

科学技術未来戦略ワークショップ —ナノ製造・デバイス・システム— 報告書

平成 17 年 11 月 26 日（土） 開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

Executive Summary

●重要研究課題

平成18年度からスタートする第3期科学技術基本計画において、「ナノテクノロジー・材料」は、第2期同様に重点4分野の1つに決定された。今後5年間、国が戦略的に投資を継続する。当ナノテクノロジー・材料分野において、デバイス、システム、およびそれらの製造技術に関する研究は、科学技術それ自体の発展のためにも、日本の未来の産業技術としても極めて重要である。本ワークショップで抽出された重要研究課題は次の通りである。

〈バイオ・メカニカルナノデバイス〉

- ・ ナノ材料またはナノ構造を用いた超高感度センサ
- ・ バイオ・化学・エネルギー応用マイクロ流体デバイス
- ・ MEMS・NEMS

〈情報・通信ナノデバイス〉

- ・ ナノ材料またはナノ構造を用いた超高性能計算素子
- ・ スピンデバイス
- ・ 光ナノ構造と電子ナノ構造との相互作用を利用する量子情報デバイスや通信デバイス

〈製造ナノテクノロジー〉

- ・ トップダウンプロセスとボトムアッププロセスとの融合、物質固有の自立性を取り入れた実装技術や製造技術
- ・ 高速かつ安価なサブナノメータ級微細加工技術

〈基盤技術・基盤科学〉

- ・ ナノ造形技術の現象理解・高度化や複雑ナノデバイスの設計のための理論や計算機科学
- ・ ナノデバイスの界面の理解と制御
- ・ スピントロニクス、マルチフェロイクスなどの開拓中科学領域
- ・ 量子計算のための理論的に予測される物理現象の実現

●研究システム

重要研究課題への直接投資も重要であるが、その投資効果を上げるために、研究施設、ファンディング制度、人材などに関する研究システム上の問題を解決する施策が必須である。本ワークショップで明らかにされた問題を以下に示す。

- ・ [研究施設] ナノテクノロジーに基づく分野融合的なものづくり研究を行える研究拠点

や共用研究施設の整備が、諸外国と比べても不足している。また、既存の共用試作施設がユーザフレンドリになっていないという問題もある。ナノテク研究開発のインフラとして戦略的対応が必要である。

- ・ [ファンディング制度] 多くのファンディング制度がアナリシス（分析・要素技術）研究向けに設計されており、複数技術のシンセシス（集積・結合）を必要とするリスクの高いものづくり研究がしにくい。デバイス・システムの研究の特徴を理解して、上述の課題の研究を有効かつ健全に進展させられるように、ファンディング制度を点検し、必要に応じて新設計する必要がある。
- ・ [人材] 総合的なものづくり研究ができる、あるいはこれを本気でしようとする研究者を、今後、どのように確保するかが問題である。研究内容が高度に専門化し、自分の専門以外のことに対して興味や理解を持たない／持てない研究者が増えてきている。また、世の中に必要とされる人材と大学等で育成している人材との乖離が顕在化している。上記に提案した重点研究課題を遂行するにあたっては、政策立案側、ファンディング側、および評価側にも、総合的なものづくり研究や分野融合研究を理解できる人材が強かつ恒常的に求められている。

目 次

Executive Summary	i
[1] 本ワークショップの開催経緯と目的	1
[2] バイオ・メカニカルナノデバイス	7
2.1 提案された重要研究課題	7
2.2 講演の概要	7
2.2.1 ナノテクノロジー・バイオ技術とMEMS： 藤田博之、東京大学生産技術研究所・教授	7
2.2.2 バイオ・メカニカルナノデバイス： 田畑仁、大阪大学産業科学研究所・教授	9
2.2.3 MSPMによる細胞内探査への挑戦： 中山知信、物質材料研究機構・アソシエートディレクター	10
2.2.4 マイクロ流体工学をベースとした超高速バイオ分析： 亀井利浩、産業技術総合研究所・主任研究員	11
2.2.5 メカニカルナノ光デバイス： 小山二三夫、東京工業大学精密工学研究所・教授	14
2.3 本セッションでの重要な議論の要点	16
[3] 情報・通信ナノデバイス	17
3.1 提案された重要研究課題	17
3.2 講演の概要	17
3.2.1 メゾスコピック系の新しい方向： 平山祥郎、NTT物性科学基礎研究所・部長	17
3.2.2 ナノスピントロニクス of 展開： 鈴木義茂、大阪大学大学院基礎工学研究科・教授	19
3.2.3 フォトニック結晶の研究動向と将来展望： 野田進、京都大学大学院工学研究科・教授	21
3.2.4 カーボンナノチューブデバイス研究現状俯瞰： 松本和彦、大阪大学産業科学研究所・教授	22
3.2.5 今後のナノテク材料分野での重要課題 —High-k metal gate開発の指針の確立の研究例を通して—： 白石賢二、筑波大学物理系物質創成先端科学専攻・助教授	23
3.2.6 情報・通信ナノデバイス： 小柳光正、東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻・教授	25

3.3 本セッションでの重要な議論の要点	27
[4] 製造ナノテクノロジー	28
4.1 提案された重要研究課題	28
4.2 講演の概要	29
4.2.1 ナノ加工技術の現状と課題： 平井義彦、大阪府立大学大学院工学研究科・教授	29
4.2.2 製造ナノテクノロジーとしてのナノ薄膜： 一ノ瀬泉、物質・材料研究機構物質研究所・アソシエートディレクター	30
4.2.3 ポリマ新原理マイクロ・ナノメカトロニクスを基盤とした 次世代医用ツールの創製： 生田幸士、名古屋大学大学院工学研究科マイクロナノシステム工学専攻・教授	32
4.2.4 超階層性ナノ構造光電変換素子の構築： 吉川暉、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー利用課程研究部門・教授	33
4.2.5 カーボンナノチューブのULSI配線応用～ボトムアップのナノ材料の導入： 栗野祐二、富士通研究所ナノテクノロジー研究センター・主管研究員	35
4.2.6 実装から可逆的インターコネクションへ： 須賀唯知、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻・教授	36
4.2.7 プラズマによるテーラード反応場の創成： 橘邦英、京都大学工学研究科電子物性工学専攻・教授	38
4.3 本セッションでの重要な議論の要点	40
[5] 総合討論 ―研究システムを中心に―	42
5.1 プレリサーチ結果のまとめ	42
5.2 セッション1～3の総括討論	46
5.3 総合討論	48
[6] まとめ	50
[7] 参加者	52

【1】本ワークショップの開催経緯と目的

本ワークショップの目的は、ナノテクノロジー・材料分野におけるデバイス、システム、および製造技術に関する未来志向の議論をすることである。JST研究開発戦略センターナノテクノロジー・材料グループは、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰を行ってきた（図1）。本ワークショップが取り扱う研究領域は、主に図1に示す④ナノデバイス・システム、および③ナノ材料・加工プロセスに該当するが、⑤計測・評価・標準のセンサや計測・分析機器関連、および研究システム（研究施設、ファンディング体制など）も対象にする。

世界的にナノテクノロジーの研究開発競争が激化している中、我が国は第2期科学技術基本計画の重点分野として、5年間、ナノテクノロジー・材料分野に戦略的な投資を行ってきた。平成18年度からは第3期科学技術基本計画が始まり、ナノテクノロジー・材料分野は引き続き重点分野に位置付けされる。このようなナノテクノロジー・材料研究の潮目の時期に、本ワークショップは、ナノテクノロジーに基づくデバイス、システム、および製造技術に関するトップダウン研究の方向性を、重要課題、研究体制、および人材育成を含めて総合的に議論することを目的とする。ただし、国が志の高い目標を掲げ、その達成に向けて研究者が使命感を持って取り組むようなトップダウン研究を進めるにあたって、研究者の好奇心やセレンディピティを重視するボトムアップ研究が従来通りなされることを前提としている。

本ワークショップでは、3人のコーディネータのもと、「バイオ・メカニカルナノデバイス」、「情報・通信ナノデバイス」、および「製造ナノテクノロジー」のセッションを設ける（図2）。各セッションで第一線の研究者に現状認識と将来展望とに関して講演して頂き、一連の講演内容を材料にして議論を行う。また、これら3セッションの後に総合討論のセッションを設けた。そして、JST研究開発戦略センターは、本ワークショップの講演と議論の中から重要な論点を抽出する。

本ワークショップの参加者は次のように決定した。まず、JST研究開発戦略センター・フェロー、および特任フェローがコーディネータ候補を挙げ、議論の後、3人のコーディネータを決定した。その後、コーディネータ、JST研究開発戦略センター・フェロー、および特任フェローが各セッションの参加者候補を挙げ、JSTとコーディネータとの議論を経て、参加者を決定した。参加者を決定する際には、専門分野、所属機関、年齢層などに偏りがないように配慮した（図3）。その結果、本ワークショップの目的を達成するに相応しい人選ができたと考える。

本報告書は、上記ワークショップの成果をまとめたものである。2. バイオ・メカニカルナノデバイス、3. 情報・通信ナノデバイス、および4. 製造ナノテクノロジーの各章は、ワークショップの各セッションに対応する。ただし、各セッションで議論された研究課題は相互に強く関連しているので、各章であげる重要研究課題は、ワークショップ全体の講演・議論を踏まえてまとめる。また、研究体制や人材育成といった各セッションに共通す

る議論は、最後にあらためてまとめる。本報告書の結論となるExecutive Summaryは、JST研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料グループによる戦略的研究開発のための国への提言である。

以下に本ワークショップの概要を示す。

1. 開催日時・場所

日時：平成17年11月26日（土） 10時00分～18時40分

会場：虎ノ門パストラル [東京都港区虎ノ門4-1-1]

2. プログラム

プロローグ10:00～10:15	
主催者挨拶	村井眞二
代表コーディネーター挨拶／参加者自己紹介	
セッション1「バイオ・メカニカルナノデバイス」10:15～12:00 進行：堀池靖浩（コーディネータ）	
「ナノテクノロジー・バイオ技術とMEMS」	藤田博之
「ナノ加工技術の現状と課題」※	平井義彦※
「バイオ・メカニカルナノデバイス」	田畑 仁
「MSPMによる細胞内探査への挑戦」	中山知信
「マイクロ流体工学をベースとした超高速バイオ分析」	亀井利浩
「メカニカルナノ光デバイス」	小山二三夫
セッション2「情報・通信ナノデバイス」13:00～14:30 進行：大野英男（コーディネータ）	
「メゾスコピック系の新しい方向」	平山祥郎
「ナノスピントロニクス of 展開」	鈴木義茂
「フォトリソ結晶の研究動向と将来展望」	野田 進
「カーボンナノチューブデバイス研究の現状俯瞰」	松本和彦
「今後のナノテク材料分野での重要課題 ーHigh-k metal gate 開発の指針の確立の研究例を通してー」	白石賢二
セッション3「製造ナノテクノロジー」14:40～16:40 進行：横山 浩（総括コーディネータ）	
「製造ナノテクノロジーとしてのナノ薄膜」	一ノ瀬泉
「ポリマ新原理マイクロ・ナノメカトロニクスを基盤とした次世代医用ツールの創製」	生田幸士
「超階層性ナノ構造光電変換素子の構築」	吉川 暉
「情報・通信ナノデバイス」※※	小柳光正※※
「カーボンナノチューブのULSI配線応用～ボトムアップのナノ材料の導入」	栗野祐二
「実装から可逆的インターコネクションへ」	須賀唯知
「プラズマによるテーラード反応場の創成」	橘 邦英
セッション4「総括議論」16:50～18:30	
「アンケート結果まとめ」	田中秀治
「セッション1総括」	堀池靖浩
「セッション2総括」	大野英男
「セッション3総括」	横山 浩
「総括議論」	横山 浩
エピローグ 18:30～18:40 総評：横山 浩／閉会挨拶：田中一宜	

※平井義彦氏は、セッション1の時間帯に入っているが、セッション3に関するプレゼンテーションである。

※※小柳光正氏は、セッション3の時間帯に入っているが、セッション2に関するプレゼンテーションである。

「ナノ製造・デバイス・システム」戦略ワークショップ

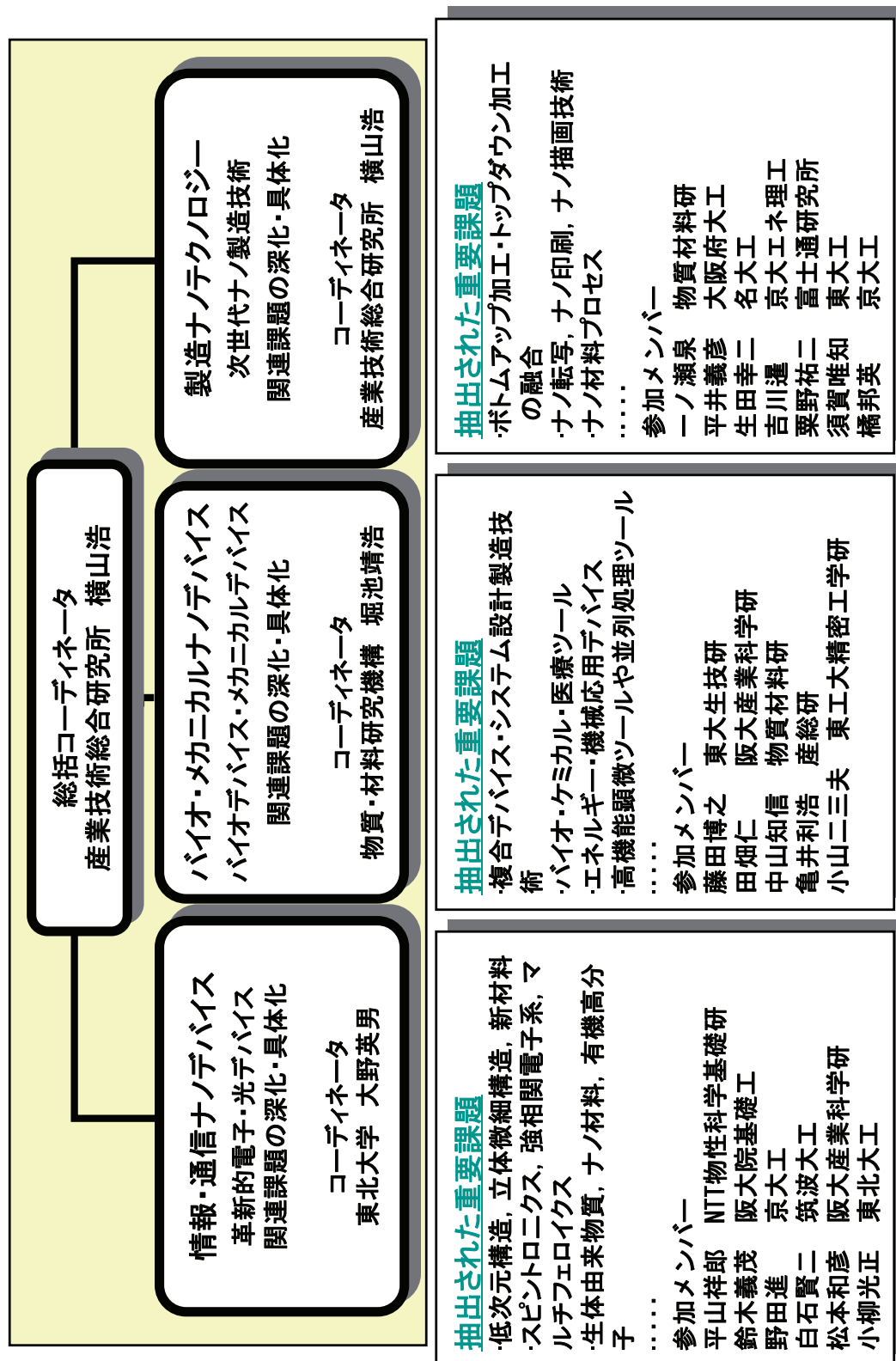


図2 ワークショップの構成

「ナノ製造・デバイス・システム」戦略ワークショップ 研究者俯瞰図

情報通信ナノデバイス
バイオ・メカニカルナノデバイス
製造ナノデバイス

【物質・材料】	【技術・要素】																																					
	⑦ナノデバイス・システム																⑧ナノ加工・ナノ材料プロセス								⑨設計・探索				⑩計測・評価									
	加工・製造技術	1. 複合デバイスシステムの設計・微細	2. ツール・診断・観察用バイオケミカル医療	3. ム・通信・メモリ用微小デバイスシステム	4. エネルギー変換駆動デバイス	5. や並列検知	6. 光・受光デバイス	7. 御デバイスシステム	8. デバイス高性能化・新材料導入による電子	9. 基づくデバイス	10. 非シリコン系高速パワーデバイス	11. 分子エレクトロニクスデバイス	12. 有機エレクトロニクスデバイス	1. トップダウン・ボトムアップ総合ナノ・マイクロ加工技術	2. ナノ転写・描画等の機械的ナノ加工技術	3. 自己組織化	4. ナノ材料の自己集合化や無機物質の組織化	5. 相分離・重合利用有機系自己組織化	6. 生体由来材料を用いた自己組織化	7. 金属の高性能・高機能化	8. 高品質化	9. 特殊環境を利用したセラミックスの作製	10. 有機材料・ナノコンポジットの合成	11. 生物・生物由来材料使用プロセス	12. 高次ナノ構造制御材料	13. ナノ構造・ナノ材料分離技術	1. 材料設計	2. 用	3. 新規な材料探索手法の開発とそれを用いた材料探索	1. 新規SPMの創製へ向けた研究開発	2. 元計測	3. ナノ計測光学を基盤とした分光測定技術	4. 単分子分光・分子イメージング	5. ノ物質計測	6. ノープの創製	7. 医療計測を思考する新規ケミカルプローブ	8. 計測技術・計量・物質の標準化のための技術研究開発および工業標準戦略	
①金属																																						
1.高性能・高機能構造材料																																						
2.機能性金属材料																																						
3.ナノ構造・分散による組織制御金属材料																																						
4.材料高度化プロセス技術																																						
②半導体																																						
1.シリコン系薄膜・バルク材料	堀池	堀池				小山	小山	栗野					須賀	平井													白石伊藤								堀池	堀池		
2.高機能デバイス用非シリコン半導体	平本小柳小山		平本小柳小山					平本小柳細野	平本小柳				須賀	平井																								
3.発光・受光デバイス用非シリコン半導体	小山		野田小山			野田小山	野田小山														橘				橘													
4.パワーデバイス用ワイドギャップ半導体																																						
5.スピントロニクス用磁性半導体	鈴木		田畑大野鈴木				鈴木	田畑大野	田畑大野												橘																	
6.複合ナノ構造半導体																一ノ瀬																						
7新デバイス用カーボンナノ材料	松本	松本									松本																				中山				松本	松本		
③セラミクス																																						
1.構造材料セラミクス																																						
2.電子・光・磁性・セラミクス																					橘																	
3.強相関電子系セラミクス																					橘																	
4.化学機能セラミクス															一ノ瀬					橘																		
④ハイブリッド																																						
1.分散型ナノ粒子材料																																						
2.ナノ物質分散複合材料																一ノ瀬																						
3.界面・表面の利用・高機能化技術	吉川					吉川	吉川堂免						藤田	平井	一ノ瀬						橘				橘													
4.触媒																																						
5.機能性分離膜																																						
⑤有機・高分子																																						
1.電子・光技術のための有機・高分子材料	吉川				鈴木	吉川	吉川						藤田	平井	一ノ瀬																							
2.特異な幾何構造をもつ有機・高分子材料																														中山	中山							
3.環境・生体適応有機・高分子材料																																						
4.有機・高分子系機能膜材料	生田						横山				横山	横山	横山生田	平井	横山一ノ瀬								横山															
5.高機能構造材料																																						
⑥生体関連材料																																						
1.生体内送達治療材料																																						
2.医療診断プローブ材料	生田	亀井生田											生田																						堀池生田	堀池生田		
3.生体適用材料	小柳生田	亀井生田					小柳					生田																		亀井			堀池生田	堀池生田				
4.生体物質を基盤とする高機能材料	田畑	亀井			田畑							藤田																白石		藤田中山	中山		亀井					

図3 ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図上でのワークショップ参加者の分布

【2】バイオ・メカニカルナノデバイス

本章では、集積回路や半導体レーザに代表される情報・通信固体素子以外のデバイス、すなわちバイオデバイスやメカニカルデバイスに関して、トップダウン研究の目指すべき方向性を述べる。「バイオ・メカニカルナノデバイス」セッションでは、堀池靖浩氏（物質・材料研究機構）がコーディネータを務め、藤田博之氏（東京大学）、田畑仁氏（大阪大学）、中山知信氏（物質・材料研究機構）、亀井利浩氏（産業技術総合研究所）、および小山二三夫氏（東京工業大学）が講演した。また、他のセッションでも、松本和彦氏（大阪大学）、一ノ瀬泉氏（物質・材料研究機構）、生田幸士氏（名古屋大学）らが、講演でバイオ・メカニカルデバイスに触れた。

2.1 提案された重要研究課題

- ・ トップダウン加工技術とボトムアップ加工技術との融合：トップダウン加工技術には半導体集積回路技術やMEMS（Micro Electro Mechanical System）技術が、ボトムアップ加工技術には生体分子や高分子の自己組織能の利用がある。両者の融合は、特にバイオデバイスの実現に重要である。MEMSに生体分子を取り込んだデバイスなどが研究されている。
- ・ 高度化した半導体技術に立脚するバイオエレクトロニクスや酸化物エレクトロニクス：超高度化したシリコン技術を利用し、その利点を最大限生かしつつ、新しい材料を用いた新しい原理に基づくデバイスを実現する方向が有効である。
- ・ 走査プローブの高機能化、およびそのバイオ研究への適用：生体を物質として理解するツールとなる。細胞の理解には既存の観察ツールでは不十分である。
- ・ マイクロ流体バイオチップとそれを用いた医療診断システム：DNA分析に代表される医療診断を超高速化・低コスト化する技術であり、テーラメード医療・創薬への応用が期待できる。
- ・ 超大容量光通信のためのメカニカルナノ光デバイス：機械的駆動によって、材料特性では実現できない光特性の可変幅が得られる。

2.2 講演の概要

2.2.1 ナノテクノロジー・バイオ技術とMEMS：

藤田博之、東京大学生産技術研究所・教授

●MEMS技術の可能性

MEMS技術は、半導体微細加工によって「動く」微細構造を実現する技術であり、システムの要となる微小デバイス、たとえば、加速度センサ、ジャイロ、圧力センサ、マイクロミラーアレイ、インクジェットプリンタヘッド、高周波スイッチ、バイオ分析チップなどを実現するために重要である。MEMS技術は、主にミリメートルからサブミクロンまでの微細構造を取り扱い、ナノ世界と人間が取り扱えるマクロ世界とを繋ぎ、ナノテクノ

ロジー分野における技術融合の要となる（図4）。

●バイオテクノロジー・ナノテクノロジーの研究ツールとしてのMEMS

高度な機能を有する走査プローブ、極微量・高速・並列バイオ分析を行える μ TAS（Micro Total Analysis System、チップ上の総合分析システム）、生体分子の操作デバイスなどをMEMS技術を用いて実現できる。これらのMEMS技術を用いた研究ツールは、既に科学技術の発展に多大な貢献をしている。たとえば、名古屋大学・馬場教授はタンパク質の合成・分離を12流路を有するマイクロチップ内で行い、15秒間で12検体を同時に解析することに成功した。また、藤田氏らが開発した技術には次のようなものがある。

①アクチュエータ付きツインナノプローブ

ナノピンセットやナノ2端子電気プローブとして利用できるアクチュエータ付きツインナノプローブを開発し、蛍光染色したDNAの水溶液からDNA分子束を捕獲することなどに成功した。

②生体分子モータのエネルギー変換計測ツール

10^{-12} Lと超微小容量の容器をMEMS技術を用いて作成し、その中に磁気ビーズ付き生体分子モータ（F1-ATPase）を1つ入れ、回転磁界によって生体分子モータを時計回転させることによって、ATPが合成されることを定量的に確認した。

●ナノ構造によって実現するバイオ機能を取り込んだMEMS

MEMS技術は高度な機能を実現する微細構造を実現できる強力な技術であるが、トップダウン加工技術で作り込むことが現実的ではない機能もある。したがって、生体分子が

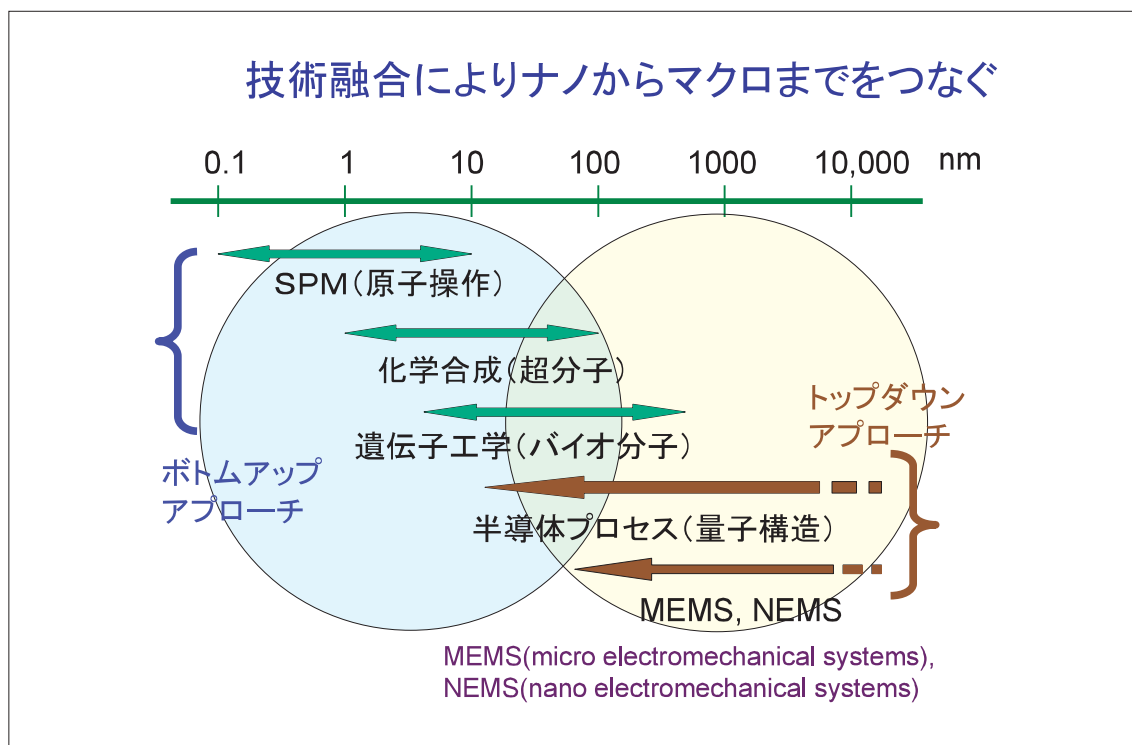


図4 MEMS技術の位置付け
(藤田氏の発表スライドから)

有する高度な機能などをトップダウン加工された微細構造に付加する技術が、今後、重要になる可能性がある。これらのトップダウン加工とボトムアップ加工との融合は、DNAチップに代表されるバイオセンサーなどで現実となっているが、藤田氏はより能動的な生体分子利用の可能性を実験的に示した。たとえば、微小管・キネシン系（生体分子モータ）をマイクロ流路に固定し、キネシンで修飾したシリコンマイクロ構造体を輸送することに成功した。この技術は、将来、分子搬送機能を有する μ TASなどに応用できる可能性がある。

2.2.2 バイオ・メカニカルナノデバイス：

田畑仁、大阪大学産業科学研究所・教授

●実用バイオチップの現状

バイオチップは、DNA、蛋白質、酵素細胞などをチップ表面に固定させたもので、それらと生体分子との電気的あるいは化学的相互作用によって、目的分子の検出を行うものである。DNAチップに関しては、Affymetrix社、Agilent社など欧米勢が市場を独占している。DNAチップは、今後も需要が見込まれ、大きな市場を形成すると考えられるが、日本での生産はほとんど行われていない。また、現在、最も需要が高いグルコースセンサの市場規模は、国内で600～700億円、世界では6000～7000億円である。日本企業を含めて、10社以上がこの市場に参入している。

●DNAチップの進化

従来のDNAチップに用いられている蛍光ラベル法は高コストであり、また蛍光分子が検体DNAに比べて大きいため、再現性・信頼性に問題がある。したがって、蛍光ラベル法に代わる検体DNAの「直接検出法」が望まれる。その方法として、振動子を用いた質量測定なども考えられるが、日本の優れた半導体技術を用いて、電流・電荷の変化として検体付着を検出する手法が1つの有望な方法である。半導体技術との融合によって、集積化、並列化、定量性・再現性の向上などが期待できる。この例としては、田畑氏らが開発したISFET（Ion Sensitive Field Emission Transistor）を用いたDNA検出法がある。このような半導体技術を利用したバイオセンサーの研究は、韓国、ドイツ、米国などの各国でも行われている。

今後、研究の対象はDNAから蛋白質や膜蛋白へと進み、蛋白質チップの実用化が不可欠になる。この段階で、ゲノム情報の真の産業利用が実現すると考えられる。

●製造ナノテクノロジーへのバイオ技術の適用：トップダウン加工とボトムアップ加工との融合

トップダウン加工技術には限界があるため、バイオデバイスの実現にはボトムアップ加工との融合が必須である。たとえば、DNA塩基の相補性を利用することで、プログラム自己組織化を実現することが可能である。まず、インプリントの技術を用いて鋳型となる

パターンを形成し、そこに種となる金属粒子-DNA複合体を位置決めし、自己組織的にナノファイバのパターンを形成することが可能である（図5）。

●酸化物エレクトロニクス

強磁性強誘電体の物理であるマルチフェロイクスが注目されている。チャンネル部にスピントロニクス（スピンエレクトロニクス）の物理を、ゲート部にマルチフェロイクスの物理を適用したトランジスタでは、CMOSと同じ操作で電界によるスピン制御ができると考えられる。これはPost FeRAM、Post MRAMのような再構築可能なユニバーサルメモリとしての応用できると期待される。

日本が技術的に優位に立っている半導体技術に、バイオエレクトロニクス、酸化物エレクトロニクスの技術を融合することで、市場価値の高い製品を作り出すことができる。

2.2.3 MSPMによる細胞内探査への挑戦：

中山知信、物質材料研究機構・アソシエートディレクター

●MSPM技術とその細胞膜研究への適用

MSPM（Multiple-Scanning-Probe Microscopes）は多数の走査プローブを集積化した計測システムであり、各プローブに異なる機能を付与することによって、微細構造表面の多点・同時観測を実現できる。MSPMは生きた細胞内での生体機能を直接観測する重要ツールとなる。

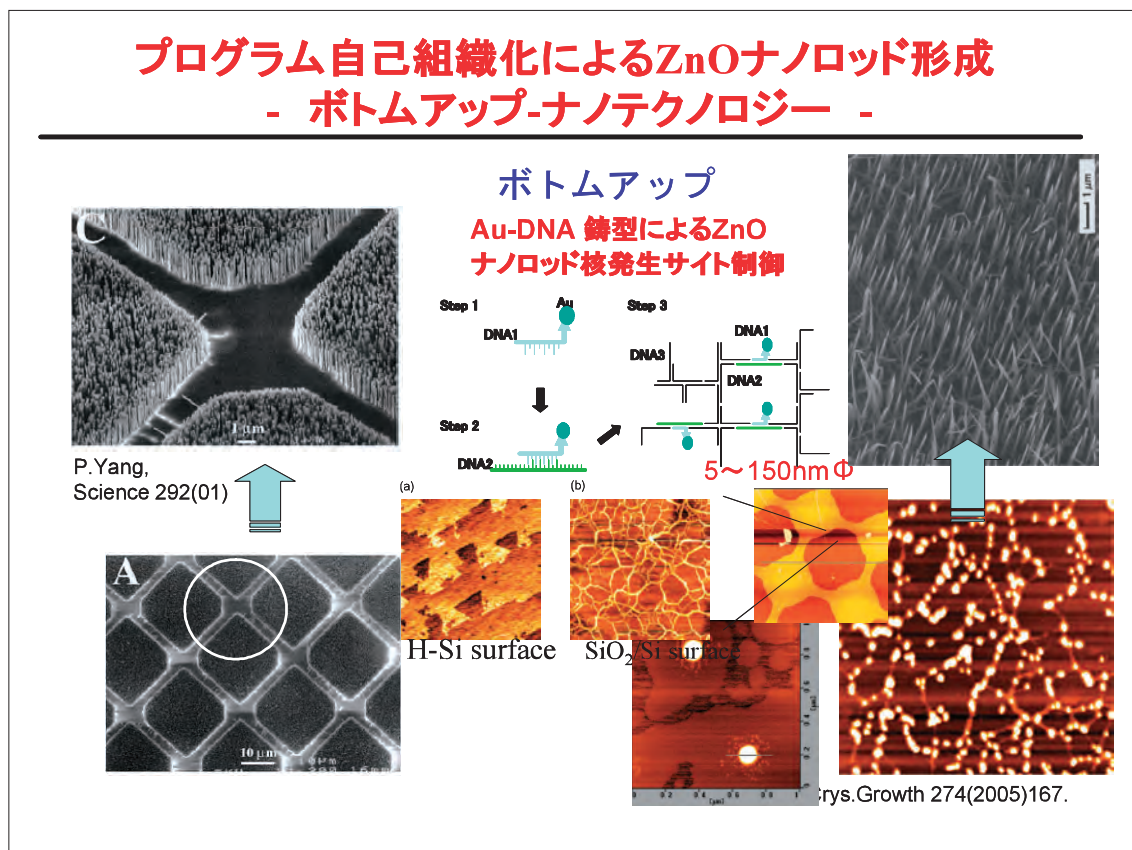


図5 製造ナノテクノロジーへのバイオ技術の適用例
(田畑氏の発表スライドから)

細胞膜は流動的な膜であり、その表面に様々な機能分子が散りばめられている。この細胞膜の表面をプローブによって観測する研究が行われている。たとえば、最近、UCLAの研究グループは、イースト菌の細胞膜の振動を観測し、振幅は場所によって、また周波数は温度によって変化するということを明らかにした。

●細胞機能を観測するためのMSPMの課題

細胞の生体機能を直接観測するためには、細胞内にプローブを差し込むことが必要になると考えられる。そのための技術課題には次のようなものがある。

- ①複数のプローブを細胞内に挿入する手法の研究
- ②プローブ先端の機能化とプローブの開発
- ③複数プローブを用いた走査・測定システムの構築
- ④生きた細胞を被観測対象として固定する手法の研究

MSPMのような観測ツールを細胞に適用することによって、細胞を物質機能の側面から理解することが可能になり、材料分野でのバイオ技術の発展が期待できる。

●細胞研究にとってのツールの重要性（議論から）

細胞が1個だけではなくコロニーとして活動しているときに、細胞同士でどのような信号交換をしているか、どのような蛋白質を作っているかなどを測定することが、細胞を理解するために重要である。細胞を系統的に理解することによって、癌に代表される病気の理解も進む。しかし、細胞を生かしたまま測定する技術は未熟であり、上述のような測定は可能になっていない。プローブの挿入は細胞観測法の候補の1つであるが、生きた細胞に異物を挿入して良いかどうかという疑問は、今後の研究によって解消されなくてはならない。

2.2.4 マイクロ流体工学をベースとした超高速バイオ分析：

亀井利浩、産業技術総合研究所・主任研究員

●マイクロ流体工学とバイオチップ

マイクロ流体工学は、微量の流体試料を操作・分析する技術体系である。マイクロ流体工学の応用分野には、バイオ分析、ハイスループットスクリーニング、高付加価値化学物質の少量多品種製造、携帯型燃料電池などがあるが、ここではバイオ分析に関して述べる。

バイオ分析試料を微量化することによって、分析の超高速化、低コスト化、さらには高精度化が期待できる。たとえば、電気泳動は、初期のスラブゲル電気泳動法からキャピラリー電気泳動（CE）へと進化したが、その後、半導体微細加工技術による精緻な流路形成と電気力学的操作とによって、チップ上で高分解能の電気泳動を高速かつ再現性良く実現できるようになった。さらに、分析スループットを上げるためには、並列化が有効である。たとえば、384本の電気泳動チャンネルが集積化されたデバイスが開発されており、

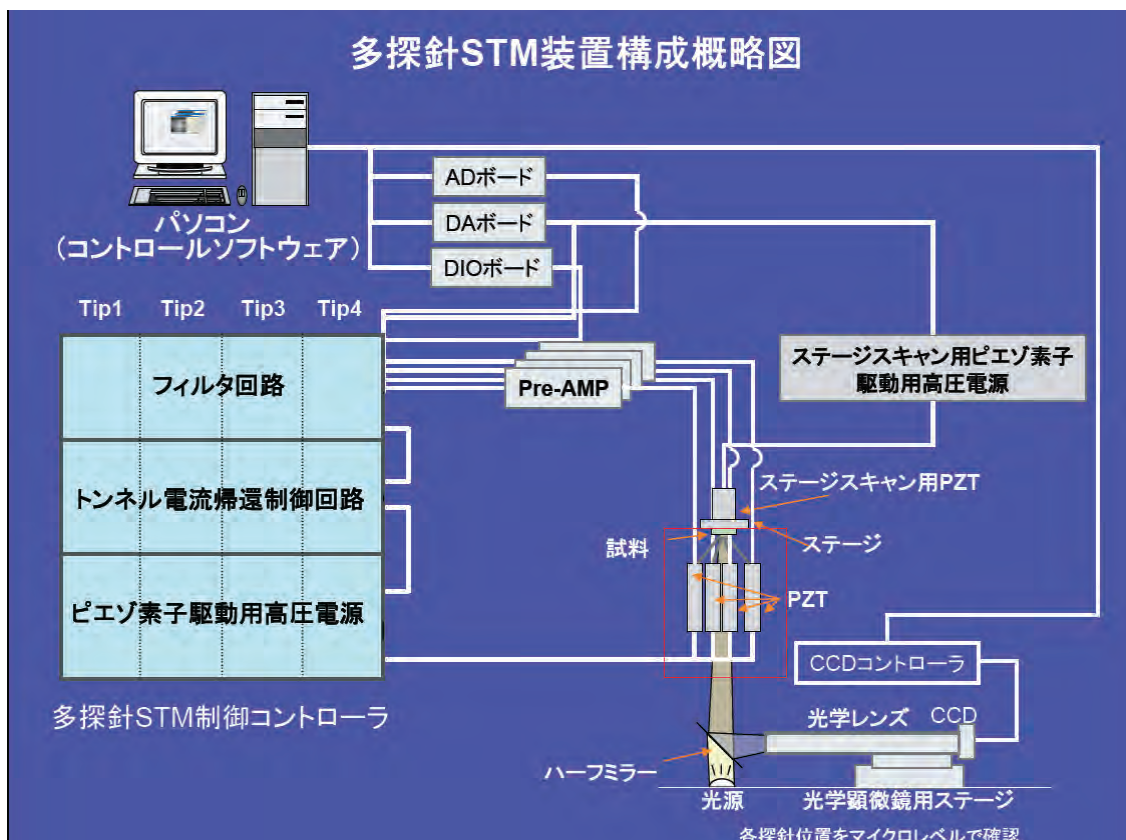


図6 MSPMのシステム構成
(中山氏の発表スライドから)

遺伝性ヘモクロマトーシスの遺伝子解析が僅か5分で可能である。このようなデバイスでは、分析スループットはサンプル前処理プロセスやサンプルローディングが律速しているので、サンプルローディングの手間を大幅に軽減できる。サンプル前処理プロセスを集積化したデバイスも開発されている。また、チップ上に異なる分析プロセスを集積化することも可能である。たとえば、20サイクル10分の高速マイクロ流体PCRと高速電気泳動とを組み合わせ、チップ上でDNAの電気泳動分離が実現されている。これによって、複数の遺伝子診断に基づく信頼性の高い分析が可能である。

この分野には、韓国、中国、台湾などのアジア諸国も力を入れている。日本では、科学研究費補助金特定領域、NEDOプロジェクトなどで研究されている。しかし、これまでに実用化されたものは限定的であり、欧米が先行しているのが現状である。

●マイクロ流体バイオチップ用集積型検出素子

マイクロ流体バイオチップによって分析の高速化が実現されているが、依然、蛍光検出システムが大型で処置が必要な“その場”（Point of Care）での高速バイオ分析は実現されていない。亀井氏らは、可視光に対して感度が高く、fluorescein、green fluorescence protein、DNA intercalatorなどバイオ分析によく使われる色素の発光帯に適したa-Si:H蛍光検出素子と面発光レーザ（VCSEL）とを一体化した、超並列化が可能なレーザ誘起蛍光検出素子を研究している（図7）。これを用いて、メチシリン耐

性黄色ブドウ球菌、メチシリン感受性黄色ブドウ球菌などの病原菌の高感度検出・同定に成功している。

● バイオ流体チップをテーラメード医療・創薬に生かすために（一部、議論から）

DNAの塩基配列情報をテーラメード医療・創薬に生かしていくためには、DNAシーケンシングを桁違いに高スループットかつ低コスト化することが必須である。これは21世紀中頃までには実現しなくてはならないと考えられる。そのためには、DNAシーケンシングの上流から下流までをシステムとして考え、全体のスループットとサンプル消費量とのバランスをとりながらマイクロ流体バイオチップを開発することが重要である。このようにシステムとして整合性を持ったマイクロ流体バイオチップを開発するためには、DNAシーケンシングのように重要性の高いバイオ分析に狙いを定め、焦点の定まった集中的な研究開発を行う必要がある。

● 蛍光検出と電気的検出（議論から）

バイオ分析の主流は蛍光検出である。蛍光検出に関する技術は常に進化しており、一分子でDNAシーケンスを行える蛍光検出技術も登場している。集積型蛍光検出素子も要素技術の進歩によって良くなり続けると期待できる。また、蛍光波長の違いを利用した多重分析も可能である。しかし、高価な蛍光色素の多くは外国製であり、国産の蛍光色素の

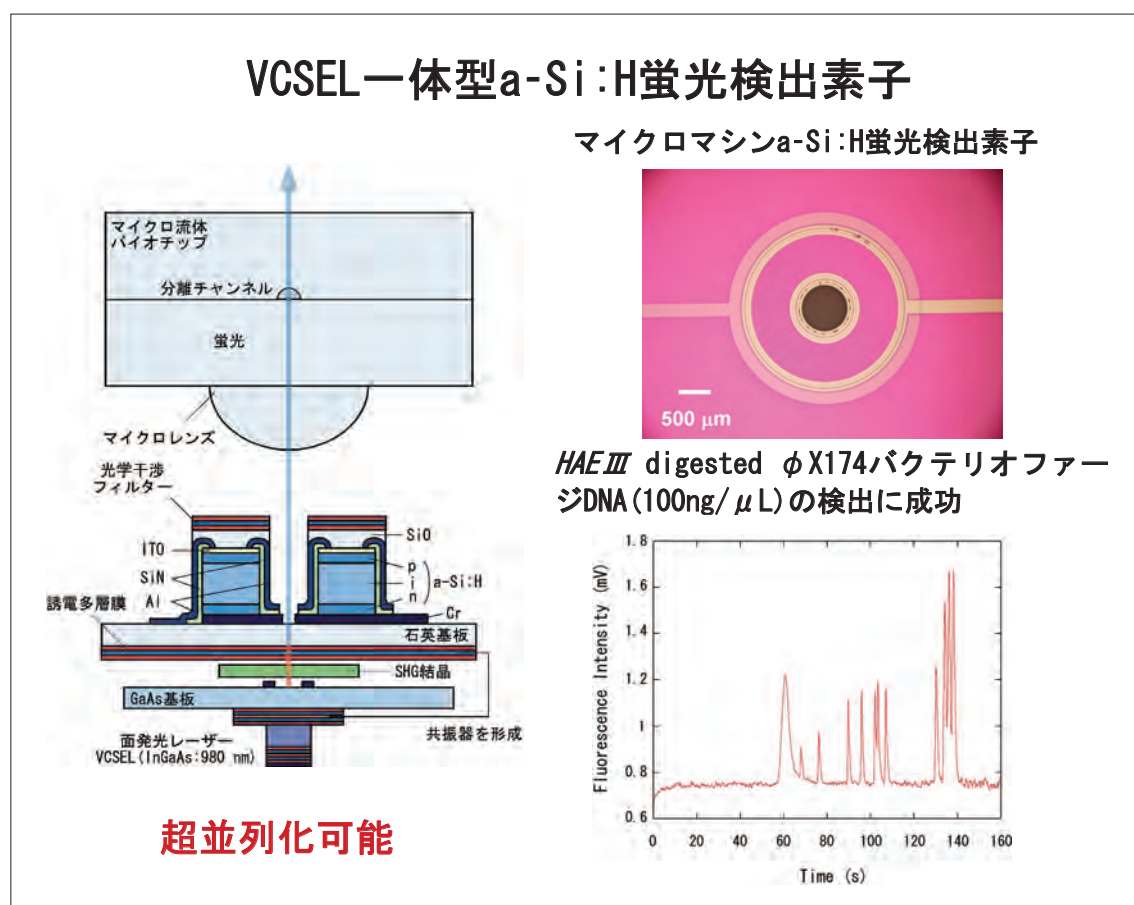


図7 VCSELとa-Si:H蛍光検出素子を一体化したデバイス
(亀井氏の発表スライドから)

開発が望まれる。一方、ISFETなどを用いて電氣的にバイオ分子の検出を行うデバイスは、低コスト化できる可能性がある。しかし、電氣的検出法をバイオ分析に適用する場合、溶液中に多数存在するイオンがバックグラウンド信号となり、検出限界を律速するという、原理的な限界がある。このように、両検出法には一長一短がある。

2.2.5 メカニカルナノ光デバイス：

小山二三夫、東京工業大学精密工学研究所・教授

●高度情報社会に求められる光デバイス

今後、普及すると考えられる画像配信には非圧縮で40Gbpsの通信速度が必要である。また、ユビキタス情報社会が到来するとあらゆる情報がネット上を流れることになる。その結果、バックボーンの通信容量はペタ (10^{15}) ～ヘキサ (10^{18}) の水準に達する。このような大容量通信を実現するためには、情報を電気ではなく光で扱うことが必須である。そこで必要となる超高速光ルーティングを可能とする光デバイスに、高速・大規模光スイッチ、広波長域可変レーザ、光バッファメモリなどがある。

また、コンピュータ内の配線（光インターコネクション）や演算でも光の利用が有効である。そこでは、光デバイスの超小形化・低消費電力化、電子回路と光回路との融合、光回路の超並列化などが重要である。

●巨大可変性を有するメカニカルナノ光デバイス

光デバイスの役割の1つは、光の強度、波長、位相などを変調することである。従来、これは、主に材料特性（たとえば、屈折率）を変化させることで実現されてきた。メカニカルナノ光デバイスは、従来の限界を超える幅で光の強度、波長、位相などを可変できる。たとえば、東北大学の羽根一博氏は、チューナブルミラーを実現するために、サブマイクロメートル周期の格子構造を静電アクチュエータで引っ張り、その周期を変えるMEMSを開発している。また、小山氏らが開発したデバイスには次のようなものがある。

- ①MEMS駆動エタロン（共振器）を用いた波長可変VCSEL：発振波長を大きく変化させられ、波長の温度安定性が高い。
- ②VCSEL上で光を局在化させる金属ナノ構造：VCSELの発振制御や高感度光センサとして応用可能である。
- ③可変中空光導波路：たとえば、圧電素子によって幅を可変できる中空光導波路に回折格子を形成し、反射波長を160nm幅で変えることに成功した。これは屈折時換算すると10%を超える巨大な変化であり、通常の熱工学効果や電気工学効果では到達できない値である（図8）。

●超高速ネットワークシステムの構築（議論から）

光ネットワークシステムは多くのデバイスや部品で成り立ち、それらの間の整合性が重要である。また、システムの性能は最も性能の悪いデバイスや部品に律速される。次世代

の超高速光ネットワークが必要であることは論を待たないわけであるから、そういうデバイスや部品、1個1個の基礎と応用をどのように担当し、研究していくかという戦略が求められる。

●日本の光技術研究（議論から）

たとえば、VCSELは日本発の技術であり（伊賀健一、東京工業大学）、光通信や光デバイスの研究開発では、これまで日本は先導的な役割を担ってきた。しかし、ITバブルがはじけた後、光研究は、特に民間企業で苦しい状況に置かれている。次世代の光ルータなどの社会的要請の大きい課題に関しては、産学官の連携が重要である。

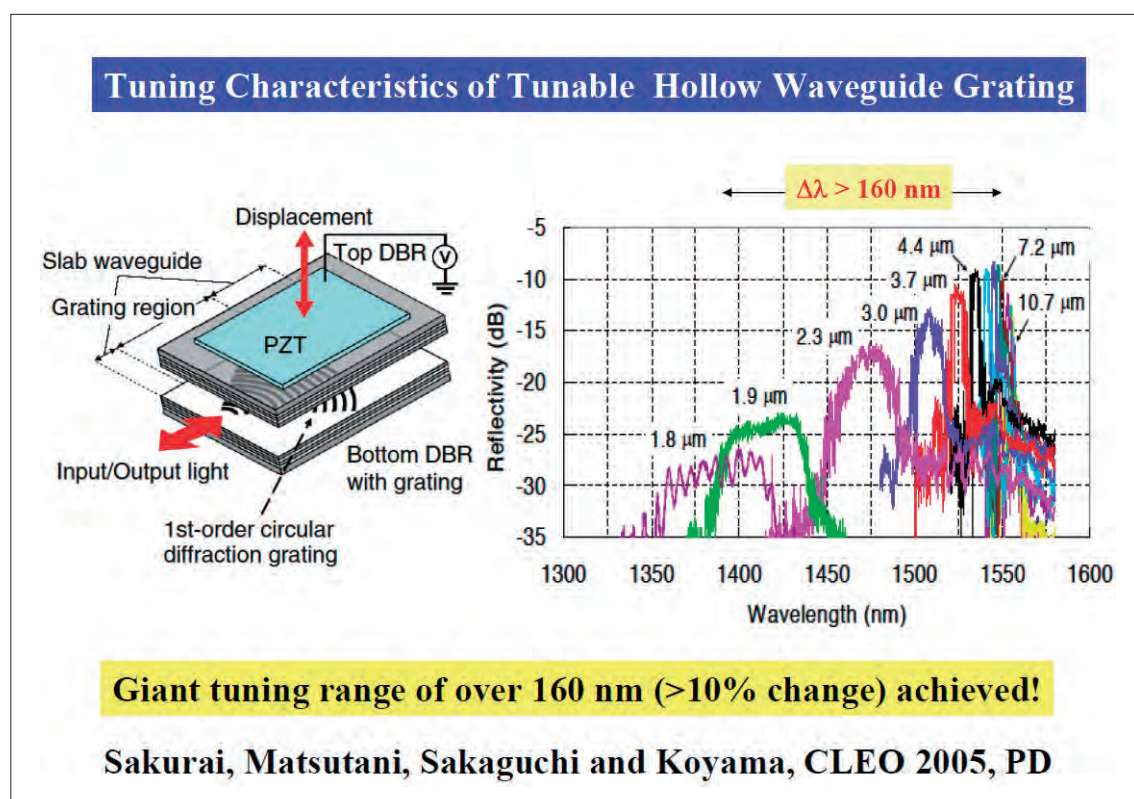


図8 中空光導波路と回折格子とを組み合わせた可変光反射デバイス
(小山氏の発表スライドから)

2.3 本セッションでの重要な議論の要点

●デバイス・システムの総合研究の必要性

社会ニーズとして、たとえば、テーラメード医療のための超高速・低コストDNAシーケンシングシステムの実現があるが、これを達成するためには、そろそろ目標を掲げたシステム研究が必要になる。ナノバイオデバイスに関連して、論文発表は大量にあるが、実用化されたものは皆無であると言ってよい。個々の研究者が、自分に都合が良いやり方ではばらばらに研究するだけでは、社会ニーズを充足する「もの」は実現しない。ある研究領域の下、ばらばらの研究を寄せ集めただけの研究プロジェクトではなく、キープレーヤが参加する組織的な研究プロジェクトが求められる。

このような分野融合的な研究プロジェクトを進めるにあたって、どのような研究システムを構築すべきかという戦略立案機能が、我が国では脆弱である。国家としての戦略性の発揮は、各省庁から提案された類似プロジェクトを連携プロジェクトとしてまとめたという程度に留まる。

●産官学の役割分担

あるデバイスやシステムの実現を目標に掲げた研究は、主に企業が担当すべきではないかという議論がある。学術研究とは異なり、デバイス・システムの研究では、産学官の役割分担を考える必要がある。企業側の意見としては、企業が利益を上げるための目の前の研究開発に精一杯であるというのが現状であり、大学や公的研究機関に次のデバイス・システムの研究開発をして欲しいと考えている。しかし、日本の大学は、遠い将来に必要なかもしれない基礎研究に逃げ過ぎているように見える。現在のような技術革新の早い時代には、国として総力をあげて次世代の研究開発を行い、科学技術力の底上げをしなくてはならない。半導体分野でそうであるように、企業の努力だけで次世代の技術を構築することは不可能である。産学官の連携が重要である。

●研究政策について

ナノデバイス・システムの研究では、良い意味での「製品」をつくるという目標を設定し、主要な研究者が必要な技術を過不足なく担当し、その目標に向かって進んでいくような研究の枠組みが必要である。JSTのCRESTでも、このようなプロジェクトは可能であると考えられる。

分野融合研究のために、どのような研究システムを組むかということについて、日本は極めて脆弱である。特に日本は各省庁が極めて強く、恐らく他の国の1国ぐらいの多くの人材を抱えて相当な計画を立てているが、非常に効率が悪くなっている。それに対する動きとして、各省から出た類似プロジェクトが一つの連携プロジェクトという形にまとめられ、2005年からは連携施策群となり、コーディネータが配置されている。

【3】情報・通信ナノデバイス

本章では、プロセッサ、メモリ、半導体レーザなどに代表される情報・通信固体素子に関して、トップダウン研究の目指すべき方向性を述べる。「情報通信ナノデバイス」セッションでは、大野英男氏（東北大学）がコーディネータを務め、平山祥郎氏（NTT）、鈴木義茂氏（大阪大学）、野田進氏（京都大学）、松本和彦氏（大阪大学）、白石賢二氏（筑波大学）、および小柳光正氏（東北大学）が講演した。

3.1 提案された重要研究課題

- ・キャリア・スピンのコヒーレンスや相関を利用するメゾスコピックスピンエレクトロニクス：キャリア・スピンや核スピンのコヒーレンスや相互作用を制御することは、科学的に興味深いだけでなく、量子コンピュータ、単分子ESR/NMRなどの革新的デバイスに繋がる。
- ・金属、半導体、および酸化物を用いたスピントロニクスデバイス：金属スピントロニクス分野では、いくつかの有用な機能が室温で実現されており、高密度磁気記録ヘッド、高速不揮発性メモリ、マイクロ波発生・検波デバイスなどへの応用が見える。半導体・酸化物スピントロニクスの研究も着実に進捗している。
- ・光・電子融合回路：フォトリソニック結晶に代表される光ナノ構造と電子回路とを一体化して、超消費電力プロセッサ、高密度光メモリ、超高感度センサなどを実現する。フォトリソニック結晶に関しては、様々な機能をエンジニアリングできる段階まで研究が進展しており、次は設計通りの構造を高速・安価に製造する技術が求められている。
- ・カーボンナノチューブ（CNT）のデバイス応用：医療診断や環境計測に利用できる超高感度センサへの応用が早く、トランジスタやLSIなどの超高性能電子回路への応用が続く。CNTの電子回路応用には、CNTの半導体／金属制御（カイラリティ制御）の問題が残っている。
- ・異種材料界面のナノスケール物性の研究：次世代以降のLSIには新規材料が導入されるので、異種材料界面のナノスケール物性の研究がデバイス開発にとって不可欠となる。また、技術的完成度の高いシリコンLSIはナノ界面科学にとって絶好の対象である。
- ・新しい材料や要素を取り入れた集積化デバイス、および複数の機能要素を集積化したシステム：これら2つの意味での集積化（インテグレーション）によって、高機能システムやリコンフィギュラブルシステムを実現する方向に研究・開発が向かう。

3.2 講演の概要

3.2.1 メゾスコピック系の新しい方向：

平山祥郎、NTT物性科学基礎研究所・部長

●メゾスコピック・スピントロニクス研究の可能性

近年、メゾスコピック系の研究の流れは、キャリア・スピンのコヒーレンスを利用する

方向、あるいは単体キャリアや単体スピンではなく、それらの相関や相互作用を利用する方向に向かっている。たとえば、結合量子ドットの中に1個の電子を入れて、電子が右のドットにいるか、左のドットにいるかが不確定な状態（重ね合わせ状態）を作り、その状態をコヒーレントに制御することが可能になってきた。また、スピンの間に量子力学的相関を作り出し、制御することにも成功しつつある。たとえば、量子ドットを挟むように2つの電極を繋いでその間に電流を流しながら、ゲート電圧によってドット内の電子数を変えると、極低温ではドット電子数が奇数の時に大きな電流が流れる。これは近藤効果と呼ばれ、ドット電子と電極電子との間のスピン相関が原因である。また、ハーバード大学や平山氏のグループでは、これにもう1つドットを追加した2ドット系で、空間的に離れた2つのドットのスピンを相関させることに成功した。こうしたスピンの非局所的制御は、量子コンピュータの実現に繋がる成果である。

最近、電子との相互作用を通じて核スピンを半導体中で制御したり、核スピンの情報を電子スピンの読み出しという研究が盛んになってきた。従来の半導体デバイスでは存在が無視されていた核スピンの表に出てきたわけである。さらに平山氏らは、ガリウム砒素を用いたナノデバイスのNMR（核磁気共鳴）で、核スピンの異なる準位間をコヒーレントに行き来する現象を観測した。この現象は単一光子遷移のほか2光子遷移でも見られた。これは、核スピン（大きさは $3/2$ の4準位系）のコヒーレント制御という点、さらには半導体中における核スピンの制御という点から興味深い（図9）。ナノスケール領域でNMRを観測したことは、従来のNMRに比べて1000倍以上の高感度の実現を意味し、将来的には単一分子のESR（電子スピン共鳴）やNMRに繋がる革新的な計測技術として期待される。

●キャリア・スピンのコヒーレンスを利用した技術の展望

コヒーレンスの実現と制御とは、量子ビットの実現やエンタングルした（量子的にもつれた）キャリアの生成に繋がり、将来的には量子情報処理への応用が期待される。さらに、電子スピンと核スピンと光の間の相互作用は、量子中継器や量子メモリーへの応用が考えられる。半導体の中には、ガリウム砒素のように非常に多くの核スピンをもつものもあれば、シリコンのように核スピンを持たないものもある。ヘテロ構造にうまく組み込むことで核スピンの量は半導体中で制御できることから、核スピンの情報を蓄えるメモリーデバイスも考えられる。さらには、スピンを並べた集団のマクロなコヒーレンスにも面白い応用があると思われる。革新的な計測技術としての面白さについては上で述べた通りである。

これらの他にも有望な技術が多数ある。たとえば、半導体中の薄い電子層2つを非常に近づけて並べると（二層系）、層間のクーロン相互作用を介した相関によって電子が超流動状態になることが実験的に示された。これを用いてマクロなコヒーレント状態を実現できる可能性がある。さらに、こうした積層構造の上にナノ構造を作ると、それぞれの相互作用が強められることも期待できる。

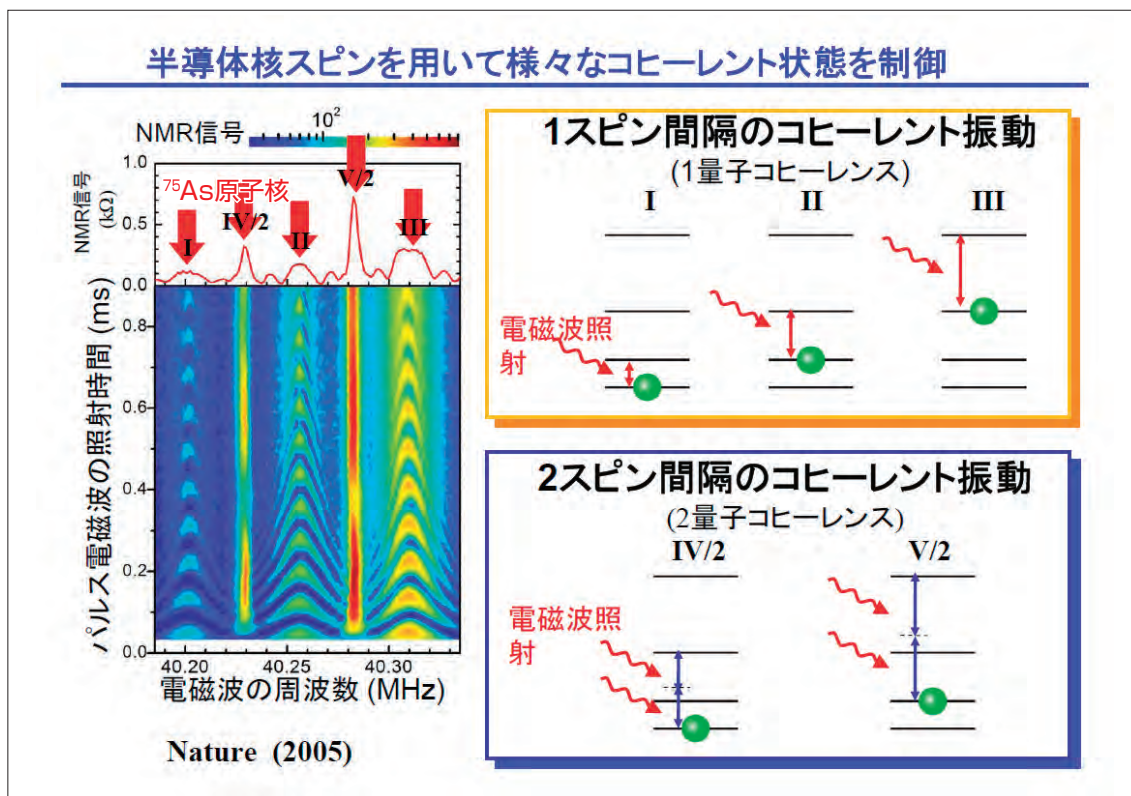


図9 革新的な計測技術として期待されるメゾスコピック・スピントロニクス
(平山氏の発表スライドから)

3.2.2 ナノスピントロニクスの展開：

鈴木義茂、大阪大学大学院基礎工学研究科・教授

●金属スピントロニクスの可能性

電子の有する電荷とスピンとを利用するスピントロニクスの分野において、鈴木氏らは、比較的実用に近い室温で動作する金属スピンデバイスを研究している。スピントロニクスの物理が現れるのは、スピン拡散長（100nm程度）より小さいナノの世界である。スピン拡散長程度のデバイスを作れば、デバイス中でスピンを保存し、スピンに特有の様々な現象を利用できる。たとえば、トンネル磁気抵抗素子は、磁気センサとしてハードディスクの読み出しヘッドに用いられ、記録密度の増大に寄与する。

また、スピン注入による磁化反転を利用した高速固体磁気メモリーの実現も期待される。スピン方向の揃った強磁性体とそうでないものとを非磁性体を介して並べ、電流（スピン方向の揃った電子）を前者から後者に流すと、流入先でスピン同士が相互作用し、歳差運動する。この歳差運動が増幅されると磁化反転が起こる。磁性金属を用いれば、この現象を室温で超高速（200ps）に起こせるので、高速メモリーへの応用が期待できる。また、この歳差運動を増幅させ、発振させると、マイクロ波（～8GHz）が発生するが、実用上有意なぐらいの出力が得られるだろうと注目されている。この現象を逆に利用すれば、マイクロ波の整流が可能である。これはスピントルクダイオード効果と呼ばれ、特定波長で起こる共振現象なので、マイクロ波の検波に応用できる。既存の半導体ダイオードは温度によって性能が決まるが、スピントルクダイオードは温度に依存しないという特長を有

する（図10）。

このように、金属スピントロニクスの大発明：①磁気抵抗効果（1988）、②スピン注入磁化反転（1996）、③スピン注入自励発振（2003）、④スピントルクダイオード（2004、鈴木氏ら）は、それぞれ①磁気センサ・ハードディスク磁気ヘッド・MRAM、②磁気書き込み、③マイクロ波発生、④マイクロ波検波などへの応用が期待されている。さらに、発振は増幅作用を含む現象であるので、増幅デバイスへの応用も期待できる。

●スピントロニクス研究の問題

金属スピントロニクスデバイスは基本的に半導体加工技術との親和性が高く、高度な半導体加工技術を用いて製作できるという利点がある。しかし、実際、その加工は非常に難しく、大学のみで研究を進めることには限界がある。このような状況下、MRAMの実用化研究では、日本は米国に大きく遅れを取っており、この遅れを挽回する国家的戦略が必要だと考える。

大阪大学では、ナノテクノロジーの社会人再教育プログラムを行っているが、産学連携といった目に見える効果には繋がっていない。人材育成から産学官で連携し、研究開発を組織化したいと考えている。

また、スピントロニクス研究に限ったことではないが、分析機器に関してはドイツと米国とが圧倒的に強く、日本の研究者は高価な装置を輸入して研究している。このような現状を鑑みると、国産分析機器の開発支援を一層進める必要があると考える。

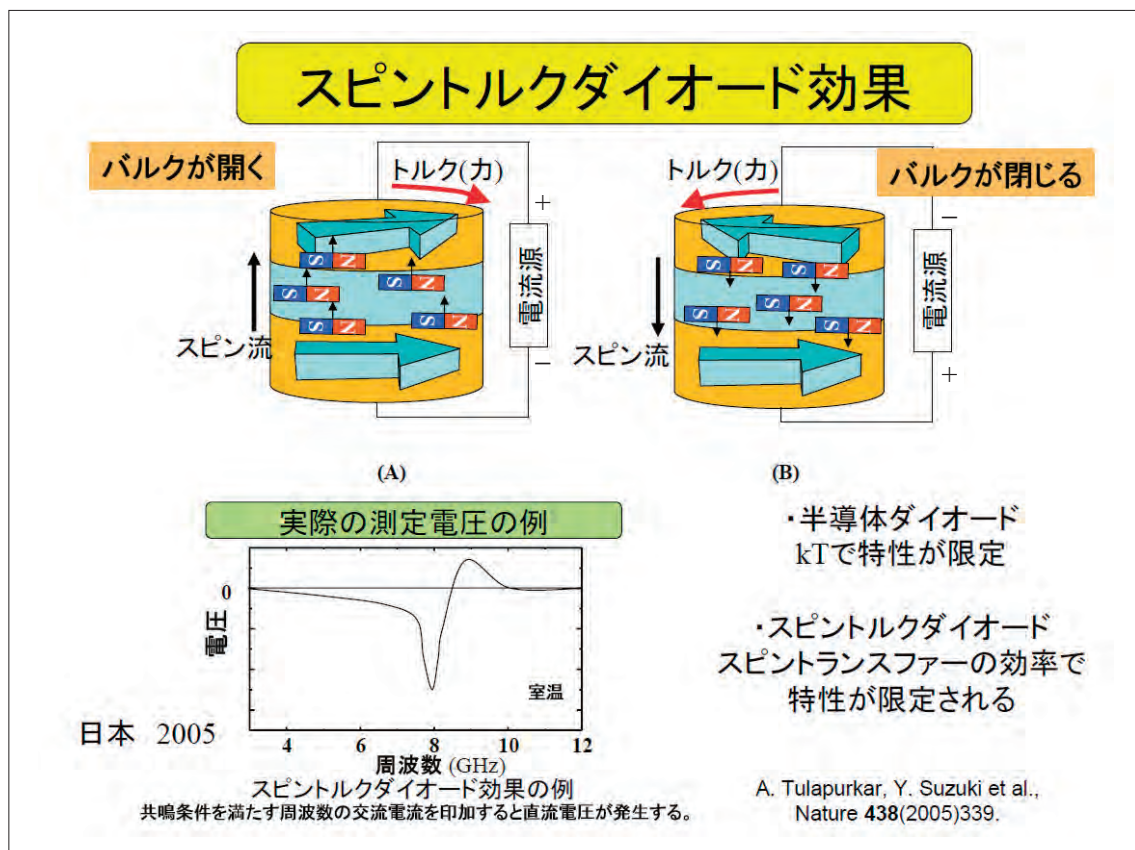


図10 スピントルクダイオード効果によるマイクロ波の検波
(鈴木氏の発表スライドから)

3.2.3 フォトニック結晶の研究動向と将来展望：

野田進、京都大学大学院工学研究科・教授

●フォトニック結晶におけるこれまでの研究成果と可能性

フォトニック結晶は、2次元あるいは3次元の周期的屈折率分布を有する人工結晶である。その周期を光の波長程度とすることで、光のバンドギャップが形成されるが、ここに周期性の乱れ、すなわち欠陥を導入することで、様々な機能を生み出せる。たとえば、バンドギャップによって光が存在できなくなっているところに線状の欠陥を導入すると、それ自体が微小な導波路となる。これを用いれば、微小領域でも光を漏らさずに自由自在に伝えられる。また、点欠陥を導入すると、そこに光を強く閉じ込めることができ、これは超高性能の共振器になる。最適設計によって、この共振器は波長程度と小さいにもかかわらず、非常に高いQ値（～600000）を実現する（図11）。

これらの機能は、単一光子光源や高機能光デバイスへの応用が期待される。また、バンド端で光の方向が限定されることで形成される定在波状態を利用すると、大面積でもコヒーレントに発光するレーザを実現できる。さらに、バンドの特異な分散特性を利用すれば、光の群速度を遅くでき、微小分散補償デバイスや光バッファを実現できる。

上述のような様々な機能の実現は「エンジニアリング」である。つまり、理論に基づいて設計し、設計通りに製作して、機能を実現できる。この水準までフォトニック結晶の研究は進んでおり、今後の多様な応用展開が見通せる段階にある。

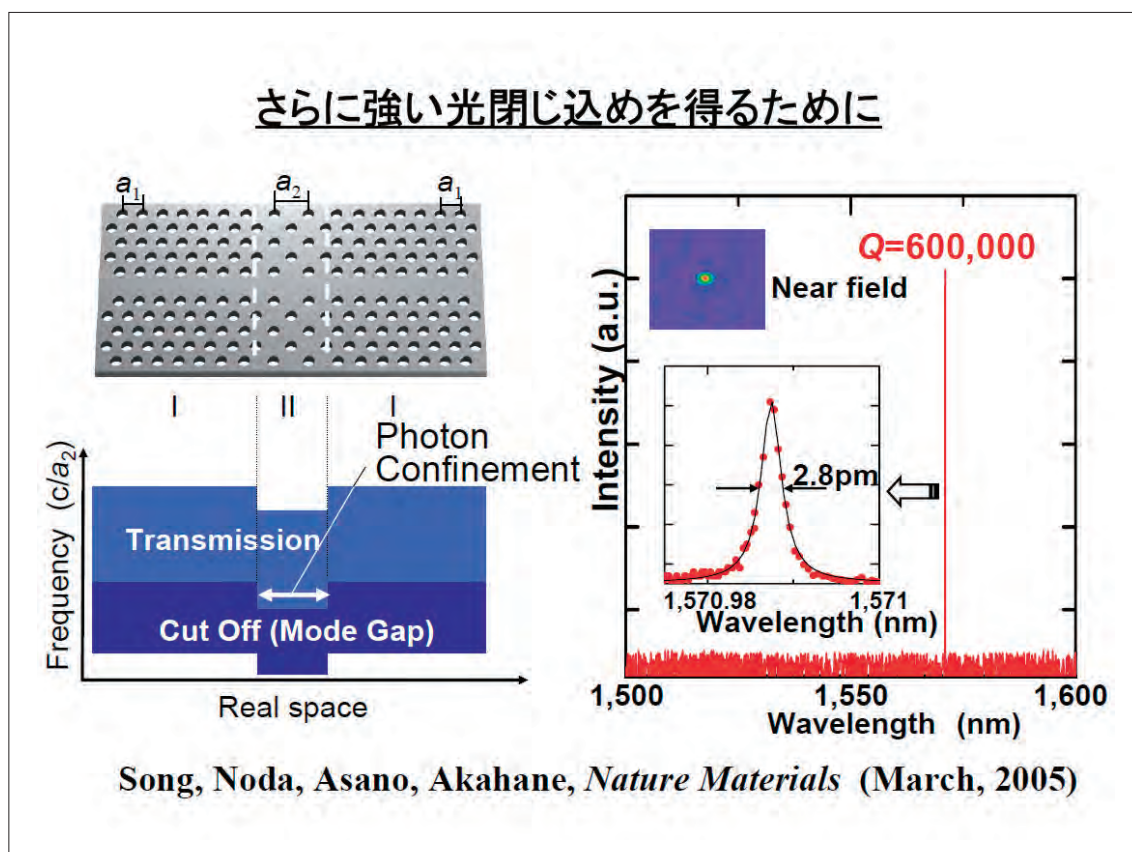


図11 点欠陥による強い光閉じ込め効果
(野田氏の発表スライドから)

●今後の展開

2次元フォトリック結晶は、電子回路との融合が進んでいくと期待される。電子回路を用いた制御によって、光の切り替え、チューニング機能、光ディレイ機能などを有する光・電子融合回路への展開する必要がある。この光・電子融合回路は、既存の電子回路より2～3桁、低消費電力化できると考えられる。また、上述のQ値の高さ、あるいは特異な分散特性を利用して、超高感度センサ、光メモリ、あるいはスローライト素子などへ応用展開できる。

発光デバイスへのフォトリック結晶の適用に関しては、上述の大面積コヒーレント発振レーザの他に、有機ELや青色LEDと組み合わせて、光の取り出し効率を向上させる研究に展開できる。したがって、フォトリック結晶は、将来、ディスプレイや照明にも貢献していくと考えられる。さらに、フォトリック結晶を用いた高Q値共振器と量子ナノ構造を組み合わせれば、単一光子光源などの次世代の光源、あるいは量子情報デバイスへと展開できる。その他にもスピントロニクスや負の屈折率を有する左手系材料との融合など、その応用展開は多岐に渡る。

3.2.4 カーボンナノチューブデバイス研究の現状俯瞰：

松本和彦、大阪大学産業科学研究所・教授

●カーボンナノチューブデバイス研究の現状

①高性能電界効果トランジスタ

米国を中心にカーボンナノチューブ（CNT）を用いた3端子素子（トランジスタ）の研究が盛んに行われている。ガリウム砒素やシリコンと比較して、高電界領域でカーボンナノチューブは非常に高い移動度を示すことが実証された。集積回路にできれば、Si-MOSFETを凌駕する高性能な素子になると期待される。これに関して、米国ではIBMが、日本ではNECが盛んに研究を行っている。

②CNTに特徴的な電子・スピン伝導

AFMを用いてCNTに人工的に欠陥を導入して、トンネル接合された量子ドットを作り、単一電子・正孔の伝導が室温で観測された。また、4 μm と長いCNTで共鳴トンネル現象が観察された。これは、CNT中で電子が4 μm ものコヒーレンス長を有していることを意味する（図12）。このコヒーレンス長は、半導体でのそれが5～10nmであることと比べて、桁違いに大きい。CNT中ではスピンもコヒーレント伝導することがわかっている。これらのCNTに特異な伝導特性は、極限の感度を有するバイオセンサや環境センサに利用できると考えられ、米国で盛んに研究されているが、日本での研究例は少ない。

●CNTを用いた高感度バイオセンサ

CNTを用いて電界効果トランジスタ（FET）を作ると、タンパク質、酵素などを電気的に高感度検出できる。たとえば、CNTの表面にビオチンという蛋白質を付けておくと、そこにある蛋白質が選択的に付着し、電流的な特性が変化することから、特定の蛋白質を

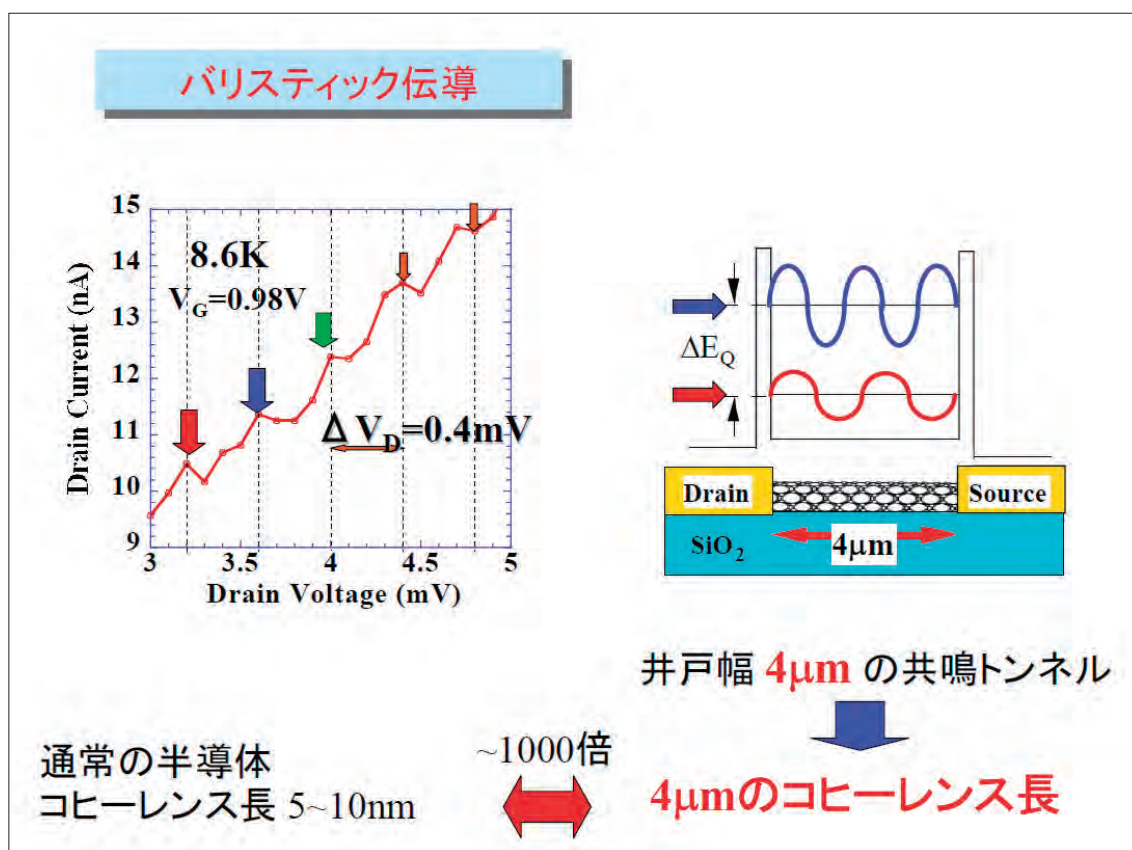


図12 長さ4 μmのCNTでの共鳴トンネル現象
(松本氏の発表スライドから)

電気的に検出できる。また、DNAもCNT-FETを用いることで、1 fmol/Lまで検出できる。このセンサはバイオ分野に大きな貢献をしてくれると思われ、欧米で非常に盛んに研究されているが、日本での研究例は少ない。

●CNT成長表面を利用したデバイス

表面に直径1 nmのカーボンナノチューブを長さ1 μm成長させて、細密充填すれば、面積が1000倍程度増加する。この表面を利用して、高性能のキャパシタ、電池、電気化学バイオセンサなどが実現できると期待できる。たとえば、CNTを成長させた電極を用いて、白金電極では検出できない蛋白質（チロシン）の検出ができています。複数種の蛋白質の検出も可能であると考えられる。この種のセンサは比較的实现に近い。

3.2.5 今後のナノテク材料分野での重要課題—High-k metal gate開発の指針の確立の研究例を通して—

白石賢二、筑波大学物理系物質創成先端科学専攻・助教授

●産学官連携研究地域つくば

つくばには、高度な半導体微細加工技術を研究する研究共同体Seleteが存在する。また、物質材料研究機構、産業技術総合研究所、および筑波大学が存在する。したがって、不可思議な実験結果やデバイス開発での実問題に対して、産学官の理論系・実験系の研究

者が共同して取り組み、その原因を探ることができる貴重な環境がつくばにはある（図13）。このようにつくばでは、異分野の研究者が緊密な連携を取り、また様々な役割を果たす多くの人が集まって、価値ある研究が可能となる。

●ナノスケール界面の重要性

新しい材料とシリコンとの組み合わせに関する研究は非常に重要になっている。一例として、Hf系High-k絶縁膜（HfSiON）の研究開発の現状を述べる。たとえば、 Ni_xSi でNiの量を変えても、真空中の有効仕事関数は変わらない。しかし、HfSiONをSiの上に乗せると、ショットキーバリア高さが大きく変化する。このような例は他にも多く示され、従来の界面物理の基本的概念であるCharge Neutrality Levelの概念では説明できない。白石氏らは、HfSiONと金属の界面に関する実験結果に触れることで、Generalizing Charge Neutrality Levelという新概念を創出し、従来の理論では説明できなかった現象を統一的に説明した。さらに、もう1つの新概念（界面反応を起源とする新しいフェルミレベルピンニング機構）も同じようにして創出した。このように、シリコンの安定したナノ加工技術を基盤にすることで、普遍性のある新しい学問（ナノサイエンス）が生まれる。

●今後の研究への提言

ナノデバイスはナノ界面の集合体である。したがって、ナノデバイス実現を見据えたナノ界面研究が、学問としても技術としても不可欠である。ナノ界面研究には、シリコンが対象材料として優れている。これは、シリコン加工技術が安定しており、普遍性が必須の科学の対象として好適であることが第一の理由である。また、シリコンに関する知見が豊富であり、さらにシリコンが産業にとっても極めて重要であることもその理由である。

シリコン技術をLSIだけに用いるのは学問にとって損出になる。現在、シリコン産業では新材料探索が大きなテーマとなっている（High-k膜、Low-k膜、金属ゲートなど）。LSIのスケーリング則はいずれ破綻し、新原理・新材料を用いるポストスケーリングのブレークスルーが不可欠である。この機にシリコンナノ加工技術を基盤にナノサイエンスを進めることが効率的である。このためには、産学官が参加する研究拠点が必要である。

ナノマシンとしての生体高分子研究も重要である。これには、環境にやさしい低エネルギー消費デバイスの原理を学ぶという意味がある。「タンパク3000プロジェクト」で、生体高分子の静的構造はよくわかってきた。しかし、なぜ生物はエネルギー効率がよいのかという問題に対しては、現状では各生物関連研究者が自説を述べているに過ぎず、これは静的情報しか得られていないことが一因と考えられる。時間分解能にすぐれた固体物性の分析手段で、ナノマシンである生体分子の具体的仕組みを解明することがやがて可能になると期待している。たとえば、振動分光等で1つのアミノ酸の時間変化を追っていければ、なぜ生物はエネルギー効率がよいかが明らかになる。そうすれば、新原理のナノデバイスの実現に繋がっていく。

現状の戦略では、どのような産業でどれだけの雇用を支えるかという国家的ビジョンが

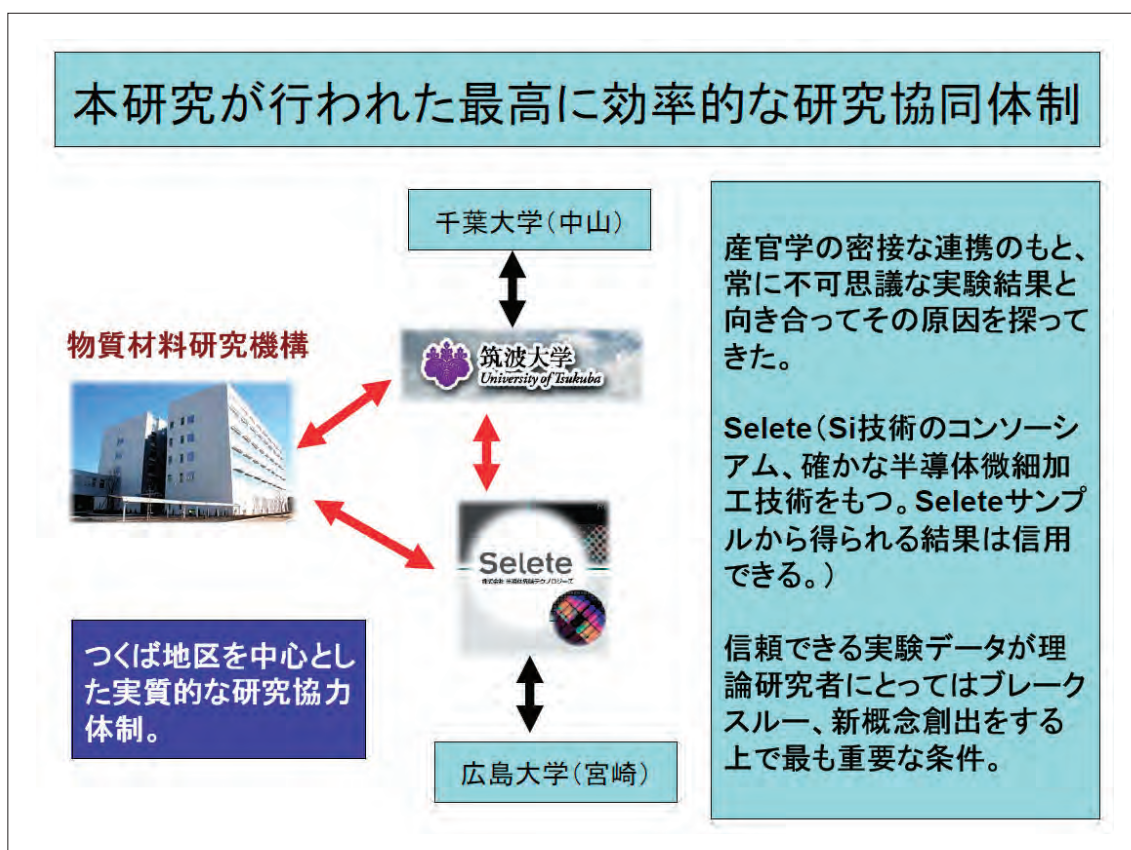


図13 つくば地域の産学官研究環境
(白石氏の発表スライドから)

明白ではない。そのようなビジョンが明確になれば、どのような人材を育てればいいのか明らかになり、どのような科学技術を振興すべきかが明らかになる。この観点から、バイオは研究資源投入に対して産業育成不足、半導体は産業規模に対して研究人材不足である。

3.2.6 情報・通信ナノデバイス：

小柳光正、東北大学大学院工学研究科 バイオリボティクス専攻・教授

●ナノヘテロインテグレーション

これまでは、高速化と低電力化とが情報・通信デバイスに最も要求されてきたが、今後はこれらに加えて、高機能性と柔軟性とが求められるようになる。しかし、高機能性と柔軟性とは、既存のシリコン技術だけでは実現が困難であるので、異分野技術の融合が必要になる。既存のLSIにはない要素や材料を取り入れ、システムとして集積化する技術を「ヘテロインテグレーション」と呼ぶ。今後は、ナノテクノロジーを取り入れたヘテロインテグレーションである「ナノヘテロインテグレーション」が重要になる。

今までLSIでは電気が利用されてきたが、今後は磁気、熱、および光も適材適所で利用される。たとえば、電気・磁気融合素子としてはスピンメモリやスピントランジスタが、電気・熱融合素子としては相変化メモリがある。これらでは、異分野技術と新しい材料とがインテグレーションされている。また、素子として単体で機能確認できたものを、LSI

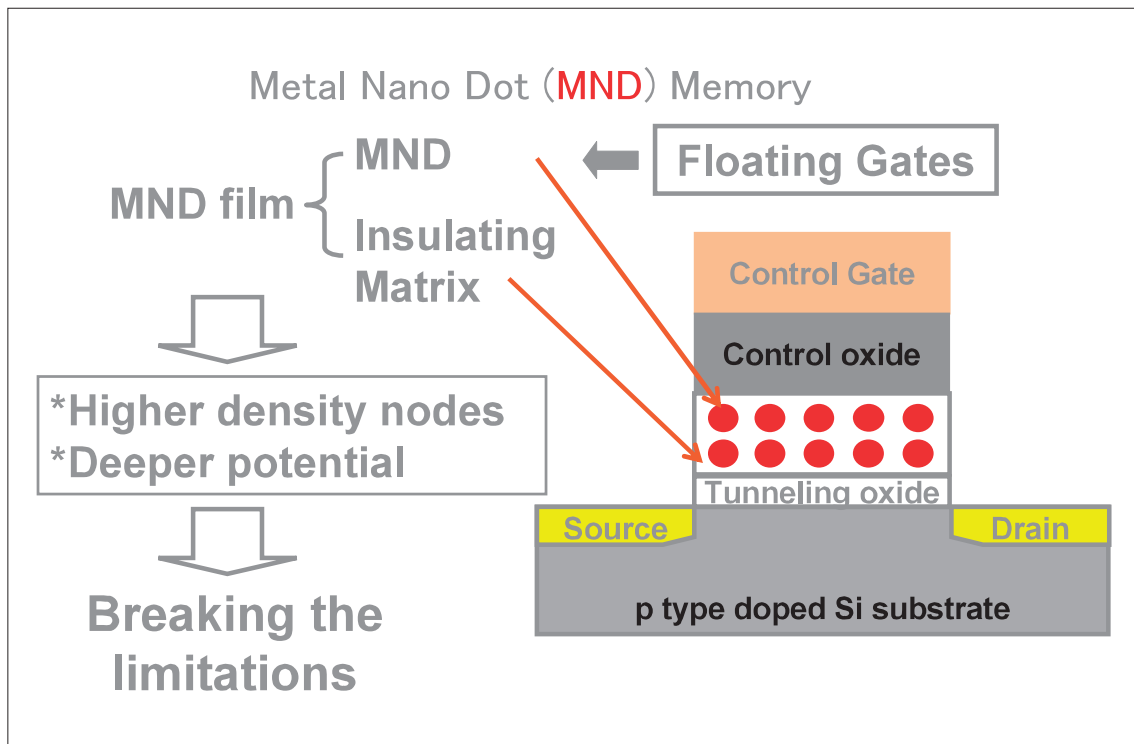


図14 ナノドットのデバイスへの応用の一例
(小柳氏の発表スライドから)

としてインテグレーションすることが重要になる。さらには、機能要素、デバイス、チップなどを3次元的にインテグレーション（積層）して、システムを作る方向に技術は向かう。この流れに日本は乗り遅れぎみである。

小柳氏らは、自己組織化ナノドットをインテグレーションしたメモリや3次元LSIを研究している。図14にフローティングゲートに金属ナノドットを用いた不揮発メモリを示す。ナノドットは $10^{13}/\text{cm}^3$ 以上の密度が必要であり、自己組織化で形成している。

●リコンフィギュラブルシステム

今後、情報・通信システムはリコンフィギュラブル（機能の再構築が可能）になる方向に向かっている。これは、いわばハードウェアとソフトウェアとを一体化することであり、現在、ソフトウェアラジオなどとして使用が広がっているDSP（Digital Signal Processing）は、今までハードウェアが担ってきた機能をソフトウェアで実現するものである。DSPを用いれば、ソフトウェアを入れ替えるだけで、機能の変更・追加が可能である。将来的には、ハードウェア自体がリコンフィギュラブルになっていくが、このためにはスピントロニクスなどを取り入れていく必要がある。このような融合の段階になると、従来の半導体加工技術だけでは限界が来る可能性がある。自己組織化や自己配列を利用した製造技術や実装技術が重要になってくる。

3.3 本セッションでの重要な議論の要点

●カーボンナノチューブ（CNT）の課題

CNTに関しては、カイラリティーの制御にブレークスルーが必要である。直径や長さの制御は可能になりつつあるが、CNTで本格的な電子回路を作れるようになるのは、カイラリティー制御にある程度の目処がついてからになる。

●超高性能デバイスの作動温度

非常に性能のいいデバイスは、現在のところ極低温で研究されている。新しい原理のデバイスでは、現象を見極めるために極低温で基礎的な実験をすることが必須である。そこから徐々に室温での動作を目指す。これは従来の量子デバイスも辿った道である。しかし、量子情報処理を担う量子コンピュータは、パソコンとは異なり、室温で動く必要はない。現在の大形計算機が空調を使っていることを考えれば、低温でも高性能なものができれば、全く問題ない。

●統合的なものづくりのための支援施設・装置の必要性

デバイスの研究開発は、まだシリコンを除外する段階に全く来ていない。現実的には、ナノテクノロジーをシリコン技術と合わせて用いることが有効であるが、研究を進める上でいくつかの問題がある。デバイスの研究開発では、優れたアイデアも机上検討だけでは思い付きの段階を脱せず、実際にデバイスを作って、性能を評価する必要がある。これには施設や装置が必要であるが、これらは高価なものであるので、簡単には準備できない。産学官で共同利用する研究施設が必須である。現状では、ポストCMOSプロセス（先に製作したLSIの上に新規デバイスを形成する方法）でデバイスを試作する際にも、海外の施設にLSIの製作を頼っている。このような環境では、速度が求められる研究開発競争に遅れを取るだけでなく、国内に融合・連携の素地が育っていかない。

韓国や台湾の政府によるナノテクノロジー投資は、GDP当たりで比べると、日本と同等か日本より高い。その中の20%近くをファンドリー等の整備に充てている。我が国は、半導体産業とその広大な関連産業によって稼いできたにもかかわらず、最近では、あと5年で日本の半導体産業が崩壊するという意見すら聞かれる状況である。このような後ろ向きの雰囲気漂う状況で、半導体研究に人材・研究投資が益々集まりにくくなっている現状を打破しなくてはならない。

ファンドリーのような施設は、大規模なものが1ヶ所があればよいというわけではない。地方にある小規模の施設は、大学発ベンチャー企業を育てたり、地方大学の優秀な頭脳を生かすために必要である。たとえば、米国のあるベンチャー企業は、微細加工は国内の大学で、製膜はドイツで行い、実験設備を抱えなくとも、新しい素子を次々と作り、最先端のスピン注入磁化反転装置などで特許を数多く取得している。

【4】製造ナノテクノロジー

本章では、製造技術としてのナノテクノロジー、ものづくりのためのナノテクノロジー、およびナノテクノロジーの新しい応用に関して、トップダウン研究の目指すべき方向性を述べる。「製造ナノテクノロジー」セッションでは、横山浩氏（産業技術総合研究所）がコーディネータを務め、平井義彦氏（大阪府立大学）、一ノ瀬泉氏（物質・材料研究機構）、生田幸士氏（名古屋大学）、吉川暉氏（京都大学）、栗野祐二氏（富士通研究所）、須賀唯知氏（東京大学）、および橘邦英氏（京都大学）が講演した。また、他のセッションでも、藤田博之氏（東京大学）らが、講演で製造ナノテクノロジーに触れた。

4.1 提案された重要研究課題

- ・ ナノ薄膜の作製とそれを介した物質・電子・エネルギー移動の制御技術：ナノ分離膜、機能性ナノコーティング、バイオセンサなどへの応用が考えられる。
- ・ バイオ化学流体チップ：医療検査、高付加価値化学物質の多品種少量生産、材料探索などへの応用が有望である。バイオ化学流体チップは多品種少量のシステムになるので、それに適した製造法としてマイクロ光造形法が、また、システム構築の方法としてモジュール化がある。
- ・ 自己組織化ナノ材料や分子集合体の応用：1Dナノチタニア結晶を含むメソ多孔性体の利用による有機薄膜太陽電池の変換効率向上などが紹介された。具体的な応用への適用を加速し、ナノ材料が役に立つという成功例を増やす必要がある。
- ・ 既存技術では解決できないシリコンエレクトロニクスの課題へのナノテクノロジーの適用：カーボンナノチューブをLSIのビア配線に利用する研究例が紹介された。CNTのエレクトロニクス応用には、直径、成長密度、カイラリティなどの制御の問題が残っている。
- ・ ナノテクノロジーの製造技術への適用によるコストダウンとスループット向上：自己組織化、ナノ転写などの研究がある。
- ・ ナノ転写技術の高度化・高機能化と応用：ハイスループット・低コストのナノ製造技術として重要である。有機材料やボトムアップ加工技術との相性がよく、やわらかいエレクトロニクスを実現する技術としても注目される。
- ・ ナノテクノロジーに基づく実装技術、およびリサイクルやハードウェアのアップグレードに対応する可逆的接合・組立技術：これらの技術は、省資源や廃棄物減少のためだけでなく、機能の追加や変更に対してフレキシブルなハードウェアを実現するためにも重要である。
- ・ プラズマの新しい応用展開とプラズマ反応場の制御：新しいプラズマであるマイクロプラズマ、大気圧プラズマ、および液中プラズマは、ディスプレイ、高感度フォトディテクタ、プラズマフォトリック結晶、コンビナトリアルプラズマリアクタ、バイオマテリアルプロセッシングなどに利用される。また、半導体製造技術を支えているプラズマ反

応場を理解・制御する研究が必要である。

4.2 講演の概要

4.2.1 ナノ加工技術の現状と課題：

平井義彦、大阪府立大学大学院工学研究科・教授

●ナノインプリント技術の可能性

ナノインプリント技術は、ナノパターンを有する「金型」(モールド)で樹脂などを加工する機械的ナノ転写技術である。熱可塑性樹脂にモールドをガラス転移点以上で押し付け、パターンを転写する方式、および透明モールドを通して、光硬化性樹脂を硬化させてパターンを転写する方法がある。ナノインプリント技術の第1の特徴は、リソグラフィと比較して装置が低コストになることである。ナノインプリントによって、10nmという高解像度、および1：10程度の高アスペクト比が実現されている。

ナノインプリント技術は、ナノ加工技術として低コスト化以外の付加価値も有している。まず、被加工物材料の多様性があり、生分解樹脂やガラスへの加工が可能である。また、加工形状の自由度が高く、多段構造、積層構造、曲面構造、さらにこれらを組み合わせた高度な3次元構造も形成できる。たとえば、平井氏らはナノインプリントによって図15に示すようなナノ構造を加工した。同図右下の構造は、反射防止機能付き回折格子として機能する。

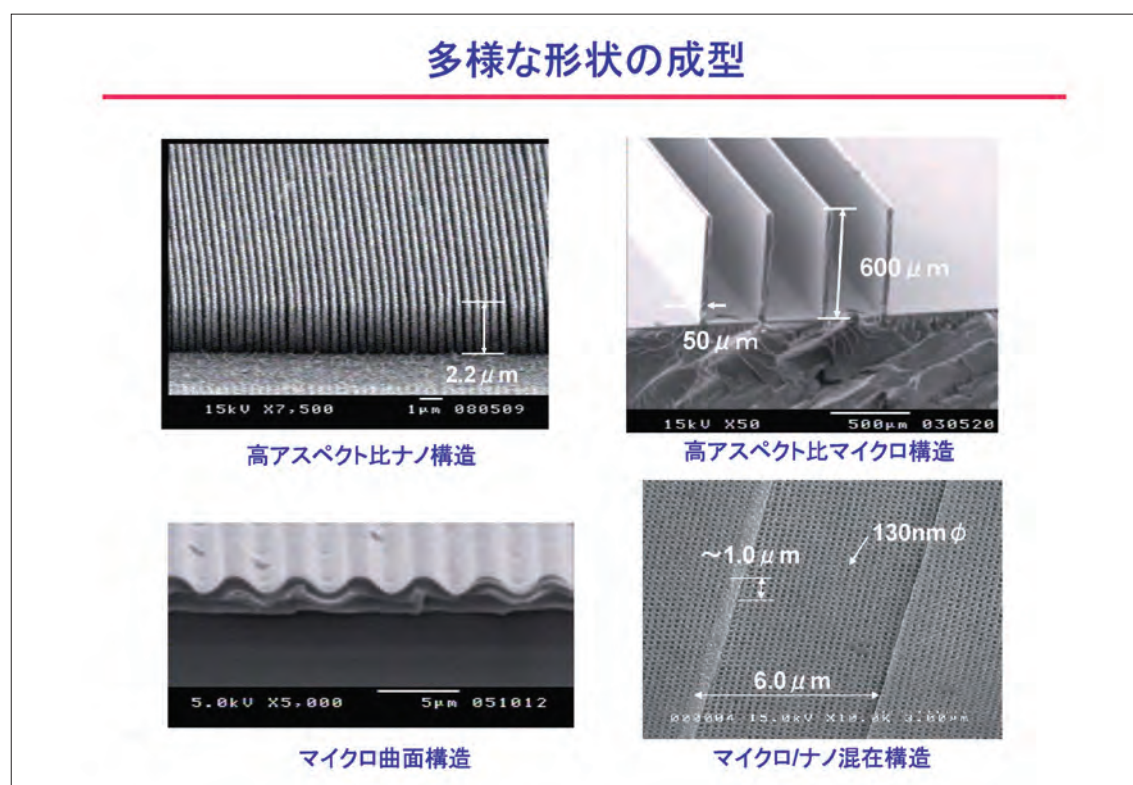


図15 ナノインプリントによって加工された様々なナノ構造
(平井氏の発表スライドから)

●ナノインプリント技術に関する研究開発の方向性

ナノインプリントではモールドが最も重要である。3次元構造を含めた任意のパターンを高精度に大面積モールドに加工する技術、モールド加工コストを低減する技術、熱的・機械的負担がかかるモールドの寿命延長技術などの研究が必要である。次に、離型の問題と直結するモールドと被加工物との界面科学が重要であり、トライボロジーの研究やコーティングの開発が必要である。材料の視点からは、光学素子、ナノ流体素子、電子デバイスなどの応用に適し、しかも加工時の収縮や離型の問題を克服する材料の開発が必要である。さらに、転写方式の開発、および転写装置の開発が重要である。高スループット化(現状では、ナノインプリントはフォトリソグラフィより遅い)、Roll-to-Roll加工、超高精度アライメントなどを目指した研究が必要である。

このようにナノインプリントの実用化・高度化には多分野融合が必要である。したがって、応用、装置開発、プロセス開発、材料開発などに関わる研究者・技術者が情報を共有する必要がある。

4.2.2 製造ナノテクノロジーとしてのナノ薄膜：

一ノ瀬泉、物質・材料研究機構物質研究所・アソシエートディレクター

●自己支持性のナノ薄膜

水和したカドミウムイオンとその沈澱物との間に形成される構造を系統的に研究していたところ、非常に細長いナノファイバが見つかった。幅に対する長さの比(アスペクト比)が1万を超えるものもある。このファイバは直径2nmであり、2本鎖DNA(Double Stranded DNA)に似ているので、ナノストランドと命名した。ナノストランドは、表面に多量のカチオン電荷を有し、あたかもロッド状ミセルのような無機材料である。これは硬くて電荷をもち、均一分散するため、ろ過によって非常に均一なナノメータ厚さの薄膜として得られる。さらに、この薄膜に白金を堆積し、その後、ナノストランドを溶かし出すことで、白金ナノポーラスシートに変換できる。白金は厚さ1nmしか付けていないにもかかわらず、この白金ナノポーラスシートは十分な自己支持性を示す。これはバイオセンサや燃料電池に利用できる可能性がある。

●乾燥泡膜

泡膜は界面活性分子で覆われた水の膜であり、水の厚みが薄くなるにつれて7色に輝き出し、さらに薄くなると、光が反射なくなり、黒くなる(黒膜)。非常に薄い黒膜はNewton Black Filmsとも呼ばれ、幅がセンチメートルオーダーで厚みが10nm以下になり、その比が1000万倍に達する不思議な安定性を持った物質である。黒膜の安定性は水の表面張力により、黒膜の安定化には水が不可欠であると言われていた。しかし、一ノ瀬氏は、水がなくなっても壊れない膜ができることを見出した。これは超高真空中や180℃以上でも安定性を示す。この膜の内部に生体分子などを取り込むこともできる。これは分離膜として利用できる可能性がある。

天然高分子(セルロース)のナノコーティング

セルロース: 地球上でもっとも大量に
生産される生物材料

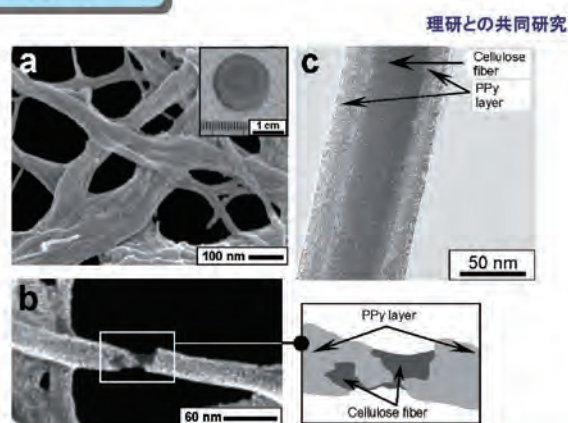


綿の花



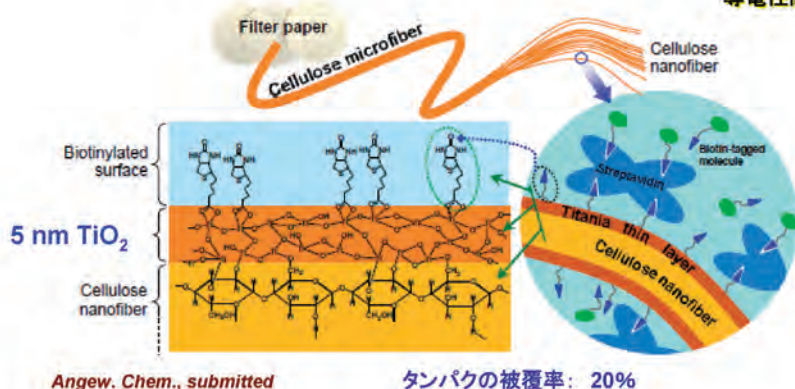
ろ紙

高分子鎖 → ナノファイバー → マイクロファイバー
→ ネットワーク化 (階層的な構造)



導電性高分子でコーティングされたセルロース

Chem. Commun., 2005



Angew. Chem., submitted

タンパクの被覆率: 20%

ビオチン/ストレプトアビジン

解離定数: 10^{-14}

単分子の検出限界: 10^{-7}

ろ紙表面での検出限界: 10^{-11}
(蛍光法)

図16 天然高分子のナノコーティングと蛋白質検出への応用
(一ノ瀬氏の発表スライドから)

●セルロースのコーティング

天然高分子を薄膜でコーティングすることで、いろいろな特性が得られる。一ノ瀬氏らは、導電性高分子を用いてセルロースを厚さ20nmの薄膜でコーティングした。また、同様な方法でセルロースナノファイバに厚さ5nmのチタニアでコーティングした。この表面にビオチンを介してストレプトアビジンを付けておくと、その被覆率は20%にもなる。これはビオチンを選択的に高密度に吸着するので、極めて低濃度のビオチンを蛍光法によって検出するのに利用できる(図16)。

●今後の展開

上述の研究は、ナノスケールの構造制御された自己支持膜に関するものであるが、たとえば、バイオテクノロジーとの融合あるいはナノ分離膜として利用することで、安心・安全に寄与することができると考えられる。また、乾燥泡膜上に金属をスパッタリングしたものは、センサや物質透過制御膜として利用できると考えられる。これらのナノ材料は、安価かつ簡単に大量生産できることも重要である。ナノ薄膜の研究は、科学と応用の両輪によって進展する。

4.2.3 ポリマ新原理マイクロ・ナノメカトロニクスを基盤とした次世代医用ツールの創製：

生田幸士、名古屋大学大学院工学研究科マイクロナノシステム工学専攻・教授

●ポリマを用いたマイクロマシン、MEMS、およびNEMS

生田氏らは、光硬化性樹脂を一層ずつレーザによって硬化させ、サブミクロンの分解能で3次元微細構造を作製するマイクロ光造形法を確立した。本加工法は、光硬化性樹脂の構造体の中に、電子部品、アクチュエータ、シリコンゴムなどを組立・接着なしに取り込むことができ、マイクロポンプ、能動力テーテル、検出器付きマイクロリアクタなどの3次元マイクロデバイス・システムを実現できる。試作サイクルが短く、多品種少量生産に向いていることも、本加工法の特長である。

●光駆動ナノマニピュレータ

リンクで支持されたナノニードルをマイクロ光造形法によって作製し、これをレーザトラッピングによって自由に動かすことができる光駆動マニピュレータを開発した。ナノニードルは、回転・並進・把持動作ができるマスタ・スレーブシステムを用いて操作できる。従来、ビーズをレーザトラッピングした場合、3pN程度の力しか発生できなかったが、本システムはその5～30倍の力を発生できる。

このシステムを用いて細胞の操作や細胞膜の機械特性の計測ができる。実際に、5 μ m程度のPC12細胞を移動させたり、イースト菌を弾性変形させたりすることに成功している。今後、細胞膜の力学特性と外部刺激・環境との関係の解明、細胞内微小器官の力学特性の計測、細胞内の動的変化時の内部操作と力学測定などに利用する。これはマイクロ／ナノテクノロジー、ロボティクス、および生物工学の融合研究である。

●バイオ化学IC

ラボオンチップやマイクロリアクタが盛んに開発されているが、分析系の応用以外に、合成系の応用が化学物質の多品種少量生産、テラメード製薬などのために重要である。そのためには、ポンプや検出器などが組み込まれた小さい化学反応システムが必要である。生田氏らは、ポンプチップ、バルブチップ、濃縮チップ、リアクタチップなどのモジュールを用意しておき、これらを目的に応じて組み合わせてシステムとする「化学IC」という概念を提案し、研究している（図17）。

化学ICには様々な応用展開がある。これまでに、機械的な方法で生物に遺伝子を戻さずに蛋白質を合成することができる「無細胞蛋白合成化学IC」を開発し、ホタルの発光酵素やGFP（グリーンフルオレッセンスプロテイン）を合成した。また、ホモジナイジング・タンパク前処理・電気泳動・分離精製の全プロセスを連続的にできる「細胞トータル生化学分析用化学IC」を開発し、プロテオーム解析に利用した。さらに、細胞などを内部に内蔵する「生体内臓型バイオ化学IC」（e.g.医薬品スクリーニングチップ）や生物に埋め込む「生体融合型バイオ化学IC」（e.g.人工脾臓チップ）に発展していく。

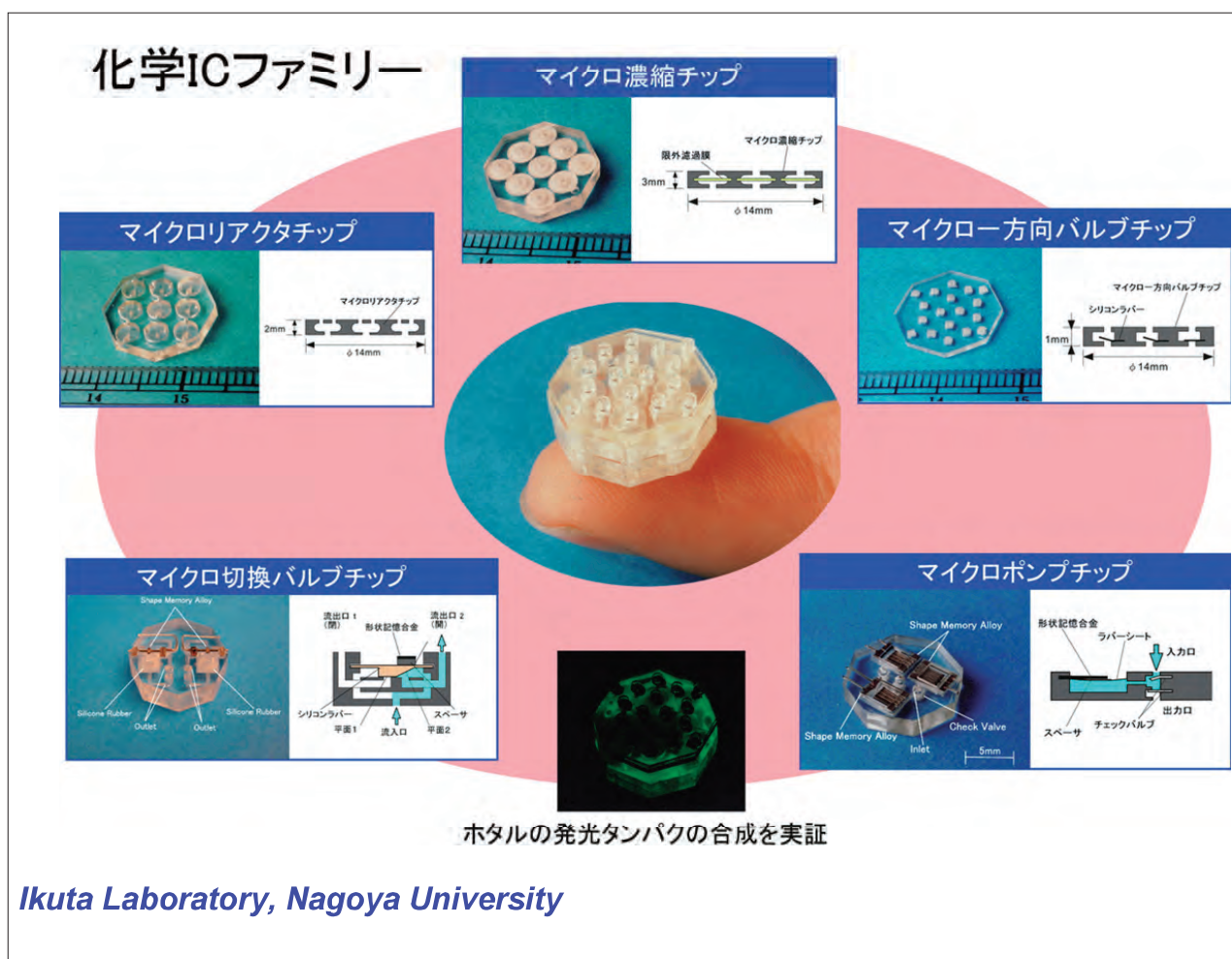


図17 化学ICと様々な構成チップ
(生田氏の発表スライドから)

●医工連携のためのシステム改革

医工連携のためには、工学研究科に薬学を含めた医工連携の学科を造る方が、医学研究科に造るより効果的である。また、医工連携は、授業や研修の段階から連携しなくては効果が上がらない。実際、UCLAはこのようなやり方を取り、10年間で成功を収めた。

特に医工連携は実用化の段階に難しさがあるので、特区設定、国際提携、特許申請支援などで実用化支援を強化する必要がある。また、よく指摘されるが、全く解決していない問題に治験・許認可の問題がある。日本では、米国の100分の1程度の人員でこれらの手続きを担当しているので、実用化を諦めざるをえない程、長い時間がかかる。根本的改革を研究し、実行する必要がある。さらに、医療経済、医療行政、病院経営、および法令を巻き込み、持続可能な医療システムを構築する必要がある。

4.2.4 超階層性ナノ構造光電変換素子の構築：

吉川暉、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー利用課程研究部門・教授

●有機薄膜太陽電池の最新研究動向

太陽電池はシリコン系がほとんどであり、現在、第2世代薄膜太陽電池の開発が進めら

れている。薄膜太陽電池には、既に商品化されているカルコパイライト薄膜（CIS）系などがある。第3世代では、有機太陽電池が1つの候補になると考えられる。そのうち色素増感や有機薄膜太陽電池がNEDOのロードマップに取り上げられ、2030年には太陽電池の1割程度が有機太陽電池になるという計画が出されている。そのときの発電コストとして、7円/kWh（現在の原子力発電は9円/kWh）が目標にされている。エネルギー技術では、コストが大きな評価指標となり、それに対応できなければ、他の指標に優れていても採用されない。

有機太陽電池の効率は約20年間で5倍以上に向上した。アモルファスシリコンや色素増感型の太陽電池に比べて、大きな効率向上である。現在のところ、活性層をPNの有機半導体のブレンド体にしたものが最も効率が良いと言われている。吉川氏らは新しいセル構造を採用して、効率の向上を図っている。この構造はメソ多孔性の接合素子で、バルクヘテロジャンクションと呼ばれ、N型半導体がお互いに連結し、ナノチューブのネットワークができているものと考えられる。メソ多孔性接合素子に1Dナノ結晶材料を導入すると、効率が向上する。これは、1Dナノ結晶材料では伝導帯の低エネルギー軌道の縮退が大きく、キャリア輸送速度が上がるからである。1Dナノ結晶材料は、サーファクタント・アシステッド・テンプレティング・メソッド（SATM）と呼ばれる一種のゾルゲル法を用いて作る。この方法による1Dナノチタニア結晶を含むメソ多孔性接合素子は、 $2.5\mu\text{m}$ の薄さで5%の変換効率を実現した（図18）。

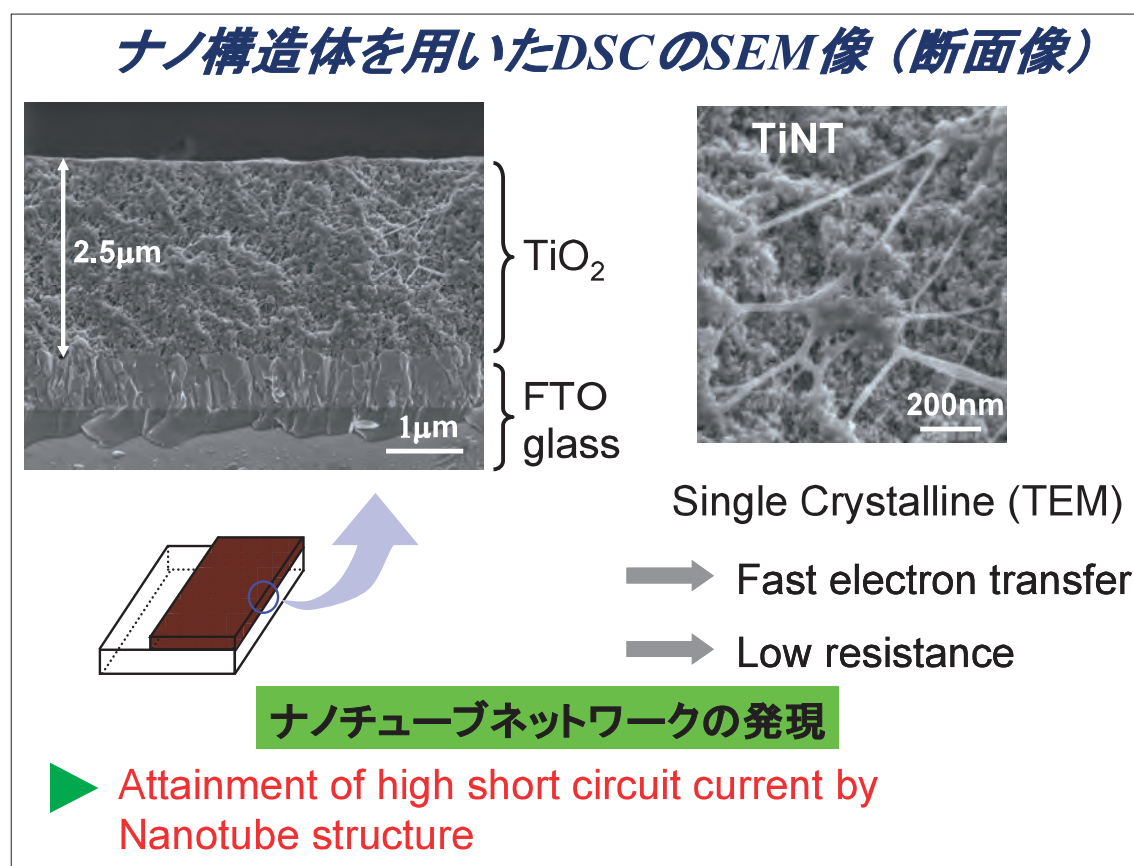


図18 1Dナノチタニア結晶を含むメソ多孔膜（吉川氏の発表スライドから）

さらなる効率向上のためには、1Dナノ結晶の2Dアレイ構造の利用が有効であると考えられる。吉川氏らは、2D-ZnOナノピラー電極の研究を行っている。また、ドナー・アクセプタの分子を1つの σ 結合を介して構成するD- σ -A型の色素も研究している。これらを組み合わせて、最終的にはフィルム型の有機薄膜太陽電池で10%の変換効率を目指す。

●今後の課題

ナノテクノロジーの有望な応用の1つとして、ナノ材料を用いた有機薄膜太陽電池を紹介したが、このようなデバイスを実現するためには、設計技術、プロセス技術、材料技術、材料ライブラリーの構築などの複数技術が必要である。さらに、これらの技術をシンセシスできる装置を揃えたナノファクトリーが必要である。

世界的に、第3世代の太陽電池の研究が始まり、活発になっている。日本では、現在、色素増感型太陽電池がよく研究されているが、今後は有機薄膜太陽電池に目標を転換すべきであると考えている。

4.2.5 カーボンナノチューブのULSI配線応用～ボトムアップのナノ材料の導入：

栗野祐二、富士通研究所ナノテクノロジー研究センター・主管研究員

●ナノテクノロジーとIT

ナノテクノロジーはIT産業にとって非常に重要な技術であり、ナノテクノロジー研究の出口の約半分がIT・エレクトロニクスである。IT市場の大きさは、2007年に国内では約10兆円、世界では約100兆円である。IT技術はIT産業だけでなく、他の産業も支える技術であり、もちろん安全や健康を守る技術でもある。IT市場の中で半導体市場は約4分の1を占めており、半導体の重要性は極めて高い。しかし、今後、日本の半導体シェアは低下していくと予想されている。このような状況下、ナノテクノロジーを半導体のために使うことが求められている。

ナノエレクトロニクスの大きな研究課題の1つは、ハーフピッチ45nm、35nm世代のCMOS技術である。これに関しては、産学官連携・業界横断の挙国一致体制を整えて、取り組まなければならない。また、ポストCMOSや新領域エレクトロニクスに関しては、カーボンナノチューブ、分子エレクトロニクス、有機エレクトロニクス、フォトンクスやスピントロニクスとの融合などが重要である。

LSIへのナノテクノロジー適用の一例として、カーボンナノチューブ（CNT）の配線がある。今後、CMOSの微細化が進むと、既存の銅系多層配線ではエレクトロマイグレーションによって電流密度に限界が来る。そこで、高電流密度に耐えられるCNTが注目されている。CMOSが耐えられる500℃以下の低温でCVDによってCNTを制御性良く成長できる技術が開発できた（図19）。また、CNTビアの抵抗はCuビアのそれには届かないものの、Wビアの値に近付きつつある。



図19 熱フィラメントCVDによって制御良く成長されたCNT
(栗野氏の発表スライドから)

●今後の課題と方向性

CNTの研究は高密度成長へ向かっているが、CNTの直径をより揃えて高密度化する技術確立したいと考えており、この技術開発にはシミュレーションが非常に重要になる。このシミュレーションには、ナノスケールに特有の手法が必要になる（ナノシミュレーション）。

上述のCNTビアのように、既存技術では解決できないシリコンエレクトロニクスの課題にナノテクノロジーを適用することが、1つの重要な研究方向である。もう1つの重要な研究方向は、ナノテクノロジーを半導体の製造技術に適用して、コストダウンとスループット向上とを目指すものである。これは、特に分子・有機エレクトロニクスに当てはまる。また、ナノシミュレーションのデバイス設計や材料設計への貢献も期待される。

4.2.6 実装から可逆的インターコネクションへ：

須賀唯知、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻・教授

●ナノテクノロジーと実装

実装は、LSIパッケージからボード実装、ソフトウェア実装、機関車の実装まで、広範囲な概念を含んでいる。このような現状を踏まえて、実装を再定義すると、「設計された必要機能を具現化するために、ハード・ソフト両者を含む構成要素を空間的・機能的に最適配置・接続することにより、システムを実体化する操作である」となる。

問題は実装が生み出す付加価値への理解不足であり、実装はものづくりのプロセスの1つで、これ自体はコストがかかるだけで、売れる「もの」ではないので、その付加価値が低く見られている。現在、コストがかかるものづくりの拠点は、益々、アジアに移っており、実装に関しても日本は弱体化しつつある。それでも、現在は部品・材料での日本の強さは際立っているが、元々、日本はシステム設計力に長けているわけではないので、ものづくりの海外流出によってシステムから部品・材料へのフィードバックが弱くなると、現在の強みを維持することすら難しくなるとの懸念がある。

従来の日本のものづくりの強みを生かしていくためには、実装の価値を理解し、その本質的価値を高める研究開発が必要である。そのために、ナノテクノロジーが果たす役割は大きいと考えられる。具体的には、LSIの3次元接続、MEMSパッケージング、チップ間通信の高帯域化などに、微細接続・低温接合技術に基づくナノインターコネク트가適用される。

●常温接合

ナノインターコネク트의主要技術の1つが低温接合である。凝着現象に見られるように、本来、固体間の接合は簡単に起こるはずであるが、半田付け、金の熱圧着、共晶接合、陽極接合、ろう付け、拡散接合など、実際の接合は、接合面がほとんど制御されていないので、高温プロセスである。

須賀氏らが研究している表面活性化による常温接合は、超高真空中での原子ビームやイオンビームの照射によって、接合面を清浄で活性な状態にして、貼り合わせる方法である。従来の方法と比べると、常温での直接接合であることから様々なプロセス上・材料選択上の利点がある。また、本方法はイオン結晶性材料にはあまり適さなかったが、最近、鉄やタンタルを1原子層程度を挟むことで、イオン結晶性材料にも適用可能になり、ほとんどあらゆる材料に適用できる。

図20に、10万個の3 μ m幅の電極を常温で一括接合した例を示す。位置決め精度は±1 μ m、接触電気抵抗は1接続当たり約2m Ω である。銅の表面には厚さ2～3nmの水和物があり、その下に厚さ7nm程度の酸化物層がある。これを超高真空中で高速原子線(FAB)によって除去して、超高真空中で位置決めして接合した。良好な接合結果を得るためには、表面粗さは2nm程度でなくてはならない。

●可逆的インターコネクション

実装では微細化・集積化だけではなく、接合の逆プロセスである分離も重要である。普通は強固に接合しているが、必要なときには分離できる技術、「可逆的インターコネクション」がこれから必要になる。たとえば、須賀氏らは、液体ガリウムを用いて半田付けを簡単に剥がすことができることを実証した。

可逆的接合が可能になれば、分解・解体が容易になり、製品のライフサイクルデザインが変わり、持続的社会的実現に貢献できる。また、部品の取替えが容易になれば、機能的

3 μm -10万電極一括接続

- 全100Kピンの接続を確認
- チェーン抵抗は電極数に正比例 → 極端な接続不良は無い
- 1接続当たりの抵抗値 = 約45m Ω → 配線抵抗 = 約43m Ω → チェーン抵抗から求めた1接続当たりの接触抵抗 = 約2m Ω
- 位置決め精度は $\pm 1\mu\text{m}$ 以下

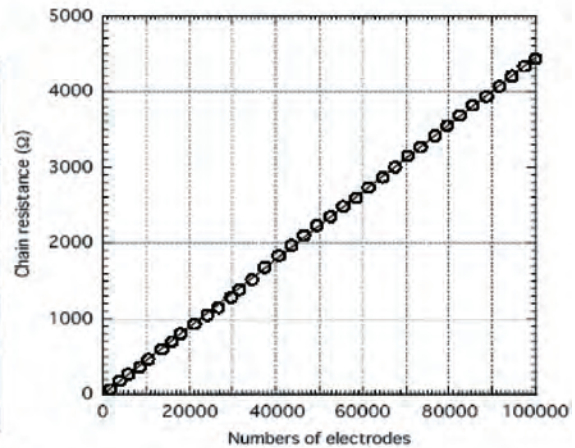
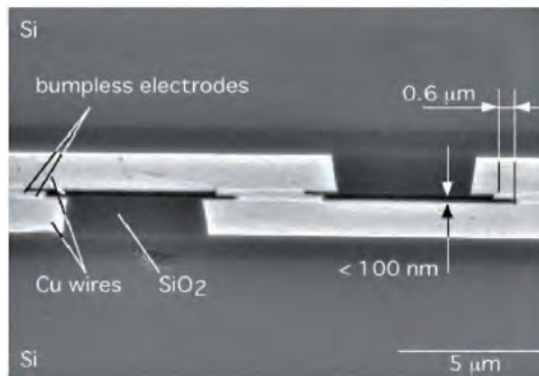


図20 10万個の銅電極の常温一括接合
(須賀氏の発表スライドから)

にフレキシブルで、進化可能なハードウェアが実現できる。今後はナノテクノロジーの適用による時間軸を考慮したものづくりがキーワードになる。

4.2.7 プラズマによるテーラード反応場の創成：

橘邦英、京都大学工学研究科電子物性工学専攻・教授

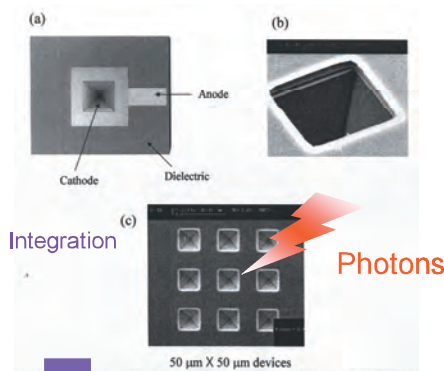
●マイクロプラズマ

マイクロプラズマは、数mmから1 μm の大きさのプラズマのことである。マイクロプラズマは、電子密度が $10^{14} \sim 10^{19}/\text{cm}^3$ と従来の低圧プラズマ ($\sim 10^{13}/\text{cm}^3$) より高い高密度プラズマである。また、非平衡状態を用いて、電子温度とガス温度とを制御でき、高電子温度・低ガス温度の高圧プラズマも実現できる。今まで、プラズマと言えば、低圧プラズマがほとんどであったが、今後はマイクロプラズマ、および大気圧プラズマも利用されていくと考えられる。

マイクロプラズマには新しい応用展開がある。数百～数十 μm の大きさのプラズマをアレイ状に並べることができる。これを用いて、ディスプレイ、平面光源、高感度フォトディテクタ (図21)、マイクロ波帯のプラズマフォトニック結晶、コンビナトリアルプラズマリアクタなどを実現できる。また、マイクロプラズマは導電性のあるイオン性液体や超臨界流体の中でも発生させられる。これには、バイオマテリアルプロセッシング、DNA操作などのバイオ応用の可能性がある。

機能的集積化の例

Photo Detector



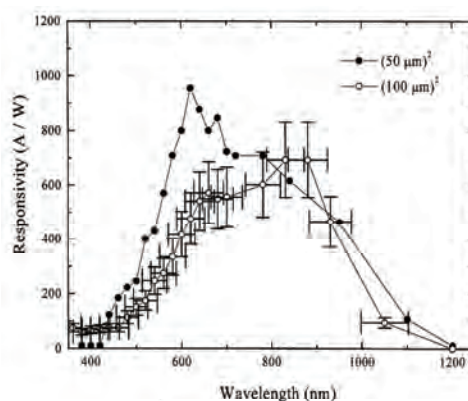
Functional Photonic Device

Prof. Eden et al. (Univ. Illinois)

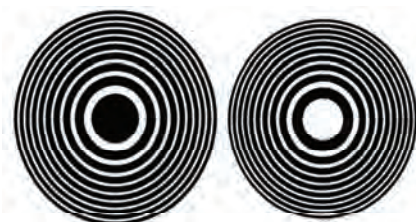
材料合成



コンビナトリアル・マイクロリアクター・アレイ



Si-APD より高感度！



Functional light source
Using Fresnel zone array

KU

図21 マイクロプラズマアレイを用いた高感度フォトディテクタ
(橘氏の発表スライドから)

●ものづくり技術としてのプラズマ

プラズマを用いたエッチング（プラズマエッチング、反応性イオンエッチング、高速原子線エッチングなど）は、LSI、MEMS、バイオチップなど、ほとんどのマイクロ／ナノデバイスの加工に用いられる重要技術である。このエッチングは、今後も益々、微細化し、さらに被加工材料は多様化していく。これらの高度なニーズに対応する研究開発が必要である。

また、プラズマを用いたデポジション（プラズマCVD、スパッタなど）も、ものづくりに広く用いられている重要技術である。これに関しては、新原料の導入、新材料の合成、既存材料の構造化・機能化などが課題である。今までのプラズマ反応場は、プラズマ励起によって原料をとにかく分解する場であると認識されていたに過ぎないが、今後はこのプラズマ励起過程、エネルギー緩和過程などを計算科学によって解明し、制御する方向に研究が進展する。たとえば、カーボンナノチューブのCVDなどが、ある程度、分子動力学でシミュレーションできるようになっている。

また、新しいプラズマ源や加工装置の研究開発では、産学官連携が果たす役割が大きい。このようなプロジェクトのリーダーとなる人材の育成も重要である。

4.3 本セッションでの重要な議論の要点

●リサイクル技術としてのナノテクノロジー

省資源、廃棄物削減のためのリサイクルにナノテクノロジーを適用するという考え方（ナノリサイクル）が、持続的社会の構築が求められるこれから重要になってくる。しかし、現在、このような考え方にのっとった研究は少ない。これは、リサイクル自体は付加価値を生み出すものというより、コストがかかるものであるので、その価値が認識されておらず、結果的に研究者と研究開発投資とが少ないからである。しかし、早晚、リサイクルを考慮しない製造は成り立たなくなるので、日本はリサイクルへのナノテクノロジーの適用で先回りすべきである。

リサイクル技術と言うと、付加価値に繋がらないように聞こえるが、機能のアップグレードや変更が可能なフレキシブルなハードウェアを構築する技術と考えれば、新しい付加価値を生み出す。これによってハードウェアのライフサイクルが長くなり、結果的に省資源や廃棄物削減に繋がる。同様な思想から、ナノテクノロジーによる生分解材料なども重要である。

●生産性について

デバイスによって世の中に必要とされる個数は大きく異なる。DRAM、CPU、自動車用センサ、携帯電話用高周波部品など少品種大量生産のものから、バイオ流体チップ、研究用高感度センサのように多品種少量生産のものまである。生産数や許されるコストによって、適した製造技術を開発し、用いる必要がある。このような視点を入れることが、製造技術の研究が単なる加工技術の研究と異なる点である。

●ナノテクノロジーの安全性の問題

よく「カーボンナノチューブは安全か」と聞かれる。カーボンナノチューブは細胞に無侵襲的に入るが、代謝されない場合、人体にどのような影響があるかわかっていない。このような段階で、ナノ材料は危ないという話ばかりが先行すると、ナノテクノロジー全体が世の中に受入れられなくなる危険がある。科学的知見に基づいて、リスクと利点との釣り合いを客観的に判断することが必要である。総合科学技術会議のナノテクのプロジェクトチームには、ナノテクノロジーの社会影響を担当するグループができており、上述の問題への対応が進みつつある。

●技術のブラックボックス化

先端的なエレクトロニクスの研究開発では、特にアジアとの競争のため製造技術をできるだけブラックボックス化しようという動きがある。しかし、技術を閉じてしまうと、その発展は遅くなってしまうというジレンマがある。企業は、製造技術は装置として海外に流出するという考え方から、鍵となる製造装置は自社開発し、外部に出さないという戦略、特許による対策などを総合的に利用して、技術防衛に努めている。しかし、海外への技術

流出による損害が本当にどの程度の大きさなのか検証する必要がある。現在の日本の産業の停滞感には、技術流出とは別の原因があるように思われる。

技術流出は自然に起こり、止める術はない。たとえば、東京大学工学部には約700人の留学生がおり、そのうち200名は中国人である。彼らは、日本の研究者や学生と一緒に研究して、帰国し、人材として技術は海外に流れる。技術流出に過度に敏感になるより、海外とのネットワークを形成して、研究開発を活性化させ、少々、技術流出しても構わないぐらい新技術を創り出すような戦略を取るという考え方もある。また、企業で不本意な待遇を受けたため海外企業で技術を売のような裏切りの技術流出を、公的なファウンダリーなどで防ぐためには、確かな技術を有する人材への組織的な支援が必要である。

●医工連携の問題

日本では、医師のエンジニアに対する理解度や敬意が低く、医工連携について消極的な研究者が少なくない。これについては、成功事例が出てくれば、改善すると思われる。より深刻な問題は、日本では医工連携研究を行っても、出口が見えないために、ある程度以上の発展ができないということである。医用工学の研究者が、いわゆる許認可システムを変えて欲しいとの提言をまとめた。しかし、現実には検査機器に関してシステム改革は可能だが、診療・治療機器に関しては問題は簡単ではない。新しい治療を待っている患者を考えると、ナノテクノロジーを利用した医療技術を、米国のベンチャー企業に渡してしまった方がよいという気になる。何を研究するかだけではなく、このような問題を科学技術戦略に携わる人間が考えなくてはならない。

【5】総合討論 ―研究システムを中心に―

5.1 プレリサーチ結果のまとめ

今回の戦略ワークショップは1日の開催であり、限られた時間内で効率良く議論を行わなくてはならない。したがって、戦略ワークショップ前に参加者全員にプレリサーチと称する書面調査を行い、参加者の意見を把握し、総合討論セッションの前にプレリサーチ結果のまとめを報告した。このプレリサーチの目的は次の通りである。

- ①参加者に戦略ワークショップの論点を伝える。
- ②プレリサーチへの回答を通じて、戦略ワークショップ前に参加者に自らの考えをまとめてもらう。
- ③プレリサーチ結果をまとめ、当日の議論の出発点とする。
- ④プレリサーチ結果を科学技術戦略立案に生かす。

プレリサーチの質問は次の通りである。

- ①現在、御研究されていることを御記入下さい。
- ②ナノテクノロジー分野の「ものづくり」に関して、5年、10年先を考え、どのような研究課題に取り組めばよいと思われますか。御専門分野に関連させて御記入下さい。
- ③アナリシス（分析）とシンセシス（総合）とは研究の両輪ですが、後者も発展させるために、何が必要だと思われますか。研究環境、研究助成、どのような専門家の協力を想定すればよいかなどの観点から御記入下さい。
- ④複数の学術・技術分野を総合して取り組まなくてはならない分野融合的な「ものづくり」研究を進めるにあたって、後自身の経験から研究助成や研究環境整備に期待することを御記入下さい。
- ⑤我が国の得意分野と主な研究者名、また参考にすべき海外の研究機関（主な研究者名を含み）、研究プロジェクト、科学技術政策などを御記入下さい。

以下にプレリサーチの結果をまとめる。

●重要研究課題について

ナノテクノロジー・材料分野において、デバイス、システム、およびそれらの製造技術に関する研究は、科学技術それ自体の発展のためにも、未来の産業技術としても重要であるというのが、参加者の共通認識である。具体的には、参加者から以下のような重要研究課題が提示された。

〈バイオ・メカニカルナノデバイス〉

- ・ トップダウンプロセスとボトムアッププロセスとを融合したMEMS
- ・ ナノ材料またはナノ構造を用いた超高感度センサ
- ・ マイクロ流体デバイス（バイオ分析、化学分析、化学合成などへの応用）

- ・ ナノ薄膜の応用、特にバイオ・環境応用
- ・ 集積化マイクロ・ナノデバイス
- ・ 細胞内の物質移動にともなう情報処理を模したデバイス
- ・ 高性能・高機能・超並列局所プローブ
- ・ CNTに続く新規機能材料の発見とそのバイオ・医療・エネルギー分野への応用

〈情報・通信ナノデバイス〉

- ・ 固体量子計算素子、そのための理論的に予測される物理現象の実現
- ・ ナノ材料またはナノ構造を用いた超高性能計算素子
- ・ ナノデバイスの界面の理解と制御
- ・ スピンデバイス（磁気記録、不揮発性メモリ・ロジック、センサー、量子演算・通信素子など）、これらの室温動作
- ・ シリコンナノテクノロジーとバイオテクノロジーや分子テクノロジーとの融合
- ・ 光ナノ構造と電子ナノ構造との相互作用を利用する量子情報デバイスや通信デバイス
- ・ 光ルーティング、超高速光信号処理、光インターコネクション、光デバイスの超小形化・低消費電力化

〈製造ナノテクノロジー〉

- ・ ナノ転写技術、およびそれによる新デバイスの実現
- ・ コンビナトリアルナノ材料合成技術
- ・ ナノ造形技術の現象理解・高度化や複雑ナノデバイスの設計のための理論や計算機科学
- ・ トップダウンプロセスとボトムアッププロセスとの融合、物質固有の自立性を取り入れた実装技術や製造技術
- ・ サブナノメータ精度の加工技術、さらにそれを高速かつ安価にする技術
- ・ 超並列ナノ加工技術
- ・ プラズマ反応場の設計技術、新しいプラズマ反応場の実現と応用
- ・ システム発展に柔軟な実装・集積化技術

また、参加者から重点研究領域の選定にあたって、以下のような視点が重要であるとの示唆が与えられた。

- ・ 独創性や新規性ばかりに着目したプロジェクト立案に偏ると、重要研究テーマを見逃す可能性がある。
- ・ 欧米が先行した研究の追従を諦め、日本独自の得意な研究を重点化すべきである。
- ・ 未来の産業に必要な人材を供給できるナノテクノロジーに投資するプロジェクトが必要である。未来の人材育成・教育は文科省の役割であるので、この視点からのプロジェクトの立ち上げが必要である。実際に、人材の需要供給のミスマッチが顕在化しており、たとえば、鉄鋼やシリコンに関して刃は人材育成不足、バイオ技術に関しては産業育成

不足である。

- ・合理的な方法論の進化に裏付けされたプロジェクトを強化するべきである。

●ファンディングについて

JST・文科省のファンディングはアナリシス寄りであるとの意見がある。これは、ファンディングの制度がアナリシス研究を想定して設計されていることが理由である可能性がある。アナリシス研究の成果の出方を想定した制度では、複数技術の総合を必要とするリスクの高いものづくり研究はしにくいとの意見が、複数寄せられた。代表的な意見は次の通りである。

- ・十分な権限・裁量範囲を有するリーダまたはファンディングマネージャが牽引するプロジェクトが必要である。とにかくリーダが重要である。
- ・上記のようなリーダ／ファンディングマネージャと研究者とが、提案書を書く前から話し合いながら、挑戦的で目的達成に最適の提案を作成するシステムが有効である。
- ・目的達成型プロジェクトをより推進するべきである。その中で要素研究と基礎研究を実施する。
- ・リスクの高いものづくり研究を、リーダの考えるベストメンバーのグループで遂行できる制度が必要である。
- ・本格的なシンセシス研究ができる研究者に投資するJST ERATOのようなプロジェクトは有効である（どのようなデバイスやシステムを作るかを決めるのではなく、人材に投資する）。
- ・異分野連携、産学官連携、複数機関参加などを強制するプロジェクトが有効である。
- ・挑戦的なもの作り研究に合った評価制度が必須である。

●研究施設や研究拠点について

ナノテクノロジーに基づく分野融合的なものづくり研究を行える研究拠点の整備が、諸外国と比べて不足であるとの指摘が多い。代表的な意見は次の通りである。

- ・ナノテクノロジー・ナノサイエンスが最も高度化しているのはシリコン技術である。当然、世界各国にはシリコン技術をナノテクノロジー・ナノサイエンスに利用する組織的な産学官の研究拠点があるが、日本にはほとんどない。
- ・異分野融合研究を行うための研究拠点を、全国に複数設置するべきである。地理的にも便利でないと利用は促進しない。
- ・違った分野の研究者を書類上集めてきて、プロジェクトチームを作り、それぞれの成果をまとめてプロジェクトの成果とするというやり方では、真の分野融合は不可能である。研究拠点を形成して進めるプロジェクトが必要である。
- ・ニーズとシーズとのマッチングをはかるコンソーシアムや技術センターの設立が必要である。日本では総合力を発揮するためのプロジェクトやシステムが不足している。
- ・旧国立研究所がシンセシス研究の拠点の役割を果たすべきである。

- ・ 外部の人が利用しやすいナノテク加工支援センターの更なる整備が望まれる。
- ・ 装置は揃っているが、運営や人員配置に問題があり、使いにくい共用施設がある。
- ・ 分析装置と異なり、加工装置の共用は有効に働かない。

●研究人材について

総合的なものづくり研究ができる、あるいはこれを本気でしようとする研究者が減少しているという危惧がある。また、世の中に必要とされる人材と大学等で育成している人材との乖離が顕在化しており、将来の我が国の産業や科学技術に不安があるとの指摘もある。このような研究人材面での課題を指摘する意見として、次のようなものがある。

- ・ 個と全体とのバランスを絶妙に取る強い意志をもったリーダー、研究の大目標だけではなく、研究開発の細部にも見識を有するエネルギーあふれるリーダが不可欠である（リーダ不足）。
- ・ 日本の材料物性研究者は、地道である反面、新規のコンセプトを発信したり、新規の研究分野の提案には弱い。
- ・ シリコン技術は日本が世界をリードしているが、それは企業内に危うく保たれているだけで、中心となる特定人物が存在しない。今後、この分野では全体像がわかるリーダが益々減少し、技術の維持すらできなくなる可能性が危惧される。
- ・ 未来の産業に必要な人材を供給できるナノテクノロジーに投資するプロジェクトが必要である。人材の需要供給のミスマッチが顕在化している。
- ・ シンセシス研究をするため、ポスドクの紹介制度や人材供給ネットワークが必要である（若手人材不足）。

●科学技術政策立案側・ファンディング側の理解や対応について

研究者ばかりではなく、政策立案側、ファンディング側、および評価側でも、総合的なものづくり研究や分野融合研究への理解や対応が不足しているという指摘がある。代表的な意見は次の通りである。

- ・ システム的な発想への評価が不足している。シンセシスがもたらすブレークスルーやイノベーションへの理解が不足している。
- ・ システムとしての最適化が個別要素の最適化より重要であることへの理解が不足している。
- ・ 既存技術のシンセシスで新しい価値を作り出してもそれは研究とは言えないという考えが、政策立案側、ファンディング側、および評価側にある。どちらかと言えば、このような研究は二流であると評価されている。
- ・ シンセシス研究の重要性を評価できる人、および融合分野の研究を纏め上げる広い視野と知見をもった研究者や指導者を養成することが重要である。さらに、このような人間が研究評価やプロジェクトの採択審査を行う委員会に参画することが必要である。
- ・ 研究が固定化・硬直化しないように、審査委員に新しい風を入れていくことが重要であ

る。

- ・研究申請の審査団が学際的になっていないため、学際的なプロジェクト申請の意味が理解できず、独創的な学際研究プロジェクトが採択されにくい。
- ・日本の研究者間の評価に、コンセプトレベルの成果は高く評価せず、引用もしないという悪い傾向がある。

重要研究課題への直接投資をするとともに、上述の研究システムに関する問題を解決していく必要がある。

5.2 セッション1～3の総括討論

●セッション1に関する重要な議論の要点

- ・日本の大学や公的研究機関では、「良い独自技術シーズが生まれたら、それに関するプロジェクトを行う」という研究形態が主であるが、国際状況を鑑みると、独自技術シーズの有無に関わらず、戦略や目標を定めて研究することに、より積極的になる必要がある。たとえば、マイクロ流体デバイスの研究は、特に将来の医療に革命をもたらす可能性を有し、戦略的に取り組む必要がある。
- ・日本では、個人単位で行う要素の研究の水準は高いが、組織で行うシステムの研究が不足している。目標や研究対象を決めて、システムまでのものづくりをし、動作や機能を世の中に示せるようなプロジェクトが必要である。このようなプロジェクトを行えば、日本で不足している研究システムは必然的に構築される。
- ・今後のデバイス・システムのキーワードは、「超並列化」、「3次元化」、「トップダウン加工技術とボトムアップ加工技術との融合」、「システムの高機能化」などである。たとえば、本ワークショップで紹介された多探針プローブ顕微鏡やDNA診断チップでも、現状の10程度の並列数を1000、10000と超並列化し、システム化すると、別の付加価値が生まれる。

●セッション2に関する重要な議論の要点

- ・本セッションでは、量子状態制御、スピンデバイス、フォトニック結晶、カーボンナノチューブ、ナノ界面などのキーワードが重要研究課題としてあがった。この分野では、いかなるデバイス・システムもシリコンデバイスと切り離しては議論しにくい。本ワークショップでも明らかにされた重要な問題は、半導体市場で、今後、日本はどのような技術を持って主導権を取るかということである。ナノテクノロジーの中にその解が存在するというのが共通認識になっている。
- ・今後もシリコンエレクトロニクスが基本になるが、その進歩を続けるためには、新しい材料が必要である。そして、新しい材料の適用には確かな科学が必要である。しかし、この分野の研究者は減少傾向にあり、今、政策的な決断が求められている。
- ・ファンディングが省庁間で分断されている上、総合科学技術会議でもIT、ナノテクノロ

ジーといったように4分野が分断されている。この縦割りは簡単には解消できないが、研究現場からの問題点の指摘は続けていかなければならない。

- ・日本の半導体産業の退潮は、技術的な要因だけではなく、経営的な要因によるところが大きい。しかし、実際には日本の半導体研究の水準が落ちたように見られ、電気・電子系学科の人気凋落、優秀な人材の減少などの影響が出ている。これらの問題は、研究だけに力を入れても解消されない。
- ・デバイス・システムの研究では、目的志向のプロジェクトが必要である。この目的にはコスト削減ということも含まれる。コストは1つの重要な性能評価指標である。
- ・デバイスの研究は、アイデアやシミュレーション結果だけでは、説得力を持ち得ない。したがって、デバイスを試作することが必須であるが、そのためにはファンドリーなどの試作施設を利用しなくてはならない。しかし、日本にはデバイスの研究試作に使える施設がない。このような施設はユーザフレンドリでなくてはならない。しかし、ナノ加工支援施設の支援要員ポストがポストドクに割り振られたりすると、ポストドクは支援業務より自分の研究に忙しくて、ユーザフレンドリは実現しない。
- ・プロジェクトでは、総合力・組織活性化力のあるリーダーが非常に重要である。
- ・デバイスの動作を実証するまでにはいくつかの段階があり、さらに、デバイス動作の実証から製品化までにもいくつかの段階がある。しかし、そのある段階までを1つのプロジェクトが担っているにもかかわらず、デバイスのプロジェクトが行われると、総合科学技術会議や各省庁は性急に製品としての成果を求める傾向にある。新しいデバイスの研究・開発には時間がかかることへの理解を、省庁やファンディング機関に求めていく必要がある。
- ・目的志向のプロジェクトの基盤となる基礎研究・学術研究も同時に行う必要がある。

●セッション3に関する重要な議論の要点

- ・自己組織化やナノ材料の研究者に、方向性や出口を与える施策が必要である。自己組織化やナノ材料が役に立つことが、ナノテクノロジー重点化の成果として重要である。
- ・医療応用を目指した μ TAS、ドラッグデリバリーシステム、治療・検査機器などが研究されているが、医工連携の難しさ、たとえば、お互いの価値観や目的の違いがあり、出口が見えない。いわゆる認可の問題もある。
- ・日の当たりにくい実装が、実際は大きな価値を生んでいる。実装は日本が得意なところであるが、目立たない存在であるので、その人材育成や技術開発が十分であるか点検する必要がある。また、ナノテクノロジーが実装に果たす役割は大きいこと、および実装は製造物のライフサイクル（製造、使用からリサイクル、廃棄まで）に強く関係することを押さえておくべきである。

5.3 総合討論

●ステージゲート方式

NEDOの提案公募型プロジェクトとして、平成17年度から「ナノテク部材実用化プロジェクト」が行われている。このプロジェクトの仕組みには、文部科学省やJSTも学ぶべきところがある。まず、材料と応用とを繋ぐ、今まで不足していた研究・開発を行うために、各研究チームに材料系研究者／材料系企業と応用する企業とが加わっている。また、「ステージゲート方式」という新しい制度で、最初の3年間のフィージビリティスタディ期間が与えられている。開始3年間で研究・開発がうまくいきそうもないことがわかれば、プロジェクトを終了するという選択ができる。従来の国のプロジェクトでは、失敗は許されなかったが、この制度は失敗することも想定して、挑戦的な研究をさせるという点で革新的である。

JST研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料グループでも、これと似たようなファンディング制度を検討しており、着想が極めて重要な研究で、良い着想を集めて、着想段階で助成するために、フィージビリティスタディ期間を有する制度が有効であると考えている。

●プロジェクトの成否の考え方

プロジェクトの評価制度に、失敗（思った通りにいかなかったこと）を評価する考え方がない。したがって、建前上、全てのプロジェクトは成功したことになる。JSTは失敗データベースを構築し、失敗の知的有用性を認識しているはずである。したがって、失敗を明らかにして、それを知識化することに対して、正当な評価ができるはずである。企業はこれを実践している。

●外国人研究者の活用

国際戦略として、米国は外国人研究者や留学生を活用しているが、日本にはそれが見られない。中国や韓国をライバル視するだけではなく、中国や韓国から研究者を受け入れることが必要である。ポスドクとして海外から来ている研究者に対して、日本の競争力維持や外交の観点から有効な施策が取られるべきである。このことに関して、ファンディングや研究拠点が果たす役割も大きい。

●日本の半導体戦略・製造業戦略

デバイス・システムの国際競争で日本の半導体メーカは負けつつある。半導体製品の主役はプロセッサとメモリであり、1つの製品が兆円オーダの市場を持っている。このプロセッサとメモリの市場は、それぞれインテルと三星の独壇場であり、この2社だけが莫大な研究開発投資を回収できる。日本は、多額の研究資源を注ぎ込んで、数十億円もするEUV露光装置を開発しているが、これを使えるのはほとんどインテルと三星とだけではないかという危惧がある。

プロセッサという機械の頭脳を掌握した米国では、集積回路と人間とを繋ぎ、サイボーグや脳アクセラレータを作る研究もしている。将来、人間の脳までも“Intel Inside”になり、米国に掌握されないという保証はない。日本が失いつつある半導体技術をどうすべきか、今、戦略が問われている。

特にプロセッサのように技術的極めて高度化・複雑化し、市場のデファクトスタンダードがほぼ決した分野で、次に勝負できるものを出せるかどうかに関して、日本は瀬戸際にある。ここからは完全に手を引いて、同程度の市場が見込める別の分野に投資するか、あるいはナノテクノロジーを駆使して、より手の込んだ集積化回路で勝負するか、選択を迫られている。日本のIT産業を見ていると、ハードウェアを切り捨て、ソリューションビジネスなどに向かうなど前者の傾向が見られるが、これは本当に良い方向か議論する必要がある。

国際産業競争は、技術や研究成果だけでは勝てない。わかりやすい例に標準化がある。米国では、大統領の周りに研究者出身の政策担当者が多数いるが、日本ではこの種の人材が不足している。これは、そのような人材をあまり輩出できない研究者側の問題でもある。この問題が端的に現れている例として、日本学術会議は政策提言の役割を果たしておらず、その進行中の改革は、組織の不透明化・自己防衛化に向かっているようにも見える。

各省庁には優秀な人材が多数いるが、2年ごとに部署を交代するので、長期ビジョンを考える動機付けに乏しい。したがって、JST研究開発戦略センターの働きに期待する。

【6】まとめ

●重要研究課題

ナノテクノロジー・材料分野において、デバイス、システム、およびそれらの製造技術に関する研究は、科学技術それ自体の発展のためにも、未来の産業技術としても重要である。本ワークショップで抽出された重要研究課題は次の通りである（図22）。

〈バイオ・メカニカルデバイス〉

- ・ ナノ材料またはナノ構造を用いた超高感度センサ
- ・ バイオ・化学・エネルギー応用マイクロ流体デバイス
- ・ MEMS・NEMS

〈情報・通信固体デバイス〉

- ・ ナノ材料またはナノ構造を用いた超高性能計算素子
- ・ スピンデバイス
- ・ 光ナノ構造と電子ナノ構造との相互作用を利用する量子情報デバイスや通信デバイス

〈製造ナノテクノロジー〉

- ・ トップダウンプロセスとボトムアッププロセスとの融合、物質固有の自立性を取り入れた実装技術や製造技術
- ・ 高速かつ安価なサブナノメータ級微細加工技術

さらに、マイクロ・ナノテクノロジーに基づくデバイス・システムを実現するための基盤技術・科学のうち、重点的に取り組むべき課題として次のようなものがある。

- ・ ナノ造形技術の現象理解・高度化や複雑ナノデバイスの設計のための理論や計算機科学
- ・ ナノデバイスの界面の理解と制御
- ・ スピントロニクス、マルチフェロイクスなどの開拓中科学領域
- ・ 量子計算のための理論的に予測される物理現象の実現

●研究施設

ナノテクノロジーに基づく分野融合的なものづくり研究を行える研究拠点や共用研究施設の整備が、諸外国と比べても不足している。また、既存の共用試作施設がユーザフレンドリになっていないという問題もある。

●ファンディング制度

多くのファンディング制度がアナリシス研究向けに設計されている。アナリシス研究の成果の出方を想定した制度では、複数技術のシンセシスを必要とするリスクの高いものづ

くり研究はしにくい。デバイス・システムの研究の特徴を理解して、上述の課題の研究を有効かつ健全に進展させられるように、ファンディング制度を点検し、必要に応じて新設計する必要がある。

●人材

総合的なものづくり研究ができる、あるいはこれを本気でしようとする研究者を、今後、どのように確保するかが問題である。研究内容が高度に専門化し、自分の専門以外のことに対して興味や理解を持たない／持てない研究者が増えてきている。また、世の中に必要とされる人材と大学等で育成している人材との乖離が顕在化している。このことは、ポストドクや博士課程修了者の進路問題とも強く関係する。さらに、政策立案側、ファンディング側、および評価側にも総合的なものづくり研究や分野融合研究を理解できる人材が求められている。

重要研究課題への直接投資も重要であるが、その投資効果を上げるために、上述の研究施設、ファンディング制度、人材などに関する研究システム上の問題を解決する施策が必須である。

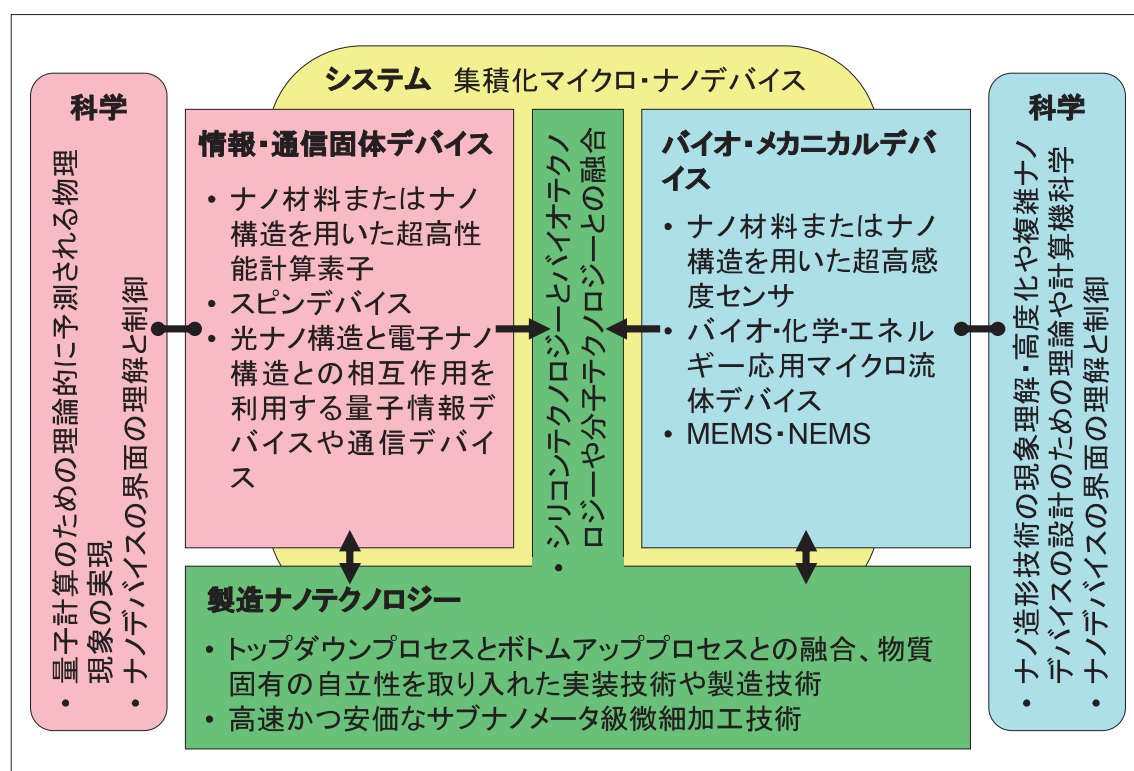


図22 本ワークショップで抽出された重要研究課題

【7】参加者

表 本ワークショップ参加者一覧

(a) 発表者

氏 名	所属・役職（いずれもワークショップ開催当時）
堀池靖浩	物質・材料研究機構 生体材料研究センター フェロー
藤田博之	東京大学生産技術研究所 教授
田畑 仁	大阪大学産業科学研究所 産業科学ナノテクノロジーセンター 教授
中山知信	物質・材料研究機構 ナノマテリアル研究所 アソシエートディレクター
亀井利浩	産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 主任研究員
小山二三夫	東京工業大学精密工学研究所 教授
大野英男	東北大学電気通信研究所 ナノ・スピン実験施設 教授
平山祥郎	NTT物性科学基礎研究所 部長
鈴木義茂	大阪大学大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 教授
野田 進	京都大学大学院工学研究科 電子工学専攻 教授
松本和彦	大阪大学産業科学研究所 量子機能科学大部門 教授
白石賢二	筑波大学物理系 物質創成先端科学専攻 助教授
小柳光正	東北大学大学院工学研究科 バイオロボティクス専攻 教授
横山 浩	産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長
平井義彦	大阪府立大学大学院工学研究科 電子物理工学分野 教授
一ノ瀬泉	物質・材料研究機構物質研究所 アソシエートディレクター
生田幸士	名古屋大学大学院工学研究科 マイクロシステム工学専攻 教授
吉川 暉	京都大学エネルギー理工学研究所 エネルギー利用課程研究部門 教授
栗野祐二	富士通研究所ナノテクノロジー研究センター 主管研究員
須賀唯知	東京大学大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 教授
橘 邦英	京都大学大学院工学研究科 電子物性工学専攻 教授

(b) 発表者以外の参加者

	氏 名	所属・役職（いずれもワークショップ開催当時）
物質・材料 研究機構	松倉文礼	東北大学電気通信研究所 ナノ・スピン実験施設 助手
	高井まどか	東京大学工学系研究科 マテリアル工学専攻 講師
	水谷 亘	産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 チーム長
	米倉 実	ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 副センター長
	北村孝雄	ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 調査部門長
文科省	平原奎治郎	ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 総括グループ長
	宮本智之	文部科学省 研究振興局 学術調査官
JST/CRDS	佐藤 透	文部科学省 研究振興局 室長
	村井眞二	JST/CRDS ナノテク・材料グループ 上席フェロー
	田中一宜	JST/CRDS ナノテク・材料グループ シニアフェロー
	江口 健	JST/CRDS ナノテク・材料グループ シニアフェロー
	井下 猛	JST/CRDS ナノテク・材料グループ シニアフェロー
	鯉沼秀臣	JST/CRDS ナノテク・材料グループ 特任フェロー
	木村茂行	JST/CRDS ナノテク・材料グループ 特任フェロー
	宮本 宏	JST/CRDS ナノテク・材料グループ 特任フェロー
	雄山泰直	JST/CRDS ナノテク・材料グループ フェロー
	田中秀治	JST/CRDS ナノテク・材料グループ フェロー ／東北大学大学院工学研究科 ナノメカニクス専攻 助教授
	中山智弘	JST/CRDS ナノテク・材料グループ アソシエイトフェロー
	横田 修	JST/CRDS ナノテク・材料グループ アソシエイトフェロー
	中島啓幾	JST/CRDS 情報通信グループ シニアフェロー
	伊東義曜	JST/CRDS 情報通信グループ 主任調査員
	石田千織	JST/CRDS ナノテク・材料グループ 事務補助員
JST/戦略的 創造事業本部	小泉輝武	JST 研究推進部 研究第一課 課長代理
	荒岡 礼	JST 特別プロジェクト推進室 主査

研究開発戦略センター報告書

**科学技術未来戦略ワークショップ
—ナノ製造・デバイス・システム—
CRDS-FY2005-WR-14**

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

平成18年3月

村井グループ

(ナノテクノロジー・材料分野担当)

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地

電話 03-5214-7483

ファクス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

平成18年3月

©2005 JST/CRDS

許可なく複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
