで動いているわけですが、これを実は兆を超えるような数のモーターで動かしている。普通、人間の感覚でいえば非常に冗長であってロスが出てくるはずなのですが、少しも冗長でロスが出ているわけではない。そういうことからいえば、こういうことを動かしているエネルギーのベースが、やはり熱エネルギーと同等、もしくは下手をすれば熱エネルギーよりも少ない。先程おっしゃったように、個々の部分だけを見たときにエネルギー収支が合っているようになかなか思えない、だけれども全体から見ればきちんと合うというようなものは、我々はいろいろと考えないといけないだろうと思います。

○全く違った発想、もっと古典的なものもあってもいいのではないかとということで、少しご紹介をします。ナノを材料に、今度は全部が小さい方へ小さい方へいくベクトルばかりがいいわけではないのではないかと。場合によっては、ナノを材料にマクロを作るということを真剣に考えるのもいいだろうと思っています。

たまたまですが、我田引水で我々がやっていることを紹介します。セラミックスのレーザーを今作っているのですが、セラミックスレーザーの中のメカニズムを見ると、最初に作っているものは粒子が10ナノメートルの超微粒子結晶で、それが非常にそろっている超微粒子結晶を作る。それを焼結することによって1×1メートルのガラス窓のような結晶すら作ることができる。出来上がったものは実は多結晶ですが、そういうことも意味がある。これからすれば、超微粒子を作るときに、超微粒子1個だけで機能を発現させるということだけが必要ではないのではないかと思います。

○これを全く純化学的手法で作って、YAGの前駆体を作ります。この段階で100オングストロームの大きさです。ですから、この最初に作り上げた結晶はみんなが100オングストロームの大きさを持ったものです。

○そのプロセスをこの間、研究をしてまいりましたが、実際はこれはナノ結晶が成長して、それがマイクロ結晶に成長している。普通の結晶はどうしてもセンチメートルとか10センチぐらいまで大きくしなければいけないから、それだけの長い成長時間を必要としますが、大きさが10ミクロンでしたら非常に短い。これは実は非常に自然に近くて、地球の内部で結晶が成長しているのと非常に近いことをすることができます。そういうふうなかたちで新しい材料が出てくるのは、十分いいことだと思います。

○実際に、それはこのようにほとんど区別がつかないいい特性を今でも出します。ある意味ではセラミックスというのはオリエンタルな技術で、中国、朝鮮、日本が絶対的に強いのですから、こういうところも伝統的だからハイテクではないと思わないで、やればいいのかと思います。

○もちろん日本にはすごく優れたセラミックスの会社があります。このようなインクジェットプリンタを作っているのも、今、全部セラミックスです。モダンセラミックス。それから多層のセラミックコンデンサを作っているのも、やはりこういうものです。例えば村田製作所やTDKでは、ミクロンの厚みのところにボルトの電圧をかけるわけです。このようなものは製造技術が優れているというよりも、最初材料形成が優れていることで、無欠陥のセラミックスができて、これは実は電界でいうものすごく高いわけで、こんな電圧をかけると普通だったらどこかに欠陥があってバンと絶縁破壊するのですが、そうならない。そういう意味では、材料としてのナノというのは必ずしもそのまま機能を発現するものだけがナノスケールではないだろう。

○もしそういうことができれば、私たちの夢ではチューインガムのようなものをどんどん引き延ばしていけば、鉄鋼、もしくは連続精錬ガラスと同じように、新しい機能を持った結晶も実現することが実は可能ではないかと思います。

○私自身のナノテクノロジーの理解をここに書きました。もともとクリントンが言ったときもこうだと思いますが、ナノテクノロジーは従来の延長として提案されたものではないのだろうと私は思います。そのためには科学そのものも実は原子、分子、生体、新しいこのような分野が融合するような分野が必要だと思います。ですから、本質的には連続と非連続は両方いるのです。したがってここに書きましたように、私は科学技術の分野でむしろ化学的な孤島を作った、飛び地を作ったのだと思います。従来からあえて違うところを作った。その上に立って全体を見直してみて、新しいスコープを作ることが今は大事であって、マイクロテクノロジーからずっと連続でいくだけではない。もちろんその技術は必要ですけども、新しい体系を生み出すというところからいえば、新しい地点から科学技術を見直すことが必要で、そのためにはギャップが開いていること自身をよしとしなければいけないのではないかと思います。

長さから見ると、変に思われるかもしれませんが、すぐにマイクロからナノにいくのは非常におかしいと思います。例えば人類は、ミリメートルサイズのことはおそらくエジプト文明のころから認識していました。ミリメートルからミクロンが見えるようになって、それをコントロールできるようになったのは、やっと20世紀の後半なわけです。5000年かけてやっと認識したようなことをしているわけです。それをあと3けた、ミクロンからナノまで数年でできるとか10年でできるとするのは、思い上がりではないかと思っているところがありまして、もう一度そこに立てば新しい地平が見えて、新しい体系が出てくるというもう少し大きなスコープが必要とされ、それがナノテクノロジーであり、そのあとに続くナノ・マニファクチャリングではないでしょうか。これが私の考えです（拍手）。

質疑応答

(矢部) どうもありがとうございました。かなり広いお話をいただきました。実際、今先生がされているコヒーレントビームなどは、まさにナノ加工の一番の期待されるものになってきているわけですが、そういう意味からいっても、ナノの新しい学問、飛び地を開拓していかなければいけないと非常に思われているわけですね。

(植田) はい。レーザーやコヒーレントな光というのは、例えばレーザーポインターは皆さん使っておられるから当たり前のように思っておられますが、実際は我々は3次元空間の波にはほとんどまだなじんでいないと思います。つまり、エレクトロニクスはどんどん技術が進んだとしても、あれはまだワイヤー、線路の中の1次元なのです。非常にわかりやすい。どうやっても川の中を流れている水を堰を上げたり下げたりしているような話なのですから、そういう意味では非常に物事が直観的なのです。

ところが波を見るときに、我々は空間的な性質、空間周波数まで含んだものになり、それはまだそんなに時間はたっていない。例えば波動光学があって、そのあとに実は回折光学みたいなものが出てきましたが、実はOSAの中でもこの間までは「あんなのは単なる数学で、光学ではない」と論文を掲載不可としていた時代が数十年前にあるのです。ですから幾何工学から波動になって、そういうふうに本当に電磁波ですよ、しかもそれが3次元ですよ、そこにバイナリ光学があって、お互いの位相と光の周波数と強度がすべてコントロールできて初めて本当の波のコントロールですよというふうに、認識が深まったのはつい最近で、まだそれほど古くはないのです。ですからそれがもう少し体になじんでこない。それを単に利用するというだけでは、理解が高まるというふうにはなかなかならないのではないかと思います。

(矢部) どうもありがとうございました(拍手)。

National Initiatives in Nano Science and Technology: Challenges to Innovation in the United States

ダンカン・T・ムーア（米国 大統領行政府科学技術政策局・次長）

本稿は、平成13年2月16日（金）に開催された「ナノ・マニュファクチャリングに関する国際シンポジウム」におけるダンカン・T・ムーア講師の講演内容を事務局が文書化したものです。

ご紹介ありがとうございました。これは科学についての講演ではありません。どうやって科学技術に関して意思決定がアメリカで行われているかという講演です。それから、ナノテクノロジーがこのプロセスでどのように扱われているかということです。

ナノテクノロジーというのは、今までうまくいかなかったところでうまくいくようにすることができる技術の1つです。今までうまくいかなかったことからたくさん学んで、うまくいくようにすることができるという1つの例になるかもしれません。どういう文脈でこの話をしたいかということですが、どれだけの費用を私たちがアメリカで基礎科学あるいは応用科学で使っているかということです。

（以下スライド併用）

○これはアメリカの大学でどれだけの費用が使われているかです。ほとんど基礎科学ですが、約180億ドルです。これは我々が基礎および応用科学で使っている費用の約2分の1です。430億ドルが基礎および応用科学で使われています。この文脈の中で我々はどうやって新しいイニシアチブをやっていくかという意思決定をします。

○なぜこれをやるかということですが、1つ我々が学んだことは、科学の予算をアメリカで増やすには2つの方法があります。1つは単にこう言えればいいわけです。「科学はよいのだ」と。その議論を使いますと約3%の増加が得られます。あるいは4%増えるかもしれません。その割合でいきますと約30年かかって2倍にできるというくらいのペースになってしまいます。一方、このイニシアチブは非常に重要で、例えば、「経済成長に貢献する。ですからアメリカは投資をしなければいけない」と言えます。ナノテクノロジーおよび情報テクノロジーはこの文脈で進められてきました。

2年前には情報テクノロジーのイニシアチブがありました。そして32%の予算の増加が得られました。このようなことは単に「科学はいいのだ」と言うだけでは実現できなかったと思います。ナノテクノロジーの場合には84%の予算増加を要求したのですが、約75%の増額が得られました。これはかなりよかったと思います。どちらの場合にも我々はこの領域への投資によって2010年に経済成長が実現できると言ったのです。すべての連邦レベルの意思決定は10年後のインパクトが何かということに基づいています。つまり、労働力の問題や基礎科学の問題が10年後にどうなるかということで要求あるいは議論をするのです。

次に、このあとには何がくるかということにもこれから触れていきたいと思います。まず、うまくいかなかったテクノロジーの話をさせてください。海洋技術という領域も我々

は見ました。つまり、海を使って持続的な経済成長を得るという領域も見たのです。2年前に、1か月の間に大統領は2つスピーチをしました。1つはMIT（マサチューセッツ工科大学）でのスピーチです。サイエンスのアドバイザー、つまり私のボスに、6か月後に情報テクノロジーでどういう投資をしなければならないか教えてほしいと彼は言ったのです。その1か月後に、大統領はカリフォルニア州のモントレイでスピーチをして、海洋リサーチの報告書がほしいという要請をしました。6か月後に情報テクノロジーは32%の予算の増額を要請し、海洋テクノロジーはレーダースクリーン上にも姿がなかったのです。イニシアチブができなかったのです。

どうしてそうなったのでしょうか。どうして海洋テクノロジーの方はうまくいかなかったのか。ITの方は、いろいろな省庁、国防省、NASA、エネルギー省、商務省、NIHなどすべてが集まって、どうやってイニシアチブを一緒に作れるかを考えたのです。単独の省庁で要求したのではないのです。単独の省庁では協調したプログラムのような増額は得られません。調整の取れたプログラムがうまく出来上がったのです。

一方、海洋技術の場合には、集まったことは集まったのですが、だれがリーダーシップを取るかというところで、それぞれが自分がやりたいと考えたのです。つまり、自分がリーダーシップを取るならばみんなと一緒に仕事をしてもいいが、ほかの人たちがリーダーシップを取るならばいやだと言ったのです。そして全体が分解してしまいました。海洋学はバルカン諸国のようです。バルカンはセルビアとかコソボとかいろいろなところが集まっています。そして長い歴史を持っています。お互いに戦いあった歴史です。海洋学の人たちも長い歴史を持っていて、協力をしないという長い歴史を持っていたのです。

情報テクノロジーの方は比較的新しい分野です。これまでの歴史というしびりがないわけです。したがってお互いに協力することができたのです。ナノテクノロジーの場合も同じです。新しいテクノロジーで、これまでのしがらみがない。歴史はない。したがって一緒に仕事をすることがメリットであると認識できたのです。アメリカのイニシアチブというのは大きいのですが、個々のイニシアチブが強調されるという傾向があります。ただ、イニシアチブを始めるときには、そのリーダーシップを取る人はニュートラルでなければなりません。例えば自動車ではクリーンカーのイニシアチブがありました。当初はエネルギー省があって、運輸省がありました。どちらも非常に強力な省庁です。我々はその責任者として商務省の人を選びました。というのはこのプログラムにかかわりがなかったからです。つまり中立であると見られていたからです。それで公正な意思決定ができると見られたのです。複数のエージェンシーが絡んでいるイニシアチブがあるときには、リーダーはその中心的な省庁でない方がよいと思います。これが情報テクノロジーとナノテクノロジーの場合の説明です。

○これは「NANO.USA」と書いてあります。112の一酸化炭素の分子を使ったものです。112の小さな点があり、それぞれが分子です。一酸化炭素の分子がここにこのようにつながっているわけです。それぞれの文字は3ナノメートル×4ナノメートルの大きさです。ずいぶん小さいと思いますが、比べてみましょう。この大きさの文字を使ったら2億5000万の文字を髪の毛の断面に書けるのです。長さでなく断面です。これは300ページの本300冊に相当するものです。つまり非常に大きなストレージ・キャパシティがここにあるわけで

す。300 ページの本 300 冊を髪の毛の断面に書くというのはすごいことだと思います。

○グラントチャレンジということがあるのですが、そのグラントチャレンジの1つとして、アメリカの議会図書館の本を全部、角砂糖の上に書くというプロジェクトがあります。なぜこのマス・ストレージが重要か。イニシアチブを取り上げた場合、ナノテクノロジーでも情報テクノロジーでもいくつか見なければいけないことがあります。今、産業界は何をしているかということを考えなければいけません。もしアメリカの産業がすでにやっているならば連邦政府は関与する必要がなくなります。情報テクノロジーの場合には、アメリカの経済はITで順調でした。しかし、製品のサイクルが非常に短いために数か月単位でした。6～18か月の単位でした。それでこれも長期に投資をしていませんでした。したがって、連邦政府は10年後を見つめなければならなかったのです。ナノテクノロジーの場合にはアメリカの産業界ではほとんど行われていません。若干はありますが。また国際競争も見ました。日本は何をしているか。ヨーロッパは何をしているか。当然、連邦政府では、「日本はこれだけの支出をしている。だからアメリカもこれだけお金を使わなければいけない」という議論はしました。そうすると日本では、「アメリカがこれだけ使っているから日本もこれだけ使わなければいけない」、そうすると次の年は「日本がこれだけ増やしたからアメリカももっと増やさなければいけない」ということが言えます。そうすると科学技術の予算はどんどん増えていきますので、長期的には我々にとってメリットとなります。つまり、「競争はいつでもよいことだ。科学技術でも競争はよい」。これも1つ我々が見たことです。

それから、社会に対する影響を見ました。つまり労働力を見ました。労働は十分だろうか。働く人たちは十分なのだろうか。もっと育てなければいけないか。また、倫理という問題があります。これは大変重要です。新しい技術の場合には倫理を見なければなりません。グライバシーの問題もあります。例えば、ナノロボットを作った場合、それはどういう意味になるのか。これはまたあとで触れます。

○どのようなイニシアチブでも、いかにしてアメリカの大統領に重要だと言ってもらえるかが大変大切です。大統領が「ナノテクノロジーは重要だ」と言えばすべての省庁が「これは重要だ」と言ってくれます。したがって予算を出す。1年ほど前に大統領がCALTECHで演説をしました。そこでナノテクノロジーに触れたのです。いったんそう言ってくれるといかに急速にものごとが進展するかは驚くべきです。これは国会図書館やがんなどいろいろなことを書いた非常に有名な演説です。

○さてこのイニシアチブでは5つの要素があります。まず基礎研究です。連邦政府は基礎研究に資金を出すというのが1つの役割です。大学での研究が主になります。その場合、なぜこれを「ナノテクノロジー」と呼んだか、「ナノサイエンス」と呼ばなかったかということが挙げられると思います。実際はナノサイエンスなのです。予算の70%が基礎研究に充当されます。外部の評価委員会で、これをナノサイエンスと呼ぶかナノテクノロジーと呼ぶかという大きな議論が行われました。結局、ナノテクノロジーと呼ばれることになったのです。ナノサイエンスということは全員がわかっていたのにテクノロジーと呼んだの

です。アメリカの一般の人たちおよび議会は、テクノロジーが経済成長に重要だと考えているからです。したがって、あるプログラムを受け入れてもらうためには、サイエンスと言うよりもテクノロジーと言った方がより容易なのです。

連邦準備制度理事長のアラン・グリーンスパンは、米国の議会で何回も、「アメリカ合衆国がこのような持続的な成長を 90 年代に遂げることができたのは、テクノロジーに対する投資があったからだ」と証言しています。つまり議員たちは非常によくわかっているのです。テクノロジーは経済成長、すなわち雇用だということがよく理解されている。すなわち再選されるということがわかっているわけです。政治家たちは再選されたいのでこれに参加している。そのためにナノサイエンスではなくナノテクノロジーと呼ぶことになりました。

そして、グランドチャレンジで、テクノロジーを見るときに 3～5 つのアイデアの中で一般の人たちにも受け入れてもらえるアイデアを特定しようと思います。我々としても科学技術の重要性はわかっているわけです。我々もそうした教育を受けてきました。しかし、テクノロジストでも科学者でもない近所の人あるいは政治家に聞いてみますと、本当に我々が何をやっているか見当もつかないという状況もあるわけです。

しかし、例えば我々が、鉄よりも 10 倍強く、重さは鉄の何分の 1 の素材を作ろうではないかと言えばみんな納得してくれるわけです。それにより航空機の基本的な設計も変わってしまうでしょう。また、マニファクチャリング・プロセスも変えることができます。

我々はワシントンでクライム・テクノロジーに関してミーティングを持ったことがありました。これはテクノロジーをどう犯罪に使うかというのではなく、テクノロジーを使っていかに犯罪防止のコストを減らすかということです。そのとき司法長官のリノさんはナノテクノロジーの話をしました。なぜ彼女がナノテクノロジーのことをその場で話すのかわかりませんでした。彼女は、「鉄の 10 倍ぐらい強く重さが 10 分の 1 の素材があったら、それで警官の防弾服を作ることができる」と言ったのです。まさにこのような基礎研究ということです。これによって人の命を救うことができるわけです。このようなことを人々は全く納得してくれるということです。

先程は角砂糖の話をしました。また、がんの治療です。がん細胞がまだ 2 つか 3 つぐらいの細胞であるときにがんを発見する。現在、がんを見つけるときは何百、何千もの細胞に増殖しているわけです。そうすると治療が非常に難しい。がんが 10 個の細胞のときに検知することができれば、ごく初期に治療することができます。だからこそ NIH がまさにナノテクノロジーにも関心を寄せ、関与してくるわけです。

3 番目に Centers and Networks of Excellence もあります。これは米国中に 10 のセンターを特定してグランドチャレンジを担当していくというかたちになります。1 つは、先程も申し上げたような素材の開発、あるいは生物関係の研究をします。さまざまな関係省庁がコーディネーションを取っていくというプログラムになっているわけです。

○確かにナノテクノロジーは非常にお金がかかることがわかっております。機器を発注することも重要ですので、やはり連邦政府としてもセンターその他でこうした機械を買っていかなければならないということです。ですから予算も問題です。

また、例えば社会、法的、倫理的な意味合いもあります。インフォメーション・テクノ

ロジー（IT）について話をするとときに、やはりプライバシーの問題を語らずにはいられません。マス・ストレージというテクノロジーはありますが、それからプライバシーという問題も出てきます。ナノロボットの問題もあります。これは非常に大きな意味合いを持つものです。例えば、ナノロボットで動脈の血栓を取り除くこともできます。しかし、ナノロボットは悪いことしかねないわけです。その意味合いも考えなければなりません。

米国においてはGMO（遺伝子組替食品）の問題を再びもたらしることがないようにということです。社会が倫理の問題をどうとらえるかということで問題を抱えているわけです。ですから我々はこのイニシアチブにおいて全予算の5～10%に関して社会学者の方々にも参加していただいているわけです。すなわち、法的な側面はどういうものか。あるいはヒトゲノムのプロジェクトにしても、何を特許にできるのか、あるいは何を特許にすべきではないのか。こうした点を最初にあるいは同時に、すなわち何かが起きてから最後になってそうした社会的な問題を考えるのではなく、最初に考えるということです。

また、労働者の訓練という問題もあります。アメリカにおいてはやはり若い人々に科学技術に関心を持ってもらわなければならない。そして、宇宙について、NASAについて、若い人はいろいろ考えることが容易です。ただ、小さいものを考えると、このナノの世界にもやはり若い人たち、ティーンエイジャーの人たちに関心を持ってもらわなければいけない。これについては非常に我々は真剣に考えているわけです。いかに若い人々の関心を引きつけるかということです。

○今度は予算です。6つの主要な機関があります。これをコーディネーションしていくことは難しいかもしれません。こちらの数字を見ていただければわかると思います。予算を6つの機関の間でコーディネーションしていくことに関しては、まずコーディネーション・オフィスがあります。すなわち、この6つの機関ではないところがコーディネーションオフィスの役割をするということです。ホワイトハウスの一部の科学技術局がコーディネーション・オフィスをやっています。この6つの機関から独立していることから中立的な立場を担保することができます。例えば何か問題があると、ホワイトハウスの局でその問題の整理をしていきます。NSFや国防省等いろいろな機関が関与していますから、それぞれの機関に対して中立的な立場でということです。一番下のところを見ていただきますと、NIHの予算は小さいわけですが、非常にエキサイティングな作業がこの分野で広がると考えていますので、この数字を上げていきたいと思っております。

○グランドチャレンジ、センターというところにその内訳がご覧いただけると思います。ここは例えば社会全体の労働者ということから考えてみますと数字的には小さいかもしれませんが。プログラムはこのような内訳になっています。これが来年も続くかと聞かれる方もあるかもしれません。私はそう考えています。確かに先月、政権の交代はありました。それによりいろいろな変化もあるでしょう。しかし、議会もナノテクノロジーは重要であると考えています。予算が現在のところどうなるかと考えても、大統領が替わったということがあったとしても、やはり議会の方からITに対する予算は維持すべきだという意見が出てくると思います。

ITもナノテクノロジーも、やはり2010年における経済成長を視野に入れているという

ことです。ただ、新しい議論も出てきています。いかに科学技術のイニシアチブを将来的に選択していくのかということです。それについてコメントを申し上げ、そしてナノテクノロジーについていかに全体像の中にフィットインするかということをお話したいと思っています。

何年か前に私がホワイトハウスにおりましたときに、1月に大統領の年頭教書の発表がありました。彼が話すべきポイントを黒板に書きました。子ども、社会保障、犯罪などに触れるべきだとポイントを挙げたわけです。大統領はテクノロジーも重要だとおっしゃいました。「キッド・テック」、すなわち、子どもにいかん技術を教えていくかということです。犯罪テクノロジーは先程も申し上げました。いかにテクノロジーを使って犯罪率を減らしていくのか。あるいは裁判にかかるコストを減らしていくのかということです。1000億ドルがこれら犯罪関係にかかっているということがありますので、犯罪テクノロジーのグランドチャレンジとしては、2010年までにいかに1000億ドルから100億ドルに減らすことができるかを考えています。1億ドルを現在使うことによって2010年に100億ドル節減することができるということを当然皆さん納得していただけたと思います。

また、社会保障テックということも大統領は書きました。ここでエルダー・テックすなわち高齢者のためのテクノロジーということも考えるわけです。アメリカにおいて、自分は高齢者であると言う方はありません。どんな年齢であったとしても、高齢者とは自分よりも15歳年上の人だと言います。例えば75歳であれば、「高齢者というのは90歳ですよ」と言うわけです。自分が高齢者だとは考えない。

しかし、このようないわゆる高齢者の人々に対して、自分は認めていないかもしれませんが、どうやって助けていくことができるのかということです。実は10月に2日間のミーティングをこの問題に関しても持ちました。いかにテクノロジーを使って人々が独立して、なおかつ10年間長く生活することができるか。2010年までにそのようなことを考えようということも提示されました。これは非常に大きな含蓄を持っていると思います。高齢者が自立して生活することができるようになりますと、どんな物差しで測ってもコストは下がるわけです。ですからテクノロジーとしてどういうふうにそれを開発していったらいいのかということがあります。

そのために何が必要かということですが、まず年をとると聴覚でも視覚でも、感覚が衰えてきます。例えば目が見えなくなったとしましょう。そうするとGPSのシステムを使うことが考えられます。補聴器ぐらいの大きさのGPSの装置を使う。補聴器のようなものをここに掛けて歩く。現在アメリカのGPSは30センチぐらいの精度があります。そこで、この装置から、「曲がり角まで20フィートですよ。信号は赤です。20秒後に変わります」というような情報が流れてくるわけです。「今、レストランの前を歩いていますよ。今日のスペシャルはガスパッチョスープですよ」というような情報がイヤホンから流れてくるということが可能なわけです。

なぜこれが重要なのか。まず、安全のために今どこにいるのかという位置情報を得る。それに加えて、目が見えなくてもレストランで今どういうメニューがあるかという情報が入ってくるわけです。もしそれが気に入らなければどんどん歩いていく。そうすると、「今、あなたは何銀行の前にいますよ」、「今、マクドナルドの前にいますよ」という情報が入ってきます。そうすると目が見えなくても自分の行きたいところに行って、自分の入りたい

ところに入れるわけです。広告宣伝もできます。そこでこういったシステムを動かすための収入源が得られます。そういうわけで、超小型のGPSシステムを作りたいわけです。そのためにはナノテクノロジーが必要です。ナノテクノロジーをこうした人々の生活の文脈の中でとらえたいわけです。

もう1つ、運転ができなくなったとします。日本と違ってアメリカは公共輸送機関があまり信頼できないという状況にあります。特に農村地域では、寒いときや暑いときは特に、バスの会社へ電話をして迎えに来てもらいたいわけです。バス会社に対して、家からバス停まで歩いて10分かかると伝えます。そうするとGPSを使ってバスが10分ぐらいのところまで近づくと電話が来て「バスが向かっている」という連絡を受けるわけです。そこで、家から出てバス停に向かって歩くとちょうどバスが来るというわけです。バスの運転手も乗客がいることを知って来るわけですから1～2分遅れても待っていてくれるということになるわけです。こういうものがあれば、運転できなくても信頼性の高い交通機関が手に入ることになります。

もう1つ、補聴器ということを考えましょう。耳が聞こえなくなる。これも高齢になってくると可能性があるわけですが、そうすると生活の質が下がるわけです。今度は眼鏡のフレームに指向性のマイクを入れます。音声認識システムというのは、今日のものはノイズがあるとあまりうまくいきません。パーティーのようなところではノイズが多いわけで、音声認識システムをうまく機能させるのは非常に難しいのです。そこで、相手の方へ向かって立つと指向性マイクはその人の声だけを拾うわけです。そして音声認識ができるわけです。そういうマイクは今も存在するのですが大きいのです。眼鏡にそのマイクをつけるととんでもないものになってしまうわけです。そういうわけで超小型のマイクを開発する必要があります。やはりそこにはナノテクノロジーが必要になってきます。以上がAの部分です。Bの部分は、話し手がどういう人であっても音声認識のできるシステムです。現在あるシステムは、はっきり話すとか、ある特定の人と話すとか、単語ごとに区切るというようなことをしないと認識できません。普通の人はそういうふうには話しません。そういうわけで新しい音声認識システムも必要であるし、マイクも眼鏡のフレームに入るくらい小さくしなければならない。コンピュータを持ち歩いてそういうことをしようというのはいやなわけです。当初はポケットベルか携帯電話ぐらいの大きさは我慢できるかもしれませんが、最終的には全部眼鏡に組み込みたいと思うわけです。音声認識のためには膨大な情報が必要です。そのためにはナノテクノロジーが必要になってくるわけです。

現在すでに存在しているものはディスプレイのシステムですが、一人一人とアイコンタクトを取ると言葉が眼鏡の中に表示されるものが 필요합니다。そのためにもナノテクノロジーが必要です。

犯罪テクノロジーや高齢者テクノロジーなどいろいろなテクノロジーの話をしていきますが、具体的に何をしようとしているのでしょうか。伝統的に今まで科学技術というのはそれぞれの分野ごとにとらえてきました。物理、電気工学、機械工学といった分野で切り分けて見てきたわけです。しかし、今の新しいアプローチは、社会が何を求めているか、子ども、高齢者、犯罪といった分野で何が必要なのかということを考えて、それを実現するために科学技術は何ができるかという考え方です。こういった社会的なアプローチを取れば、国民からより強い支持を得ることができるだろうと思います。どうせ開発するならば

国民の支持を得た方がやりやすいわけです。

○アメリカの科学技術開発において障壁がいろいろありますが、重要なものを1つ挙げます。雇用の統計をご覧ください。労働人口の問題です。アメリカの失業率は1月1日で4.2%でした。これは16歳以上で職を探している人です。学生などは入りません。失業率を教育水準で見ると非常に興味深い結果がわかります。大卒の人の失業率は1.6%しかないわけです。非常に低いのです。失業率が全国平均より高い人口グループは高卒未満の人だけです。ここで何が問題かというのがよくわかります。ここで過去2年間の最大・最小の失業率を示しています。非常に小さい値になっています。そういうわけで現在、労働者が危機的に不足していることがわかります。

これはすべての大学卒業者です。科学者とかエンジニアだけではありません。歴史、政治、経済、物理、科学などあらゆる専攻の大学卒業生です。科学の分野を専攻した大卒者の失業率はもっと低いことが予想されます。これは非常に大きな社会的な問題であるといえます。

○全体の文脈の中でとらえてみたいと思うのですが、これは非常におもしろいデータだと私は思います。アメリカはハイテク経済と目されています。90年代、アメリカ経済は非常にテクノロジー的にうまく発達してきたわけです。これは毎年どれぐらいの電気工学の卒業生が出ているかを示しています。87年に2万5000人でピークを打っています。すべての大学の電気工学の卒業生です。これがどんどん減ってきて現在は1万2500人と87年の2分の1になっています。その同じ時期に経済はこのように伸びています。経済がこんなによくなっているなら科学や技術を専攻する学生は増えるだろうと思われそうですが、実際にはそうになっていません。機械工学、フォトリソグラフィ、オプティクスといったところでも同じ傾向が見られます。

何が起きているのでしょうか。1つは初等教育に問題があります。高校を卒業した学生は科学・数学の能力が20年前と比べて著しく落ちています。それから、失業率があまりにも長い間低く推移しています。大卒は1.6%の失業率しかないわけで、どんな専攻だろうと職が得られるという状況になっています。学生は、それならば難しい学問を専攻するはやめようと思うわけです。科学とか技術というのは難しいのです。何を専攻しても職が得られるのであれば、科学技術を専攻しようという人は減るわけです。そういったことでどんどん科学専攻が減ってきたわけです。

もう1つです。この曲線はずっと平坦でしたが急に上がったのです。これは公園やレクリエーション、レジャーの専攻です。たぶんこんな専攻は日本には存在もしないのではないのでしょうか。しかし、これはアメリカでは成長産業です。非常に少ない人数だったのが急激に伸びています。こういったビジネスにみんな入りたがっているわけです。電気工学はどんどん衰退していると学生は考えるわけですが、政治の政策的な観点からいえば、これは非常にまちがった考え方であって、非常に大きな問題になるわけです。

○興味深い比較を示します。97年の数字ですが、どれぐらいの大学卒業生がいるかということです。アメリカでは学士号を117万人ぐらい出しています。24歳の人口のうち何%が

学士号を持っているかを右側に示しています。アメリカでは 24 歳の人の 33%が大卒以上です。アメリカの人口全体の 21%ぐらいです。長期的にはこの数字は上がっていくことになります。日本は世界第 3 位で、24 歳では学士号以上を持っている人が 28%です。アメリカとほぼ同じです。

ここで面白いのは、1.4%という中国の数字です。私は、各国がどのように競争しているか、そして 2010 年にどれぐらいの競争力を持つかということに非常に興味を持っているのですが、この数字を見ると中国は 1.4%しかない。ということは、98%の人は大学を卒業していない。中国の今後 40 年間の経済成長はどうなるのかということを考えるわけです。この 24 歳の人はいこれから 40 年間働くのですが、製造業の中でこういった業種がこの人たちを雇用するのかと考えるわけです。この数字からわかることは、人件費上昇のプレッシャーが高まらないということです。日本の戦後の経済成長、韓国・台湾の経済成長の経緯を見ると、人口は比較的少なかったわけです。雇用を増やし、システムを改善していくにはそれほど時間がかからなかった。しかし、10 億人の人口となると、これらの人々を十分に雇用していくには時間がかかるだろうと考えられます。

○これはおもしろい数字だと思ったのでいろいろとほかにも調べてみました。これは有名なグラフでよく使われるものです。自然科学あるいは工学の学士号を持っている人の比率です。左から多い順にフィンランド、イギリス、シンガポール、韓国、日本、台湾となっていて、右の方にインド、中国があります。アメリカは真ん中ですが、アメリカにとって最も手ごわい競争相手は、その左側にある国ということになります。アメリカとしてはフィンランド、シンガポール、韓国、日本、台湾を心配して、右側の国は心配する必要はないと考えられます。

しかし、別の見方をしてみます。このデータを別の視点で切り取ってみます。工学関係の学士号を見てみます。確かに実際の卒業者数は中国は非常に少ないのですが、工学が 46%を占めているのです。物理や化学などは入っていません。それらを入れると 60%ぐらいになります。旧ソ連も同じような状況がありました。最も頭のよい人たちが科学や工学を専攻したわけです。なぜかという政治と関係ないからです。中国では、法律、政治、経済、社会学は、最も優秀な学生は専攻しません。なぜかという、科学を専攻しても政治的なペナルティがないからです。ロシアではその伝統が今も続いていて、非常に科学専攻の学生が多いのです。

しかし、アメリカでは何を専攻するかは完全に自由です。大学で社会学をやりたいとか政治をやりたいとか、個人の自由な意思で選択できます。日本もそうです。日本は学士のうち 20%が工学関係です。アメリカよりもずっと高いのです。アメリカは 5%ということで非常に少ないのです。こういった数字を見ると、アメリカにとって非常に大きな問題だということがわかります。

○ではアメリカの学生たちはいったいどこへ行っているのでしょうか。これはアメリカの学生の専攻ごとの数です。ビジネス、社会、歴史、教育などが多く、下の方に工学が出てきます。フィジカル・サイエンスには物理、化学、地学、その他の各分野が含まれています。物理の学士号を取得する学生数はアメリカ全土で年間 4000 人を切っていることがわ

かっています。これは40年前の物理専攻の学生数より少ないのです。スプートニクの前の時代です。スプートニクが57年です。当時の物理学専攻の学生は今よりも多かったのです。これはアメリカにとって危機的な問題につながりかねません。科学者・技術者を十分に育成していないということです。

国際的にこれはどういう意味合いを持つかということですが、アメリカは今後も技術者を輸入するということになるわけです。知的資本を今後も海外から調達するということです。こういった科学者を誘致するためにビザを発行し続けることになるわけです。ということは、人材に対する取り合いが非常に深刻化する。今後10年間、ベンチャー・キャピタルではなくヒューマン・キャピタルが貴重資源になる。そして人を呼べる国が成功するということになります。

アメリカは100年ほど前から労働力の問題を解決するために人を海外から入れてきました。しかし、現在はアメリカで教育を受けて母国に帰ることも簡単になってきました。そういうわけで、アメリカもそんなに簡単に人を調達できません。結局どうなるかということ、サラリーが上がってくるのです。弁護士や医師と同じレベルまで上がってくるかもしれない。それはいいことなのです。給料が上がってくれば prestige も上がってくる。経済的な魅力も上がってくるということで人が集まってくる。今後10年間は学生が不足するかもしれないが、その後、給料が上がることによってまた学生の数が増えてくるだろうと考えます。

質疑応答

(Q) ナノテクノロジーの製品化のステージにおいて、ITや遺伝子の技術と同じように、ファンダメンタル・リサーチから出てくるスピナウトの企業が重要な役割を果たすのか、それともコンベンショナルな製造業、ビッグカンパニーが重要な役割を果たすのか、アメリカにおいてはどのように考えておられますか。

(ムーア) アメリカではテクノロジーが大きく変わるとき、大手の企業はあまりうまくいきません。適応があまり上手ではないのです。新しいテクノロジー、特にITを見ますと、スタートアップ会社というのは大学あるいは国立のラボから出てきたものです。ナノテクノロジーも同じだと思います。大手の企業でナノテックのプレーヤーとなるのは非常に数少ないと思います。どこの会社になるかはよくわかりませんが、ダウ・ケミカルはナノテクノロジーあるいはナノサーフェス・ストラクチャーを重視しているので大きな役割を果たすかもしれませんが、2010年に大きな企業として活躍できる企業はまだないと思います。どこかで始まっているかもしれませんがまだ名前は有名になっておりません。ナスダックに上場などもまだしていないでしょう。どこかにスタートしているかもしれませんが、「ナノ」という名前がついたものがナスダックにいくつか入っているかもしれません。それがメジャープレーヤーになるかもれません。例えばネットスケープは15年前にはだれも聞いたことがない会社でした。10年前でもそうだったと思います。だから、こういったかたちで革命的に成長していくでしょう。

これはアメリカと日本とは大きく違うと思います。日本では大手の企業が大きな働きを

してきました。産業を変えてきました。アメリカではそうではありませんでした。20 世紀の歴史を振り返ってもアメリカにはそういう伝統はなかったのです。例えば運輸業界では、鉄道会社は 20 世紀の初め、大手の企業がいたのですがもはや存在していません。飛行機の会社は当時小さな存在でした。

(Q) ナノボットについては、医療の面では非常に有効な働きをしたいと思います。それにもかかわらず、かなり批判があると聞いています。ナノボットの研究は制限を受けるのでしょうか。どのようなかたちで実際に遂行されると考えておられますか。

(ムーア) ナノボットがどのようなかたちで応用されるかという質問ですね。

(Q) アメリカではナノボットに関するリサーチは多くの人々によって批判されていると思います。倫理の問題があり、ウイルスのように機能するとも言われています。しかし、ナノボットは非常に有益だと思います。

(ムーア) そうです。

(Q) ナノボットのリサーチは制限を受けることになるのでしょうか。

(ムーア) 今のところ制限はありません。

(Q) ということは、多くの人々がやっておられますか。

(ムーア) 多くの人々がやっているということはありませんが、制限はありません。

(Q) 自由ですか。

(ムーア) そうです。ナノボットあるいはナノロボットの主たる提唱者は NASA です。NASA はこのぐらいのサイズの衛星を打ち上げたいと考えています。そうなりますと非常に小さなセンサーになります。それをエウロパなどに送って、氷の中も通り、戻ってくるといようなセンサーも考えているわけです。太陽系の外へも送りたいと考えています。そのためには非常に小さくしなければなりません。短い期間で行くには膨大なエネルギーがいるからです。小さなセンサーや非常に小さな飛行物体というのは、ナノロボットが役に立つ分野の例です。

(Q) ここにいる人たちの大半が、ナノテクノロジーは 5 年後には市場に入ってくると考えていると思います。しかし、今朝のレクチャーやあなたのレクチャーでは、基礎研究が強調されています。ナノテクノロジーが、10 年後あるいは 15 年後に、例えばスーパーマーケットの棚に載ることは無理かもしれないという印象を持てしまいます。政府は短期的なメリットを期待しています。納税者の税金も使われているわけです。政治家は科学

を曲げてしまうこともあるので、そういった人たちのまちがった夢を正したいと考えます。

(ムーア) ナノテクノロジーがいつ市場に出るかということなのでしょう。私はナノテクノロジーが最初に、経済的なインパクトを持つのはメモristレージだと思います。より多くのストレージを小さなところという強い要望があるからです。ナノストラクチャーを早くできた者がたくさん売れるということです。これは5年後にナノテクノロジーが実現する1つの領域だと思います。

ナノロボットその他は、おっしゃるように2015年あるいは2012年というレベルだと思います。膨大な量のリサーチが行われて初めて市場に出ると思います。ただ、イニシアチブの中に早く実現するものを入れると、政治家あるいは一般の人たちがそのメリットを見してくれます。長期的なリサーチが一方で行われている間に、関心を維持することができると思うのです。もちろん長期的なリサーチということになりますと、そこで仕事をする人が必要になります。PhDではなくテクニシャンが必要になるのです。どういうクリーンルームが必要か、あるいは製造をどうするのかという話になるわけです。

これまではどんどん小型化を進めてきましたが、逆の方から今始めようとしているわけです。製造プロセス全体を変えていかなければいけないわけです。そうすると2005年ではなく2012年ぐらいになってしまうでしょう。

(Q) 2週間ぐらい前にレーザー・リサーチに関するミーティングが日本で開かれました。そこで前の文部大臣が、日本はナノテクノロジーでトップで、米国よりも前にいると言いました。そして、このポジションを維持したいと言いました。これについていかがでしょうか。

(ムーア) 政治的なディベートには口を突っ込みたくはありませんが、そのコメントは好きです。というのは、米国に戻って、「日本ではこういうことを言っている」と言えるからです。「日本と同じぐらいやらなければいけない。日本に追いつかなければいけない」というふうに使えらるわけです。それでナノテクノロジーの予算もさらにつくでしょう。申し訳ありませんが、それを使わせていただきたいと思います。日本は自分がナンバーワンだと考えているが、我々アメリカもナンバーワンにならないと言いたいと思います。これは競争にとってよいことだと思います。ただ、私はオプティクス、フォトニクスの人間で、ナノテクノロジーの専門ではありませんので、そのコメントを評価する立場にはありません。しかし、引用させていただきたいと思います。

“Trends in Micro-Optics and its Future”

ハンス・P・ヘルツィヒ（ニューシャテル大学・教授）

本稿は、平成13年2月16日（金）に開催された「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」におけるヘルツィヒ講師の講演内容を事務局が文書化したものです。

ご紹介ありがとうございました。科学あるいは工学的な話をさせていただきます。スイスに帰ったら政府にもっと予算を要求して、アメリカや日本に勝たなければいけないような気がしてきました。ナノ・テクノロジーというのは新しいサイエンスです。予算を獲得するためにはナノ・パッケージという新しいサイエンスを作らなければいけないかもしれません。

（以下スライド併用）

○マイクロ・オプティクスへの傾向とその将来についてお話をしたいと思います。私はスイスのフランス語圏にあるニューシャテル大学にいます。マイクロ・オプティクスの中にはいくつかの素子があります。例えば、マイクロレンズ、回折の光子、回折格子カプラー、インテグレートされたオプティクス、1つのディメンションがナノメートルサイズの光ファイバーなどがあります。すべてがミクロン以下のレンズでもって、リソグラフィなどを使って作られます。これからフリースペース・マイクロ・オプティクスという分野の話をします。

○この分野ではさまざまな動機があると思います。今朝もその話がありました。今はマイクロですが、ナノに向かって前進しています。こういった分野での応用が可能です。

製造あるいは作成の方法に触れたいと思います。マイクロ・オプティクスの製造方法、回折光学素子、屈折マイクロレンズ、グレー・トーン・リソグラフィ、RIEなどについて触れ、それからいろいろなアプリケーション、イルミネーション、ビーム成形、ラブ・オン・チップ、分光計、光接続について触れていきたいと思います。

それから次に何がくるか。マイクロではあるのですが、ナノへのアプリケーションはすでに探求されております。将来はナノにいくでしょう。マイクロあるいはナノに関しては、かなりの関心を持たれていることは今朝の話を伺ってもわかりました。

○回折光学素子についてその製造、作成についてお話しします。グレー・トーン・リソグラフィに触れ、さらに熔融レジスト法、屈折素子、それから反応性イオン・エッチングによる断面形状形成、マイクロ・オプティクス、それからレプリカの作成などについて言及します。私の大学あるいはドイツの、フレデリック・シラー大学、ヘプタゴンという会社などがかわっています。ヘプタゴンというのは、最近新しくマイクロ・オプティクスでスピノフしたところです。

○製造方法ですが、製造技術を見ますと3つの主要なパスを見ることができます。1つは、

在来のホログラフィックな書き込みです。それから、まずマスクで始まって、フォトリソに露光し、階段状のストラクチャーを使います。それから、電子ビームで直接描画をする。あるいは、レーザービームで描画をするという方法があります。これはそんなに説明を必要としていないでしょう。

○このような素子の写真だけをお見せします。これは単純な干渉によって作成されました。まず2つのビームを干渉させまして、90度曲げます。それからまたエクスポーズしますと1ミクロンの間隔のものができます。フィーチャーサイズは200ナノメートルです。安価で単純な技術です。レンズの表面のコーティングに使われます。レプリケーションによって、容易にコピーすることができます。

○これはレーザービーム描画によって、チューリッヒのCSEMで作られたものです。CSEMはスイス・センター・フォー・エレクトロニクス・アンド・マイクロテクノロジーの略です。マイクロ・フレネルレンズですが、非常によいプロファイルです。深さは約1ミクロン、ピリオドは約10ミクロンです。この構造をナノ・スケールで作りたいというのが我々の望みです。数百ナノメートルということです。数十ナノメートルにすると超紫外線のアプリケーションが可能になるでしょう。30ナノメートルぐらいにできればと思います。

○これは最近の努力なのですが、任意の表面のシェイプを作るためのもので、グレー・トーンのテクノロジーを使っています。グレー・トーンのマスクはいろいろな充てん率のものがああります。これはグレーで、この場合にはプリズムを作ることができます。最初はフォトリソ、それからガラスにエッチングが行われます。

ここでナノは、表面の精度です。つまり、波長の何分の1ということで測定されますが、10分の1（ラムダ）という精度が必要です。それはナノメートル、オングストロームのレンジになります。

○これがそのようなグレー・トーン・ストラクチャーの写真です。大きさは約100ミクロンで、深さは10ミクロンです。表面の精度は10分の1（ラムダ）はまだ達成されていません。周りの部分は意図してできたものではありません。これは描画のライティング・フィールドが出会うところです。

○テクノロジーの中で詳細に我々の研究所で研究が行われているのが、熔融レジスト技術です。これは単純で、は自然によってインスパイアされたものであるとも言えます。本当はそうではないのですが、そのように考えることができます。バイナリーのマスクから始めて、フォトリソの円柱ができます。それからオープンで加熱するとシリンダーが溶けて、球状の表面が得られます。もちろん、すべてのパラメーターはコントロールしなければなりません。そのようにして、望ましい表面が得られます。これは球面に非常に近い面ができます。2ミクロンから5ミリのレンズができます。f値は5以下です。クォーツにエッチングしますと、f値を増やすことができます。どんなところまでも変えていくこ

とができます。そして、回折限界の分解能を得ることができます。

○マイクロレンズは100～200ミクロンがよいということで、光学インターコネクト、シングル・モーター・フアイバーの接続に使うことができます。いくつかの素子がここにあります。3ミクロンのレンズ、これはちょっとおもしろいので作られたものです。円柱レンズ、楕円レンズ、リング、ドーナツ、クロス、いろいろなものがあります。こういった構造は、測定が容易ですので、マスターされています。ただ、こちらの方はマスターするのが非常に難しいのです。

○これもニューシャテル大学なのですが、断面形状の形成を行おうとしています。レンズを熔融性石英にしまして、形状を変更しようとしています。30ミクロンのレンズです。フオートレジストを使いまして、球面からの偏りがここにあります。エッチングをしまして23ミクロンにしました。アブリケーションに合うように球面の条件を変えることができます。まだ精度の高い3Dの成形はできていません。任意の表面をナノメーターで測定することは大きな課題です。

○これらはドイツの素子です。いずれもe-ビームを使っています。バイナリーのDOE、グレーズド格子、任意のビーム成形素子などです。これは、熔融レジストのテクノロジー、つまり大きな構造のものと、小さな構造のための電子ビームの描画を合わせて使っています。これらはラフ・オン・チップ・システムの分光計に使えるでしょう。

○もう1つ製造のスライドですが、これはざっと見ていくことにします。よければあとでお読みください。いくつかの異なる複製の技術があるということです。高温エンボスからUV-エンボスまでは成熟した技術です。ナノ・ストラクチャーを製造するには、とてもよい技術だと思います。これはヘクタゴンから引用したものです。CSEMとフインランドの大学のスピノフでできた会社です。

○次に、応用にいききたいと思います。ここできいよいよ収益が出る。そして政府にこれは役に立つから予算をくださいと言えるベースになります。

最初にイルミネーションです。それから、ディスプレイ、ハイパワーのレーザー・ビーム成形、ラフ・オン・チップ、マイクロレンズ投影リソグラフィ、光接続、小型化されたフーリエ分光計について説明します。

○まず照明（イルミネーション）です。これは、例えば、従来のランプに比べて2倍の光を集められれば、エネルギーを下げることができます。だれでも照明は必要でしょう。この部屋でもいりますし、自動車、信号機などいろいろなところに必要です。LEDを照明に使えます。いろいろなアプリケーションに使うことができるでしょう。ただし、台所にLEDはほしくない。あるいは、リビングルームにはほしくない。ラセン状やハート型などもっとフアンシーなものが必要でしょう。ということ、ビーム・シェーピングの素子が必要です。また、拡散するものが必要です。これはマイクロ・オプティクスの大変よい

応用例だと思います。拡散を 20%、30%など自由にできます。スイスは時計の国なので、これは時計に使ったものです。時計の中にLEDで光を入れるということです。

○もう1つの照明として、シリカのウエハーです。このウエハーをイルミネートしますと、どんな形のビームでも、どこからのポジションでもいいのですが、リングやフラットなどいつでも同じパターンを出します。これはナノ・ファブリケーションでは、この超紫外線のビーム・シェーピングはいろいろなものにも使えるでしょう。ウエハーのステッパーにも使えるでしょう。次世代のナノ・テクノロジーに使えるマイクロ・テクノロジーです。

○ハイ・パワー・レーザーでもビーム形成素子が必要です。ハイ・パワーにするには、ラインを長くしなければなりません。ラインが長さ 350 ミクロン、幅 1 ミクロンだと、ここから出たレーザーをファイバーに入れようとする多くが失われてしまいます。そこでレーザー・ライトを3つの部分に分けて並べ替えると、ファイバーにフォーカスことができます。

○それを行うのがこの素子です。先程ももうご覧になったと思いますが、3つのゾーンがあります。真ん中は光を通しフォーカスします。こちらは光を上向きにし、こちらのは下向きにします。ここに1つ目の素子があり、2番目の素子がまた光の方向を変えます。そしてファイバーに映ります。半導体レーザーの前にもレンズがいます。この素子は非常にいいと思います。ただ、これを組み立てるのは別の問題です。これをいかにしてサブミクロの精度でレーザーの前の正しい位置に置くかが問題です。

○いろいろなやり方がありますが、1つのやり方として、このようなオプティカル・テーブルがあります。テーブルにオプティカル・ホルダーがついています。このテーブルのサイズですが、こちらにマッチがあります。このホルダーの大きさがわかると思います。オプティカル・エレメントはオプティカル・ホルダーに取りつけてあります。そして、ロボットがさまざまなピースをこのテーブルの上に載せていきます。そのときに出てくるビームを測定します。それによってポジショニングをしっかりとっていくということになります。これはEPFローザンヌによってなされました。TRIMOSMDといわれているもので、3Dの小型化オプティカルSMD組立技術です。

以前のとは全く同じではないのですが、似たようなシステムです。プロトタイプとしてはいいと思います。ただ、大規模なファブリケーションにはまだなってはいません。

○何回か使われております作業としてラブ・オン・チップがあります。例えば、医療用のアプリケーションに使えると思います。医療用アプリケーションは社会の高齢化のため増えています。私を含めて50歳以上の高齢者には必要です。特にこのラブ・オン・チップの考え方ですが、多くの測定がパラレルでできるということです。さらに、使う液体は非常に少なくてすみずみ。ここから血液などの液体を入れます。ここでマイクロレンズアレイを使ってイルミネートします。そして、出てくる光をここで検出して、透過測定、分光測定、吸収測定、蛍光測定をします。

○これは原理としては非常にシンプルなものですが、詳細ではいろいろな問題があります。これがパイレックス・ウエハーで、いろいろなチャンネルがあります。マイクロレンズがチャンネルの上にあります。レンズは直径が 310 ミクロンです。液体がチャンネルを流れているのがマイクロレンズでわかります。

○先程も申し上げたようにシンプルな原理です。ここに 2 つのウエハーがあります。液体をイルミネーションします。そして蛍光が出て、測定します。問題はこちらの信号が 100 倍ぐらい強いので、2 つを分けなければなりません。通常はフィルターあるいはアパチャー・ストップを使って分けます。システムの大きさを制限する問題は、システムが小さくなると光が分散してしまうことです。ですから、サイズを 100 分の 1 や 1000 分の 1 にするというのがなかなかできません。

○具体的にどういうシステムかということをごちゃで見ていただきたいと思います。あまり詳細は見えませんが、ここにマイクロレンズがあります。マイクロレンズはチップの両側についています。ここにはアパチャー・ストップがついています。それにはマイクロレンズのための穴があります。ナノ・モルのレベルで検出ができます。

ナノでは面積や長さより容積の方が容易です。

○マイクロレンズの 1 つのアプリケーションをお見せしましたが、もう 1 つ、マイクロレンズ・プロジェクション・リソグラフィ (MPL) があります。これが我々のインスティテュートで開発して、スピノフしました。スピノフは、有名な半導体メーカー、装置メーカーの *カール・スイス* 社に買われました。

ここでのアイデアとしまして、大きい、8 インチぐらいのマスクがあります。そしてそれをイメージングいたします。スキャニングをするわけです。そしてこれを 1 つのステップでフォトレジストにイメージしていきます。解像度は高くありません。3 ミクロンぐらいです。超平坦なマイクロレンズ・プロジェクション・システムがここにあり、4 つのマイクロレンズがここについています。これでイメージを出します。回折のクォリティ、アライメントが非常に重要になってくるのがわかります。回折限界も非常に重要です。

○このシステムのメリットは、焦点の深さ (Depth of Focus) です。パターンのプリントに関しては、平面でなくてもそれをプリンティングすることができます。V 溝でやることができます。非常に大きなアプリケーションがあると思います。

さらにまた、解像度が 3 ミクロンまで、動作長が 1 ミリですので、ファブリケーションをスピードアップさせることが可能です。

ここにシステムをご覧いただいています。オペレーターの指が写っています。通常のサイズで、このようなかたちで動作させることができます。これはナノ・ハンドではなく、普通の人の手です。

○このようなものが得られます。ここに大きなラインがあります。50 ミクロンです。ベス

トフォーカスになっているのが真ん中、左はベストからマイナス 150 ミクロン、右はプラス 150 ミクロンです。ほとんど違いがありません。ベストなものから外れてもこれだけしか変わらないことをご覧ください。

○米国においても、多くの新しいテレコムの子会社が出てきています。だれもが、テレコム、テレコムという話をしております。こうしたテレコムの子会社はますます拡大しているわけです。

それでは、オプティカル・スイッチ、あるいはオプティカル・インターコネクトについてです。シャッターがついている 1 対 1 のもの、あるいは 1 対 2、1 対 N のスイッチがあります。あるいは N 対 N もあります。いろいろなコンフィギュレーションが可能だと思います。オプティカル・レンズのカンファレンスでも、いろいろなものがプレゼンテーションされております。

○こうしたものがどういうスイッチになっているのかを見てみたいと思います。2 つの例をご覧ください。まず最初の例ですが、こちらはシャッター・タイプのものです。基本的には、こちらはシリコン・プラットフォームで、シリコンをカットして小さなフィルムにして、シャッターを立てるようになります。

あと、右の方は全然違います。こちらの方は厚いシリコン・ストラクチャーがあり、これはシリコン・ウエハーの上にあるわけです。そしてその間にレイヤーが入っているわけです。そしてこれを深く 80 ミクロンぐらいエッチングします。そしてこのところのフリースタANDINGの素子が入ってくるわけです。鏡のような形です。ここのところにファイバーがありまして、ミラーもついています。ですから、光が屈折するということです。鏡が外の方に出てきますと、光が送られます。鏡がなくなるとまっすぐに行くということです。このような分野の研究をしている人々はどんどん増えていると思います。今はほんの 10 人ぐらいですが、毎日とはいわずとも、少なくとも毎週増えていると思います。

○これも新しい試みですが、この場合は 100×100 というかたちの完璧なスイッチャブルなシステムになっています。これは有名な Lucent 社のスイッチで、こちらはドロ잉です。マイクロミラー、それからマイクロレンズがここにあります。ただ、ここでの問題は、いわば光のファイバーへの再投入で、その精度はミクロンのレベルでなければならない。さらに解像度 (resolving power) も非常に高くなければならないということで、それによって、この光をファイバーに対してファインチューニングしていかなければならないわけです。特にオプティクス関係の人々は、ここから光のカップリングをどうするかということで関心を寄せております。なぜならこの分野の光学系の人たちのほとんどは、メカニクス系から来た人だからです。

○このシステムは非常にシンプルなもので、こちらにソース・ファイバーがあります。それから受光ファイバーもあります。ここの V 溝がありまして、ここに色消しレンズがあり、ミラーがあります。この色消しレンズを動かすことによって、うまく結像させるかたちになります。これを数値的・実験的にシミュレーションを行いました。どのような結果が出

たかを次でご覧ください。

○これは受光ファイバーの数、それからロスがどのくらい出たかということです。ですから2番目、3番目のファイバーでは、光の投入率がよいのですが、6番目、8番目のファイバーになると、かなりロスが出ているわけです。ここで色消しレンズ 40mm、また全体が 80mm というかたちです。つまり、この 80mm の非常にシンプルなアクロマット (achromat) を使う場合は、6、8 ぐらいのファイバーまでを一方向にしか設置できず、ここが限界となります。ですから、それをそれをさらに改善したいとなると、サイズを大きくしなければならぬのですが、それは望むところではありません。このシステムを小さくすると、もっと良質のレンズを使わなければならない。あるいは収差 (アバレーション: aberration) をさらに是正していかなければならないわけです。

○収差を狭くし、是正するための一つの方法は、deformable mirror を使うということです。膜と電極を伴うミラーです。このミラーはデルフト大学のドヴィン (Dovin) 先生が作ったものです。電極を作動させれば、収差を鏡の表面に導いて吸収することができます。

○これはその具体的な写真です。どれくらいの大きさかということで、このミラーはセンチメートル単位です。こちらの方にファイバーが出ています。ここのところが、ファイバー・ホルダーです。ここのところに、アクロマット (色消しレンズ) があります。

○そしてその結果をご覧ください。最適化を図ったものです。これをテーブルに載せ、ライトを測定するわけです。このアバレーションゆえに、このミラーの最適化をしておきます。そしてテーブルで最適化しますと、このようなシグナルが上がってくるわけです。このグラフの 20th receiver fiber のように、上がっていくのは非常にいいかと思います。あまりよくないのは、一番下の 30 番目の受光ファイバーで大体 20% ぐらいまで、19 番目のファイバーでも 50% ぐらいまでしか上がっていないということです。

まだよくわからないのですが、1 つはミラーのキャパシティの問題と、ミラーがちょっと振動しているわけです。たぶん不安定なパワーソースなどが原因でしょう。そして、これがインジェクションに悪影響を与えているということです。ただ、我々は自信を持っています。おそらく、よりよいミラーを作ることができ、振動の問題を解決することができますと考えています。しかし、これは問題解決の方法としてより、どちらかというと、アナリシス・システムとしてはいいかと思います。光システムがあった場合、それに最適なミラーを入れて、その収差を得ることができるということで、一般的なかたちで分析用として使えると思います。

○もっと問題解決の方法としてよいものということで、もう一度マイクロ・オプティクスに戻ります。マイクロレンズをファイバーの前に置きます。そして、それぞれのファイバーの前に 1 つのレンズを置き、そしてレンズのアパチャーを減らし、結果として収差も大幅に減らすことができます。ただ、この前でアライニングをすることを、いかに安価に行うかが問題ではあります。Lucent のシステムでは、たしか 1 立法メートルぐらいのサイズ

だったかと思いますが、かなりのアラインメントや微調整が必要になります。やはりこの部分をいかに安価に作るかが、今後の問題かとも思います。

○この写真では、ミラー、アクロマット（色消しレンズ）、そしてマイクロレンズがファイバーの前にあります。

○これはカップリング効率です。マイクロレンズを使わない場合を+、それからマイクロレンズを使った場合を○で示しています。フォトレジストの吸収による損失もあります。これは一次元・一方向のもので、ファイバーを2次元で2倍にします。それぞれの平方になります。3次元にすると1000倍以上のファイバーを扱うことができるようになります。

○それでは、システムの応用の方に話は移っていきます。フーリエ変換分光器です。このテクノロジーは通常、これぐらいの大きさで作るものですが、これをもっと小さく作って、数mmのオーダーのものを作ろうということを考えたわけです。フーリエ変換分光器というのは、干渉器であり、2つのミラーがあり、1つのミラーが移動して行って、その干渉の量と移動の関数として計測するものです。フーリエ解析をすると、スペクトルが得られるというものです。

○これをシリコンでどのように加工するかが問題だったわけです。ここに分光計（beam splitter）があり、鏡が2つあります。こちらのミラーは、くし型のアクチュエーター（シリコンに深くエッチングされているもの）によって動かされています。これによってミラーを移動しています。

○これがミラーで、80ミクロンの高さで、反射率60%、今は85%に上がっています。これがくし形のアクチュエーターです。これでミラーを動かしています。メカニカル・パスは40ミクロン、そしてオプティカルは2倍、80マイクロメートルということになります。

○これが実験の結果です。この分光計の実験の経過です。ヘリウム・ネオン・レーザーのスペクトルです。ヘリウム・ネオン・レーザーというのは、本当はこういったスペクトルではないわけです。なぜこういう結果が出るかというと、ミラーの非線形によるわけです。これは干渉計ですので、この非線形を測ることができ、その分は ± 0.5 マイクロ・メートルぐらいです。これがもともとのスペクトルです。我々は、非線形ではあるが反復可能であることがわかり、 ± 25 ナノメートルで即定位することができたということで、それをこの積分の中に入れ、その分を補正すると、6ナノメートルの解像度の、数mmの分光計ができたことになります。

○こちらは分光計のメカニカルな部分になったわけですが、ここにオプティクスを入れようとしたわけです。シリコンでマスターを作って、そしてそれをメカニカルなシステムに複製できるように、こういう実験をしています。これが複製されたビーム・スプリッター

と円柱形のレンズです。これはなかなかうまくいっています。

○こちらは何でしょうか。ちょっと未来の話ですが、将来の分光計です。基本的にはフーリエ分光計です。ビームスプリッターではないが、2つのミラーが先端で互いに重なり合っています。深さが可変である格子ともいえます。ここで格子のいろいろなパーツが見えます。このパーツを立ててアクチュエーターを動かすと、もう1つのパートが動くということになります。最初のフラクチュアル・オーダーを測定すれば、その信号の大きさを測ることができる。ここでは、追加的なオプティクスが必要ないという特徴を持っています。

○それでは、今後の進展を見ていきたいと思います。

1つ、ナノというのは結構だが、ナノだけではないと言いたいと思います。ナノを強調し、マイクロレベルの研究だけでよい仕事をしていく人もいますが、それがすべてではありません。ナノの分野でも基礎研究が必要で、また広い視野に立った研究が必要です。

そこで、大型のマイクロ・オプティクスについても、非常に将来は開けているということに触れておきたいと思います。それから、非常に深い立体の表面プロファイリングをナノ・メートルの精度で行うことが重要です。

それから、ナノ構造、人工索引構造、それからフォトニック結晶があります。

もちろん、メトロロジ（Metrology）で、SNOM（近接場走査型光顕微鏡）、それからHRIM（高解像度干渉顕微鏡）も重要です。なぜなら、ナノを見るために必ずしも近接場（near-field）を使う必要はなく、場合によっては、far-field から有益な情報が得られるわけです。

応用例として、光メモリー（Optical Memory）の概念も重要だと考えられます。

これらのうち、前半部分だけ少し触れていきたいと思います。

○まず大型のマイクロ・オプティクスですが、これはLawrence Livermoreのホームページに出ていたのです。彼らは大型の宇宙望遠鏡を作ろうとしている。2つのスペースクラフトを使って、それらを数キロ離しておき、片方に大きなレンズを持って、片方にその結合のための資材を載せる。現在25mのフレネル・レンズの加工技術を開発しているということです。

さて、マイクロ・オプティクスというのは微細加工を使います。非常に薄膜の非常に薄い、非常に計量の素子を作れるということで、宇宙でも使える非常に大型の素子を作ることにも利用できるわけです。こういった2個の宇宙船を使ったこの宇宙望遠鏡も検討されておりま

○こちらは回折格子です。1つの波長には非常にうまくいくわけですが、白色光用のものなどを作ろうとすると、効率の問題が出てきます。というのは、これは1つの波長にしか効かないというわけです。そういうわけで、格子の各周期を色消しレンズですということになります。2つの間、あるいはこの上の部分にエアスペースを入れることが考えられるわけです。

○キャノンがこれについて特許を取っています。これについては、プロトタイプが出ていることがわかっていますが、これが生産の段階まで行っているのかどうか、聴衆の方でご存知の方がいれば、教えていただければと思います。

寸法は、こちらの構造1つの長さが100ミクロンで、深さは20～30ミクロンぐらいです。

○こちらは効率性です。これは従来型のブレード格子の効率です。1が100%です。これが補正されたブレード格子の効率です。ここで、秘訣はどのようにスムーズな素子を安く作るかということです。

○ブレード格子ですが、人工的なブレードを作ることができます。格子が波長よりも小さくなりますと、光はその構造を見なくなる。薄膜を見るだけです。充てん率を変えれば、解析、あるいは屈折率を変えることができるということで、バイナリーなブレード格子を作ることができます。しかし、そのためには、解像度100ナノ・メートルのテクノロジーが必要です。それがなければできないわけです。いったんそれができれば、安価に複製できます。現在、これは試みられています。ラボの中ではできています。波長では簡単ですが、可視光ではなかなか難しいという状況です。

○フォトリソグラフィとかフォトリソ・*バンカップ*というのがよくいわれますが、波長レベルの周期で作ります。そして屈折率が高い材料が必要です。そしてここに寸法が書いてありますが、280ナノメートルの薄さ、そして径（半径）が200ナノメートルのものがが必要です。丸と長方形では結果が違いますので、非常に精度が高くなければならない。こういった結合ができれば、光を誘導することができる。現在のところ、すべての集積オプティクスがそれをできるわけではないので、あまり関心はないかもしれません。しかし、おもしろいことは90度で光を反射することができるので、ロスのないシステムができ、また小型化できるということがあります。おそらく、10年ほど前からアイデアはありますが、実際の加工の可能性は、今後の技術の進展にかかっていると思います。

○さて、こういったナノ構造を作るためのツールとしては、電子ビームが最も一般的なやり方かと思います。今までにも成功を収めています。ただ、これはオリジネーション・ツールでしかないので、1回しか使えない、複製できないということがあります。そういうわけで電子ビームには、複製技術の問題があるというわけです。

光学リソグラフィは今、ナノの方に進んでいます。DUV、EUVです。しかし、今まで市場規模が小さかったということで、高価なリソグラフィ機器は、なかなか実際に使わせてもらえなかったという問題があります。市場が大きくなればこの点は改善するでしょう。

次にソフト・プリンティングは柔らかい材料での複製です。電子ビームで作られたものの複製で、数百ナノメートル以下のものがあります。

それから干渉技術では、安価で大きな面を作ることができます。あらゆるものを作ることとはできませんが、いろいろなものに適用可能です。

そして、自己組み立てについては、先程も話がありましたが、今は一定の構造に限られていると思いますが、構造をプログラミングできるという可能性を持っています。

○いくつか、写真をご覧ください。こちらは電子ビームで、スイスの Paul Scherrer Institute のものです。1ミクロンです。1、2、3、4、5周期が1ミクロンの中に収まっています。ということは100ナノメートル・オーダーであるということ、そして、アスペクト比は5ぐらいが実現されているようです。

○これはコンタクト・プリンティングで、IBM Ruschlikon です。もちろん、オリジナルが必要です。EDMSという材料を使ってコピーを取り、そのあとそのコピーを別の基材に転写できる。これはソフトでなければいけない。基材が完全に平坦でないという場合も考えられるので、柔らかなものである必要があります。

○それから、干渉ですが、2つのビームの干渉で作られたものです。これは1ミクロン、これは1、2、3、4周期が1ミクロンに入っています。レーザーの波長は430ナノメートルという普通のもので、そういうわけで、この波長で微小構造ができるわけです。

○この grating というのはまだ理論上のものですが、近い将来、干渉によって、こういった構造が作れるようになるかもしれません。複数のビームを記録する、そしてそのヘッドを回転させて加工することが可能になるかもしれません。これは3つのビームを使っています。そういうわけで、もしそれができれば、安価にナノ・テクノロジーが実現できるかと思えます。

○最後に、将来について。マイクロ・オプティクスによる明るい星が輝いています。マイクロレンズで作られています。そしてその裏に、皆さんが作りたいような構造が示されています。明るい星が輝くような、明るい未来だということになります。ありがとうございました。

質疑応答

(Q) 大変興味深い説明をありがとうございました。特に関心を持っているのが、大きな面積のマイクロ・オプティクスに関してですが、マイクロレンズの投影のリソグラフィに関して伺いたいと思います。解像度は現在、3～5ミクロンとおっしゃいましたが、これを限定する要因は何でしょうか。

(ヘルツィヒ) つまり、どうしてもっとよくなるのかということですか。もっと小さくならないかと。問題は、マイクロレンズでは、軸の上では非常にいいのですが、ただ、軸から外れる場合はアバレーションが大きくなります。原則としては球面レンズでもいいのです。しかし、今のところはコントロールが難しく、解像度がこのようになっています。もし走査システムを使えば、少しは改善できるのですが。

(Q) アバレーションを減らすためには、4つのレンズのシステムを使ったと思います。4層のものです。それから、また球面レンズも1つのソリューションとしてあったと思いますが、今はどちらを使っているのですか。

(ヘルツィヒ) わずかに球面のものです。MITでは同じようなシステムで、スキャナーを今やっています。それも1つのソリューションかもしれません。解像度を上げる。

(Q) 1つよろしいでしょうか。いくつかのパターン生成の方式、リソグラフィとか、ソフト・プリンティングとか、複製などを示されました。それらは実際、ナノ・マニファクチャリングで使える製造技術だと思いますが、こういった手法を一般的なかたちで応用するものは、どうでしょうか。ほかの材料とかほかの目的とか。

(ヘルツィヒ) 例えば、先程のコンタクト・プリンティング、これは私の理解が正しければ、ナノ粒子を表面上に位置決めするときに使われています。それからもう一つの応用例は、今日は示していませんが、コンタクト・プリンティングを使って、液体の結晶を、あるいは高分子を、液体の中でアライニングするものにも使われています。

「ナノ・マニファクチャリングの製造分野における応用」
潟岡 泉 講師（日本航空電子工業（株）中央研究所所長）

本稿は、平成13年2月16日（金）に開催された「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」における潟岡泉講師の講演内容を事務局が文書化したものです。

日本航空電子の潟岡です。今日は矢部さんの方から大変重たいテーマをいただいてしまい、ここに来るまで大変足取りが重かったです。さらに午前中、藤正先生のお話の中で「ナノ・マニファクチャリングで、向こう数年ぐらいで金もうけなどできると思うな」というお話もあり、私はいったいどうしたらいいのだろうと思いながらまいりました。

ただ、午前中の植田先生の方から「問いを発する学生はよい学生だ」ということで、今日はなるべく、クエスチョンマークというか、「何ができるのか。どんなものなのか」という問いをなるべく発しながら、話をしていきたいと思います。今日は主にフォトニック結晶を例に取りながら、最後にどんな技術がいるのか、いつごろになるのかという話ができたらよいかと思います。私はこのあと話される神谷先生の前座ぐらいにお考えになっていただきたいと思います。決してこの分野の専門家ではありません。一介の多層膜屋です。

（以下OHP併用）

○ここに挙げましたナノ・マニファクチャリングとはいったいどんなものか、どんな考え方で今日これからお話しするか、内容を少し言います。私が勝手に考えるナノ・マニファクチャリング技術というのは、ナノメートルオーダーの構造を持たせて、そのサイズや構造が現象とインタラクションを起こして特有な機能を発する、そういう材料やデバイスということに限定して、ただ小さいというだけではなくて、そういったものを作るにはどういう技術がいるのかという話で進めたいと思います。

それから、こういった技術の特徴としては、空間的とか時間的、あるいは加工のエネルギーなどに、非常に高い制御性を持った加工が必要なのだろうという、そういったものを想定しながら少しお話をしたいと思います。

○これも朝、下山先生の方からいろいろとお話があって、「あんなに応用があるのか」と実はびっくりしてしまっただけです。それと同じような話で、今日意識しているのは大体この辺の領域の話であるということです。

今、我々の身の回りにあるナノの世界というと、ナローバンドパスフィルターについてはあとでお話ししますが、一番数が多いのがデンスWDMといって、光の情報を非常にコンパクトに、非常に狭い波長間隔で押し詰めて送るという技術があります。そのITUグリッドが、今0.8ナノぐらいです。それが50ギガになると0.4、25で0.2というナノメートルの間隔で、波を並べていくという技術がすでに現実になっております。そういったものを、こういったフォトニック結晶応用デバイスで何かやっていくには、どうしたらいいかということも少し頭に入れてお話ししたいと思います。

それからもう1つは、今までお話の中であまりなかったのは「熱電変換」という領域です。フォノンの平均自由行程とエレクトロンの平均自由行程の差がうまくあるので、それ

を利用して、フォノンが散乱するけれどもエレクトロンはうまく通してやろう、というものができないか。この辺は、環境という問題では非常に重要な技術になってくると思い、少し説明の中で触れてみようかと思っています。そのほかは大した話ではありません。

○なぜ、そのような技術が必要になるのかを私なりに理解してみますと、これは朝のお話にもあったわけですが、先進国だけが便利さを謳歌するような時代というのはもう許されない。最大多数の最大幸福のような社会は、やはりこれからどうしても指向していかざるをえないだろうと思います。いってみれば勝手にエネルギーや資源を使いきってはいけませんと、そのような要求が産業の中でも大きな流れとして出てきております。

ここは ISO14000 などいろいろなかたちで、企業活動の中にもそういうことが具体的に盛られてきて、そういった流れがあります。それから今、爆発的に増えております。これも月並みですが、高度情報社会があります。いってみれば個人と巨大な集団がネットワークの中で対等になってくるような社会が、今、現実になりつつあります。こういった社会の流れを、最小のエネルギーと最小の資源で実現していく。技術としては、ジャイアント・ナノという言い方が、わりといいかげんな定義ですが、ナノの効果を非常に巨大に表すようなデバイス群によって支えられていくのではないかと。そのためにナノ・マニファクチャリングというのが、皆さんの注目を浴びているのだらうと思います。

そして、こういった技術とこういうデバイス群は非常に相補的で、先程から大きな旋盤が小さな旋盤を作り、小さな旋盤がまた小さなものを作っていくというように、相補的にこういう技術が交流しながら、社会を支えていかななくてはならないのではないかと。そういった社会的なニーズがあって、将来ナノ・マニファクチャリングと呼ばれるような技術が、やはり必要になってくるのだらうと理解しております。

○これは、将来といっても今、ここで取り上げるような遠い将来の話ではなくて、近々こういったネットワークで構成された情報社会ができてくるということです。大陸間を結ぶようなウルトラロングホールで結ばれて、それが大陸の中に入って、ロングホールという基幹系を作ります。その下にメトロと呼ばれるような領域があり、それが個々人の家庭あるいはオフィスへつながっていくという階層構造を取っております。こういうネットワークに光のデバイスが膨大に使われようという時代に今、なっております。

私の今日の役割の中に、産業規模がどのくらいだという話をしると、大変難しいご依頼がありました。とてもそんなわけにはいかないのですが、とりあえずこのシステムに大体どのくらい毎年の需要があるかという、今、2003 年で 13 兆とか 15 兆といった投資が必要だろわといわれております。こういうところで使われる光学系の小さなフィルターなどを合わせたサブシステムで、数千億ぐらいの需要があります。その中の、さらに我々が実際にやっているようなバンドパスのフィルターなどで、大体、数百億ぐらいの需要があります。仮にそういう領域が、これからお話ししますような、フォトニック結晶の応用デバイスで置き換わるとしたら、それはアメリカ一国の市場ですから、全世界でそういうものが構築された場合は、その何倍にもなるだらうという印象は持っております。

○だんだんと技術的な話に入ってきますが、フォトニック結晶というのは考え方としては

古いかもしれませんが、物が作れるようになったのはほんのここ最近で、まだ生まれたばかりの技術です。それに対して現在、非常にソフィスティケートされた技術分野で、そういった技術と対等に戦えというのはとても無理な話で、今やらなければいけない技術がどんなスタンスになるか、これも釈迦に説法かもしれませんが、簡単にお話しします。

一番上にあるのが、いわゆるデンスWDMといわれ、基幹系のシステムです。その下にいくつかのアクセス系の考え方が示されているわけですが、ここで広いのは波長の領域です。ここに線で書いてあるのは、基幹系ですから情報量が非常に多いのです。アクセス系では、広い領域でふらふらと動いてもかまわないのですが、こういった基幹系では非常に厳しくて、ここに書いてありますように、0.8 というのは 100 ギガに相当するのですが、今 0.8 で並べなさいと、0.8 ナノで並べるわけです。だから非常にシャープなフィルターを作らなくてはならない。したがって、この中心波長の温度依存性なども、実は 1 ピコメートル/℃以下の安定度があるといわれています。そういう意味では、ナノを超えてピコの要求がすでに現実の問題として出ております。

現在は、この辺は多層膜やAWDといったデバイスでカバーをしているわけです。

○さて、そういう社会のニーズに対して、どのように応えていったらいいのかということです。製造分野への応用というテーマは、要は何が作れるのか。ナノ・マニファクチャリングという技術を総称した技術で、何が作れるのかを少し理解してみたいと思っております。

いってみれば、最初に書きましたように、対象とする波長や周波数と同レベルの構造を人工的に作り、新たな効果（価値）を出現させるための技術だと理解します。したがって、こういった技術であるからには、従来と同じ効果や機能を要求されるデバイスについては、より少ない材料や、より少ない資源で作らなくてはならない。やはりそういう技術でないといけないと考えます。したがって、結果的にはより少ない消費エネルギーで製造できればいい。やはりそういう技術を考えていかななくてはならないと思います。

したがって、そういったデバイスや材料によって構築される社会のシステムとは、また従来よりも効率的で、より省資源で、省スペースでなければならないのではないか。そのような要求が、この技術には課せられているのではないかと考えます。

○それでは、これは朝の下山先生のOHPから比べると非常に貧弱なのですが、話題になっている、私なりに注目するような領域ということでお考えになっていただきたいと思います。ナノ構造ということで、いくつかいろいろな分野が提案されています。やはり今一番大きく目立つのは、フォトニック結晶です。すでにNECの小坂さんが、スーパープリズムとかスーパーコリメータといったものを実証され、これらが先程のデンスWDMのクロス・コネクティに使えるような、光の合分波器に使えるのではないかというアイディアも出されております。

それから、この辺もすでに実験が始まっていますが、面発光レーザーをフォトニック結晶で挟んで、低閾値のレーザーを作る。あるいは、非常に小さいスポットでできるので、容量が少ないということで、超高周波の光源になるのではないか。それからこういったものは、スペース領域に液晶などを入れたりして、超並列の光スイッチになるのではないか、

光トランジスタや光回路、大容量の記憶材料とか、非常にたくさんの応用を考えておられます。さらにまだいろいろとあるわけですが、このようなものが考えられます。

それから、ここではフォトリソグラフィ結晶ではないのですが、近接場光学ということで、従来の光の回折限界を超えて小さく絞れるということで、エバネッセント光のプロープとか高分解能の書き込みとか、近接場の走査顕微鏡とか、いろいろなものが考えられています。

○釈迦に説法になることを恐れずにご紹介しますと、これは野田先生の書かれたものからコピーを取らせていただきました。お手元にはお配りしておりませんが、補助資料として使わせていただきたいと思います。

これはイメージです。これは横が100ミクロンぐらいの大きさで、ここに低閾値のレーザーアレイがあって、こういった極微小の導波路があって、変調器があつてうんぬんというものを、この中に押し込んでしまいたいというものです。現在、先程お話ししたような、フォトリソグラフィネットワークの中のサブシステムというのは、弁当箱ぐらいの大きさがあり、昔のディスクリート部品をプリント基板に配線したようなイメージのものです。

それに対して、本当にこういうものができれば、真に光ICというようなものにふさわしいものができていくのではないかと思います。これは、規則正しい構造の中に、こういったかたちで欠陥を導入したものとして考えられております。

○それから、そのほかにもいろいろとナノ構造があるのですが、先程お話ししたフォノンのガラス材料のようなものを使って、熱電変換で高効率のものをつくろうとか、環境触媒を高性能化しようとか、これはもうたくさんありますので省略します。こういったものを改良するために、いろいろなものが提案をされております。

それで先程少し触れました、あまり話題になっていかないかもしれませんが、熱電変換の方では、やはりずいぶん研究が進んでおります。これはマンガなので本当にこんなものができるかというよくわからないのですが、フォノンに対して障壁になるような材料、あるいは構造を作ってやる。ただし、電子の波長は長く、エレクトロンのド・ブロイ波がフォノンの波長より長いので、そういうところを通り抜けていける。そういうもので、いってみれば電子をよく通して熱伝導を悪くするという構造が作れないかということで、スキャタルライトとか、クラスレートマテリアルなどが提案されております。

○少し飛ばし始めますが、以下はフォトリソグラフィ結晶を例に取り、製造システムを少しシミュレーションしてみようと思っております。

さまざまなフォトリソグラフィ結晶が提案されているので、それに伴っていろいろと製造法も多種多様です。大きく2つに分け、1つは一筆書きに近いような方法で周期構造を形成していこうという考え方があります。これは光像形法といい、これはもう電子デバイスの方ではよくやられています。紫外線硬化樹脂をうまく使って構造を作るものと、そのほかにも多光子吸収で石英の中に書き込もうという話もあります。

それから半導体をエッチングして、融着しながら組み合わせていこうとか、あるいは選択的に成長させようとか、そういった一筆書きに近いような方法もあります。この場合には、成長させる、あるいは物を形成させる過程で、欠陥の導入を行えるという特徴があり

ます。

それらに対して、一括してフォトリソグラフィック結晶を作ってしまうというので、1つは微粒子を分散させる方法で、 SiO_2 の微粒子、それからポリマー等、ポリスチレン等の球を分散させて、それで構造を作る。あとで簡単にご説明しますが、この場合には周期構造とは別に欠陥を導入しなくてははいけないけれども、将来、バルクを考えていった場合には、ひょっとしたらこういう方法にメリットがあるのかもしれないと考えております。

そのほか、有名な自己クローニング法といって、バイアスパッタで積層していくというような考え方があります。この辺は、私が説明するまでもなく、非常によく知られている方法ですので、2つだけご説明いたします。

○これは、三沢先生がいろいろとご提案されている方法です。これは、先程の紫外線硬化樹脂に400ナノの波長の光を当てて、大体80~140マイクロジュール／パルスぐらいのかたちでやられているようですが、構造をつくります。同じような考え方ですが、この場合には1ミクロンぐらいのサイズしかまだできないので、もう少し小さいところということで、これは400ナノぐらいの構造を作り込んだ例です。多光子吸収で屈折率変化を起こさせて石英ガラスの中に構造を作り込む。ただ、これは、これでフォトリソグラフィック結晶を作ったというのではなくて、これはむしろ光の記憶媒体として3次元ができます、ということにお使いになっています。いずれにせよ、こういう方法は比較的、自由にいろいろな構造を書き込めるということで、なかなか有望な方法ではないかと考えています。

○これは、今の2つの方法を基本にシミュレーションしてみたわけです。1つは、先程申しましたように、フォトリソグラフィック結晶のインゴットのようなものを作ったらどうなるか。あるいは書き込み型で、最初は欠陥のないような書き込みをすれば、それはフォトリソグラフィック結晶のプレートになりますし、欠陥を書き込んで切り出せば、いろいろなデバイスになる。仮にこういったフォトリソグラフィック結晶のようなインゴットであれば、ウエハのように切り出して機能を付加しなくてははいけない。この辺がナノ・マニファクチャリングの要素として出てくるのではないかと、いう想定をしました。思ったより30分というのは短く、時間がだいぶ狂ったので飛ばします。

通常ですと、要求仕様があって、設計があって、素材の選定があってこのように作る。微粒子の製作とかインゴット形成で、ナノ・マニファクチャリングが必要になるだろうと思います。そういったものを切り出してきて、欠陥書き込み、埋め込み、接続うんぬんをしてデバイス化するわけですが、この行程でやはりナノ・マニファクチャリングが必要になります。あるいはフォトリソグラフィックプレートの場合ですと、構造書き込みとか回路書き込みのところで、やはりナノ・マニファクチャリングが必要になってくると思います。

では、ここでどんなことをやったらいいかを簡単に説明します。

○必要な技術のポイントとしては、非常に大ざっぱで大変恐縮です。フォトリソグラフィック結晶を作るためには、私は3次元の方はわからなくて、教科書から2次元のやり方を読み出してきて例として考えたわけです。当然、どんな波長で使用するのか。それによって、媒質、構造体の材料の選定が必要になります。これは主として n の選定になります。 n の組み合

わせでどんなものになるか。それでギャップ地図を求めて、ギャップ地図から構造材の半径と格子の格子間隔を求めて、それより周波数を決めるというかたちになります。これはあとで少し説明します。そういったことで必要となるものは、媒質と構造体の光学定数、それから構造体のサイズ、配置の周期、これを必要な精度でコントロールする技術が、ナノ・マニファクチャリングとなります。それから書き込みパターン、それからエッチングと、この辺で必要になって来ます。

○これはよく教科書に書いてありますギャップ地図です。先程のお話は、こちら辺にTE、TMの重なりがあるわけですから、こちら辺で選んでやればいいということになります。それは簡単にこういった式で出てきて、これですと格子間隔 1.5 ミクロン、半径が 0.21 ミクロンのものが必要になってくる。そのような設計のパラメータになります。

○これを具体的に、本当に正しいのかということで見てみますと、これは場場先生が書かれた文献の中から例を引っ張ってきたのです。このような設計例がありまして、そうおかしな話ではない。必要周期としては、少なくとも5周期以上こういうものを積み上げなさい。バンドギャップ半減値として、10 ナノぐらいのトレランスがあると、バンドギャップが半減してしまいます。ですから、実際のデバイス精度としては、もう1けた小さいものがあるのではないかという感じがします。

○そういったものをつくるためには、製造技術の分野としては、設計、加工、組み立てと。先程から設計が大変大事だということで、設計技術、それから加工技術として用意しないといけないのは、形状を与える、あるいは機能を与える。機能、形状を与えるためには除去や付加をしないといけない。除去や付加をするためにはエネルギービーム加工、化学加工、機械加工があるけれども、従来の化学・機械加工に対して、ビーム加工のようなものは、こういった非常に微細なものを加工するためには大変重要だろうと考えています。また、こういったものを組み合わせて、アセンブルする技術が大変重要になってくると考えております。

○あまり大した答えにならないのですが、これは応用分野ということで挙げてみました。これは、吉野先生の論文から簡単に引っ張ってきたのですが、勘定できないくらい、たくさんあります。なぜこんなにあるかというと、これはもう非常に簡単なのです。電子デバイスのアナロジーで考えていただくとよくわかるように、いってみればエレクトロンのド・ブロイ波を固体の格子と相互作用させながら、現在の電子文明が出来上がっているわけです。それと同じようなことを、仮にフォトニック結晶でできるとすれば、これはもういくらでもあるわけです。ですから、そういう意味でどんな分野に応用できるのかは、実は今ここでお答えできないのですが、そういったアナロジーで考えれば、非常に広い応用分野があるだろうと想像いたします。

○では、そのために何を用意しないといけないかになるわけです。これは私の考えではなくて、むしろここにおられます*志村*さんたちの方がはるかに詳しいわけです。その

辺の資料を少し参考にさせていただきながら、このようなものがあるのかと総括しました。だいたい時間を超過してしまいましたので、申し訳ありません。これでおわりたいと思います。

質疑応答

(潟岡) 少し補足します。これはあとでやればいいことなのですが、このあとでロードマップのようなものの議論があると思うのです。これは、私は正直いって全然この分野専門ではなくて、皆さんがいろいろどんなことを言っているかをまとめただけです。

これは、やはり相補的でないといけないと考えており、川上先生がお書きになっているものでは、2次元のフォトリソニック結晶応用デバイスはまだ出てき出ようということですが。私自身の感触でも、たぶん2003年ぐらいには、何か使えるところから出てきそうな気がします。それでこの辺を、先生方と商売屋との感覚の違いかもしれないのですが、世の中には使えるものが出てくる。これがいきなり高度な光ICになるとは思いませんが、従来のデバイスに対して、メリットは必ずあるわけで、このくらいはたぶんできるだろうという感じがして、出てくるだろうと思います。

その次は、やはりバンドギャップを利用するような受動素子になるだろうと思います。最後に、最後といっておかしいですが、この辺になれば能動素子を集積化された本当の意味の3次元立体回路のようなものが出てくるのではないかと。それを補うような技術として、大きくはやはりリソグラフィの技術があると思います。リソグラフィの技術は、ある意味で私はむしろこちらの方に近いのですが、エキシマーリソはもうすでに現実の話になっており、非常に高価ですが、やろうと思えばやれる領域です。このグラフは実際に使われるようになる年代を示しており、少しずれていますが、VUVは2004年ぐらい、EUVが2007年ぐらいに準備はできるといっています。VUVが2004年ぐらいを目指していますので、その辺になれば加工精度もかなり上がってくる。そういう状況が出てきます。

一方、その中では、今はせいぜい40多重の3倍ぐらい、120多重という話もして、最近では160多重という話もあるわけです。2010年には3000多重がいるという青山先生のエスティメーションもありまして、やはりこういうところをにらみながら、何を我々が用意していったらいいのか、という議論をした方がいいかと思っています。

すみません。超過しました。

(Q) 今のご説明のイメージというのは、製造技術といっても、例えば半導体製造装置を作る技術とか、そんなイメージを思い浮かべるのです。例えば、こういうフォトリソ装置は、いろいろなエレクトロニクスに入っていくでしょうし、ただそういうのを作り上げていく装置を、まさに製造技術として作りあげていかなければいけないという、そういうイメージで捕らえればいいのでしょうか。

(潟岡) そのとおりです。書き方が半導体的だったのですが、あそこのナノ・マニファクチャリングを必要とするところは、まず、とりあえず形状を作るやり方に2つあると思うのです。ですから、書き込んでいくという方法は、たぶん高付加価値のものにわりと

向いていると思います。ですから、DWDM用合分波器は、実はまだ百何十万ぐらいと言われているのですが、デバイスの所には25万とか30万ぐらいかかります。そういったものには、たぶん向くと思うのです。将来、これが産業の米になるとときには、今のシリコンと同じように、カレーライスにしてもいいし、チャーハンにしてもいいけれども、ベースとなるフォトニック結晶を大量に生産するためには、やはりインゴットで作るようなことが必要だろうと思います。その場合には、そこを掘り込んだり埋め込んだり、あるいは重ね合わせたり、そういった技術が必要になってくるだろうと思います。そういうものの装置を、先程申し上げたようなところで準備しなくてはいけないのではないか。そういう印象を持っています。

「光デバイスのナノ・マニファクチャリング」
神谷 武志（文部科学省大学評価・学位授与機構・教授）

本稿は、平成13年2月16日（金）に開催された「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」における神谷武志講師の講演内容を事務局が文書化したものです。

ご紹介どうもありがとうございます。大変充実したお話のあとで、中身が薄いのではないかと心配しているのですが、こういう題目でお話しさせていただきます。

（以下OHP併用）

○日本語の方の題目の順番が逆になっていてすみませんが、ナノマニファクチャリングと光の緩い結合について話したいと思っています。

私がここで登壇させていただく一つの主な理由は、ナショナルリサーチプロジェクトをやったいいのではないかというお話がしばらく前からあって、約2年弱の期間、オプトメカトロニクス協会というところで調査活動をしました。そのときに、その調査委員会の委員長という役割をやらせていただいたので、その関係のレポートを土台にして、トレンドについての若干の情報をお話しして、皆様と共有させていただくことが一つの私の役割ではないかと思います。

ただ、そのような話だけだと、たぶん今日の講師のようなエキスパートの方のお話を、浅いかたちでなぞることになるだろうと思いますので、多少自分が経験したものづくりの苦労話を入れ、そういうミクロな立場から微細加工のおもしろさと難しさのようなことをお話ししてみたいと思います。マクロスコピックな話とミクロスピックな話が急に接続されていて、違和感があるかもしれませんが、その辺はご了承いただきたいと思います。

話の流れとしては、1ディメンショナル、2ディメンショナル、3ディメンショナルと機械的に段階を分けてみたのですが、私が東京大学でやった最後の仕事の一つが、誘電体多層膜をどれだけコントロールできるかという話でした。これはそんなにモダンな話ではないのですが、やはりナノメートルオーダーの precision を要求するという意味でそれなりには苦労したということで、そのお話を2の部分でやりたいと思います。それから後半の方は、先程言いましたトレンドについてのスケッチということです。

○すでにほかの講師の先生方が手際よくサーベイされたわけですが、このアドバンストマニファクチャリングは、いろいろな影響力がある。特に情報関連ということだと、ITエイジという時代の主役になるのではないかと、期待を込めております。特に光という技術は、物理的な現象としては、最もIT技術としてふさわしいものの1つであることは、かなり自信を持っていえるので、その光の装置を作るためのアドバンスト・マニファクチャリングが実用化されると、まさに21世紀を担う技術だといえることになるかと思っています。

20世紀の到達点とすると、光通信、光メモリー、ディスプレイ、光センシングと、「光」のついている先端技術が次々と実用化されて、現在の我々の技術社会を作っているわけで

す。その10年後、20年後に、さらに一段階高いレベルで、こういうものがまた実現することを考えますと、やはりマニファクチャリング・テクノロジーとしても、イノベーションが必要であることになるわけです。そういうことで、ナノ製造技術に寄せられる期待は、非常に大きいのではないかと思います。

光と情報を考えますと、光の持っている物理的な性質のうちの3つが、ますます注目されているかと思っています。それは時間軸上の多重性が可能である、つまりウルトラショートパルスということで、今、フェムト秒の領域まで技術が進展している。それからスペースですが、空間的な並列度もどんどん上がってくる。それが波長のオーダーは、ミクロンオーダーが限界のようにいわれていた時代もありますが、今日のお話のように、ナノメートルサイズのもものがターゲットに移りつつある。それから波長で、渦岡様が最後におっしゃいましたように、デンスWDMといった、非常に波長のマルチカラーの情報も期待されているわけです。

○そのWDMの話から始めたいのですが、これは一番単純化した光による、光ファイバーによるシグナル・トランスミッションの図になっています。現在はネットワークで2ディメンショナルの、もっと複雑なネットワークが考えられているわけです。このWDMのシステムが実用化した非常に大きな理由の1つは、光増幅器が実用化になったということで、エルビウム・ドープド・オプティカル・アンプリファイアが主役になっているわけですが、複雑なネットワークになりますと、より小型の半導体の光増幅器、SOAが相補的に非常に重要になってくるということです。

ところが、SOAをWDMシステムの中で使おうとしますと、どれだけ増幅のbandwidthが取れるか、ブロードバンドSOAが要求されることになるわけです。

○これを、私が指導した最後のドクター学生の、リー君という韓国から来られた学生さんがテーマに取りましてなかなか頑張ったわけです。半導体レーザーは普通、クリーブドファセットによってキャビティができるのです。そのキャビティの共振特性を殺さないと増幅器にならないわけです。そういう意味で、このファセットにアンティ・リフレクション・コーティングをすることが普通なのです。ここで、通常行われている4分の1波長の誘電体膜をつけると、中心波長では反射率ゼロになるわけですが、波長がずれると、必ず誘電体の反射率が出てしまうということで、これを多層膜にすることにより逃げるのが技術になってきます。この誘電体の膜厚および屈折率を制御することが、非常に重要になってくるわけです。

それで私たちは、当時としては一番進んだ電子ビーム蒸着装置を購入して頑張ったわけです。2つの特徴があります。酸素イオンアシストということで、 SiO_2 の酸素の欠損を補うようなイオンビームがついている。もう1つは、インシティ・モニタリングということで、光の反射率を見ながら、どれだけの厚みがついたかが見られるようなものを作った。かなり装置的にはすぐれていると最初は思っていたのですが、実際にはそう簡単ではないことがわかりました。

○これは、厚みによって屈折率がこんなに変わるということを、 SiO_2 の場合と TiO_2

の場合について実測した結果です。それから1層目につけるのと2層目につけるのでは、また屈折率が違ってしまうということです。こういうデータを基礎データとしてデータベースに取り込んで、フィードバックするということをやってみて、かなりの制御性が出てきたわけです。つまり、ある厚みの多層膜の設計をするとき、 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 というものをいれて設計するわけですが、実際に先程のデータベースに照らすと、その厚みだったら屈折率が違うということで、また違う屈折率を入れて計算し直す。そのような、ループ的なデザインをすることが必要になったわけです。

○いろいろ苦勞をした結果、最後は、幸いにして卒業前にある程度、サクセスストーリーになり、当時としては最高級の長信号利得が26デシベルというものができた。また、band width も数十ナノメートルのものができたということで、大学の研究としてはかなりのレベルまでいったのではないかと思います。しかし、そのようにナノメートルレベルのコントロールをすることは、やはり装置があればいい、物があればいいということではないということを体験したわけです。

○次、急ぎますけれども、1ディメンショナルから2ディメンショナルに話を進めます。

2ディメンショナルの中で、皆様が一致して非常に重要ではないかといわれている技術というのは、近接場光学（ニアフィールド・オブティクス）ではないかと思っています。これにつきましては、ほかの講師の方もそうおっしゃっておられるので、私としては安心してこれを申し上げられるわけです。古典光学における設計原理が、現在の光学装置の大部分であるわけですが、近接場光学をすることにより、波長よりもずっと小さい寸法の2次元的な制御ができるということです。

計測につきましては、SNOM（スキヤニング・ニアフィールド・オブティカル・マイクロスコープ）というのが、ほぼ実用の直前というところまで来ておりますし、それからこれを使った光ピックアップの研究のざわめきというか、その直前の研究がかなり行われてきています。これを、ナショナルプロジェクトで製造技術サイド、それからシステムとしてまとめ上げるサイドという、いくつかの顔があるわけです。そういうものをうまく組み合わせ、日本がメモリー分野で世界のリーダーシップを取るようになればいいと思っています。

○いくつかの有名な仕事を、その報告書からコピーさせていただきましたが、こういう弗酸を使ったエッチングによって、石英ファイバーの中に先に非常に細い先端を作るという技術が、いくつかのところでできました。日本では東工大の大津先生のグループが、こういうパイオニアの仕事をいろいろやっておられます。これと、こういうSTM的な手法を組み合わせることにより、光ピックアップのようなことができる。これをさらにコンパクト化したような装置についても提案があります。

○さらに急ぎます。2次元から3次元ということで、3次元の代表例として、クエンタム・ドットレーザーを取り上げました。物質の寸法が、非常にアトムに近くなってくると、量子力学的なエネルギー順位が、その形状を反映するということです。その代表的な例が、

量子・ウェルストラクチャー (Quantum Well Structure) を作り込んだ、いわゆるヘテロ・ストラクチャーの非常に薄いものです。これが、量子・ウェルレーザーとして、現在我々が使っているレーザーの大部分といってもいいぐらい、実用になっているわけです。さらに次元を下げていきますと、量子・ワイヤー、量子・ドットとなっていきます。そうすると、どんな良さ、悪さが出てくるか興味あるわけですが、すでに1982年に荒川・櫛の理論的な予言があり、それが逐一実証されつつあるというのが、今の流れではないかと思います。

○最近、その実験的な証明というものが次々なされ、これもよく知られているかと思いますが、こういう結晶の次元性が下がっていくと、Density of State (状態密度) がこのように変わってきて、非常に電子のエネルギー軸上での局在化が進んでくる。それに対応して、光の gain (利得) が量子・ドットになると、非常に局在して、同じ電流を流したときのレーザー発振が非常にしやすくなることが予想されているわけです。こういうもののトップ争いが行われているわけです。

○ここに紹介してありますのが、ロシアのヨッフエ・インスティテュートとベルリンのリンデルグ先生のところの共同研究でやった、早い時期の電流注入型のレーザーの話です。それから、これは東大の荒川先生のところのイリジウム・ガリウム・ナイトライドで、短波長で光領域のレーザー発振が行われたという例を紹介しています。

1次元、2次元、3次元という閉じこめを、今、電子的なものについてやりました。ただ、今申し上げました量子・ドットレーザーの成功例は、自己組織型結晶成長に頼っているわけです。そのサイズのばらつき・揺らぎがまだ大きく、それでいいのだという説と、それではまだ問題だという説があります。ここでは、NECの西さんたちのグループが行っておられます、より制御性のよい歪超格子を基盤側に作り込むことによって、安定した自己組織ができるという研究です。311という結晶面を使うことにより、そういうことができることを実証しておられます。

○それから、話がまた飛びますが、3次元、2次元、1次元と局在化していくという話を、光そのものにしたものがフォトリソグラフィという話になるわけです。これも潟岡さんは非常に詳しくレビューされました。

日本発の非常に有名な仕事というものを2つピックアップしますと、1つは東北大の川上先生のオートクロニングによる、こういう構造の安定した作成です。ご承知かと思いますが、川上先生はこういう意味の世界のリーダーでいらっしゃるわけで、去年の暮れに光協会から櫻井賞を受賞しておられます。

○もう1つのトップバッターというか4番打者といった有名な仕事としては、こういうリソグラフィーを使って、3次元のダイヤモンドバンド・ストラクチャーのようなものを作ったり、アクティブデバイスの方に進むといった、京都大学の野田先生のグループの仕事があります。これも非常に世界的なリーダーシップがあって、ヨブロンビッチ先生からも激賞されているということで、去年の日本IBM賞を受賞しておられます。これをこう

いう電送路に応用したものが、ルーセントから出ています。これはフォトニックファイバー、クリスタルファイバーといわれております。ディスパージョンの特性を精密にコントロールできるということで、非常に注目されております。

○フォトニック結晶から離れますが、新しい注目すべき光学技術として、こういうディフラクティブ・オプティクスが、リソグラフィーの最先端技術と絡み合って、どんどん発展しているということです。これはヘルツィヒ先生が非常に詳しくレビューされました。

○以上、非常に多岐にわたっており、しかし、先陣争いは非常に激しいものがあるということが、スケッチで出てきたかと思えます。そういうことを考えるときに、どの辺のところを心しないといけないかについて、やや抽象的ですが申し上げたいと思えます。

これは皆様、たぶん実験室で感じられていることだと思うのですが、マニファクチャリングの中では、プロセッシングが中心になるわけです。これには、やはりデザイン、それからテストと組み合わさった総合的な技術として、ナノメートルがうまく使えるか、使えないかが決まってくるということです。やはりインテグレート・テクノロジーとしてのナノマニファクチャリング技術を、考えないといけないのではないかと思います。

結局、プロセッシングで難しいことがあったときに、いわゆるデザインを変える、それからデザインの robust 性と組み合わせて考えていかないと、プロセス屋さんだけに負担がかかるということでも、いけないのではないかと思います。そのためには、ナノメートルスケールの測定技術が、やはり同じぐらい重要になってくるのではないかと思います。この柱を立てて、全体のプログラムを考えていく必要があるかと思っています。

もう時間がないのですが、私たちの小さい多層薄膜の試みも、デザインとプロセスとキャラクター化と、この3つそれぞれに、ある程度新しい種を仕込むということにより、ある程度の成功が得られたと自覚しております。

以上、あちこち話が飛びましたが、まとめますと、このマニファクチャリング・テクノロジーの大革新がないと、新時代の技術で我が国がリーダーシップを取れないのではないかと思います。

どういう研究の種があるかにつきましては、非常に有力なものが目白押しで、これを研究の種まきから実用化に進める中間段階は、ナショナルプロジェクト化していくことがぜひ必要ではないかと思います。そのためには、1つだけに注目しないで、多角性を考えて計画を立てていくことが、不可欠ではないかと考えるしだいです。

以上で私の報告を終わります。どうもご清聴ありがとうございました。

質疑応答

(Q) 最後にのびのびとした設計とテストとシステムの・総合的なことが一番重要であるというのは、ご経験からも大事であるということですが、それは計測技術なども、発展させてやっていく必要があると思うのです。実際プロジェクトの中は、ある程度みんなが集中して、いろいろな人が集まってやることを意味するようなイメージでとらえてよろしいのでしょうか。融合しながらシステムの扱うというのは、そういうことでしょうか。

（神谷） たぶんプロジェクトをするときには、それぞれの区分されたテーマについては、主体性というか、どこの会社がやる、どこの大学のチームがやるということで、一つ一つ自分が責任を持つというものが、やはりあると思うのです。それが、あまり個別性を強調しすぎると、チームワーク的な仕事を、ディスカレッジすることになるのではないかと思います。やはり、測定の先端で世界のトップを切っているチームと、製造でトップを切っているチームが、ある時期に組んで一緒にやりましょうという、そういうものをプロモートできるような仕掛けが望ましいと思います。最初からうまく、トップとトップが組んでチームが作れるかということは、必ずしもそこまで要求はしていないのです。

総括討論（パネル討論）

「ナノ・マニファクチャリングのロードマップとナノ・マニファクチャリング技術開発の重要性」

本稿は、平成13年2月16日（金）に開催された「ナノ・マニファクチャリングに関する国際シンポジウム」における総括討論（パネル討論）の内容を事務局のが文書化したものです。

司会 宮沢和男 氏（新エネルギー・産業技術総合開発機構 産業技術開発室長）
パネリスト 下山 勲 氏（東京大学 教授）
植田憲一 氏（電気通信大学 教授）
潟岡 泉 氏（日本航空電子工業株式会社 中央研究所長）
神谷武志 氏（大学評価・学位授与機構 教授）
藤田博之 氏（東京大学生産技術研究所 教授）
矢部 彰 氏（機械技術研究所 企画室長）

（宮沢） NEDOの宮沢です。パネル討論ということで、今日別途配付の資料の後ろから2枚目のところに、総括討論（パネル討論）「ナノ・マニファクチャリングのロードマップとナノ・マニファクチャリング技術開発の重要性」というタイトルのところがあります。パネリストはもう先程来、講師を務められた先生方ですし、それから先程までの司会進行にご尽力をいただきました機械技術研究所の矢部企画室長にもパネリストとして参加していただきまして議論を進めてまいりたいと思います。

ポイントということはいくつか書いてありますが、これは今日の議論が始まる前にどなたかが用意されたということでしょう。今日いろいろな議論が朝から進められたわけです。お聞きになっておわかりになりますように、まだこのナノ・マニファクチャリングに関して明確な定義といいますか、まだ皆さんのコンセンサスもない状況です。むしろこのシンポジウムはそういうコンセンサスをまとめ上げていこうというプロセスにあるとお考えいただければと思います。

ナノ・マニファクチャリングは、5W1Hではありませんが、何のために、なぜ、何を、いつまでにやる、そのほか Where、How、Who、いろいろわからないところがあるわけです。それを少しでも今日この場を通じて明らかにできたらと思います。時間が約1時間半ということですが、前半で今日の議論のいくつかの総括をさせていただき、そこからだんだん議論を進展させていただきたいと思っております。

ご出席の方々はおわかりになりますように、ナノ・マニファクチャリングはいつたいどういうふうに定義するのか、在来の技術との関係はどうか、融合分野ですので隣の分野との関係はどうか、そのようなことについて少しでも皆さんが何か新しいことをこの機会ですべたという場になり、そしてこの場として何か一つ新しい考え方がまとめられたらと努めてまいりたいと思います。

会場の方々からの質問、あるいは議論への参加ということもお願いしたいと思います。今日は不幸なことに私のところにお出席者リストがありまして、272 人の方のお名

前が書いてありますので、状況によりましてはご指名させていただくかもしれませんが、けれどもご容赦いただきたいと思います。

それでは早速ですが、まず今日の司会進行を務められた機技研の矢部企画室長から、各講演のポイントと、今日いくつか話題になっておりました中で、ナノ・マニファクチャリングが何のために何をするのかということを少し明らかにするための1つとして、ロードマップという考えが出てまいりました。この辺についてまた矢部ドラフトというようなものを出していただきながら、何のために何をするのかということを考える最初のヒントにしていきたいと思うわけです。では矢部室長、よろしくお願いいたします。

(矢部) 矢部です。それでは今日のご講演を私なりに、ポイントだけでも、ご説明させていただこうと思います。今日、8名の方からご講演をいただきました。私なりに理解したものですから読みにくくて申し訳ありません。

○三菱マテリアルの秋元会長はいろいろなことを言ってくださったのですが、1つの評価指標として、エネルギー・マテリアル・情報が社会への貢献するものである、機能である。これが分子にくる。分母は、必要な資源量・機器の大きさである。ナノテクノロジーに期待されるものは、分子を飛躍的に増大すること、あるいは分母を大幅に低減することである。こういう視点でナノテクノロジーをぜひ見ていきたい。もう1つは、人類に貢献する実質的な果実を生むことが重要であって、貢献するところまでいかないとそれはなかなか重要性を持ちえないだろうというのが最初の秋元先生のお話だと思います。

下山先生は次にいろいろなことをしゃべられたのですが、私なりに勝手に理解させていただくと、超精密加工（ナノ・マニファクチャリング）によっていろいろな機能を発現してくる。支配法則が変わる、時定数が変わる、ノイズが低減する。これをうまく生かすいろいろなものがあるだろう。応用分野は、いろいろ調べられて光学とかバイオとかいろいろな分野を提言されていました。製造プロセスに関しても、大きい小さいという感じでなくて、ネットワークを使って、みんなが壁を低くしてみんなで作り上げるような装置が大事になってくるのではないかというのが下山先生のお話だと思います。

藤正先生は、最後の質問のところで端的に言われました。ナノの世界のアンダースタンディングがまず最重要課題であると。ここをちゃんと理解することによって新しい技術の芽を生み出すのではないかというのが1つです。2つ目は、今ある技術を使って早く実用化したいのであれば、まず現場にちゃんと入り込んでニーズをしっかりとつかみなさい。これが藤正先生のおっしゃったことです。もう1つ、機械の欠けている分野が、原子の分野から、一方でマイクロマシンのようなオーダーの間にあるミクロン以下、ナノの大きい方のオーダーの世界に挑戦しなさい。例えば人間でいえば機能を持った赤血球があります。ああいう機能を出せるような機械をちゃんとターゲットとしてやってはどうかというのが藤正先生だと思います。

植田先生もかなり広いお話をしていただきまして、光の利用だけ考えても3次元の

サイエンスとしての視点が重要である。そこがまだまだ歴史がないし、これからやっていかなければいけないのだと。それから、粒子性とか波動性、量子効果を出していかなければいけないわけですが、これは今までの延長ではなくて新たな学問的な島を作るためにやっている。そういう視点でぜひやられたらいいのではないかということだと思います。

ムーアさんは、私の理解では、まずナショナル・ナノテクノロジー・イニシアチブが、今、世界で大事なことになっているのですが、10年先の社会を考えて、それがどういうふうに変わっていくかということからすべて説得を始めて、そういうふうで作っていったのだということだと思います。逆に10年先まで、どこまでテクノロジーが実用化になるかわからないけれども、メモリの分野がまず実用化してくるだろう。こういう視点で作っていただきたい。逆にいうと、プログラムをこれから我々が作ろうとするときに、どういうふうに使ったらいいかという参考になるのではないかと思います。

ヘルツィヒさんにお話しいただいたのは光学の部品です。マイクロ化がかなり進んでおり、マイクロレンズとか機能デバイスをいろいろご説明いただきました。光学部品を作る技術はかなり今まで考えられてきた。それはかなりの部分がナノ・マニュファクチャリングに応用可能ではないだろうかというのがその視点ではないかと思いました。

潟岡さんは、例えば汎用フォトニック素子は代表例ですが、これから重要になってくるもの、しかも応用が多様になる、基幹製品である例えば汎用フォトニック素子などを自在に作り上げるような装置、製造技術を作り上げることが大事なのではないかというのが1つのポイントではないかと思いました。

神谷先生もいろいろご説明いただきましたが、1つはシステムの研究です。設計、テスト、計測を融合するような研究が大事なのではないかと考えていただけたと思います。

(神谷) すみません、設計、プロセス、計測です。

(矢部) 申し訳ありません。ここまでの私なりに先生方のお話を理解した内容です。実際どういうふうにナノ・マニュファクチャリングをもっていくべきなのだろうかと考えて我々の研究の中で議論したものを少しだけご紹介させていただきます。

○補足資料にも載っています。我々は製造技術はやはり我が国の経済の生命線であり、それをさらに進めていくことが大事だろうと思っています。今は製造技術の方向としていくつかの方向があります。例えば環境と調和させる方向、あるいは自律的に人間と協調させる方向、それとともにマイクロ化というのは非常に大きな方向であり、それは今まで高精度化ができましたし、これがさらに進んでナノ製造技術、新しい機能を持った製造技術を作り上げるのが大事ではないか。

それはナノレベルの加工装置を作るハードウェアの開発でもあり、あるいはその加工法を汎用的に作り上げるソフトウェア的な技術でもあるだろう。ナノテクノロジー

という意味では、いろいろなものを作り上げる加工というところから見た加工、製造というものから見た新しい技術体系を作り上げるとともに、あるいはナノエレクトロニクス技術、あるいはナノ材料技術と、それがコンバインして 21 世紀の新製品が生まれてくるのではないだろうか。こういう視点で今、ナノ・マニファクチャリングを考えております。

○例えばナノの加工方法も今いろいろあります。そういう中でいろいろな方法が検討されるべきだと思います。ナノというレベルで加工できる方法に、例えば機械加工でも、今はナノの位置制御ができますから、そういう機械加工も、ナノの形状精度を持った製造技術がずいぶん出てきております。そういうものもあるでしょう。

それから、エネルギービーム加工です。これは光の技術がずいぶん進んでいますので、反力を持たないという意味で、小さなものも加工できるという大きな特徴があると思います。

我々の議論が特に主張しようと思っているのは、原子操作によって一つ一つ原子を動かす技術も大事ですが、実は 10 の十何乗個の原子をいっぺんに動かさないと我々が使いやすい製品にはならない。そういう製品に持っていくところが大事なのであって、それにはこういう機械加工やエネルギービーム加工でナノの加工をできるような技術をぜひ目指すべきではないかというのが出発点の 1 つです。

○ナノのマニファクチャリングでどんなロードマップがありうるかと考えてみたのがこれです。まだキーワードを挙げただけで、また研究段階なのか実用化段階なのかという面でもまだあまり説得力があるものではありません。ただ、我々としては、こういうものが出てくるであろうし、そのために加工技術をぜひ作り上げるべきだろうと考えています。

設計技術、加工技術、組立技術、計測技術というのが、製造技術の一般的な分け方だと思います。そういう中で、ミクロになってきますと 1 つの大きな特徴として表れるのは、加工と組立が一緒になってしまう。うんと小さいものを組み立てるというのはほとんど技術的に、加工したときに組み立てるしかなくなってくることによって、加工・組立技術はだんだん融合してくるのではないかと。逆に、そういう加工・組立をしながら機能まで出してくる。こういう技術が大事になってくるだろう。そのための設計があり、また計測があると思います。

アウトプットとしても、ナノ加工ができるマザーマシンがいろいろな意味でエレクトロニクスの製品であり、またいろいろな機械の製品のマザーマシンとしていろいろなものを作り上げる。自在に作り上げるもののポイントになるのではないかと考えております。

○それではいったいどんなかたちでこういうものをプロジェクトに組み立てていったらいいのか。これはまだ試案の段階にしかならないわけですが、ご説明させていただきます。例えばこのプログラムはナショナル・ナノテクノロジー・イニシアチブに相当する日本のものになるといいと思いますし、逆にナノのマニファクチャリングが

1つのナノの技術であり、こういうものが組み合わさったプログラムの集まりで1つのナノのテクノロジーのイニシアチブが日本なりにできるのではないかと思います。

製造技術は我が国の国際協力の源泉であり、高付加価値化・高機能化を目指した技術開発が重要であろう。ナノテクノロジーに対する期待は大きく、ナノメートルオーダーの構造に特異の現象を有意義な機能として発現・利用する製品が、材料・エレクトロニクス・バイオ分野における研究開発と相まって21世紀の新たな市場を生むのではないかと。また、そのようにチャレンジすべきなのではないか。産業応用可能な現象で生産可能なナノスケールの製造方法の確立が産業技術としてナノテクノロジーのキーになるのではないかと。さまざまな素材・大きさの加工物に対応できる生産速度が速くて制御性にすぐれたナノスケールの製造技術にかかわる研究開発プログラムが大事なのではないかと考えます。

○それはどのような内容で構成されるかといいますと、実際に社会に役立つという意味で、ハードウェアとしての加工装置とソフトウェアにあたる加工法の両面にかかわるプロジェクトが中核になるだろう。それだけではなくて、例えばナノバブルですが、バブルもうんと小さくなっていると、いろいろなものをきれいにする効果、殺菌効果などいろいろなものが出てくる可能性があるわけです。そういう新たなナノクリーニングとか、新たな構造創生技術に関する技術シーズも探索することが大事だろう。あるいは、ナノの世界に非常に近いのですが、マイクロマシンの応用、あるいはフォトン計測の応用という意味で、成果をナノの製造技術、重要な技術に関する実用化も大事だろう。4番目が、今日の午前中に強調されましたが、ナノの構造と機能の発現メカニズムの探索等の基盤研究技術もこういうプログラムの中に入れ込んでやるのが大事なのではないかと思います。話題提供ということでご説明させていただきました。

(宮沢) ありがとうございます。一気にプログラムというところまで進みました。少し戻ります。講演者の方からいくつかお話をさせていただいたわけです。

ロードマップを出しておいていただいた方がよいと思います。このロードマップは全くの試案ということのようです。このごろ「ロードマップ」という言葉がはやっております、さまざまな分野でロードマップを作る動きがあります。一番古い動きは、ご案内のように、半導体業界で、確か最初は92年だったと思いますが、その後2～3年ごとに分厚いロードマップを作っております。この中である年ごとに技術目標を横軸で定めて、例えば半導体では微細加工を130ナノ、100ナノ、70ナノ、50ナノとやり、一方それに対応してさまざまな技術ごとに何を達成すべきか、どういう課題があるかということを整理しているものがあります。

これ以来、さまざまなところでこの種のロードマップの取りまとめが進められているわけです。今日は、先程の講演者の方々からもいくつかのロードマップの例が出ました。これは昨年、工技院で作られたものです。このようなロードマップ(案)が出ていますが、ご覧になってどうお感じになれるかということのを皮切りに始めたいと思います。そもそもこういう考え方がいいのか。横軸のこういう取り方がいいのか。

横軸も本当に技術年で考えるのか、あるいは市場で展開するような年で考えるべきなのかとか、いろいろなものの見方があるかと思います。質問なり、建設的提案なり何でも、まず今日のパネリストの方から始めていきたいと思います。

下山先生、こういうものをご覧になってどういうことをお感じになるか、あるいはこういうことを明確化しなければいけないのではないかとか、コメントをいただければと思います。

(下山) 私はこれを見て2つほど考えるところがあるのですが、まず、この会場にいらしている方も少し混乱があるのではないかと思います。ナノテクノロジーあるいはナノ・マニファクチャリング、ナノサイエンスというのは、それぞれいったいどういうものを対象にして、そこから議論が始まるわけですが、共通のコンセンサスを持っていないといけないということです。ナノ・マニファクチャリングというものについて何かイメージが共通化してくると、そこからだんだんと議論が深まってくると思いますが、これイコール、ナノ・マニファクチャリングかどうかとか、あるいはもっとほかにあるのではないかとか、そういうこともあるのではないかと考えています。

2番目に、このロードマップで考えると、製造技術が主体になっています。私も関係しているわけですが、製造技術自体はニーズを持たないというか、お客様を見つけてそういうところにサービスするような部分にどうしてもなってしまうわけです。プロジェクトとかプログラムで混乱されているかもしれないと思っているのですが、いわゆるシーズに引っ張られてプログラム、プロジェクトを作っていたときに、ではいったいアウトプットというのはどうなるのかなということも議論の対象になるのではないかと考えています。

(宮沢) ありがとうございます。植田先生、いかがですか。今度は光の方の立場からということでも結構です。

(植田) 私自身はこういうロードマップを自分で作ったことがほとんどないのであまりよくわかりません。具体的にプログラミングできるものと、まだできないものが、たぶん混ざっているのだろーと思います。今日の議論の中で分かることは、ナノテクノロジーの中になんかの幅があるわけです。サブマイクロでナノというものと、本当に原子サイズであるナノを目指すというものは、かなり桁が違うわけです。そういう点では、日本のナノテクノロジーを考えるときに、いったいどこまで含んでいくのか。ある意味では歴史認識の中でどのくらい大きいことをしようとしているのか、つまり、個々のプログラムができるかどうかだけではなくて、人類史的にどれだけ意味があるようなことを我々はできるのかということも考える必要はあると思います。

先程、マイクロ・オプティクスの話がありました。例えば屈折率というのは、これまでは物質固有の量です。それが物質固有の量ではなく、そこに構造要素が入る。マイクロ構造が入ると、屈折率は人工的にコントロールできるというようになってきて、今のフォトニック・クリスタルとかフォトニック・ファイバーとかバイナリ・オプテ

イクスであるとか、いろいろなことができるようになってきました。そういう意味では、単に技術が進んだという以上に、人類が大きな力を持ったということだと思います。

そうだとすれば、そのくらい内容に力があるものを、次の質を生み出すためにはどうするかというような大きな長期的な見方を一つ押さえておく必要があります。それだけでは夢で終わるので、今の技術の中から、すぐにもやれるものから手をつけられたらよいのではないのでしょうか。科学と技術は相補的ですが、技術的に成功するとしても、科学的に理解できたらただちに成功という形にはならないと思います。つまり、新しい科学的知見になじんでこないと、本当にその世界の中でどうやればうまくいくかということが見えてこないわけです。

そのためにはある種の成熟期間が必要で、それを科学と技術がお互いを認め合いながらやっていく。ダンカン・ムーアさんは、アメリカでもナノサイエンスとナノテクノロジーでは、ナノサイエンスの方を言うと政治家はあまり喜ばないので切ってしまったというお話をされていましたが、実際に内容的にはサイエンスとテクノロジーは二人三脚でやらないといけないことは事実だと思いますので、ロードマップの中にも、両方入っていればよいというだけではなくて、お互いにどういうふうに交流しながら相互刺激をしていけるかというルートをつけていくべきではないかと思いました。

(宮沢) ありがとうございます。潟岡さんはいかがですか。

(潟岡) 私はこの中で唯一産業サイドにいる人間なのですが、考え方が2つあると思います。まず、仮に国が予算を使ってこういうことをやろうという場合に、考え方が2つあると思います。1つは、世界が最大多数の最大幸福というような言い方をしているわけですが、それは理念としての最大多数の最大幸福であって、実際にはグローバルな経済の中で生きていかなければいけないわけです。そういう意味で、世界全体のバランスを取りながら、勝ち組に入っていくためには何をやらなければいけないかという経済的な要求があります。そのためには、先程私が申し上げましたように、世界の産業の流れがどういう方向に向かっていて、それがいつごろこういうふうになるからそれまでにこういうツールは用意しておきましょうという意味のロードマップです。それから、先生が言われるように、我々が勝手に地球食いつぶしていいわけではないですから、そのためにはいろいろなところが、いつまでにCO₂をどのくらいにするなどのルールを今、決めているわけです。

ヨーロッパはそういうところをきちんとやりはじめていて、車の規制や燃料の規制も同時に進行させているわけです。そういった流れと両方のバランスを取って、いつまでにどういうルールを満足しましょうと。そういった目でロードマップを見ていけないといけないのではないかという気がしています。

(宮沢) ありがとうございます。神谷先生はご専門の立場からとなりますが、こういうものをご覧になりまして、デバイスの方のことはお詳しいかと思いますが、どんな感じでしょうか。

(神谷) 第一印象的なことはほかの先生方がおっしゃったので、それにかかわる議論になるかと思いますが、私は下山先生がおっしゃいました2番目のポイントにかなり共鳴します。つまり、ナノ・マニファクチャリングという製造技術を柱に立てたプログラムのおもしろさと難しさといいますか、製造技術というものはいろいろな分野に横断的にかかわるということで、1つの分野で成功すればそれがほかの分野にも及んでいく。そういう意味では非常に魅力的な部分ですが、逆にいうと茫漠としてとらえどころがない。設計一般論みたいなものは非常に魅力的だけれども、設計一般論はありうるのかという議論もまだ続いていて、やはり個別のターゲットに対する設計という、その村の中でやったものの総体が設計学なのかという議論もあるわけです。それと同じように、製造技術というものも個別のターゲットの中で育てていくという部分が*ハンプンキョウカ*などで、それにプラスして汎用化を目指すものと、その両方のバランスを考えていく必要があるのではないかと思います。

自分が言ったことにこだわって補足させていただきますと、こういう個別の研究を始めると、あるイナーシャといいますか、特に実験的な研究の場合には、あるところまでいかないと白黒がわからない。例えばそれが3年、5年というときには、場合によって風化する場合もあるし、その中間評価が公的な評価でなくても自己評価という意味でも非常に重要になってくるかと思います。そのときに実験的な研究だけをスケジュールの中に入れていけると、技術の選択ということに関するやわらかさが出てこないの、今の時代ですからシミュレーションだけで将来を予測するような仕事、それから実験で実際にものを作ってみる仕事、そういういろいろな研究のスタイルのバリエーションが入るようなことを考えたらどうかなと思います。

(宮沢) ありがとうございます。今のお話ですと、研究サイドからという感じと最後のプロダクトのサイドからという感じと、両方それぞれお持ちかなという印象を受けております。たまたまナノの議論をやりますとトップダウン議論とボトムアップ議論があります。あるいは異分野から新しいのが来るとか、いろいろなアプローチがあるようです。そういう観点からもこのロードマップの見方が違ってくるのではないかと思います。

先程、半導体の話をご紹介いたしましたけれども、あれの場合は微細化という1つのプロセスを目標にするためには何をなさなければいけないか、どういうリソグラフィの技術を開発するか、どういう材料を開発するかということを明確にやりまして、それに向かっているフェーズのものと、将来に向かっているきわめて基礎的な技術を涵養していくものがあります。白いゾーンとイエローのゾーンとレッドのゾーンがありまして、白のゾーンはもうすでに着実に実用に向かいつつあるもの。黄色は何となく方法はわかっていてそれを一生懸命開発していく。レッドは将来に向けて、まだ解法が全くわかっていないので探索的な研究を進めていくと分かれています。半導体の場合は、そういった意味では現在の半導体の技術を前提にしたもので、全く新しい半導体の技術はむしろロードマップにはない世界で、探索的なものがいろいろ行われている状況かと思っております。

このロードマップを今たまたま提示されまして皆さんからいろいろ意見が出ましたけれども、会場の方からご意見なりご質問をここで集めてみたいと思います。いかがでしょうか。どんなご質問でも結構です。あるいはコメントでも結構ですが、いかがでしょうか。

どうぞ。よろしかったらご所属とお名前をよろしく願います。

(藤田) レーザー総研の藤田と申します。例えばアウトプットのところで、この場合、部品とか装置、要するに目に見えるもの、触れるものしか出ていませんね。ここではいわゆる製造技術、方法といったかたちのアウトプットは考えられないのでしょうか。

(矢部) そういう意味では、アウトプットというのに製品を持ってきて、製造方法等はその上の欄に書き込もうということで、加工技術とか加工法というイメージで上のキーワードを入れております。

(藤田) それにしては何か既存技術みたいなものが多いので。わかりました。

もう1つ、製造技術に関しても、ここにあるものは、プラスチック、金属というもので、例えば生体とか、例えば一番右の方にはバイオメディック加工とか、「バイオ」という言葉が出てきますが、これから自己組織化でナノ構造がどうのこうのとなると、生体的なこともこういった製造技術には入れていった方がいいのかなという気はするのですが、いかがでしょうか。

(矢部) おっしゃるとおりだと思います。ただ、逆にバイオの分野はロードマップがないのです。それは数年先が見えないから作れないという面がありまして、そういう特徴は確かにありますので、そういうのを入れ込むのは大事だと思うのですが、ある程度、目標はニーズまで見えた段階で初めて入ってくるのかなという視点を持っております。

(宮沢) 確認ですが、このロードマップは、私の先程の分類ですと、目的のような感じでまとめられたという理解でよろしいのですか。それとも何か全くシーズ探索的なイメージなののでしょうか。そこだけ確認していただけますと皆さん方から質問が出やすくなるかと思いますが。

(矢部) そういう意味では、我々の研究所で、グループでディスカッションをして、将来こういうものができてほしい、あるいはできてくるのではないかとこのものを並べました。ですから、ある程度、シーズとニーズがごっちゃになっているという感じもありますし、両方考えたということもあります。研究段階のイメージもありますし、アウトプットの方は商品になってくるだろうというイメージは持っております。

(宮沢) その辺はまだこれから少し何段階かの、こういうロードマップの階層も整

理してやっていくということだと思います。どうぞほかの方もご意見、ご質問をよろしくお願いします。半導体関係の方がいらっしゃいますね。半導体ロードマップにお詳しい方から見ると、こんなものがあるのではないかとコメントをしていただくとよろしいかと思うのですが、いかがでしょうか。

お役所の方からでもご質問・ご意見をしていただけたらと思いますがいかがですか。森下さんいかがですか。経済産業省の産業機械課の森下課長補佐です。

（森下） 経済産業省の産業機械課で技術担当の補佐をやっています森下と申します。ロードマップと離れてしまうのですが、今日のシンポジウムに参加して私の感想ということになると思いますけれども、よろしいですか。

（宮沢） どうぞ。

（森下） まず一つ思っているのは、日本の研究ポテンシャルがどれくらいあるのかなというところを私は見きわめたいというのもあって来ました。比較の対象がいかどうかありますが、バイオテクノロジーやITに比べて、基礎分野といいますか、実用化一步手前の技術がかなり日本にあって、そこはポテンシャルとして強みがある。それをいかにうまく将来のターゲットに向かって花開かせていくことができるか。行政官としてそこをよく考えなくてはいけないなということを今思いました。今何かあるかというところはまだ全然暗中模索です。

それを実現するやり方として、今、頭の中で悩んでいるのが、アメリカは、ムーア博士がおっしゃったように、いろいろな省庁がトップの大統領の声の下、一つにまとまってやる体制を作り上げられている。一方、日本も総合科学技術会議ができました。ここはまだ未知数で、今日は経済産業省が主体でやっていますが、基礎分野の研究であれば文部科学省、あるいはもう少し基盤的なものになれば、元科学技術庁の方でもグラントがあります。我が省でもNEDO等があります。それがこれまでどううまく連携が取れないまま、かたちはいろいろ整理できると思うのですが、もったもったアメリカよりもというものを目指したいのです。連携を組んでいくことをどうやったらできるのか。今日は内閣府からも聞きに来られていますし、どうやってリーダーシップを取って、我が省も含めて、うまくやっていけるのだろうかということを今つらつらと考えていました。そういうことをこれからしっかりやっていきたいと思っています。感想です。

（宮沢） ありがとうございます。非常にいいコメントをいただきました。このコメントを使わせていただきまして、こういうロードマップ議論に反映させるのですが、はたして日本というのは、今、2000年と書いてあるようなものが本当に強いのでしょうか、それとも弱いのでしょうか。強いからもっと伸ばすように頑張りたいのか、それとも弱いから伸ばすように考えたいのか。ナノテクノロジー分野全般、ロードマップをご覧になりながらどんなふうにお感じになるか、講師の方からお一言ずつ、それぞれご専門の分野に近くなっても結構ですので、一言ずつコメントをいただければと

思います。

（下山） 私は基本的には強いと考えています。ナノ機構とかマイクロマシンプロジェクトとか、いろいろ微細製造あるいは微細なものに対するプロジェクトはそれなりに走って、あとはアトムテクノロジーですが、それなりにたまってきた。何が一番悔しいかというと、先程も森下さんのコメントにも神谷先生のコメントにもありましたが、ニーズがあるところと技術があるところがうまく一体化できない。ですからぜひそういう垣根を低くしてほしい。藤正先生からもありましたが、例えばお医者さんは非常にテクノロジーを望んでいるわけです。光、通信、情報デバイス、環境にもニーズはある。そういうものをうまく使って、ニーズのあるところのプロジェクトとしてあるいはプログラムとしてしっかり立つことが必要ではないかと思っています。

（宮沢） ありがとうございます。ニーズのあるところへということです。植田さんはいかがでしょうか。日本の強み、弱みを自己分析しますと。

（植田） 日本が強いかどうかという場合、どこかと比べて強いという話になると、かなり政治的な宣伝的要素が強いという話がありました。それより今、我々が議論しないといけないのは、こういうことをやるに十分な能力があるかどうかということです。そういう点でいえば、疑いもなく日本はそういう資格を持ってやれる場所にあるわけです。

ただし、そういう中でどういうイニシアチブを作ってプロモーションをしていくべきかということからいいますと、学問分野も私はもっと融合して相互乗り入れをしないといけないと言いました。同時に、大学と産業界がお互いに力を合わせないと無理だということです。例えば、大学はお金が足りないから少し予算をつけてあげたらできるかという、お金だけで問題が解決しないような課題もたくさんあります。ここでいうような最先端のハイテクノロジーを使わないとできないような課題、つまり、さらにもう一步進んだ研究というのは、現在すでにそういう技術を持っておられるところと、それから科学をやりたい、知識を求めたい、理解力は十分あるというところが協力をしないといけないのです。各々が単独で完ぺきなものを作ることはなかなか難しい。そういう意味では、大学・産業界が相互に強みを認めあって、互いを必要としてやっていくようなことが必要なのだと思います。

（宮沢） 力を合わせれば十分強さはあるということでしょうか。

（植田） 日本ができなかったら、他にできるところはないような気がします。

（宮沢） 大変力強いお言葉でした。潟岡さんはいかがですか。強さ、弱さという観点です。

（潟岡） 基本的な認識としては全く相違はないのですが、ただ、いくつかの分野で

最近少し危機感を持っております。実は私は昭和 62 年ぐらいから超先端加工大プロということで参加させていただきまして、それが現在私どもの基礎体力になっているということで大変ありがたいと思っております。

それ以降、今日は話をしなかったのですが、私は当時から X 線リソグラフィー用の多層膜という、ここでいうと 1 次元のナノ構造の研究開発をやっていました。それは何のためにやっていたかという、当時は、A r F の次は 1 対 1 の X 線だといわれていたのですが、我々は、そうではなくて E U V だと考えておりました。なぜかという、E U V は光学系の延長上にあるという認識でやっていました。今から数年前、文部省の重点領域でやはり浪岡先生がリーダーシップをとられて X 線の力を大変つけまして、そのときは私どもは非常に日本の力がうまく発揮できていると感じておりました。ところが米国はその後、経済状況が変わってきたということもあるのですが、E U V L L C という組織を作りまして、350 億というお金を入れてあっという間に追いつきました。

それはアメリカにおける技術と産業の連携がうまくいった例だと思うのですが、そういう意味では、ことリソグラフィーに関しますと必ずしも今日本はチャンピオンではないのではないかと。アメリカとヨーロッパというのはわりと簡単に手を結びます。例えば S V G が A S M L に買われたように、非常に動くのです。これは産業分野ですが、気がつくとも日本だけが取り残されたような印象を受けています。ナノ・マニファクチャリングがプロジェクト化していくとしたら、そういう轍を踏んではならないのではないかと印象を持っております。

(宮沢) むしろ反省ありということですね。いいご指摘をありがとうございました。神谷先生いかがでしょうか。日本は誇るべき技術を持っているのか、それとも少しあせらなければいけない状況になってきているのか、いかがでしょうか。

(神谷) こういう公共的な共同研究のシステムというのは、今お話がたびたび出ているような横のつながりというものを促進するのに、本当はいいしかけのはずなのですが、従来そういう横の連携というよりは個々の責任を言うあまりに個別の粒を強調する方向にいきがちだったのではないかと。もちろん研究主体の責任も重要ですが、それと同時に横のつながりをプロモートするようなしかけをぜひ考えてほしいと思います。

日本が進んでいるかどうかということについて言いますと、2 つの愚痴的な話を言いますが、1 つは、かなり多くの方がご存じの話ですけれども、伊賀先生という光の巨人がいらっしゃるのですが、面発光レーザーの父とか母とかいわれて世界的に認知されている方です。その伊賀先生が、ビジネスよりもずっと前に実験的にその可能性を示された後、ビジネスとして取り上げたのはアメリカの産業界が早かった。日本のレーザーでそうそうたる会社がどこも、ある意味では今から見るとティミッドでなかなか実用的なチームを作れなかった。それは伊賀先生にとっても、何で自分がそれだけのインフルエンスが及ぼせなかったのかという自分に対する悔恨でもあるし、日本の産業界に対するおしかりの言葉も私は何回も聞いているのです。

もう1つ言いますと、藤田先生にごまするつもりではないのですが、光MEMSというのは、今は「タイム」や「ニューズウィーク」にもどんどん出てくるぐらい世界の先端情報技術としては有名なわけです。それはアメリカのいくつかの会社が出したものが次々に新聞発表になる。日本でそんなのやっているのという質問を聞くのですが、専門家の中では藤田先生が世界的にもう数年前から有名になって、招待講演ではあちこち飛び回っている。大学院生は大丈夫かなと思うぐらい世界中を飛び回っている。そういう有名人なのですが、意外に日本の中で、専門がちょっと違うと情報を集めたり解析していないのではないか。その辺の情報の利用というものが遅れているのかな。情報を開発する力はすごいのですが、情報を利用する力が足りない。これはむしろ各会社のビジネスリーダーの責任問題なのですが、公共的なところでもそういう融合技術で新しいことをやってみましょうというものもテーマとして採択するということも考えていただいてもいいのではないかと思います。

(宮沢) 皆さん方のご意見の多くは、強さ、弱さ議論よりも、むしろ可能性があって、その可能性をいかに進めていくべきか。その体制とかテーマの設定に焦点があるようです。ここで1人、パネリストをまたご紹介いたします。東京大学生産技術研究所教授の藤田先生です。今ちょうど神谷先生からお話がありましたMEMSの藤田先生です。

議論を進めている最中ですが、ここで話題を少し変えます。ナノ・マニファクチャリングというプログラムあるいはプロジェクトを今後考えようかというところですが、藤田先生は、ナノの1つ上のサイズのマイクロというところでマイクロマシン関係やMEMSの関係にご経験がありまして、こういう在来マイクロマシンであったりMEMSというものが今度のナノの展開にどういうふうに関係があるのか、あるいは関係ないのか、そもそもマイクロの世界はどういうふうに関係を確実にゲットしていくのか、そのようなことを含めて少しお話しただけたらと思います。よろしいでしょうか。先生、10分ぐらいですか。

(藤田) では5分から10分の間で。

(宮沢) とりあえず10分、まずお話をしていただきまして、質問はまた出していたきたいと思います。お願いいたします。

(藤田) 大変遅くなりました。私は今、神谷先生からもご紹介があったのですが、下山先生などと一緒にマイクロマシンングというのを十数年前からいろいろ研究をさせていただいています。

(以下スライド併用)

○これはこの前の「日経」に出していただいた記事です。マイクロマシンングもかなり小さいものが作れるようになりました。私たちのところで今作っている一番小さいものですと、針みたいなのがここにありますが、この太さが100ナノメートルで、

先端は非常にとがっていて数ナノメートルというものです。マイクロ・アクチュエーターがその後ろにつけてあって、これは大きさを例えると自動車に針がついているぐらいの、1000 倍ぐらい違うスケールのサイズになっているわけですが、その自動車でこの針を動かす。その針の先端を数十ナノメートルのオーダーに近づけることができるわけです。そういうわけで、マイクロマシンもナノの世界に入ってきたよということころをまず取っかかりでお話を始めさせていただきます。

○時間がないので唐突にもう結論にいくしかないのですが、私の今ご提案したい、考えているアプローチというのは、マイクロマシニングの技術というのはナノの技術と非常にかかわりが深い。そしてどういう意味で役に立つかということ、マイクロマシニングからトップダウンで攻めていくものというのは、例えばバイオ・ナノで、ボトムアップでできていくもの、例えば材料であるとか機能が得られるりっぱなものができると思うのですが、それを取り込んで全体としてシステムとして動いて、かつマクロの世界までつながってこないことには材料だけでは役に立たないわけです。そういう意味での役に立ち方を一番考えるべきではないかと思います。

○もう少し別の見方で見ていくと、ナノのところで議論をされていたのだと思うのですが、そこは全部フォローがうまくできていないのですが、ボトムアップで新しい機能・新しい材料が出てくるだろう。それがありきということで考えますと、それをある構造の中に入れて、そしてシステムレベルで集積化して初めてそのシステムとして役に立つものができるであろう。神谷先生も議論されていた、機能集積システムの一部としてナノも必然ですが、それだけではたぶん、人間の体のように、体から血管からすべてのものをボトムアップで作るのはなかなかまだ難しいでしょうから、マイクロマシニングの技術で、人間で例えれば血管にあたるパイプだとか心臓にあたるポンプだとかは作ってあげて、中に詰まっている肝細胞などはできませんから、そういうものはナノ技術で作っていただくというのが現実的なアプローチではないかと考えているわけです。

○そういうものの利点としてボトムアップとトップダウンの技術を融合することでナノからメートルの世界までシームレスにちゃんとつながるようなシステムができるということ。それから、マイクロシステムでは電子的な部品、化学的なセンサー、光の部品というようなものがもう手に入るわけですから、そういうものとナノの材料をくっつけることでさらに機能アップが図れる。あと大事なことは、私たちが作るわけですから設計が自由にできないといけないわけです。そういう意味で、今まである V S I の技術等を生かせれば、機能を与えたときにどういうかたちにどういう手順で作っていけば望みのものが得られるかということがわかっています。だからプラスアルファで、くどいですが、ナノをそれに取り込んでいけば、よりよくより自由に生かすことができるというようなことがいえると思います。

○では具体的にどういうことをやればいいかというと、バイオで得られたものをマイ

クロマシンに使っていくとバイオ・マイクロ・システムのようなものとか、簡単にはバイオセンサーのようものができる。それから、DNAチップに見られるような化学合成とか分析化学をマイクロマシンとくっつけると、蚊が吸ったぐらいで血液の分析ができる。そのようなシステムも考えられるわけです。

○これはサイエンスの観点ですが、たぶん皆さん、ナノのサイエンスをきちんとわからなければものがないということをおっしゃっていると思いますが、ではナノを理解するためにはやはりツールが必要で、それはマイクロサイズから、先程お見せしたプローブのようにナノの世界に自由に入っていける、ちょうどお箸でものをつまむようなことができればいけない。それはマイクロマシンの技術が非常に適していると思います。そういうものを全部使える加工法も確立する必要があるというわけです。

○先走ってこんなことを言うのも何ですが、こういうものを早く実現して即戦力でやっていくということはナノシステムでは大事だと思うのです。ですから、そういうナノからマイクロまでを含むような、MST（マイクロ・システム・テクノロジー）の設計・解析・製作に関するシームレスな産業化技術を提供できるような組織ができるといいなということを考えています。

特に、即戦力ということを考えると、実験室レベルでこういうことをしてもしかたがないので、やはりCMOSのファウンドリーにあるような、工業生産規模の、インダストリアル・クオリティのプロセスのサービスを皆さんに提供できるということがあると、ベンチャーの人がいいアイデアがある、マーケットがあると、それがプロセス全体をサポートするほど大きくなくても、こういうサービスに乗せることで、例えば100のベンチャーがそのプロセスをサポートできればしっかり産業としてできるわけです。そのようなスキームをぜひ考えていただきたいと思います。時間は？

（宮沢） まだ結構です。まだ5分しかたっておりませんのでどうぞ。

（藤田） こういうものがあると、幅広い科学技術分野の統合に対応して、ある程度標準化がどうしても必要ですので、標準化・共通化されたプロセスを低コストで供給できる。そうするとサイエンティストがもちろん使えますし、もちろん産業界の方々もこれを使って自分の考えたデバイスの開発が進むということになります。特に高額な特殊加工をセンターでみんなのためにやってあげるというマルチチップ・サービスのようなことをすることで、研究開発の効率化、実際の利用者の負担軽減が図れるわけです。少量多品種のASICのようなファウンドリーが提供できることで、ベンチャー企業等のリスクなり産業化への障壁を減らすことができるであろうと考えています。

○材料とどこまでかかわっているかというところは、江刺正喜先生が、例えばマルチプローブで高密度のデータ記録装置を作るといような装置をご提案になっています。このプローブの部分、先は数十ナノメートルです。これがたくさんあって、それとの

読み書きをするためのインターフェースの集積回路を含めてマイクロマシニングとCMOSの技術でここをマイクロシステムとして作る。こちらの記録媒体の方はたぶんナノ材料である必要があって、数十ナノメートルで安定に記録ができるような媒体をぜひ作っていただいて、それをX-Yステージに載せて動かす。これはIBMのチューリッヒ研究所でも*ミリピーリーズ*とって研究が進んでいます。これと同じようなことを考えてやろうとしたときに、ではいったいどこでできるのか。しかもインダストリー・クオリティでどこでできるかということを考えたときに、こういうセンターがあればいいなということを思っています。

○最後に来ていろいろ申し上げて恐縮です。結論は、ナノシステムを作る。このためにはトップダウンとボトムアップの両方のアプローチを使うことによって、ナノからマクロまでを階層的に接続するような機能を融合したシステムができるだろうと思います。これをやることで、例えばハイブリッド人工臓器や、発見的創薬、コンビナトリー・ケミストリーをマイクロ的に合成する装置とか、それから最後の例でお示したアレイ化SPM（スキャニング・プローブ・マイクロスコプ）のようなものが考えられるわけです。ただ、これを早く実現しようとしたときに何らかのセンターのようなところでのプロセス設計のサポートが必要ではないかと思います。

（宮沢） ありがとうございます。私なりに理解いたしますと、トップダウンできましたマイクロマシンの方は、ある明確な目標を持って、産業化に向けた研究をするツールを作ればかなり確実にいろいろなものが達成できていくのではないかというようにお話が伺えて大変心強く思った次第です。

藤田先生の方からおもしろいプレゼンテーションありましたので、これについて会場の方からもしご質問、ご意見がありましたら受けたいと思います。ございませんか。

では、我々パネリスト側の方から、今の先生のご提案のところにつきまして、マイクロマシン、MEMSの世界から来たこういうナノと今までの成果を備えて確実に実現をしていくということについての提案です。いかがでしょうか。今度は逆に神谷先生の方から一言ずつ、今の藤田先生のご提案、ご意見についてのコメントをと思います。

（神谷） 見方が偏っているかもしれませんが、マイクロマシンの技術の流れというのは、ある意味で、一つの見方をすれば半導体産業で培った基盤的な技術を他の分野に及ぼしていこうという一つの運動といいますか、流れともいえるのではないかと思います。要するに、日本の半導体産業は、現在は少し変わっていますが、従来はいわゆるDRAM産業といいますか、均質なものの大型なものを大量に生産する。大量生産効果で産業ができてきたわけです。それが今、多様化の方に半導体産業自身が移っていきます。そういうリソグラフィーを中心にした半導体の製造技術をいろいろな分野に及ぼしていく。それはバイオの分野なども非常に有力なターゲットだと思うのですが。そういうことを考えていったときにマイクロマシン技術というのはそういう意味で主役になっていくのではないかと。

そうしますと、それは製造技術だけではなくて、今お話が出ましたように、設計技術・システム化技術・計測技術、そういうものを総合的に考える立場のチームがいくつ也需要である。そうするとシステムの人というのは研究成果としてはデモンストレーターといいますか、結果が見せられなければ研究として成功にならないので、非常に研究のタイムコンスタントが短いわけです。そうするとやはり、作ってくれる人、ファウンドリーが重要になってくる。半導体の設計研究が、日本である時期から非常に遅れてしまったが、小さいながら学問研究に対応できるファウンドリーができて、少し立ち上がってきた。そういう意味で、今おっしゃったもう1つのポイントである研究用の試作センターというものを、経済産業省が主になってか、文部科学省かわかりませんが、その辺のところで立ち上げるということが力強さおよびタイムコンスタントという意味で非常に重要なのではないかと、私は全面的に藤田先生のおっしゃることに共鳴しました。

（宮沢） 半導体技術を適用するためにはまた適用するための新しいシステムからの考え方を忘れずにやらなければいけないということですね。ありがとうございました。それでは潟岡先生、いかがですか。

（潟岡） 今の神谷先生のコメントとそう違いはないのですが、企業側にいる人間として思いますのは、企業はその分野で戦いに勝って利益をあげてなんぼの世界です。で、利用のしかた等についていろいろと考えなければいけないと思います。ただ、思いますのは、従来日本の強さというところは、よくも悪くもうまく連携が取れているというところがあったと思います。そういう意味では国がきちんとこういうシステムをサポートしながら世界に向けてちゃんと門を開いておいて、発信基地のような意味で情報を発信していくようなところはぜひ必要だと思います。そういう意味では非常によい考え方ではないかと思っています。

（宮沢） ありがとうございます。植田先生、いかがですか。藤田先生のご提案にさらに追加的な提案を含めても結構です。

（植田） 以前から藤田先生と同じような考えは持っておりました。例えば科技庁に呼ばれて勉強会で話をしたときも、やはり日本で非常に遅れているのは、例えばコーネル大学のナノ・ファブリケーション・ラボのような研究施設だとしてきました。本当に大学で先端的なことをやろうとしたときに、日本だとどこか会社に頼まないといけない。会社に頼んだら、そんなのはもうからないからやってくれない。その結果、アイデアがあっても実現しない。アイデアというものは実現をしないとだんだんと腐って行って、アイデアを出す癖がなくなります。人間は自分にできることを考えるというようになるわけです。ですから、いいアイデアがあれば、それをみんなで御輿に載せて実現してしまうような研究施設が必要だというのは確実です。それがアメリカのように大学やジェット推進研究所のような、国立研究所の中にあって、大学もしくは企業を含めてかなり広くサポートをしてくれるのがいいのか、それとも民間企業と

の上手な連携し尾が日本に向いているのかを真剣に考えるべきです。

もう1つの例は、ドイツの方式です。ドイツが最近いろいろなかたちで研究をやっているのは、彼らは三位一体型を作っているわけです。いろいろな研究センターができます。ドイツも連邦ですから州政府と大学と民間の3人の所長がいて、一緒に運営をします。敷地をちゃんと提供して建物を造るのは州政府が造る。それに対して知識とマンパワー、研究者と学生を連れてきて高水準の研究をするのは大学の責任でやる。研究所には、いろいろな会社の方が来られてそれを利用する。利用させる代わりに、そのデータを残していきなさいと。つまり、それを使って何かやることサポートをするのですが、その結果はみんなの公共のものにするのだという非常に強いポリシーがあって、それはかなりうまくいっていると思います。

そういう中で、大学、先生、産業界の方が一緒にやることによってお互いに必要なことが出てくる。必ずしも外国と同じものを作ればいいというわけではないと思いますが、日本に合ったかたちで、いろいろなところからアクセスができて、そのうえでそこで情報を共有しお互いの相互刺激ができるシステムというのはどうしても必要なのだろうと思っています。

(宮沢) ありがとうございます。下山先生、いかがですか。

(下山) 私は生物系の人と共同で研究していることがあって、その研究態度を見ると、今日の藤正先生の話にもありましたが、手段は関係ないのですね。とにかく知りたいと思っていることをどういう手段であろうがどういう汚い手を使おうがとにかくわかればいいという、そういう非常にアグレッシブな態度に、私は非常に勉強になったわけです。

そのときに、ではこのナノ・マニファクチャリングといったものの目的がいったい何だろうかということでそこから先の展開が違ってくると思うのです。私はずっと先程から言っていますが、たぶん藤田先生もそういうニーズをいろいろなところから聞いてしっかりとニーズを把握されている。ですからバイオあるいは情報通信あるいはAFMにいろいろとニーズがあるということをたぶん確信されているわけです。

そうするとどういうことを考えなくてはいけないかというと、では1人で最初から最後までやって目的を達成するよりも、何かうまくチームを作ったり、あるいはファブとデザインをしっかりと分けて、人がやった成果に乗ってさらにそこから先に進めていかないととても国際競争には勝てないだろう。だから目的はいったい何かということをしかり見据えて議論していかないと、ただ単にこういうことをやりたいということで話を進めていったのではいけないのではないかと考えています。

(宮沢) ありがとうございます。では矢部室長。

(矢部) 3つぐらいコメントさせていただきたいのですが、1つは、藤田先生のやっておられるのは非常に重要なことで、マイクロマシンに今、成果がどんどん出てきて、アイデアがどんどん実用化していこうとしている。このステージはすごく大事で、

マイクロマシンのイメージでいえば、基礎をいろいろやったあと実用化を目指す段階であるだろう。これはナノ製造のプログラムの1つとして入るべきものではないかというのが1つのコメントです。

2つ目は、ナノの世界、マイクロの世界に共通だと思うのですが、先程、先生がセンターという話をされましたが、ナノのところはもっとすごいと思うのです。何かアイデアを持っても、実際作ってみようとしたら既存の作れる人のところへ行かなければいけない。そういう意味で、マイクロの世界のセンターだけでなく、ナノのプロジェクトでやるにしても、ある程度アイデアが出たときにそれを作り上げるようなセンター組織は必須になってくるのではないだろうか。

3つ目は、藤田先生がおっしゃったように、マイクロをどんどん実用化して、それにナノの構造を入れていくことも大事だと思うのですが、私が考えていますのは、潟岡先生のお話にもありましたが、例えばフォトリソグラフィ結晶みたいなものがこれから汎用的になってきたら、そういうものを自在に作り上げるような技術に新たに挑戦しておく。そこで新たな機能を出すとか。そういう製造技術にまだ大きなブレークスルーの課題があるのではないか。そこを見きわめる必要があるのではないか。そういうことを感じました。

(宮沢) こういう研究センターという意味ではなくて、研究基盤みたいなかたちのものが提供されればより多くの研究者の方々がこれに取り組むし、また企業の方もこの研究を実用化に向けて円滑化できるということだと思います。

ここで、研究の進め方ということで、海外からお越しのお2人にコメントなり、それぞれのアメリカあるいはスイスにおけるご経験から、センターあるいはセンター・オブ・エクセレンスみたいなものをどういうふうにとらえていらっしゃるか、コメントをいただけたらと思います。

ドクター・ムーアに、アメリカにおけるナノテクノロジーのセンター・オブ・エクセレンスの役割をどのようにご評価されているかということコメントいただけたらと思います。

(ムーア) まず、国のレベルではこういったものを作ろうともしません。いろいろな領域のリサーチャーがいるわけですが、センターを作りたいというプロポーザルがたくさんあるのでお金が十分にはないのです。例えば10のセンターを作るといって、100のプロポーザルが出てきます。そうなりますと国家のゴールということにはなりません。いろいろなアイデアを見て、例えば100から30に減らしていきます。そのうちの30を競争させて15に減らします。そして、サイトビジットをします。そうすると10に減るわけです。

ということで、システムは日本とアメリカで異なっていると思います。ただ、ゴールとして設定するのは、例えば10のセンターのうち2をナノバイオロジーにする、あるいは3を材料にする、または1つをフォトリソグラフィにする。つまり全体的なゴールは作るということです。何を求めるかということ、コラボレーションを求めます。複数の大学が産業と共同する、あるいは国家の研究機関と協力をするという状況があれば点

数が高くなります。それから、たくさんのリサーチが獲得できるかということを見ます。

アメリカで関心を持っているのは経済的なデバイドです。デジタルデバイドなどいろいろなデバイドがあります。つまりアメリカの多くの地域で経済の成長が偏っているということがあります。主な大学が所在しているところはいいのです。ニューヨークのように大学がたくさんある州があります。カリフォルニア、マサチューセッツ、バージニア、メリーランドなどは大学がたくさんありますが、特に中西部、カンザス、ネブラスカ、ノースダコタ、サウスダコタなどには大学がありません。センターではそういったところの大学とどういうインターフェースを持っているかということを見ます。

経済成長は単に大都市や大きな州だけに集中すべきではないのです。全国的に広げることが重要だと思います。大学は経済成長の一部をなすと考えます。スピノフの企業がありますし、それが地方に出ていくということがありますから。ですから大きな大学が他の大学とどう協力をするかということに注目します。それは人的資源、知的な資源をどうやって出していくかということに関してです。

もう1つ大変重要なことがあります。物理・化学・生物が統合したナノテクノロジーです。ナノテクノロジーの成功の1つとしてインターフェースをどう見るかということがあります。もちろんすぐれた物理学者が量子力学をやるといいのです。生物学者がDNAをやるといいのもいいのです。また、化学者が分子化学をやってもいいのです。しかし、この3つのグループの能力が統合される、そしてお互いの言葉を学びあう。この3つの科学は異なる言葉を話しているわけですから、物理学者あるいはオプティカル・エンジニアが化学のセミナーに行く。それはアメリカから日本に来るようなものだと思います。言葉が違うのです。逆も同じでしょう。たくさんの時間をかけてお互いの言葉を学ばなければいけません。これは決して容易ではないのです。年をとってくるとなかなか違う言葉をうまく学べません。

もう1つ重要なことは、これはどうなるかはよくわからないのですが、ここ10年間、アメリカでバイオメディカル・エンジニアリングが非常に重視されています。生物とエンジニアリングを合わせるということです。これは連邦のプログラムではありません。主に民間の基金がお金を出しているものです。目的は生物学とエンジニアリングのインターフェースを作ることです。大学である学部を始めたい、バイオエンジニアリングをやると言ったらこの基金からお金が得られるのです。多くの大学がこのプログラムを導入しています。長い伝統を持っているところもあります。ジョンズホプキンス、デューク、ジョージアテック大学、UCサンディエゴなどは長い歴史を持っています。そのほかの大学もこういった分野に関心を持っています。というのはNIHが今年、バイオメディカル・エンジニアリングとイメージングの研究所を始めなければならないということが法律に入っているのです。これがナノテックとどうかかわりを持つてくるかはまだはっきりわかりませんが、非常におもしろい分野になると思います。

それから、調整というコメントがあったと思います。省庁間の調整というのは決して易しいことではありません。アメリカでも難しいのです。簡単にやっているように

見えるかもしれませんが、非常に多くの時間がかかります。日本でも同じですが、コンセンサス・マネジメントのシステムであるからです。コンセンサスというのはマネジメントスタイルで一番時間がかかるものです。人的資源も必要です。しかし、長期的には重要な核をなすと思います。アメリカでは簡単にやっていると思ってはいただきたくはありません。たくさんの時間が費やされています。信頼ということにつきると思います。個人と個人の間あるいはグループとグループの間の信頼なのです。先程も言いましたが、意思決定のプロセスにかかわっていない人がリーダーになります。

それから、アメリカではマニュファクチャリングはリサーチの分野の1つです。この言葉を大学で使うとリサーチになります。アメリカではマニュファクチャリングはリサーチとは考えられていません。非常に大きな問題があったのです。マニュファクチャリングのリサーチというのは一番難しいリサーチになると思います。これは方程式に還元することが非常に難しいのです。物理や工学ではたくさんの方程式があつてそれを解決すればいいのですが、マニュファクチャリングを方程式に還元するのは非常に難しいのです。

ということから、大学ではマニュファクチャリングの研究という言葉はあまり使いたくありません。純粹の学問ではないと考えられているのです。私が15年前ロチェスター大学で、センター・フォー・オブティクス・マニュファクチャリングを始めたとき、同じような問題に遭遇しました。リサーチの対象にならないという批判を受けたのです。ロードマップの中でマニュファクチャリング・リサーチという言葉はあまり出てきません。マニュファクチャリングはタイトルには出てくるのですが、マニュファクチャリングという言葉が出てくるのはロードマップの中で右のコラム、つまり2015年の測定というところだけだと思います。これはおもしろいと思いました。

(宮沢) ありがとうございます。プロフェッサー・ヘルツィヒ、お願いします。

(ヘルツィヒ) センター・オブ・エクセレンスについてのご質問でよろしいですか。

(宮沢) 共同研究体制あるいはセンター・オブ・エクセレンス、いずれでも結構です。

(ヘルツィヒ) わかりました。私どももセンター・オブ・エクセレンスに関しても競争の原理を導入しております。センター・オブ・エクセレンスを生物、医学などいろいろな分野に導入しています。社会科学などの分野にも導入しようとしています。競争したあとで12のセンター・オブ・エクセレンスを選ぶことになっていて、そのうちの1つがナノサイエンスということになっています。

おそらくこのセンター・オブ・ナノサイエンスは、大学あるいは民間企業だけというのではなく、いろいろな大学、業界の人が集まってやっています。ネットワークを持つことが重要だと思います。一緒に話をするのが重要だと思います。そうでなければセンター・オブ・エクセレンスは成立しえないと思います。なぜナノサイエンス

なのかということですが、まずいいネットワークがあったからです。また、新聞などでも宣伝をしたということもあると思います。科学者は学術論文を出しますが、一般の人々、納税者はそういうものに接しません。しかし、実際にリサーチャーにお金を出すのは納税者ですから、普通の新聞などでも広告・宣伝をすることが重要だと思っています。

もう1つは、インターフェースです。ムーア先生もおっしゃいましたが、重要だと思います。人々と一緒に話をし、生物学者であれ物理学者であれ、一緒に話をし、理解をするというのは難しくてまだできてはいないのですが、いろいろな人がいろいろなことを言うわけです。ただ、皆、自分のコアビジネスで働きたいと思うわけです。これが必ずしも同じではない。特にオプティクスはイネーブリング・テクノロジーということになりますと、例えばほかの人に手伝ってもらいたいと考えるわけです。そうなりますとお互いさまです。ギブアンドテイクでほかの人も助けていかなければなりません。ほかの人々がどういうゴールを持っているのかということも共に協調しあいながらやっていかなければならないと思います。

(宮沢) ありがとうございます。皆さん、我が国で研究開発をやってきまして、大学間、研究機関間のインターフェースはどんな感じでしょうか。まだ難しさがあると思いますか、それとももう十分動いていると思っていいでしょうか。どなたか、いかがでしょうか。藤田先生、我が国の大学間あるいは学科間のインターフェースについて、いかがですか。

(藤田) MEMSのフィールドは非常に学際的なフィールドで、下山先生はある意味で私の研究の同僚ですが、私は電気工学科に属していますし、下山先生は機械情報工学科なわけです。私の勤めている生産技術研究所でも電気系の教官と機械系の教官、それから化学の教官も時々参加してくれますが、マイクロメカトロニクスの国際研究センターを作っています。それは違う分野の人間が少し違う言葉で話していたのが、マイクロということで結集しようということです。その前身も含めてもう7～8年続けていますので、うまくいくようになってきました。今度は国際センターという名前がついて、フランスの方を十数人受け入れてやっているのですが、そこではまだまだ摩擦があって、論文は一緒にたくさん書けるようになりましたけれども、やはり実際にクリーンルームに入って実験をするとかなり不満がたまっているようです。聞かないふりをして続けておりますけれども、そういうことになっています。

産業界は、始めたときはびっくりしたけれどいったい何を出すのかよくわからないという反応が多かったのですが、数年前からかなり具体的なスペックを持って来られる方が増えました。こういうスペックのものが作れるかどうか。ではそれをやってみましょうということです。企業の方も来られて一緒に研究をした結果、何とか使いものになりそうなものができました。光学の機械ではないのですが、一部にマイクロマシンの光スキャナを入れた測定器を何とか市場へ出せるというところまでできました。

また、化学とマイクロシステムという研究会もつい最近始めました。化学系と電気系・機械系だと言葉がもっと違ってなかなか難しいのですが、だんだん融合ができて

きたような気がします。化学系列とナノの部分を取っていらっしゃる方も多いので、ぜひそういうあたりが徐々に進むとよいと思います。ネットワークはやはりトップダウンでなくてボトムアップでなければならないのかなと思っています。

(宮沢) ありがとうございます。ナノを進めるにあたってもこういう点は十分注意しなければいけませんし、やがてはアメリカやスイスの研究者の方たちともネットワークがつながるようになっていけばいいと期待しております。時間がだんだんなくなってまいりましたけれども、最後に、先程プログラムということで矢部室長から提案がありましたので、この辺を少しだけまだ議論をさせていただきたいと思います。

プログラムという言葉がありまして、皆様方は聞きなれていらっしゃるかと思います。簡単に解説しますと、今までプロジェクトという概念で経済産業省の方で進めていたのが、プログラムというふうに考え方が変わりました。よく誤解がありますのは、複数のプロジェクトをまとめたのがプログラムだといわれているのですが、そうではありません。プログラムというところで政策的な目的を明示化することに最大の課題があります。技術的な内容を含む政策目的を実現するためにどういうプロジェクトを構成するかというわけで、そのプログラムの中にいくつかのプロジェクトが入ってくるのです。

その政策目的が何かということについては、先程たまたまドクター・ムーアがお話しされたのと似ていまして、ナノテクノロジーというのではなくて、日本の場合ですといくつかの社会ニーズを柱に立てています。高度情報化社会の実現、高齢化社会の安全安心、環境と調和、エネルギーの4つを社会的なニーズという大きな政策目標に掲げ、その政策目標に対してどうプロジェクトがこたえていくのかという構成をしているのがプログラムです。

もちろん今申し上げました社会ニーズはかなり目標が明確に設定できるものです。すべてが明確に目標が設定できるとは限りません。先程の半導体のようなプログラムですと、何年までにこれこれの技術を確認するというようなことができるわけですが、そうではない未来探索的なものについては、社会ニーズではなくて基礎基盤的なものとか、よりシーズ指向的なプログラムを立てているものもあります。経済産業省は5本のプログラムを13年度からスタートさせていますが、そのうち4本はこういう社会ニーズ対応ですし、1本は基礎指向です。ちなみに基礎志向のプログラムは材料ナノテクノロジーという名前のプログラムで、材料の分野を包括したものです。

今、議論してきましたナノ・マニファクチャリングの世界がどのようにいくか。明確な目標を持った製品アウトプットのイメージを持ってやるということ、例えば二千何年までにこれこれの高度医療機器を作るというアプローチもあるわけですし、かたやアメリカのナノテクノロジーと同じように、2010年ごろまでに角砂糖の図書館を作ってしまうというアプローチもあるというわけです。

今までのお話を聞いてきますと、一部のナノ・マニファクチャリングの技術テーマの流れは、社会ニーズ指向的に、高度情報化社会とか安全安心というものに直接こたえていくこともできるようですし、一部のものについてはまだまだこれから基礎的なものを展開していくと思います。矢部さんのは技術指向でまとめられたのだと思い

ますが、プログラムという言葉はなじみがなかったので、若干プログラムのご説明をさせていただきますして、矢部室長自身はこれにこだわらずにこういうアイデアをまとめられたのではないかと思います。

このプログラムにこだわらずに今まで総括して今後国、経済産業省、あるいはNEDOが中心になりながらこういう研究開発をぜひ進めていくということで、個別の研究開発のテーマあるいは体制ということが今まで出てきましたので、これ以外でいろいろなご提言なり考え方についてコメントをいただけたらと思います。あるいはテーマの分野、あるいは研究開発の進め方につきましての補足的なコメントということでも結構ですがよろしくお願いいたします。

藤田先生の方から、これは矢部試案で、これにこだわらずに、研究開発のテーマあるいは体制以外のことについて、このようなことに留意しながら研究開発のプログラムを考えていくべきではないかというお話を一言ずつお願いします。

(藤田) 私は、こういうプログラムの中で実現していただければと思うことをお話ししたわけです。試案に沿って言うと、一番下の3行目ぐらいにあるマイクロマシン、フォトン計測・加工等のところでの製造技術ということになるわけですが、出口をよく見て、製造技術の中でも、設計加工、システム化まで含めた統合的な区分をぜひ入れておいていただきたい。新しい機能が見つかってもし何かに役立つものだと思いますので、そういう意味で、工学的なまとめる力といいますか、そういうところをぜひ入れていただきたいとお願いしたいと思います。

(宮沢) ちょっと補足します。プログラムの実現のツールとして、3段階が用意されています。基礎から応用に近いところで、基礎的なところはグラント制度というのがあります。残念ながら今は若手中心グラント制度ですが、グラント制度というのが1つ。それから、これはシーズの発掘で、技術がどこまで産業に使えるかという見きわめの段階になりますと、プロジェクト制度です。今まで大プロとか次世代とかいわれましたが、今は産技プロジェクトです。次のフェーズになりますと企業への助成というかたちです。いわゆる補助金の制度です。このようなかたちでプログラムの実現ツールが準備されているということをご参考までに申し上げます。

では今度は神谷先生、お願いします。

(神谷) 先程、ムーア先生がお話しされた中に、どういうものを取り上げていくかというときに、最初から政府が柱を立てるのではなくて、多くのプロポーザルを受けてその中から本当に力のあるものを選んでいく。研究主体の自発性を尊重するとおっしゃいました。それが100も出てくるほど活発であることをご紹介されました。アメリカの活力というものに私は非常に感心しました。たぶん日本の産業技術研究分野も活力においてそれほど劣っていないと思うので、あまり境界条件をかたく言うと提案が減ってしまうと思うのですが、今おっしゃいましたように非常に小規模なものから大きな規模のものまでいろいろなメニューがあるわけですから、プロポーザルがしやすいような周知をしていただけたらいい。ただ、それが全然ばらばらですとプログラ

ムという大きな目的に向けて集約しにくいので、やはりある方向性を出したような、項目の箇条書きみたいなかたちがもう一段階進められるとどうなのかなと思っています。

ここにすでにプログラムの内容というところでいくつか書いてあって、例えばナノ旋盤みたいなものとかナノ加工装置というような言葉がありますが、そういうものとか何とかの技法とか、それから例えば情報通信用の装置とか、個別の研究アイデアではなくて、研究アイデアの領域をいくつか指定するようなものを箇条書きして、こういう分野で提案がありませんかというようなことを出して、その中で強い、弱いというのをどこかのレベルで審議する。そのようにすると、それぞれの研究主体はある程度自由に、勝手な発想で提案できるけれども、全体として見たときにある種のバランスの取れた、またはリンクの可能なかたちに落ち着くのではないかと。つまり、一番大きなところと一番個別なアイデアの中間のところをどういうふうに整理するか。そこは従来、その辺のところは公募のフォーマットとしては練れていなかったのではないかと思います。私はもしかしたら情報不足かもしれませんが。

（宮沢） いや、そういうことがありました。まさにそうだと思います。ある程度の領域を定めて、その中での研究者の方たちの発想が伸ばせる自由提案制度で新しいアイデアもどんどん出てくるであろう。こういう領域をぜひ設けたらどうかということです。ありがとうございます。それでは潟岡さん、いかがですか。テーマ、体制以外のことということで。

（潟岡） よく理解できているかどうか自信がないのですが、うまくいくかどうかというのは基本は競争と評価だと思います。私の認識が正しいかわかりませんが、我々の例えばリソグラフィの世界でも、EUVとX線とSCALPELのような電子ビームという選択があるわけですが、アメリカのやり方は、それをある時期まで競争させて、そこでディベートして次に生かしていくというやり方をしていると先程の話にもあったと思うのですが、その辺は我々もよく見ならうべきだと思います。それからやはり評価をきちんとしなくてはいけないと思います。そこら辺はぜひうまくシステムがあつたらいいのではないかと思います。

（宮沢） 今のは半導体の言葉で翻訳しますと、ロードマップを数年ごとに改訂するときに、ある年まではイエローが3本引いてあつたのが改訂したときには2本に減っていたとか、そのぐらいの感じで技術の絞り込みをやって次へ進んでいるという話です。ありがとうございます。では植田先生、いかがでしょうか。

（植田） プログラムのご説明をいただきましたが、こういう意味では、社会ニーズの観点からいえば、ナノテクノロジーとかナノ・マニファクチャリングは絶対合っているのだと思います。つまり、この方向は科学とか技術の進歩が本質的に内在している方向ですから。自然な方向を促進することなしに、他のものが発展したりはしないだろうと思うのです。それはまったく心配しないでよいでしょう。むしろそれよ

りは研究に内在するそのもの自身が持っているエネルギーとか運動量をいかに表現させて、うまく活用するかということがすごく重要です。いろいろなアイデアが出て百花繚乱になってくるものをあまりまとめる必要はないでしょう。

その中でナノテクノロジーのようなものがどこからエネルギーをもらうべきかということからいいますと、先程、下山先生もおっしゃいましたが、実は違った分野の融合が大変重要です。異なった科学分野は日本語と英語のように言葉も違っていろいろ大変だとムーアさんもおっしゃいました。それは確かにそうで、実際に自分の村に住んでいなくてよそへ行ってやりますと非常に勉強になります。私も天文学者と一緒にやるとむちゃくちゃ言われる。最近はバイオの方たちとやると、やはり先程おっしゃったように、何がなんでも、美しい方法でなくても何でもいから実現したいという。乱暴なまでの研究に対する要求があるわけです。これこそが学問発展の基礎なので、その分野がすごい勢いで発展しているエネルギーをもらうことができるわけです。

物理、化学、生物がお互いに一番進んでいるところのエネルギーを栄養として受け取って、それを自分の中のエネルギーにしてさらに新しい花を咲かせる。ナノテクノロジーのような融合的な領域では、自分だけではできなくて、お互いを必要とします。それは研究者間がどううまくいくかというよりも、自分のやっていることが重要だったら、他人にあまり斟酌しないでずかずかと入っていく。それができないぐらいだと大したことないと思ってお互いが刺激をしあうようになりたいものだと思います。

(宮沢) ありがとうございます。お互いに刺激があるようなかたちをとということです。下山先生、よろしくお願いします。

(下山) 言葉が違うというのでおもしろいエピソードがあります。生物の人とやっていたときに、アンテナという言葉を出されて、僕は携帯電話のアンテナを思ったのですが、生物の人は触覚を思うのです。本当に言葉は違うなということです。余談ですが、先程からの話ですが、ナノテクノロジーがいったい何か、あるいはナノサイエンスがいったい何か。あるいはそのうちどういうことをこういうプログラムなりプロジェクトでやるのかというのは、かなり整理しないとたぶんここにいらっしゃる方も混乱されていると思うのですが、そういう整理がもう少し必要な率直に思います。

それで、そうやったときにたぶん総論としてはナノ・アスタリスクというのは賛成だと思うのです。ただ、ではそれにいくらかかるの、ではどれだけの見合いがあるのというのは、アメリカのお話などで非常に端的だったのですが、たぶんうちの家内にこういう話をしたらそういう反応が返ってくると思うのです。税金をそういうところに使っているのと。それにちゃんとこたえられるだけの論理的な話をしなくてはいけないのだらうと思いました。

さらに、融合するということに関して、我々も頑張らなくてはいけないけれど、省庁間のいわゆる連携もかなり頑張ってやっていただいて、お金を使った分に対して実のあるアウトプットが出るようにぜひしていかなくてはいけないのではないかという気はしております。

それから、評価の話が出ていましたが、評価も単に形式的に評価をするというだけ

ではなくて、せっかくいろいろなプログラム、あるいはプロジェクトが走り始める可能性があるわけですから、もしそういうことになったときには、形式的な評価だけではなくてどんどん助言ができるようなアドバイザリーボードなどで、失敗させないようなメカニズムもぜひ必要なのではないかと考えています。

(宮沢) ありがとうございます。では矢部室長お願いします。

(矢部) いいです。

(宮沢) よろしいですか。時間が今、5時40分です。まだ議論がつきないところで、プログラムは残念ながらまだナノ・マニファクチャリングの領域は完全には明示化できなかったわけですが、どうやら議論としては、きわめて融合的な領域に我々はいりつつあるのかなということです。それを意識しながら取りまとめませんと、単に1つの技術を提言する、フォーカスするということではいかないようだという事です。

もし会場からぜひ一つということがあれば受けたいと思いますし、なければパネリストの方から、もしなければこれで終わりにしたいと思います。会場からはいかがでしょうか。どうぞ。

(ニコン 飯塚) 大変いろいろな話を伺えてありがとうございました。私は一番初めの秋元先生がお話になった経団連のナノテクノロジーの委員会に加わっているのですが、そこで聞きますと、今日のような検討がいろいろなところでなされ、ぜひこれはお互いにこういうところが理解しあって、コミュニケーションを取って、むだな力を注がないように、ナノというのは学際的、商際的に非常にいいアイテムですから、そういうことをこの際もう一度意識する必要があるのではないかと感じました。

(宮沢) ありがとうございます。お答えになるかどうかわかりませんが、先程冒頭の挨拶で私どもの企画調整部長の辰田の方から、3月末にシンポジウムというお話をさせていただきました。一応26日が仮の予定ですが、そのときは実はこういう私たちの機械とか加工とかではありませんで、むしろ融合的な観点で議論をする予定で今準備をしております。この分野につきましても今日の議論をそちらに反映したいと思っております。ぜひ私どものNEDOのホームページを見ていただきますと、開会が近づきましたらわかるようにしたいと思いますし、毎日見る必要はございません。ホームページにメール登録をしていただきましたら発表した時点で自動的にメール転送されるようになります。ありがとうございました。

ほかにはいかがでしょうか。遠慮はいりません。コメントなり質問なりどちらでも結構です。よろしいですか。これをぜひ一言とか、あるいは会場の方々に一言伺いたいことがなければと思いますけれども。大変失礼なことを聞かせていただいて、では私が会場の方々に聞かせていただきます。ナノテクノロジーあるいはナノ・マニファクチャリングということで今日はやらせていただきましたが、とりあえず70点ぐらいいただけるという方だけご挙手いただければと思いますが、いかがでしょうか。いか

がでございますか。ありがとうございました。

またこういう企画を持ちながらこのナノのプログラムの実現に向けていきたいと思っています。まだいろいろご意見等がありましたら私どものNEDOなり、今日の主催者関係のところにぜひお寄せいただきたいと思います。これからがこういう研究開発をどう進めるかということの機会ですので、今日場に限りませんで、引き続きご意見等がありましたらぜひお寄せいただきたいと思います。私のアドレスでも結構ですしNEDOのアドレスでも結構です。FAX等、何でも結構ですのでご連絡をいただいてご意見をいただきたいと思います。今日はありがとうございました。先生方、ありがとうございました。

本報告書の内容を公表する際は、あらかじめ
新エネルギー・産業技術総合開発機構企画調整
部の許可を受けて下さい。

電話 03-3987-9379

FAX 03-3981-1059