

「ナノ計測」検討会 報告書

平成19年1月13日(土)開催



Executive Summary

- ナノスケールの計測技術「ナノ計測」は「もの作り」と共にナノテクの両輪であり、ナノテクと他分野をつなぐ融合の媒体でもある。戦略重点科学技術にも「ナノ領域最先端計測・加工技術」として明記されており、今後のナノテク分野全体の中でナノ計測は一層の重要性が増すものと考えられる。特に、
 - ・ 従来は、優れた研究者個人のアイデア（シーズ）による実質的なボトムアップ型研究がほとんどであるが、現在の非常に厳しいナノテク競争環境において多くの優れたアイデアを生み出し、効率よく実現する仕組みを作ることは重要である。
 - ・ ある時点で近い将来有望と考えられていた手法が10年後に別の計測手法に置き換わっている場合も多く、様々な可能性を常に検討した柔軟な開発も求められている。
 - ・ 分野融合の典型的な場であるナノテクにおいては、異分野で用いられている計測技術間の融合、新物理・化学現象のナノ計測技術への応用等を強く推進すべきである。
- 日本の計測戦略は計測技術・装置開発自体に少々偏っている印象は否めない。計測技術・装置開発自体に特化にせず、ナノテク全体の進化からの視点で取り組む必要がある。すなわち、
 - ・ 個々の革新要素技術は日本の先端基盤技術としては非常に大切であるが、それだけでは役に立たない要素技術が多い。ニーズを出発点に解決すべき要素技術を選択する必要がある。
 - ・ このためニーズ側の研究者をリーダーとしたプロジェクトが必要である。
 - ・ “ベンチャー企業を作る”ことが目的ではない。その種となるべき新しい概念・技術を生み出すことに軸足を置くべきである。
 - ・ 「ナノ計測」とは、試料作製技術、測定環境技術、理論計算等、これら全ての総合技術である。ある具体的ニーズに向かって、あらゆる科学技術を総動員する中で、最も重要な要素の1つとして「ナノ計測（プロジェクト）」がある、と捉えるべきである。
- 計測を舞台にした分野間の融合の例として、
 - (1) 光イメージング用光源としての半導体量子ドットレーザーの生体・医療現場での応用
 - (2) AFMを（生体）高分子に接触させ、その光学応答計測、計算シミュレーションを融合させた能動的計測法
 - (3) MEMSを基盤としたセンシング技術等が提案された、また、ニーズの高い計測としては、例えば、
 - (1) 量子ドット形成ダイナミクスの「MBE その場」STM観察等の機能発現環境下における計測は、困難であるが粘り強く取り組むべき課題である
 - (2) ナノエレクトロニクスでは、不良（特性ばらつき等含む）が起きたときの原因解明が重要課題で、不良を同定したビットそのもののナノ計測（不純物分布、歪み、欠陥）などを全て計測できる方法が求められている
 - (3) 生物学的課題をクリアする化学プローブの開発

(4)置き換え困難な構造物、社会基盤材料の劣化（腐食等）の予測・診断等である。また、ニーズを満たす可能性が高い計測シーズ(技術)の多くは、走査プローブ計測、電子・イオンビーム計測（TEM等）、光学（X線含む）計測の基本・派生技術に、試料作製技術、測定環境技術の融合である。ニーズとシーズのカップリングを効率的に行うにはこの点を考慮することが重要である。

目 次

Executive Summary

1 「ナノ計測」検討会

1.1 挨拶	/田中一宜 (JST-CRDS) ……	1
1.2 検討会の趣旨及び問題提起	/永井康介 (JST-CRDS) ……	3

2 第1部 ナノサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ

/司会 塚田捷 (早大)

2.1 ナノダイナミクス	/塚田捷 (早大) ……	6
2.2 単一量子、極限スケール等	/花栗哲郎 (理研) ……	7
2.3 ソフトマテリアル・合成	/大須賀篤弘 (京大) ……	9
2.4 コメント1	/古宮聰 (Spring 8) ……	10
2.5 コメント2	/二又政之 (AIST) ……	11
2.6 コメント3	/渡部俊太郎 (東大) ……	13
2.7 第1部討論 ……		14

3 第2部 情報・通信エレクトロニクス領域におけるナノ計測ニーズ

/司会 金山敏彦 (AIST)

3.1 製造プロセス、その場検査ニーズ	/金山敏彦 (AIST) ……	18
3.2 Beyond CMOS	/高柳英明 (東理大) ……	19
3.3 有機エレ	/八瀬清志 (AIST) ……	21
3.4 コメント1	/藤田大介 (NIMS) ……	22
3.5 コメント2	/田島道夫 (JAXA) ……	24
3.6 コメント3	/塚本史郎 (東大) ……	25
3.7 第2部討論 ……		26

4 第3部 医療・ライフサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ

/司会 竹山春子 (農工大)

4.1 医療・予防	/北野滋彦 (東女医大) ……	29
4.2 非侵襲・その場の検診、多種検査	/竹山春子 (農工大) ……	30
4.3 生体内ナノ粒子 (安全性も含む)	/阿多誠文 (AIST) ……	32
4.4 コメント1	/小野崇人 (東北大) ……	34
4.5 コメント2	/田村守 (北大) ……	35
4.6 コメント3	/菊地和也 (阪大) ……	36
4.7 コメント4	/安田賢二 (東京医歯大) ……	37

4.8 第3部討論	39
5 第4部 安全・環境・エネルギー領域におけるナノ計測ニーズ	
	/司会 金村聖志 (首都大)
5.1 非接触な認証・検査	/谷田貝豊彦 (筑波大) 41
5.2 燃料電池、触媒	/金村聖志 (首都大) 42
5.3 材料劣化 (腐食)	/水流徹 (東工大) 44
5.4 コメント1	/塚本史郎 (東大) 46
5.5 第4部討論	47
6 第5部 全体討論	
	/司会 鯉沼秀臣 (JST-CRDS)
6.1 コメント1	/金山敏彦 (AIST) 49
6.2 コメント2	/今石宣之 (九大) 50
6.3 コメント3	/湯村守雄 (AIST) 51
6.4 コメント4	/安田賢二 (東京医歯大) 52
6.5 第5部討論	54
7 まとめ	57
Appendix (検討会の開催日時・場所、プログラム、参加者の構成)	58

1 「ナノ計測」検討会

1.1 挨拶/田中一宜 (科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー)

科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) は、JST の戦略的創造研究推進事業等だけでなく、我が国が推進すべき研究開発のオールジャパンの戦略立案することを使命として、2003年7月に開設された。ナノテクノロジー・材料分野担当グループ (田中 Gr.) では当該分野の戦略立案のため、分野全体を俯瞰して重要な研究領域・分野あるいは方法を切り出し、戦略プロポーザルとして提案して、関係省庁や総合科学技術会議に対して発信している (図 1-1)。

ナノテクノロジー・材料は、ライフサイエンス、医療、IT 等の分野とは異なり、いわば分野横断的な側面が強く、そのカバーする領域は非常に広範におよぶ。このため、我々はこれまでに、「元素戦略」、「新材料設計・探索」、「エネルギー・環境」、「電子情報材料」等の切り口で俯瞰を行い、これらを集めることによって分野全体の俯瞰を行ってきた。本検討会は、1.2 で述べるように、具体的なニーズを出発点にして、「ナノ計測」を俯瞰することが目的である (図 1-2)。

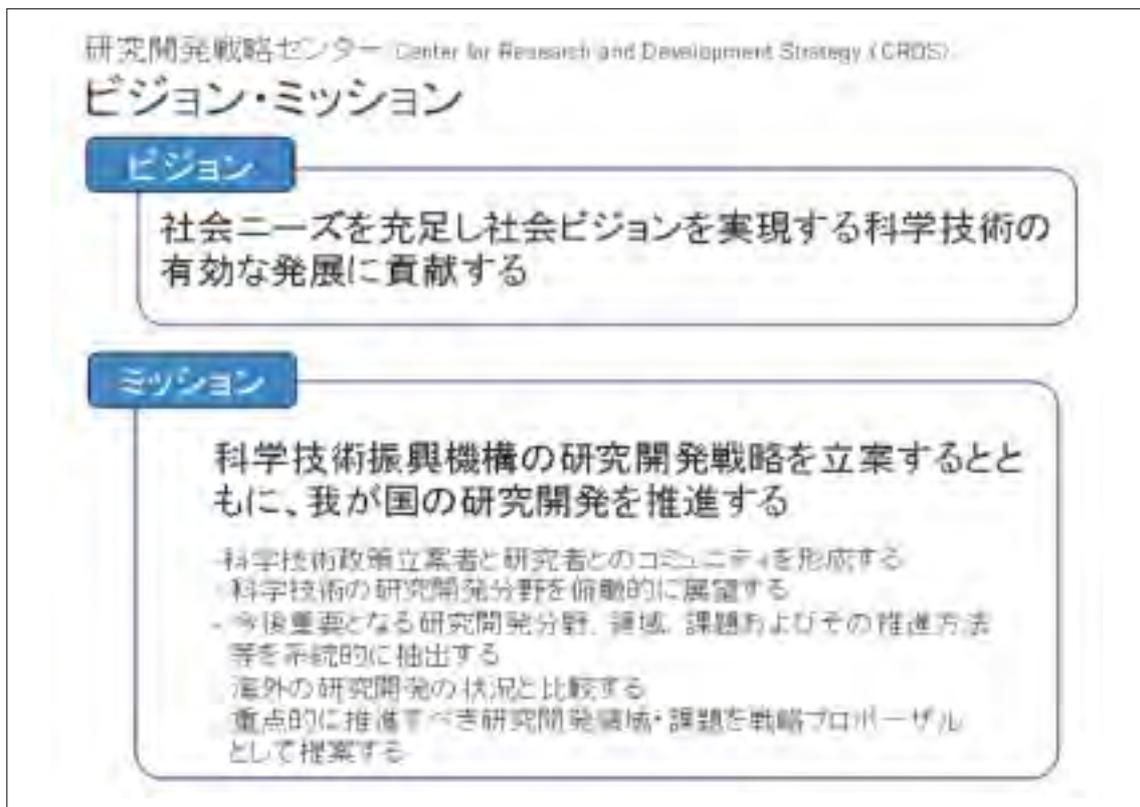


図 1-1 研究開発戦略センター ビジョン・ミッション

ナノテクノロジー・材料研究開発戦略俯瞰図		関連する共通基本課題	
		社会受容・倫理に配慮した戦略	教育・人材育成戦略
【イノベーション達成分野】	① エネルギー・資源	1. 再生可能エネルギー変換技術	立
	② 安全・環境	1. 生活環境モニタリング・環境浄化/保全技術	立
【イノベーション達成分野】	③ 輸送・社会基盤システム	1. 建設・住宅・土木用技術	立
	④ 生活・文化	1. 少子高齢化社会対応技術	立
【イノベーション達成分野】	⑤ 医療・食料	1. 創薬技術	立
	⑥ 情報・通信	1. 表示・記録装置	立
【イノベーション達成分野】	⑦ 計測・評価・標準	1. 計測・計量物質の新評価法	立
	⑧ 設計・探索	1. 材料設計シミュレーション	立
【イノベーション達成分野】	⑨ ナノバイオシステム	1. 生体内送達治療材料	立
	⑩ ナノデバイス・システム	1. 設計・微細加工・製造技術	立
【イノベーション達成分野】	⑪ ナノ材料・加工プロセス	1. 機械的ナノ加工技術	立
	⑫ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	⑬ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ粒子の複合化材料技術	立
	⑭ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	⑮ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	⑯ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	⑰ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	⑱ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	⑲ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	⑳ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉑ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㉒ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉓ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㉔ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉕ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㉖ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉗ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㉘ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉙ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㉚ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉛ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㉜ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉝ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㉞ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㉟ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊱ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊲ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊳ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊴ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊵ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊶ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊷ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊸ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊹ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊺ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊻ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊼ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊽ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊾ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊿ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立
【イノベーション達成分野】	㊿ ナノ材料・加工プロセス	1. ナノ構造	立
	㊿ ナノ構造・材料	1. ナノ構造	立

「ナノ計測」検討会

図1-2 ナノテクノロジー材料研究開発戦略俯瞰図

1.2 検討会の趣旨及び問題提起

/永井康介 (科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー、東北大学 金属材料研究所 助教授)

ナノスケールの計測技術「ナノ計測」は、「もの作り」と共にナノテクの両輪であり、ナノテクと他分野をつなぐ融合の媒体でもある。戦略重点科学技術にも「ナノ領域最先端計測・加工技術」として明記されており、今後のナノテク分野全体の中でナノ計測は一層の重要性が増すものと考えられる。特に、従来の計測技術の延長上の技術(例えば従来技術の高精度化による分解能の向上、ビーム強度の増強による計数率の向上等の高度化)ではない、新しいコンセプトに基づく計測手法の発明・開発は、それ自身がナノテクの最先端である。

基本的に従来の新計測手法の発明は、優れた研究者個人の突発的なアイデア(シーズ)に依存した、まさにボトムアップ型研究の典型といえる。しかしながら、現在の非常に厳しいナノテク競争環境において、多くの優れたアイデアを生み出し、効率よく実現する仕組みを作ることは重要である。また、ある時点で近い将来有望と考えられていた手法が、10年後に別の計測手法に置き換わっている場合も多く、様々な可能性を常に検討した柔軟な開発も求められている。さらに、分野融合の典型的な場であるナノテクにおいては、異分野で用いられている計測技術間の融合、新しい物理・化学現象のナノ計測技術への応用等を強く推進すべきである。

一方で、これまでの計測に関わる多くのファンディングは、個々の計測技術・要素技術の高度化に大きく寄与してきたが、これらは主としてシーズからのアプローチであった(図1-3)。計測装置開発自体に少々偏っている印象は否めない。一方、海外に目を向けると、

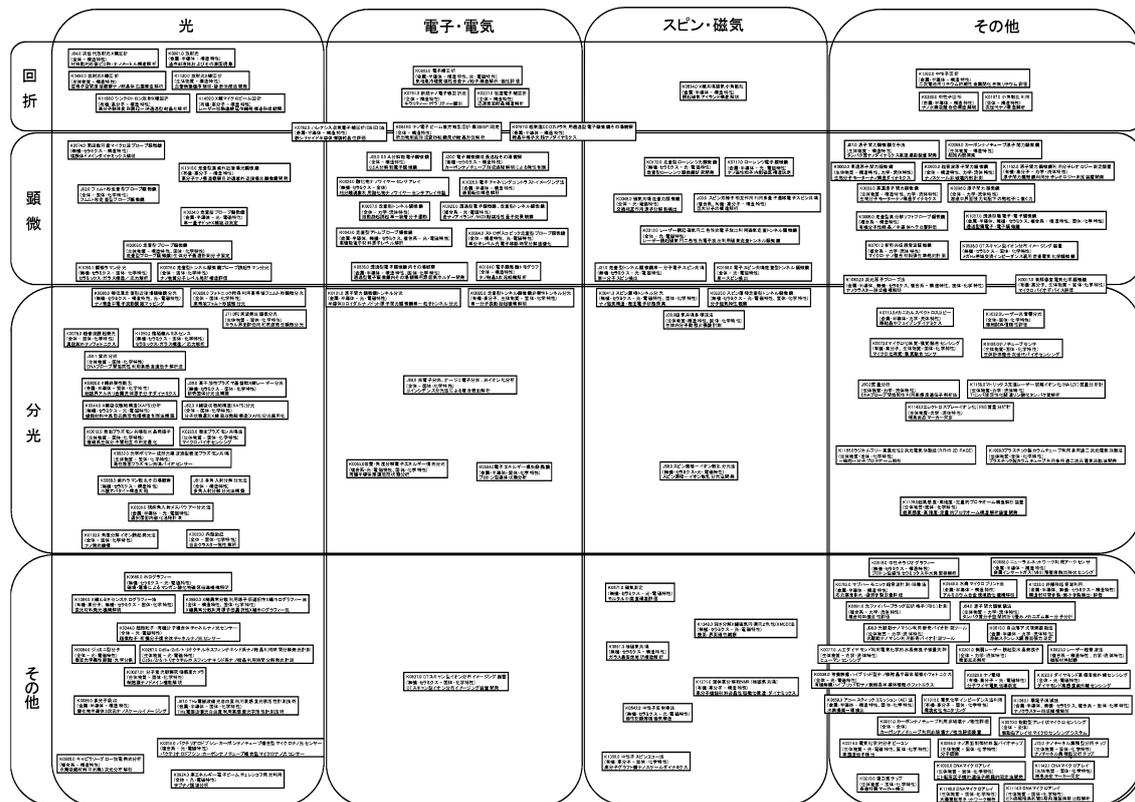


図 1-3 最近の計測評価関連研究の技術側からの整理

米国 NIST (国立標準技術研究所、National Institute of Standards and Technology) 等では、計測装置開発に特化にせず、ナノテク全体の進化という視点で計測技術分野に取り組んでいる。これは日本には欠けている視点といえる。

以上のような状況と問題提起のもと、ここでナノ計測ニーズを把握し、具体的なニーズを出発点にしたナノ計測分野の俯瞰を行うことが、今後の開発戦略上、極めて重要との考えに到った(図1-4)。本検討会は、従来の計測技術のワークショップとは異なり、計測技術自体のエキスパートというよりは、それらを用いて最先端の研究をされている先生方にニーズを紹介して頂くことに主眼を置いた。「10年後に……な計測ができれば……のような素晴らしいことができる」という夢のある目標や、「現在の……の方法は……ができませんのでダメ」というお話しをこの場で出し合い議論することが、本検討会の趣旨である。また、ニーズだけでなく、計測のエキスパートの先生方にもコメンテーターとして、計測技術の現状、将来展望を紹介して頂く。また、ナノサイエンスから、電子材料、医療、環境等、様々な分野の方々にお集まり頂くことで、異分野の計測技術間の融合に関しても議論して頂く。

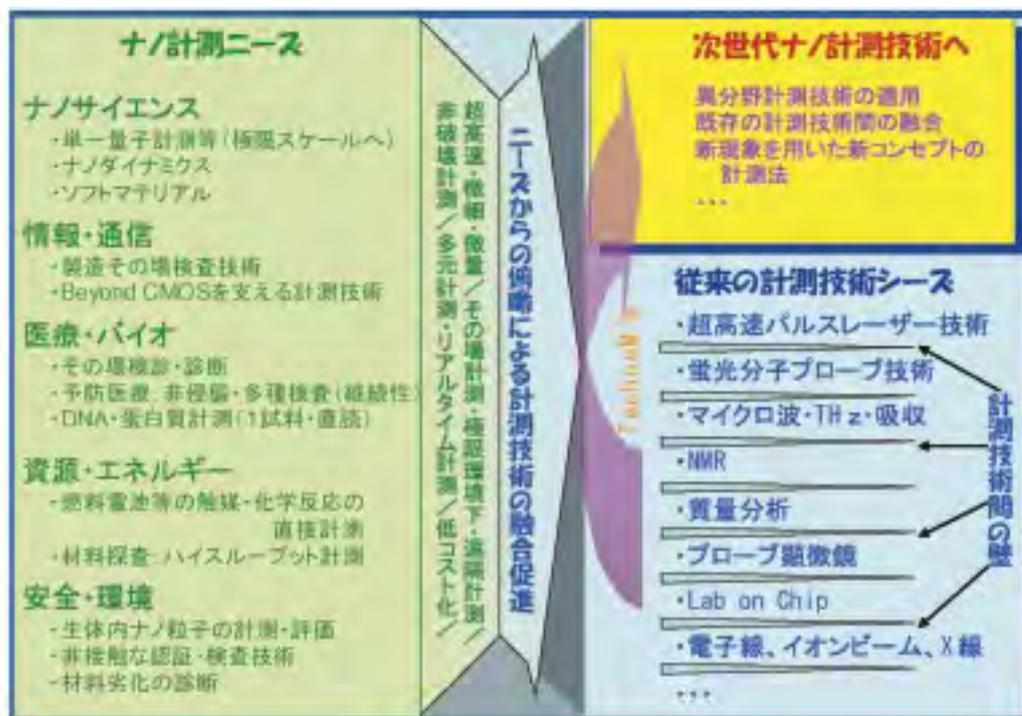


図1-4 ナノ計測におけるニーズ俯瞰の概念

本検討会は、第1部「ナノサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ」、第2部「情報・通信エレクトロニクス領域におけるナノ計測ニーズ」、第3部「医療・ライフサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ」、第4部「安全・環境・エネルギー領域におけるナノ計測ニーズ」、第5部「全体討論」から構成される。とりわけ第5部では、異分野計測技術間の応用を討論していただき、ファンディングに関しての提案等を期待する。ナノ計測分野の俯瞰図の例を示す(図1-5)。本検討会の意見を反映させ、俯瞰図を改訂していきたい。

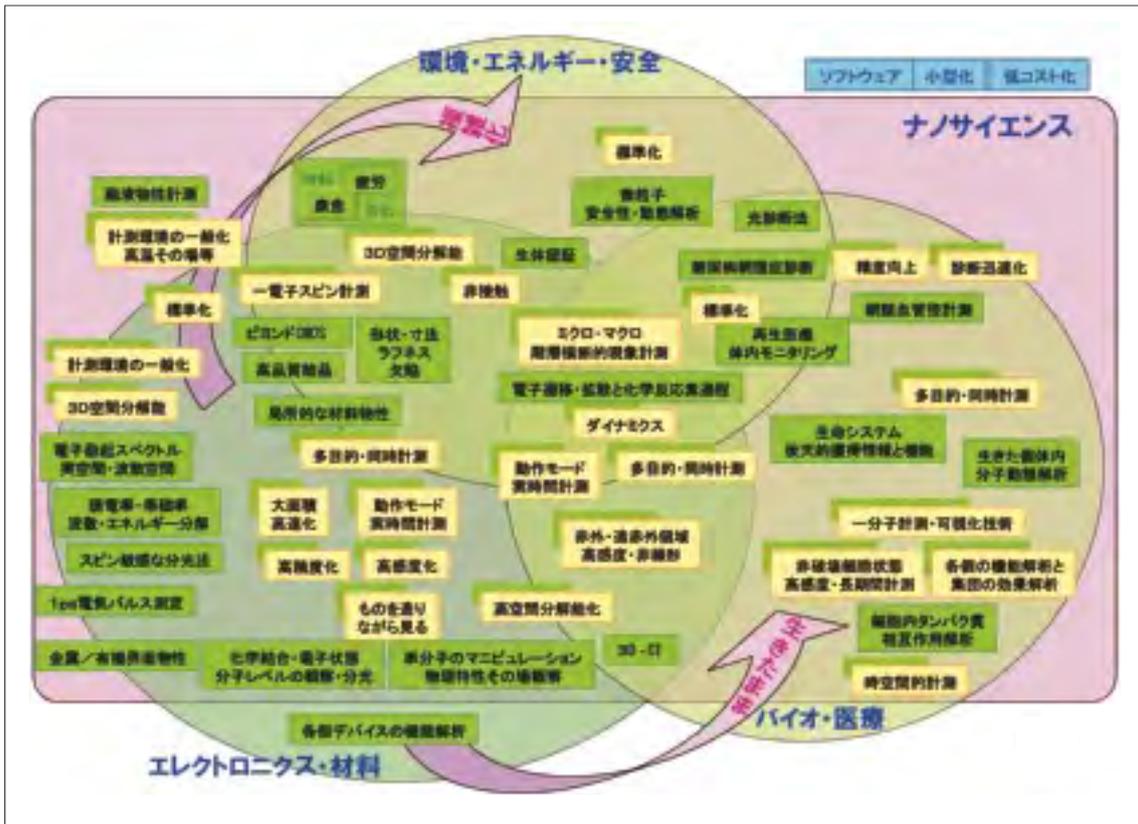


図1-5 ナノ計測のニーズ俯瞰図の例

2 第1部 ナノサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ

司会：塚田捷（早稲田大学大学院 先進理工学研究科 客員教授）

2.1 ナノダイナミクス/塚田捷（早稲田大学大学院 先進理工学研究科 客員教授）

表面科学の歴史が100年以上に及ぶ中で、現代的な分野の歴史は30年程度でしかない。表面の本質的理解は、素過程を明確にすることから始まった。これまでの、より単純な素過程や系へ還元するという研究の方向性に対し、現実の工学的問題や技術的問題に適用するには、単純性を改めて統合していく方向性が重要であると考えられる。こうした点から「素過程から複雑現象へ」というテーマをまずポイントとして述べ、その後、「能動的計測」と「極限現象計測」に関してのテーマを述べる。

まず、「素過程から複雑現象へ」というテーマに関して述べる。

現実の計測対象の複雑さは、階層横断型の構造や現象に由来すると理解している。要素分解型の計測ではなく、複雑な階層横断的過程を総体として把握することが可能な計測が必要になるであろう。階層横断的な現実過程に、素過程の研究・計算による理解をフィードバックさせ、それらを連携させることで現実の事象を捉え、物質現象を制御することが重要となる。例えば、走査トンネル顕微鏡の像において、一個ずつのピクセルでスペクトルの過程を、全体的な現象として捉え時間的发展を見るには、従来の技術に加えて新規の発展が必要になる（図2-1）。

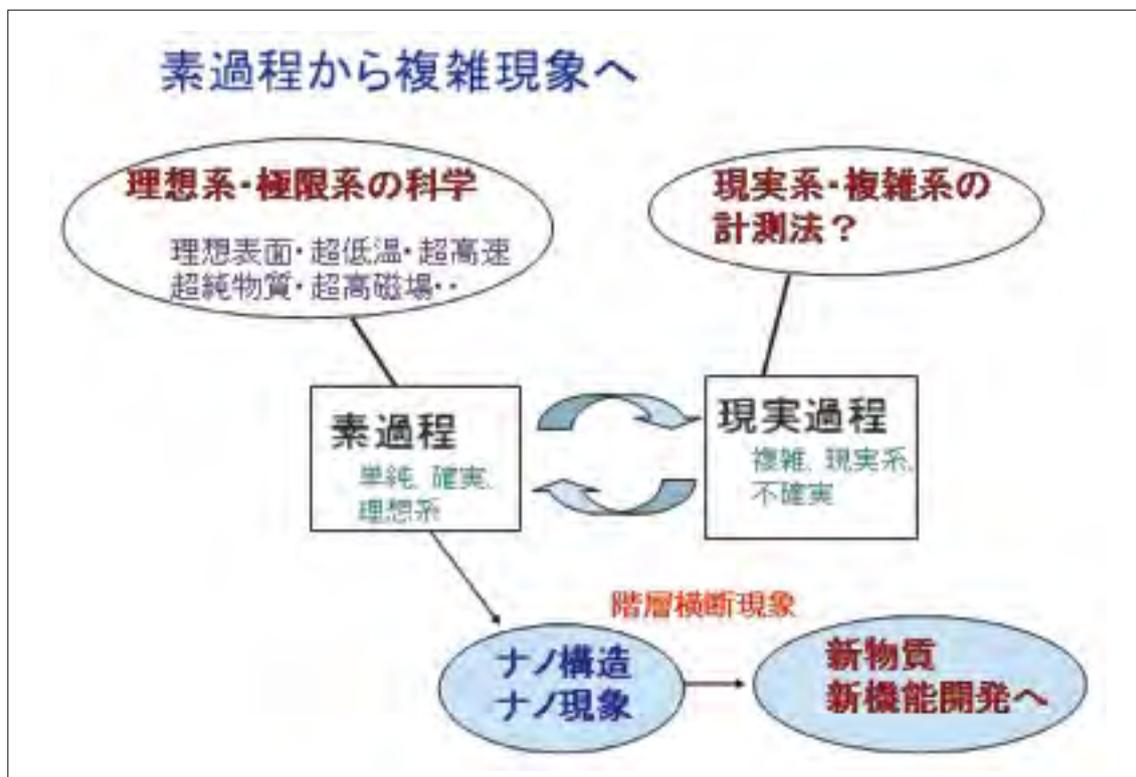


図2-1 素過程から複雑現象へ

次に「能動的計測」というテーマに関して述べる。動的 AFM(原子間力顕微鏡、Atomic Force Microscope)による原子マニピュレーションは、能動的計測法の一例である。対

象に強く働きかけ、その応答を計測にフィードバックさせる。着手されて間もない技術であり、発展が期待されている。例えば、蛍光タンパク質 (GFP、Green Fluorescent Protein) を原子間力顕微鏡で圧縮すると蛍光が消失してしまう。原因解明には、計算科学、バイオ、ナノ光科学等の技術の融合による研究の進展が期待されている。

「極限現象」というテーマに関して述べる。理論的研究では、相転移などミクロな不可逆過程に伴う散逸過程を原子間力顕微鏡により画像化することを検討したい。振動によるエネルギーの散逸を計測することにより、新規の現象を捉えることが可能になるのではないだろうか。量子現象の計測では、非局所性、多重性、瞬間性などの機能を十分に利用したい。テーパーポルフィリン分子の透過スペクトルの研究は原子エレクトロニクスにおいて重要である。理論が先行しているため、実験における計測が期待されている。電流・電圧測定や磁場に対する応答の測定等を同時に行うためには、複合的実験の原子レベルでのデータを確実にとることが重要である。ただしこの分野はまだ発展途上にある。三角形グラフェン内部ループ電流の予測に関しては、理論的段階にある。実験や計測の実現化の期待は非常に強い。ドーナツ型のカーボンナノチューブ (CNT、Carbon Nanotube) における永久電流の予測も理論的段階にある。外部にソースとドレインを付けることで、分子内電流の検出等が可能となり、新規のデバイスが実現する可能性がある。ナノ分野においては、理論が先行する傾向がある。理論的研究の対象物が実験的計測に移行されることを期待したい。

最後に計算法に対する期待を述べる。京速計算機が 10 数年先に実現すると目されている。計算的手法により、物質構造や物質現象を予測する能力は向上するであろう。理論的研究だけ行うのでは成果は限定される。理論分野と、現実の系における現象の予測または現実で実験されたことの解析とを、車輪の両輪として研究を発展させる必要があると考える。その結果素過程の研究を複合した階層横断的な、あるいは現実系に対し有効的な応用技術の発展が実現されることを期待している。

2.2 単一量子、極限スケール等 / 花栗哲郎 (理化学研究所 高木磁性研究室 専任研究員)

物性物理学の二一ズ (夢) には、「新現象、新機能の機構解明」「新現象、新機能の発見」「新現象、新機能の応用」の 3 点があると考えます。「新現象、新機能の機構解明」に関して、物性物理学が対象とする物質は高温超伝導体の発見以来、バンドメタルから強相関電子系へと移行している。モット絶縁体へキャリアドーピングすることで通常の半導体にはない機能が発現しているものの、強相関電子系では基盤となる学理が確立されていないために、応用段階には至っていない。高温超伝導体の事例に見られるように、電子のもつ自由度が複雑に絡み合った系では、理論的・物性的な予測は困難である。競合する電子相が多数現れて機能と密接に関連するため、電子状態の理解のみならず、相転移の理解が重要となる。相転移に伴う電子励起スペクトルを実験的に計測する手法が求められる。電子励起スペクトルの分光測定とともに、相転移による変化を抽出するための (温度と磁場の) 広パラメータ可変な計測が、機能解明には決定的手段となる。電子の位置情報も重要になる (図 2-2)。

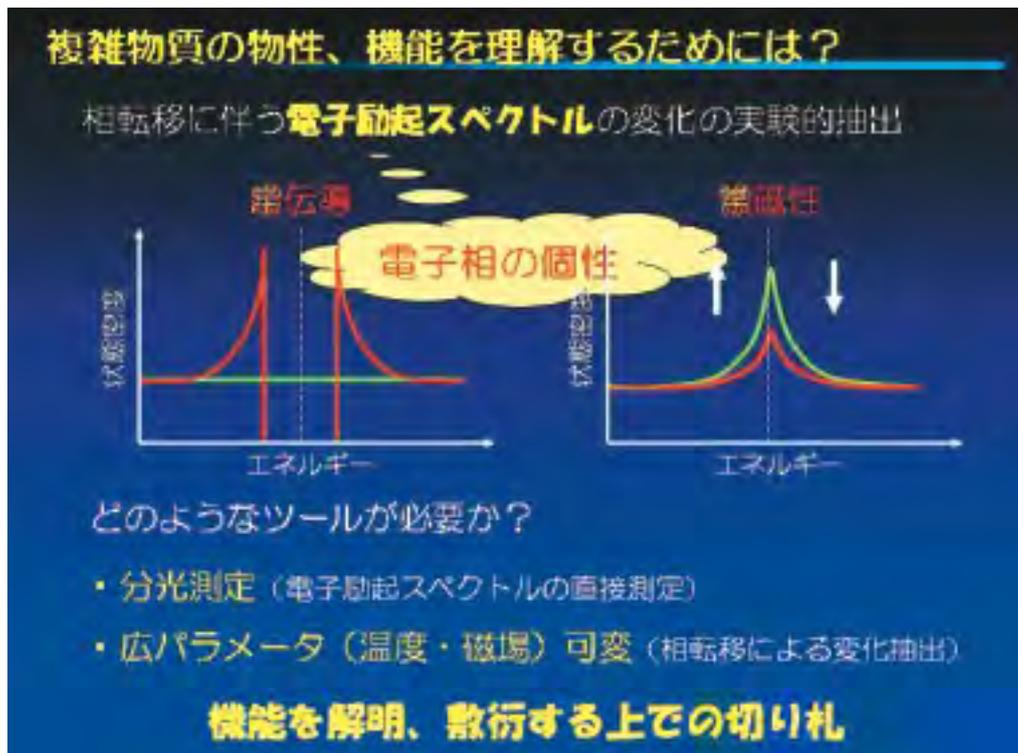


図 2-2 複雑物質の物性、機能を理解するためには？

現段階では ARPES (角度分解光電子分光、Angle Resolved Photo-emission Spectroscopy) と STS (走査型トンネル分光法、Scanning Tunnel Spectroscopy) が、重要な技術となっている。ARPES は高温超伝導体の発見を契機に発展し、現在ではサブミリ電子ボルトの分解能で分光が可能となっている。STM (走査型トンネル顕微鏡、Scanning Tunneling Microscope) / STS も発展が見られ、現在、マイクロ電子ボルトの分解能で分光が可能となり、400 mK~60 K の温度可変パラメータで 10 T 程度の磁場範囲で扱う実験が可能となっている。高温超伝導体の電子状態の理解には大きな貢献をしている。

STM/STS や ARPES を用いて、将来的には電子励起スペクトルをサブミリ電子ボルトのエネルギー分解能で場所もしくは運動量分解し、様々な温度や磁場の環境下で測定したいと考えている。ただし STM/STS と ARPES の両者に共通して、表面敏感性の問題点がある。1 電子の電子励起スペクトルの測定には、試料への電子の出し入れが必要となり、表面を介さなければならない。一方、多電子の電子励起スペクトルでは、中性子や X 線の出し入れにより測定することが可能である。手法として量子ビームの非弾性散乱を用いた技術に期待をしている。STM にも高い潜在力があると考えている。ARPES は磁場中での計測が不可能であるのに対し、STM は極限環境を組み合わせた状態での計測が可能である。現象を発見するための手段としての発展と低コスト化が期待される。現在の STM にはスピンに対する感度がないことと、絶縁体を計測できないことが弱点としてある。STM が一般化していない理由は、安定度がない点にある。極限環境を開拓し、強相関電子系や自己組織化界面のような計測が困難と考えられている対象を計測していくことも重要である。

今後現象の機構解明には電子状態の理解が不可欠であり、ARPES や STM にはない、バルク敏感分光法を開発する必要がある。新現象や新機能の発見のためには、スピン敏感や絶縁体の電子計測が可能な STM が必要となる。さらに新現象や新機能の応用には、極限計測を一般化し、STM をツールとして応用するために新しいコンセプトの SPM(走査プローブ顕微鏡、Scanning Probe Microscope) が必要である。

2.3 ソフトマテリアル・合成/大須賀篤弘 (京都大学大学院 理学研究科 教授)

メゾ-メゾ結合ポルフィリン多量体の合成に関して述べる。ポルフィリンを銀塩で酸化し2量体化する。2量体は同じ酸化反応により4量体に変換できる。これらのポルフィリン多量体では、隣り合うポルフィリン環は直交しているため、溶解性に優れている。更に酸化反応を繰り返すことで、32量体、48量体、64量体などの合成が可能となった。分離には、GPC (ゲル浸透クロマトグラフィー、Gel Permeation Chromatography) を用いた。いずれも非常に大きな分子ではあるが、単分散の有機物でありポリマーではない。最大で1024量体まで達成した。

これらの化合物の構造決定にはNMR (核磁気共鳴、Nuclear Magnetic Resonance) を用いるが、大きなポルフィリン多量体などの大きな分子の精密なキャラクタリゼーションへの要求は大きい。これらのポルフィリン多量体を更に強く酸化することにより、ポルフィリンが平面に固定された「完全共役フラットポルフィリンテープ」の合成にも成功した。2400 nm 付近のノイズはポルフィリンの両側のCHの振動によるもので、通常の赤外線の状態である。中性分子の電子遷移が赤外線より低い。KBr ペレットで赤外線計測すると、12量体では1000 nm 以下の範囲で吸収ピークが検出される(図 2-3)。

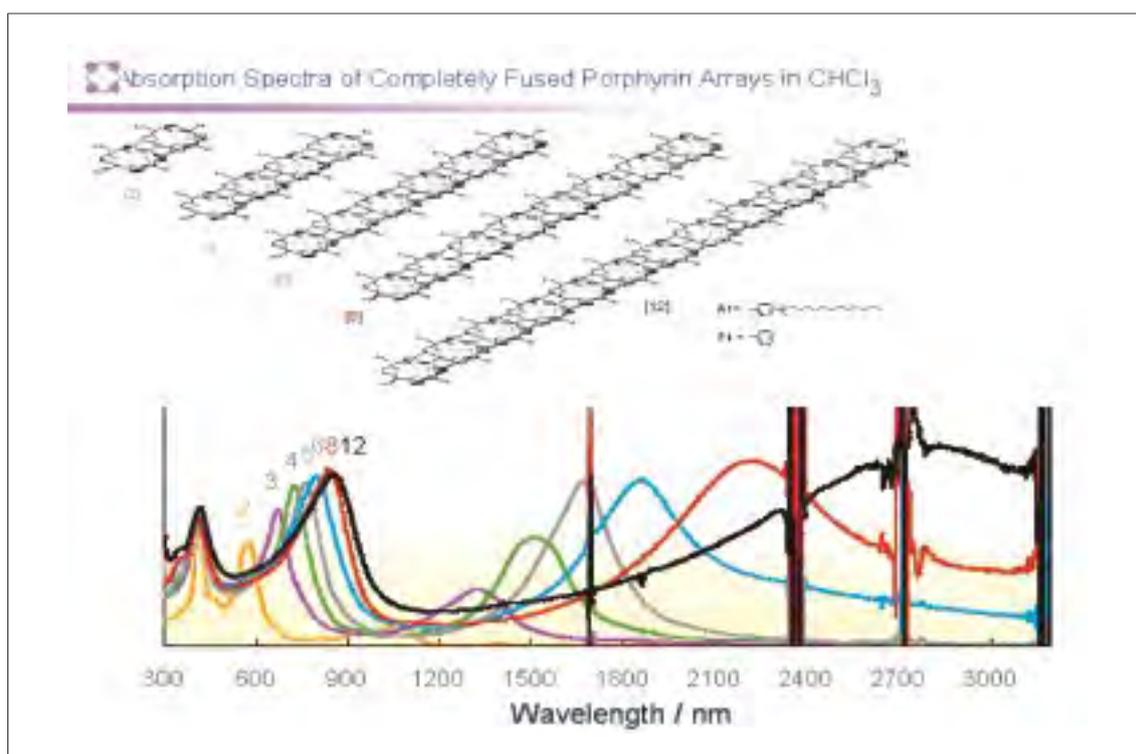


図 2-3 Absorption Spectra of Completely Fused Porphyrin Arrays in CHCl_3

光合成反応中心の光捕集アンテナの環状構造をモデルに、5,10-ジアリルポルフィリンを出発原料として環状ポルフィリンを合成した。STMで観察すると、実際に環状構造を見ることができた。巨大な環状ポルフィリン多量体は、金属表面上でねじれた輪ゴムのような構造を取っていることがわかった。有機物の大きな1分子の構造決定を目で見ることのできる時代の到来を感じている。有機成分野でも既存の域を超えた大きな分子が作られ始めている。キャラクタリゼーションを含め多種多様な物性を計測する手段は、今後ニーズが高まるものと考えている。

2.4 コメント 1/古宮聡 (高輝度光科学研究センター 産業利用推進室 特別研究員)

放射光は高輝度光源であり、波長選択の自由、偏光性、パルス性、干渉性の特徴を持つ。大型のSPring-8では、これらの特徴をX線領域で利用できる利点を持つ。それにより薄膜(原子層)や微量(fg)、局所(サブ μm)の対象に対し、高性能な構造解析、状態・元素分析が可能となる。

SPring-8には2005年に約170社からのべ2200名(全体でのべ約1万名)の利用があった。半導体、金属、有機材料、磁性体、生体材料など多様な材料の構造解析、状態分析、元素分析、イメージング分析等、用途は多岐にわたる。最近はin-situ計測とX線マイクロビームに大きなニーズがある。

SPring-8ホームページの利用事例データベース(http://www.spring8.or.jp/ja/users/new_user/database/)を見ていただきたい(図2-4)。



図 2-4 計測法と産業利用例

こうした産業利用の発展に伴い顕在化してきた課題について述べる。日本のメーカーはものづくりの優れた知識をもっているものの、科学的情報になっていないことも多い。科学に裏付けられたものづくりには、製品の機能・性能と素材の物性およびプロセス条件との相関や現象を科学的に明らかにすることが重要となる。この相関の解明が産業利用における分析・解析分野の重要な使命である。特に放射光には最先端の多様な手法が備わっており、その利用が産業界にとっても有益である。これらの科学情報は分析・解析従事者(専門家)により多く集まることから、これらを体系的に蓄積・利用できることが重要である。その組織的な対応は本来は公的機関が担うべきであろう。

製造装置や材料開発などシーズ側と製品やプロセス開発などニーズ側の協働が重要であるが、指標や特性など相互に言葉が異なり理解を難しくしている。分析・解析としてのツール側は、両者の言葉をつなげ総合的な理解に至る核となりやすい。SPring-8 など共同利用施設は重要な協働の場となり得る。しかしながらほとんどの研究が個別に独立して実施され、協働の場として活かされていない。また多量の測定、複数の手法による総合的評価、タイムリーな(即時、定期的)利用など産業界に特徴的な要望も顕在化している。こうした状況変化に応え共同利用施設としての機能を最大限に発揮するには、ミッション、組織、利用制度等の再構築が必要と考えている。

放射光施設間や他の分析・解析機関の連携と情報集積・利用のための新たなシステムの構築、課題解決型の対応が出来る人材の確保・育成が重要であり、最先端計測技術を簡単に使用できる装置開発も必要である。

2.5 コメント 2

/二又政之(産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクトゥクス研究センター 主任研究員)

単一分子感度およびナノスケール空間分解能を有する振動分光法について、現状を中心に述べる。近接場振動分光では試料の狭い領域からの微弱な信号を検出するために、高感度の表面増強ラマン散乱(Surface Enhanced Raman Scattering、SERS)の利用と、さらに進んだ技術としての単一分子感度のSERSとの複合が行われはじめている。SERSは30年ほど前からナノスケールからサブマイクロスケールの粗さや構造を持つ金属表面に吸着した分子のラマン散乱が、平均として 10^4 - 10^6 倍増強される現象として知られている。いろいろな実験事実や理論的解析に基づき、局在表面プラズモン(Localized Surface Plasmon、LSP)の光励起で金属表面に形成される巨大電場による「電磁気学的増強」と、分子-金属間の電子移動相互作用にもとづく「化学的増強」の2つのメカニズムが提案されている。しかし従来の実験方法では多数の形状やサイズ・集合状態の異なる金属表面の多くの分子からの信号を統計平均として測定していたため、これらのメカニズムの解明は十分進んでいなかった。

最近SPMの普及や光検出器の高感度化により、個々の金属ナノ粒子(構造体)やその表面に吸着した単一分子からのラマン散乱測定も可能となってきた。その結果、我々を含めいくつかのグループが単一分子ラマン感度実現のための構造として「ジャンクションモ

デル (Junction model)」を提唱している。このモデルは「電磁気学的増強」メカニズムに基づいており、数 nm 以下に近接した金属ナノ粒子 (径 50-100 nm) の間にごく少数の分子が存在するとき (弾性散乱スペクトルに現れる吸着分子による付加的なピークから、そうした分子の存在が確認できた)、接合軸に平行な偏光をもった光照射により金属粒子の LSP が分子を通して強くカップルする結果、その分子のラマン散乱が 10^{10} 倍もの大きな増強度を受け単一分子感度を実現されるというものである。こうした金属ナノ構造体に分子 1 個が存在していることを直接示す実験技術がないため完全な証明は困難であるが、関連する種々の分光特性、高分解能 SEM での形状や集合状態の観察や局所電場計算の結果に基づき、このモデルが広く支持されている。その場合 SERS 信号の強度やエネルギーが時間的に揺動するブリンキング (Blinking) 現象が観測される。これは単一分子感度検出の証拠と考えられており、その温度依存性から吸着分子の熱拡散によることを我々は見出した。「化学的増強」はその局所環境にある分子の存在状態 (分子構造、配向性、周囲特に基板との相互作用) を決めるので、SERS をナノ計測法として利用するために極めて重要である。しかし、個別の金属と分子の組み合わせにより大きく異なる相互作用を有するので、「化学的増強」メカニズムの一般化は困難である。我々はこれまで微視的な機構が不明であったハロゲン化物イオンの役割に関して、酸化エッチングによる銀表面不純物・酸化物の除去と、それにひきつづくカチオン系色素 (ローダミン、R6G) や分子の静電的吸着により、安定でかつ特異な電子的相互作用を有する Ag-X-R6G 錯体が形成され、これが 10^2 - 10^3 の付加的な SERS 増強を与えることを見出した。

以上のように増強メカニズムの解明が進んだため、金属ナノ構造を基板上に固定して実際に使用する研究も始まっている。例えば大掛かりな装置を必要とするが電子ビームリソグラフィで、局所電場計算により予測された LSP 励起のための最適構造を形成するほかに汎用性の高い方法としてナノ粒子リソグラフィが知られている。この方法では溶液からガラス等の基板上に自己組織化的に形成されるポリスチレンナノ粒子の 2 次元配列の上方から金属を真空蒸着したあと、ポリスチレンのみを有機溶媒で溶かしだすことで金属ナノ三角柱配列を作成できる。三角柱構造体のサイズ・軸比を変えることで、LSP 共鳴励起波長を制御でき、必要な波長領域でごく微量試料のラマン散乱を高感度 (10^6 - 10^7 の増強度) で得ることが可能である。ただし従来法では構造体の表面粗さや粒子状成長のために、増強度の再現性や均一性・定量性の点で問題があった。我々は、これらの精密な制御を進め、LSP 共鳴の精密な制御と再現性及び定量性のある SERS デバイスの実現を目指して検討を進めている。

さらにナノスケールでの単一分子感度振動分光の実現のために重要と考えられる手法として、上記のジャンクションモデルと等価なギャップモードがある。単結晶を含む平滑な金属基板上に金属ナノ粒子が縦型に上方から 1, 2 nm 程度のナノギャップを持って存在するとき、ギャップに LSP 励起による強い電場が発生し、そこにある分子のラマン信号が大きく増強されるというものである。この現象は従来から理論計算により予測されていたが、最近神戸大学の研究チーム (林真至教授ら) が近接場ラマン分光により実験的に確認

した。このギャップモードにおいて金属ナノ粒子を STM チップや金属コートした AFM プローブでおきかえることで、幅広い展開が期待される。実際に、Fritz Haber 研究所のグループ (Pettinger 博士) により、STM で金プローブを用いて金単結晶表面の色素や DNA 等の単分子層の分析や、1 分子レベルのラマン散乱が得られはじめています。上記のように表面プラズモンを利用して高感度化を図る場合、10 nm 以下の空間分解能の実現は容易ではない (現在のところ非線形ラマン分光でも空間分解能は 15 nm 程度とされている)。原子・分子分解能の実現のためには STM 電流による振動励起など何らかの技術的ブレークスルーが必要と考えられる (図 2-5)。

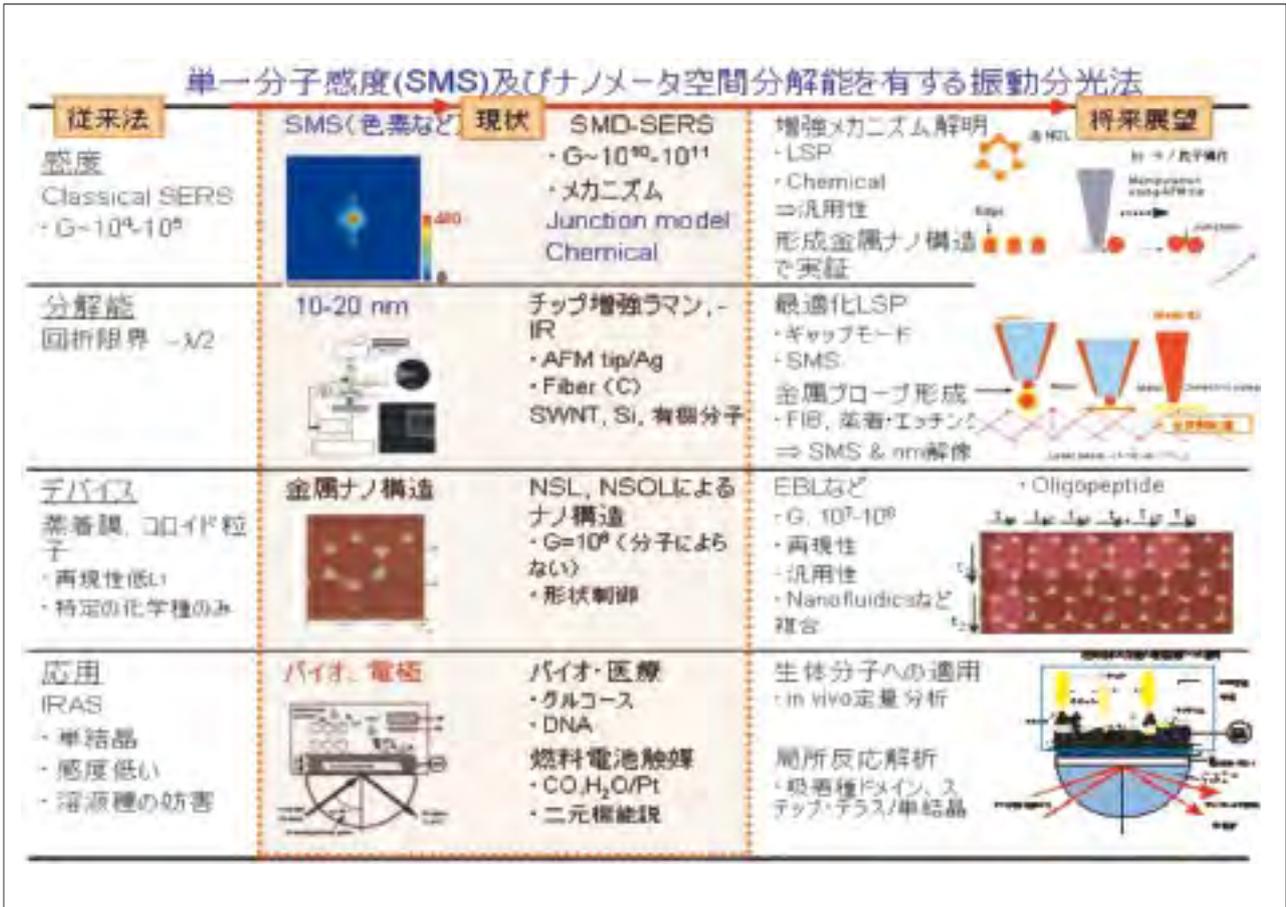


図2-5 単一分子感度 (SMS) 及びナノメータ空間分解能を有する振動分光法

2.6 コメント 3/渡部俊太郎 (東京大学 物性研究所 副所長・教授)

アト (10^{-18}) 秒パルスとナノ計測について述べる。光パルスの時間幅は光の周波数で振動する電場の包絡線の二乗 (光強度) の幅で定義する。研究の進歩により最近、包絡線のピークと振動電場のピークの位相差を自由に制御することが可能となった。現在まで多様な手法により超短パルス化がなされ、可視域まで 1 サイクルに近づいている。更なる短パルス化のためにはより波長の短い光を使用する必要があるため、電子の歪んだ振動が出す高次高調波の研究がなされている。8 フェムト (10^{-15}) 秒程度のレーザーを用いて原子を急激に励起することによりアト秒パルスが出るようになった (図 2-6)。

「ナノ計測」検討会
 第一部 ナノサイエンス領域におけるナノ計測
 第二部 情報通信エレクトロニクス領域におけるナノ計測
 第三部 医療・ライフサイエンス領域におけるナノ計測
 第四部 空環境エネルギー領域におけるナノ計測
 第五部 全体討論

まとめ

Appendix

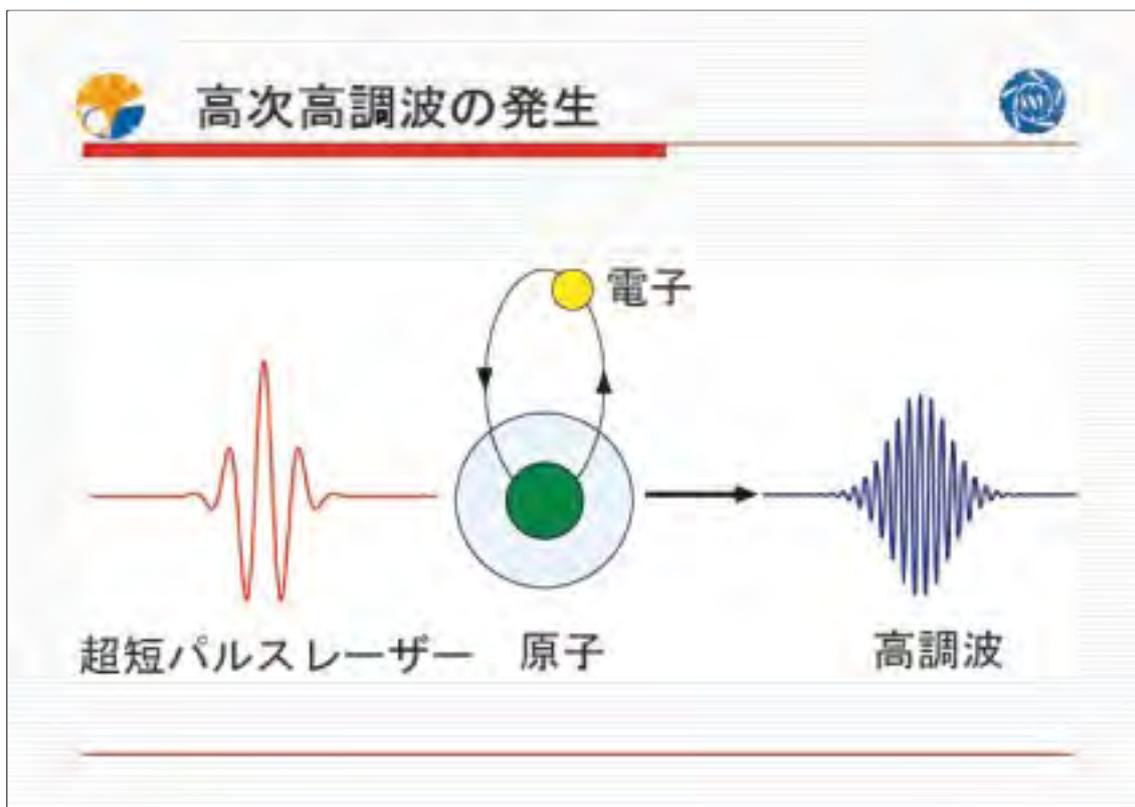


図 2-6 高調波発生

計測は通常マイケルソン干渉計に非線形素子を置いて計測する。だが X 線領域では非線形素子がないため、光子を 2 個吸収することで 1 個の電子が出る 2 光子イオン化を使う。電子の数を計測しながらディレイを変化させパルス計測する。最近では 1 フェムト秒を切る領域でのパルス幅計測が可能になってきた。スペクトル分解で位相も決めることが可能になってきている。世界的には現在 100 アト秒のパルスを目指した研究がある。

原子からトンネルイオン化で電子が飛び出しそれがイオン核と再結合する際の光が高調波となるため、この現象はナノスケールの領域の現象であるといえる。この現象を利用し分子の電子軌道の決定や飛び出し、再び戻ってきた電子と分子の量子干渉に関する研究などがなされている。

アト秒パルスを用いたナノ計測という点では、時間差トモグラフィでは困難である。干渉法やホログラフィ法が実現すれば大画面ナノ計測の可能性はある。

2.7 第 1 部討論

〈サンプルプレパレーション等の重要性〉

- ・ 計測技術とともに重要なのがサンプルプレパレーションである。計測技術のプロトコルをユーザーフレンドリーにしておくことが重要である。ナノ構造を厳密に作るものがナノ計測を活用するための条件となる。
- ・ ナノ材料は材料の組み合わせにより妙味が出てくる系が多数ある。サンプルプレパレーションは今後取り組んでいくべき問題である。
- ・ 機構解明に興味がある者として要素還元的な系から複雑な系へと進む方向性とは逆行す

る考えをもっている。現在純度の高い単純な系を作ることに腐心している。STM では、観察できる部分は表面であるため興味深い現象が表面に発生する条件を作らなければならない。

- ・有機分野の観点から溶解性などに注意をすれば、通常の有機化学と同様に、相当に大きな分子を扱うことができると考えている。
- ・金属ナノ粒子を膜還元せずを使用すると、表面に原料が吸着しターゲット分子の吸着を妨げる場合がある。金属ナノ粒子をハロゲン化物で覆い静電気の相互作用で干渉性の色素を付けたり、有機分子の CO 系の鎖を成長させてターゲット分子をトラップさせる等の方法をとっている。
- ・産業の現場で用いる計測ではサンプルプレパレーションを誰がどのように管理するかが重要である。測りたい対象はすでに決まっている場合、情報を抽出することのできる試料をいかに用意するかが求められる。

〈材料の単離と計測〉

- ・ソフトマテリアル合成に関連して分子量を決定したうえでポルフィリンを作成する技術は、計測に直接的にフィードバックすることができる。単離された物質の生成が可能となれば、その物質を原子間力顕微鏡や走査型トンネル顕微鏡等のバリデーションに利用することも可能である。

〈リファレンスの構築〉

- ・医薬品等の開発では物性のどの部分が体に効果的であるかは推量に基づいている。そのような物質を分光法で処理した場合、想定していなかった元素が計測したい元素の妨げとなる場合もある。計測や材料物性の注意点を示したリファレンスがあると非常に有効である。

〈分野横断的コミュニケーション〉

- ・研究者間での分野横断的な交流やコミュニケーションの場が乏しい。
- ・産業側で使用するデバイスはクリーンではない環境下で使われるため、例えば STM を産業側の現場で使用するにも困難が伴う。サイエンスと産業ニーズの間にある溝を埋めなければならない。クリーンでない環境に適用できるような技術を実現化し、双方の橋渡しをしていきたい。サイエンス側がデバイスの開発に関して、どのような取り組みをして、その結果をどのように応用に活用するかを表明することが重要になる。産業ニーズの要件に耳を傾けつつも、サイエンスとしての立場を失わないで研究開発を進めていくことが課題である。
- ・サンプルプレパレーションでは複雑なサンプル自体を使用するのではなく、そのサンプル内の要素をチップ上などに再構成し、モデル系を使用することが重要となる。計測技術の分野が、1分子から計測が可能な状況まで近づき、サンプルの分野が、サンプルの簡

素化により計測が可能な状況まで近づくといい双方の歩み寄りが、ナノ計測における着地点となる。

- ・例えば STM 等の計測装置を設計する場合、機械の加工法や機構を考慮しなければならない。ところが背景的知識がないと、どのように設計をし、どのような材料を使用したらよいのかが判然としなくなる。計測装置の加工技術者と設計者との間の有機的なつながりがあるとよい。
- ・研究開発戦略センターでは設備の共同利用のありかたを、多様な角度から議論している。日本は、米国、韓国、台湾におけるナノテクノロジー分野全体の国家投資と比較して、コア資金やインフラへの投資比率が大変に低い。効率よく運営できる共同利用施設の形成は、不可避なものになると認識している。
- ・文部科学省のナノテクノロジー総合支援プログラムにおいては、各拠点の施設利用者に関する情報が共有されていない。情報の共有性がより向上すれば、大きな成果が実現する点も多い。本プログラムへのプロポーザルは、利用者希望者の考えるテーマで分野を括るのではなく、研究の最終目的や各手法を選択したときの運用面等の観点から検討されるべきものである。コーディネータ的役割が必要となる。「質」が問われる研究と「量」が問われる研究では、計測分野の研究者は前者に傾倒する傾向がある。研究者は計測メーカーに対して、希望する装置の機能を仔細に説明しなければならない。施設利用者の間でもコミュニケーションが不足している。各計測手法の専門家が専門の手法に傾倒しすぎるあまり、課題をもっている側の解決アプローチを制限してしまうことがある。

〈対象内部の観察〉

- ・バイオ分野における細胞内のたんぱく質の形成過程等は奥深いものがある。その部分で何が起きているかを見極められる計測法が実現すれば、大きな進歩である。バリスティック・エレクトロン・エミッション・マイクロスコプ (BEEM, Ballistic Electron Emission Microscopy) は、対象の内部を計測することが可能な装置である。分解能や原子スケールの情報をどこまで得られるかに関しては問題点が残る。
- ・STM は、基本的にはすべての情報を原子スケールで得ることが可能な技術である。しかし表面の影響が大きく、内部の状況を観察することができないというのが現状である。サンプルプレパレーションにおいて、内部の情報を得ることが可能な試料を作るという点と、計測した情報から必要な情報だけを抽出するという点が重要になる。

〈研究開発の試作レベルでの問題〉

- ・欧米やロシアでは研究所で一括して試料を作成できるようなシステムがあるが、日本の大学等ではその点が弱い。研究開発の試作レベルにおいて問題点があるように思われる。
- ・大学内の技官は最先端の技術を保有しているわけではないために、仕事の依頼の仕方が難しい。JST には大学の枠を超えたマシン・ショップ的な施設を開設してもらい、その施設に研究者からの高い要求に応じることのできる、匠の技をもった人材を確保しても

らえたらと思う。設備投資をしなくても街の工場の活用等が可能である。中小企業等が自社の得意技術を JST に登録し、ネットワークを形成するといった方法も考えられる。日本の中小企業の強みを、最先端分野に取り込めることができれば良い。

〈ブレークスルー的技術〉

- ・ ナノサイエンス領域におけるナノ計測という観点から、ブレークスルーとなる技術として、阪大・森田清三教授らの能動的計測技術は成功例である。能動的な計測や、極限環境下での計測には今後もブレークスルーがある可能性がある。
- ・ 材料が成長している最中に計測する技術はブレークスルーである。工場における検査方法が発展したことが、現在の技術の支えである。理想的には 3 次元の対象やナノ構造を成長途中で、直接に内部を調べなくても観測できるような技術が実現するとよい。
- ・ 金属の合金化において、融解から固化の間どのような現象が表れるかを観察する要求がある。X 線回折をスキャンニングにより観察したが、観察可能な部分が制限される。また、溶接において固化するまでの 4 秒間程度、2 次元の読み取りをすると、中間層の部分を観察することができる。ただしこの分野は日本の得意分野ではない。まだ観察できない部分に対しては、ミリ秒以下や、サブミリ秒以下のレベルで観察することが可能な検出器を開発している。
- ・ 物性の機構を解明するために究極的な分光法が望まれる。中性子は電荷の励起に対して感度がないため、X 線非弾性散乱に非常に期待する。

〈AFM による観察技術の可能性〉

- ・ AFM が 3 次元的な影響力を及ぼす場合、複数のプローブを組み合わせれば、バルク内の 1 原子のみを重ね合わせて動かすことは可能になればよいが、容易ではない。
- ・ 複雑な対象を観察する場合、多様な機能を集積化して複数の視点から観察することが必要である。

3 第2部 情報・通信エレクトロニクス領域におけるナノ計測ニーズ

司会：金山敏彦（産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター 副研究センター長）

3.1 製造プロセス、その場検査ニーズ

/金山敏彦（産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター 副研究センター長）

現在のシリコン LSI（大規模集積回路、Large Scale Integration）技術の動向と、関連する計測技術の必要性に関して述べる。

LSI の内部構造は、シリコン・ウエハ表面に作製されたトランジスタから、電気信号を多層に張り巡らせた銅の配線に送る形になっている。したがって LSI の作成においては、シリコン・ウエハ表面にトランジスタを作製する技術と配線層の形成技術が重要となる。両者に共通してリソグラフィ技術が使用されている。

2005 年国際半導体技術ロードマップ（ITRS、International Technology Roadmap for Semiconductors）のビジョンによると、2007 年度は DRAM（Dynamic Random Access Memory）の配線のハーフピッチが 65 nm に突入する段階である。実際のデバイスの加工寸法は、高性能トランジスタのゲート長に見られるように 65 nm の半分以下となっている。この程度まで微細化が進むと原理的な限界が近づいているため、計測技術に対する要求がより一層高まる。

産業技術総合研究所 次世代半導体研究センターでは、従来の技術の連続性を保持したまま、シリコンあるいはシリコン化合物の材料限界を補完する新規の材料や構造を LSI に導入する研究を行っている。ナノレベルの構造に多種の材料を導入する研究では、バルク材料では予測できないような状況が発生するため正確な計測が要求されている。原子レベルで場所を特定し構造や物性を知ることが非常に重要である。

STM は優れた技術であるものの、過程や構造のフレンドリーさが要求される工学計測や電子部品計測には適当ではない。トランジスタの観察では、界面の状況、境界の粗さの状況、微細パターンの真中と端の部分の物性の変化状況、また内部の不純物の影響等を、デバイスの作成後に分析できるようになることが理想である。

透過電子顕微鏡を使用する場合、界面の深部を観察することが不可能であるため、薄片試料を切り出す必要がある。現在、非接触・非侵襲的方法としてラマン計測等に関心が寄せられている。

ドーパントの計測では、STM が 1 個のドーパント分子を観察する可能性をもっている。ただしプローブを対象に接近させて電圧をかけるために状態が乱れる。状態を乱さずに計測するには、計測シミュレーションを数多く用いて実験結果を比較するといった方法が必要である。同様に配線の中にボイドを導入する技術においても、非接触・非侵襲的な手法の必要性が高い。以上を考えると、ナノレベルの物性解析において単一の計測技術のみでは通用しないといえよう。複数の計測技術を組み合わせではじめて実際に使用可能な技術となる。複数の計測技術に通じる試料の標準化や計測法自体の標準化が必要となる。計測したデータから元の対象の状態を把握するためには、大規模なシミュレーションも必要と

なる。サンプルプレパレーションも重要となる。把握したい構造を類推するためのテスト構造を決定しておく必要がある。

統合的な計測技術に関して、日本の開発状況は惨憺たるもので機能していないといつてよい。基礎分野の研究者とデバイス開発の技術者の間にミスマッチがある。基礎分野の研究者はニーズへの知識や関心がない。目的が限定しすぎて興味がない。さらに、高度な成果を出していれば自然に使われる、といった誤解も見られる。一方デバイス開発の技術者は一般に、基礎研究者に期待をしていないし、未完成技術に寛容でない。強力なコーディネーションが不可欠となる。現在の競争的環境は、基礎分野の研究者とデバイス開発の技術者の連携協力を阻害しているのではないか。連携を促進するためのファンディングは工夫されているものの、形式的過ぎて新規の技術を育成する機能は果たしていない。こうした問題の改善に取り組む一例として、つくば半導体コンソーシアムでは「半導体計測・評価技術ネットワーク」を組織し、ニーズとシーズのマッチングを試みている (図 3-1)。

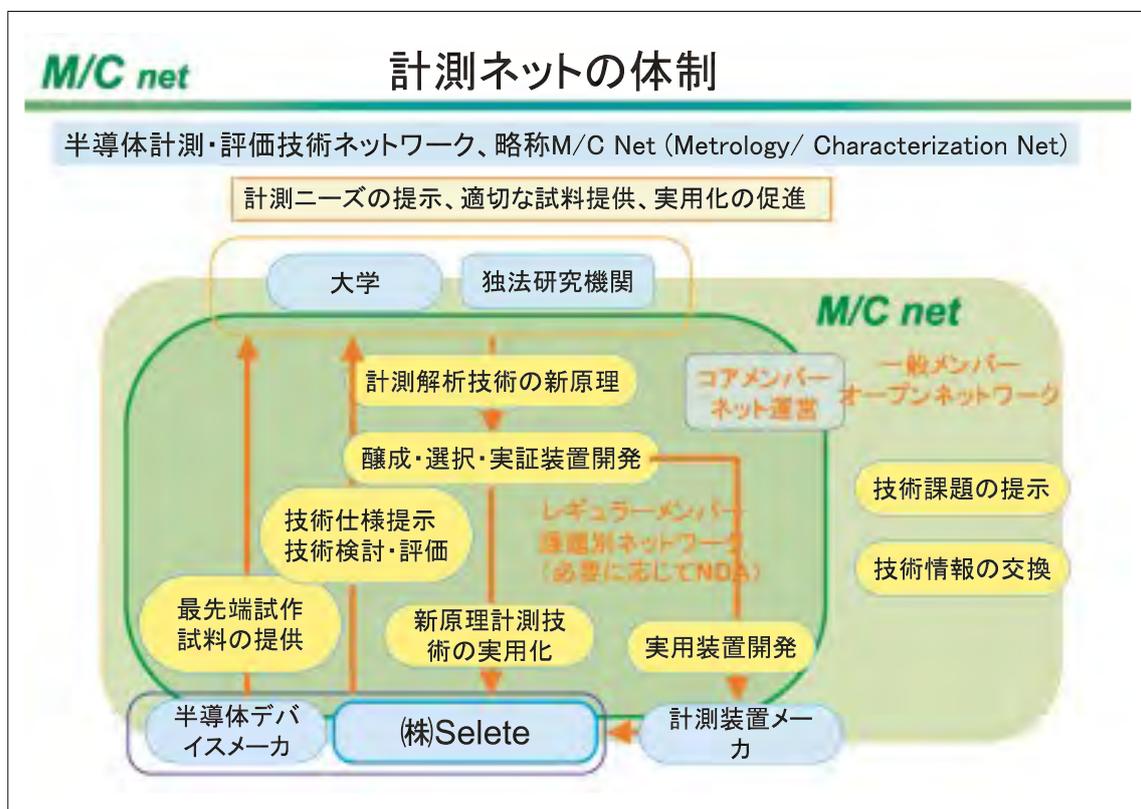


図 3-1 計測ネットの体制

3.2 Beyond CMOS/高柳英明 (東京理科大学 理学部応用物理学科 教授)

メゾスコピック超伝導の分野で超伝導体-半導体接合における量子輸送特性の研究をしている。この研究は超伝導体の間にカーボンナノチューブのネットワークを付けることによる、物性の観察技術等に発展している。こうした研究は静的研究の段階である。静的研究からダイナミクスに展開することを目指している。円偏波したフェムト (10^{-15}) 秒レーザーパルスにより半導体中に光誘起スピンを励起し、ジョセフソン効果やアンドレーエフ反射のダイナミクスを調べる。極低温にある試料の超伝導性測定では現在、1ナノ秒オー

ダーである。レーザーのパルスがフェムト秒オーダーであることから、極低温にある試料の1ピコ秒オーダーの電気パルス測定の実現化に期待して研究している。

量子コンピュータの分野に関しては超伝導磁束量子ビットの研究をしている。量子ビットの制御はマイクロ波のパルスを外部から照射することにより行う。したがって高速でマイクロ波を制御する技術が必要となる。量子ビットの研究における現在の最大の問題はコヒーレンス時間がマイクロ秒オーダーであり、非常に短い点である。現在の量子ビットのゲート制御はギガヘルツのオーダーであり今後1ピコ (10^{-12}) 秒オーダーのゲート制御が期待される。量子コンピュータ実現化への期待の有無に関わらず、高速のゲート操作は重要になるであろう。20 mK の極低温環境にある量子ビットと制御系との間の、超高速マイクロパルス制御技術が求められる。極低温にある試料の1ピコ秒オーダーの電気パルス測定も期待される。

スピントロニクス分野に関して磁性体を用いなくても、各量子ドット中の電子数が5/3となる状態を作れば、相互作用により強磁性が実現する。最近、量子ドット間のスピンの、フェルミ準位近傍の自由電子を用いて、RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 相互作用を利用し、二つの量子ドット間のスピンの非常に強い相互作用をもたせることも検討している。スピンの揃った際にその個々のスピンの励起しているかを観察したい。理想的には電子顕微鏡の「スピン版」が実現すれば画期的技術になるであろう。

量子暗号は現在、通信距離が100 km 程度であり速度は非常に低い。単一光子を検出するための検出器の性能向上が求められている。超伝導デバイスなどにより、速度を高くする装置が開発されれば、量子暗号は10年スケールで実用化されると考える(図3-2)。

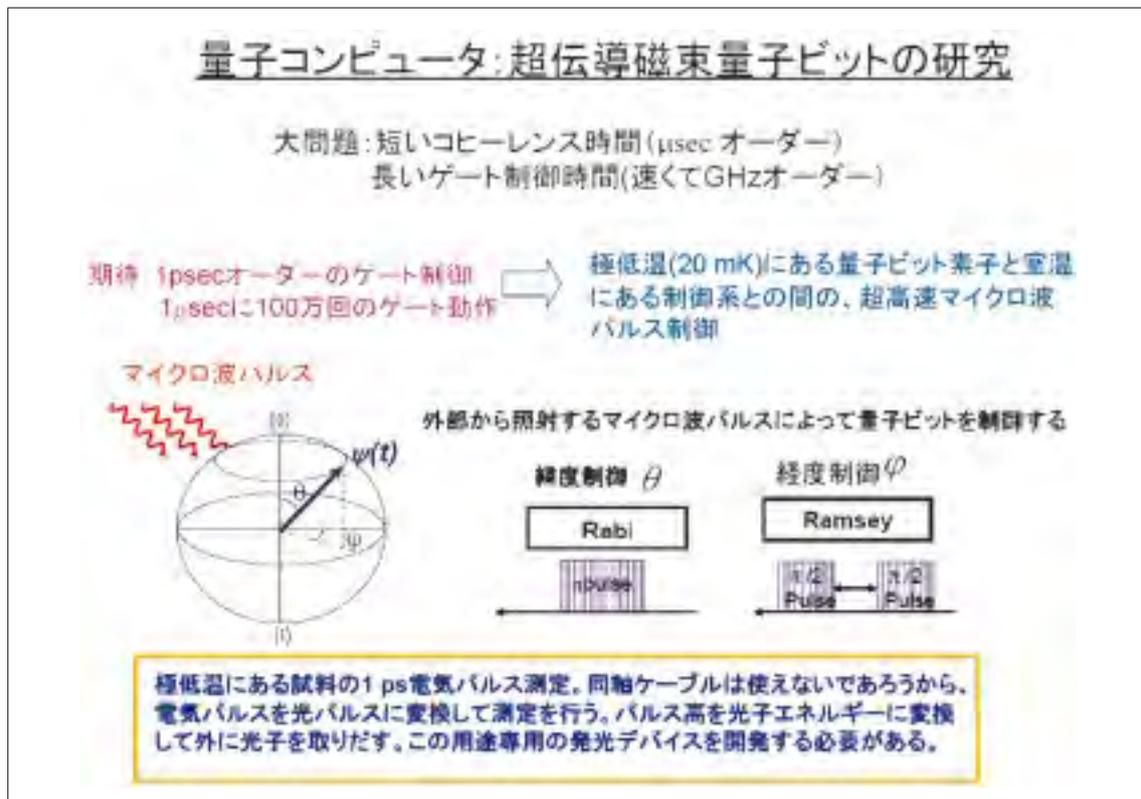


図 3-2 超伝導とスピンの関与したダイナミクス

3.3 有機エレクトロニクス/八瀬清志 (産業技術総合研究所 光技術研究部門 副研究部門長)

有機デバイスの現状をニーズ面中心に述べる。台湾のベンチャーが 25 インチの有機 EL (Electroluminescence) ディスプレイを、ソニーが 27 インチの有機 EL ディスプレイを開発している。すでに携帯音楽プレーヤーや携帯電話の小型ディスプレイとして有機 EL が実用されている。有機 EL は有機色素の極薄膜に電荷を注入することにより発光するものである。液晶ディスプレイの場合、数 mm の厚さが必要となるのに対し有機 EL ディスプレイは全体の厚さで 0.2 mm しか必要としない。白黒のトナーを電場で反転させて表示させる、電気泳動方式の表示技術も開発が進められている。この方式ではメモリ性があり消費電力量も少ない。プラスチック基板上に有機トランジスタを並べ画素を制御することによりフレキシブルな電子ペーパーが実現する。半導体や電極材料を可溶性のインクにすることで、インクジェット方式などを使った印刷法が研究されている。3~5 年以内に市場に出すことを目標としている。

有機 EL ディスプレイや電子ペーパーを効率よく生産するためには、評価システムの確立が重要となる。具体的には、有機の半導体材料がディスプレイなどの駆動回路中で実際に機能するかが今後重要となる。

個々の有機分子には HOMO (最高占有分子軌道)、LUMO (最低非占有分子軌道) と呼ばれる電子状態が存在する。分子中に局在する電子の状態が、材料の物性を様々な面で支配する。一方で有機 EL やトランジスタでは、分子を集合させた凝集物として捉えるので分子の集合状態が重要となる。固体物理学でいう伝導体や価電子帯を用いて議論することも可能であるが、上記の HOMO-LUMO と整合性よく理解するには、有機エレクトロニクスとも言うべき新しい学問体系の確立が必要である。

有機デバイスを計測する装置として、透過型電子顕微鏡について述べたい。無機半導体デバイスでは、超高分解能電子顕微鏡を用いれば、Si や SiGe 等の個々の原子の観察が可能である。電子線ビームを 1 nm 程度まで絞り試料全体を走査することで、元素マッピングも可能である。有機材料では元素分析のために電子線ビームを絞ると、薄膜試料が溶けたり焼けたりしてしまう。そのため電子線を絞る手法ではなく、平行照射により像をとる手法が考えられる。構成元素が炭素である有機材料では、無機元素に比べて軽いいためコントラストが出ない。

透過型電子顕微鏡の機能の一つに電子線エネルギー損失スペクトル (EELS) がある (図 3-3)。グラファイトやカーボンナノチューブの π 結合を有する領域は 283~285 eV の間でサブ・ピークを示す。これらの材料がもつ sp^2 (π : パイ) 結合とダイヤモンドに代表される sp^3 (σ : シグマ) 結合と EEL スペクトルの差異を利用して、化学結合の状態の違いをイメージングすることが可能である。特定のエネルギーをもつ電子を使うことにより、コントラストをチューニングすることが可能である。空間分解能は、現状では 10 nm のスケールである。250~350 eV 周辺エネルギーをもつ電子の写真を 2 eV 毎に 50 枚程度撮影し、コンピュータ上で異なるエネルギーを有する画像を重ね投影することにより、所望の微細領域のスペクトルを示す方法もある (図 3-4)。

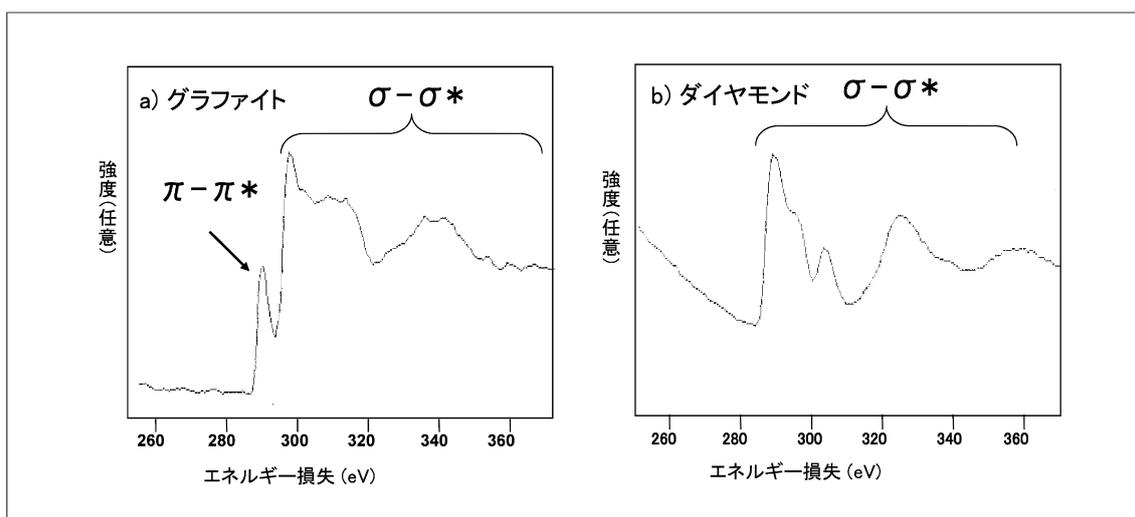


図3-3 グラファイトとダイヤモンドの電子線エネルギー損失スペクトル

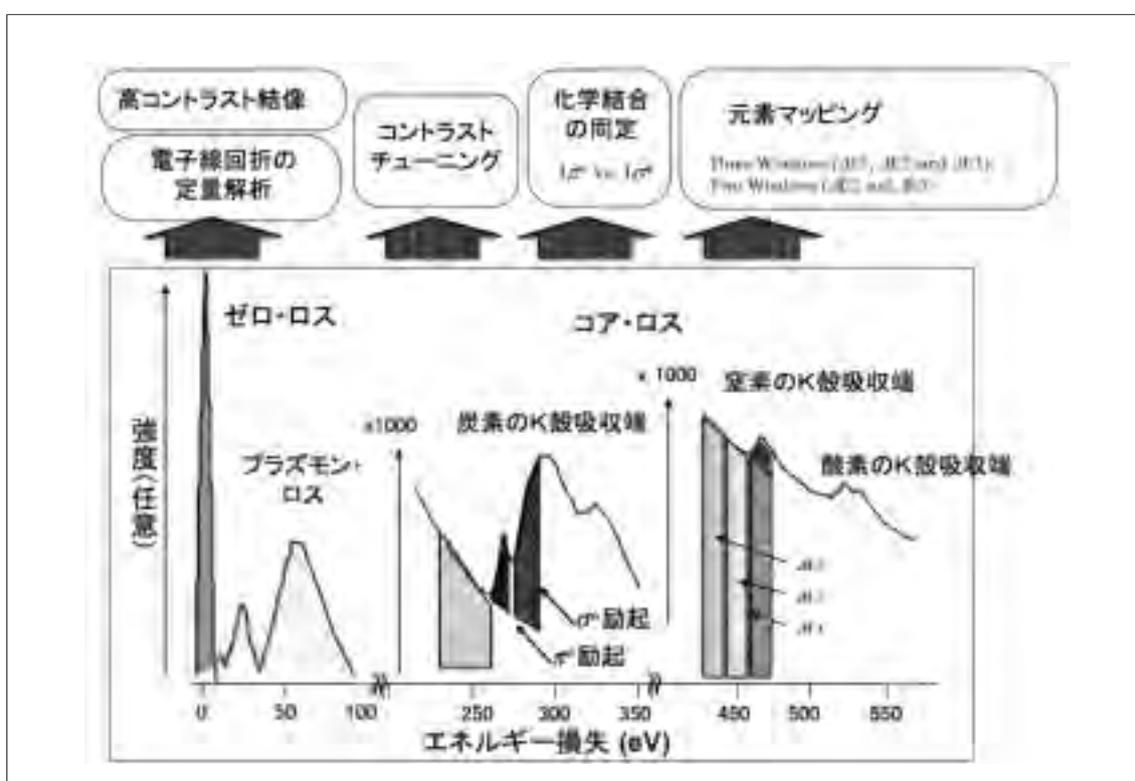


図 3-4 電子線エネルギー損失スペクトルと電子分光結像法

有機デバイスにおいては分子内に局在した電子の状態や分子間の相互作用が重要である。特に元素の酸化状態や配位数に依存して EEL スペクトルのピーク位置が変化する(ケミカルシフト)。この特定のエネルギーをもつ電子を用いて視覚化する電子分光型の電子顕微鏡、すなわち「ケミカル・マイクロスコプ」とも言うべき透過型顕微鏡の開発が望まれる。全く新しいイメージング装置が5~10年後に実現することを期待する。

3.4 コメント1/藤田大介(物質・材料研究機構 ナノ計測センター センター長)

物質・材料研究機構ナノ計測センター(NIMS、National Institute for Materials Science)では多種多様な顕微鏡を保有している。透過電子顕微鏡、走査型プローブ顕微

鏡、強磁場 NMR、表面電子分光法、超高速時間分解計測法などを用いて結晶、多結晶、アモルファス等の多岐にわたる表面、表層、内部の計測技術を研究している。ここでは主にナノ物質材料研究のためのナノプローブ計測に関して述べる。ナノ計測センターではナノ計測技術開発とともに、材料の開発等の「ナノ創製」と融合した計測技術の研究を行っている。また材料の機能を発現させるために強磁場、極高真空、極低温、高温、応力場といった極限環境下でのナノ計測を行っている。

半導体等に関連した測定の手法として 3 次元アトムプローブがある。電界蒸発という手法を用いて、表面から深部まで 3 次元の固体内部の原子組成分布を観察することができる。極低温 STM を用いて、Si (100) 表面に注入する電子またはホールエネルギーを制御することにより表面超構造を可逆的に制御することに世界で初めて成功し、STM による超構造のマニピュレーションが可能であることが明らかとなった。さらに Si (100) 表面に極低温 STM の探針を用いて原子を 1 個ずつ配列させる操作を行うことで、原子レベルの 1 次元量子井戸が実現している。

情報通信エレクトロニクス領域でのナノ計測では、ナノ創製プロセスと融合したナノ計測技術やナノ機能を発現させるために環境を変えて行うナノ計測技術等を、産業に応用していくことが課題としてある。ナノ計測技術の国際標準化の動向も進んでいる。最終的にはニーズとシーズのマッチングの機会の創出や、個別の産業応用に適したナノ計測技術の開発が必要であると考えられる (図 3-5)。

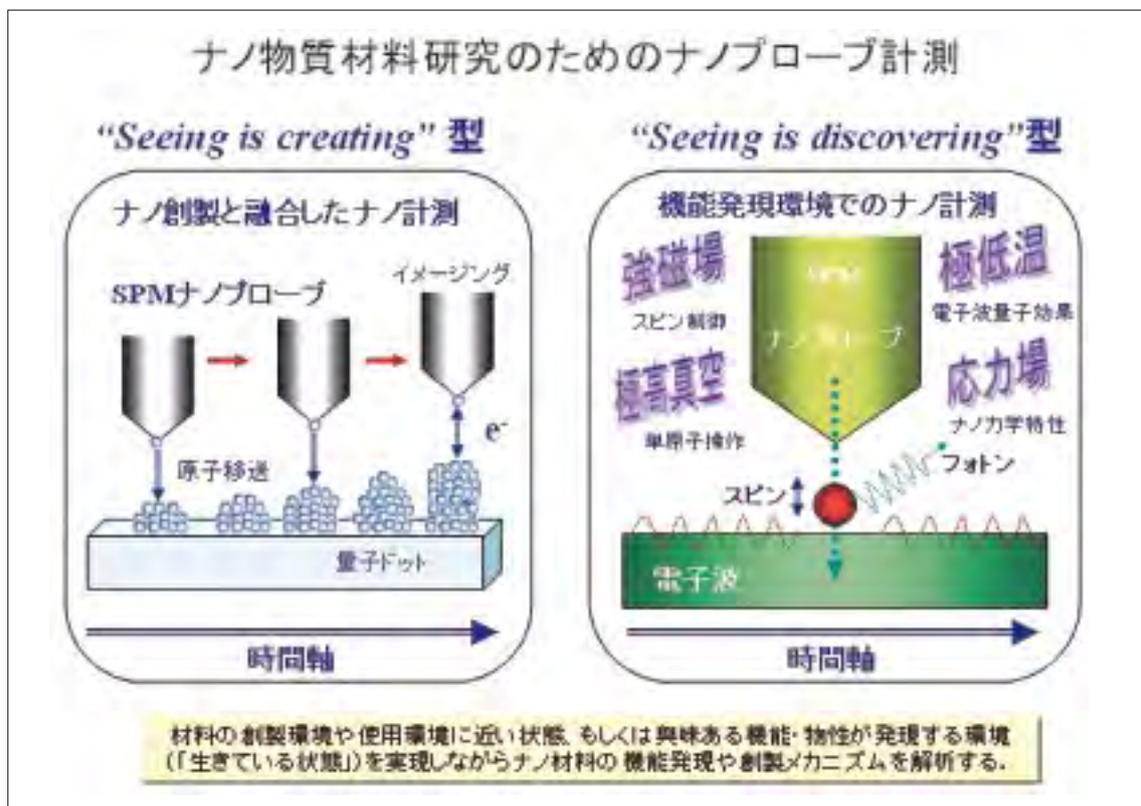


図 3-5 ナノ物質材料研究のためのナノプローブ計測

3.5 コメント 2/田島道夫 (宇宙航空研究開発機構 教授)

電子デバイスの基板として使用されているウエハ評価のためのフォトルミネッセンス法に関して紹介する。フォトルミネッセンス法は、半導体に励起光を照射し電子が再結合する際の光を解析し情報を得る方法である。intrinsic (固有) 発光からは物質の組成、キャリアライフタイムに関する情報を得ることができ、組成の同定や結晶性 (欠陥検出) を評価することが可能である。extrinsic 発光からは不純物、欠陥の電子状態、電子準位に関する情報を得ることができ、不純物・欠陥の同定や不純物・欠陥の半定量分析をすることが可能である。

評価法の特長としては高感度 (対象により ppt オーダー)、高空間分解 (μm スケール)、精密な同定を可能にするスペクトロスコピック分析、非破壊・非接触、試料の前処理不要、実験室規模の装置で行える点等が挙げられる。フォトルミネッセンス法の高感度性に関して世界最高純度のシリコンをフォトルミネッセンス法で計測した結果を示す。intrinsic 発光と extrinsic 発光を比較することにより定量分析が可能となる。1978 年に開発して以来、フォトルミネッセンス法は JIS 化や国際標準化がなされウエハ作製用高純度シリコンはすべてこの方法で計測されている (図 3-6)。

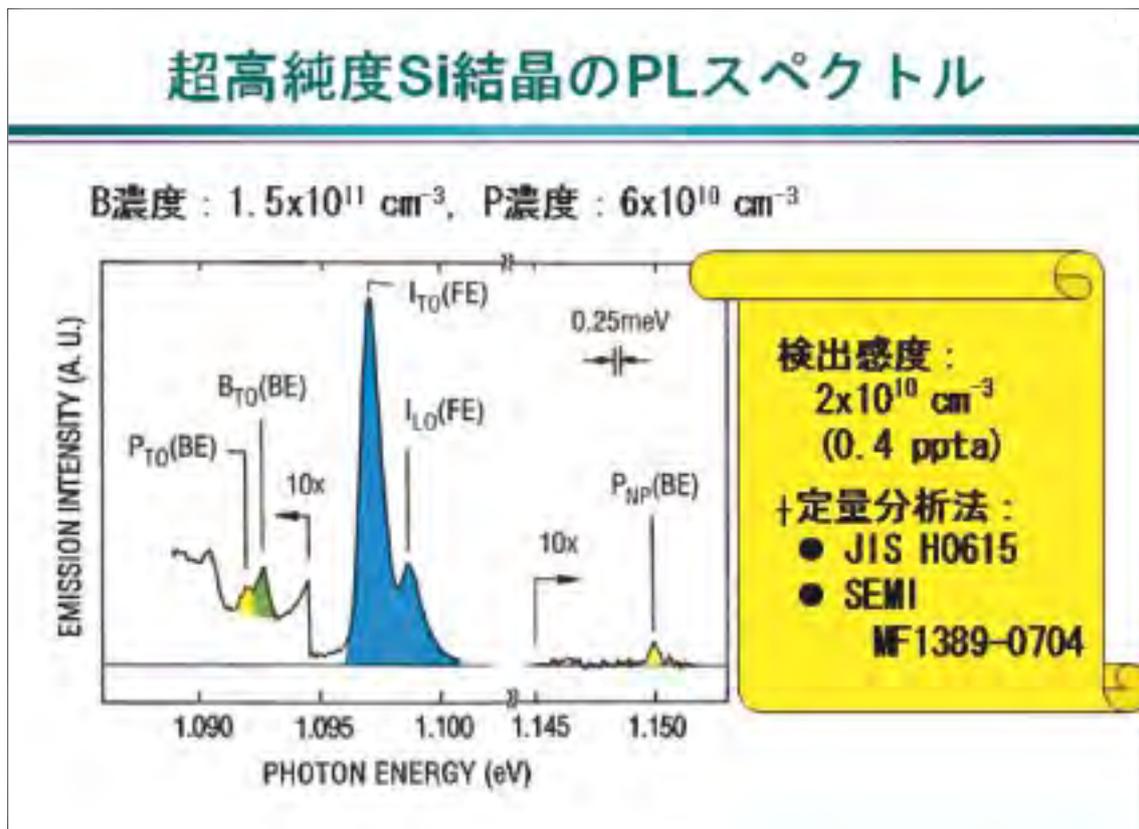


図 3-6 超高純度 Si 結晶の PL スペクトル

高空間分解性という特長に関して、シリコンカーバイド (SiC) のウエハをルミネッセンス法でマッピングすると従来のエッチング法に比べ遜色のない微細な欠陥分布情報を得ることができる。また紫外線を励起光として深さ方向の分解能を向上させることにより、次世代 LSI として期待される極薄 SOI (Silicon on Insulator) ウエハの欠陥を観察する

こと等が可能である。地上用太陽電池の約 60% を占める多結晶シリコン基板を、ルミネッセンス法を用いて短時間かつ高分解能で計測することが可能である。

3.6 コメント 3

/塚本史郎 (東京大学生産技術研究所 ナノエレクトロニクス連携研究センター 特任助教授)

東京大学ナノエレクトロニクス連携研究センターの荒川泰彦センター長のプロジェクトに参加し、量子ドットレーザーを目的とした研究をしている。量子ドットをレーザーに応用すると量子井戸を用いたレーザーよりも低消費電力、高温度動作、チャープ(搬送波の周波数が時間と共に増加、もしくは減少するパルス)が少なく高速になるといった利点が生まれる。量子井戸レーザーでは注入電流に対する光出力の値が温度により変化してしまう。温度制御装置が量子井戸レーザーの値段を上げている。量子ドットレーザーでは、温度による変化がほぼ見られない。簡便に使用できるという利点がある。量子井戸レーザーではチャープが約 15 GHz であり大きい。一方、量子ドットレーザーではほとんどチャープが生じない。長距離伝送が可能になるという利点がある。量子ドットレーザーの作製法は GaAs 上に InAs を載せ SK (Stranski-Krastanov) 成長という自己組織化成長法で、歪みに応じて 3 次元成長をさせる手法が主流である。実用化のためには、高均一性 (High Uniformity)、高密度性 (High Density)、また、波長 1.3 μm 、1.55 μm という高性能性が不可欠である。このような条件を満たすためには、量子ドット成長メカニズムを解明しなければ実用化は難しいと主張している。

RHEED (反射高速電子線回折、Reflection High Energy Electron Diffraction) は、量子井戸レーザーを大きく発展させる技術である。ただし、3 次元成長には不向きである。そこで STM を用いようとしたが、MBE (分子線エピタキシー、Molecular Beam Epitaxy) では、砒素ごみが多量に発生するため、相談した各研究者からは、STM が故障すると言われ実際に故障した。しかしながら幾多の改良を重ね、基板を加熱、インジウムと砒素を供給しながら、STM により原子レベル観察が可能な装置「STMBE (走査型トンネル顕微鏡/分子線エピタキシー装置、Scanning Tunneling Microscope/Molecular Beam Epitaxy)」を開発した。エピタキシャル成長過程、量子ドット成長初期過程の計測をすることが可能である。(図 3-7)

ニーズに合わせつつ非常識なことを行うとそれが日本発の「世界初」技術となる。現在、STMBE から論文化できるデータを得られる割合は数百回に 1 回である。非常によいデータが出る割合は数年に 1 回であり、改善していきたい。現在、この状態での STS の使用は極めて難しいが、改善していきたい。量子ドットの計測で主流の AFM でも、成長その場観察できればと考えている。さらに小型化した汎用性のある STMBE を開発して、様々な分野の様々な材料系に広く使われることが出来ればと考えている。

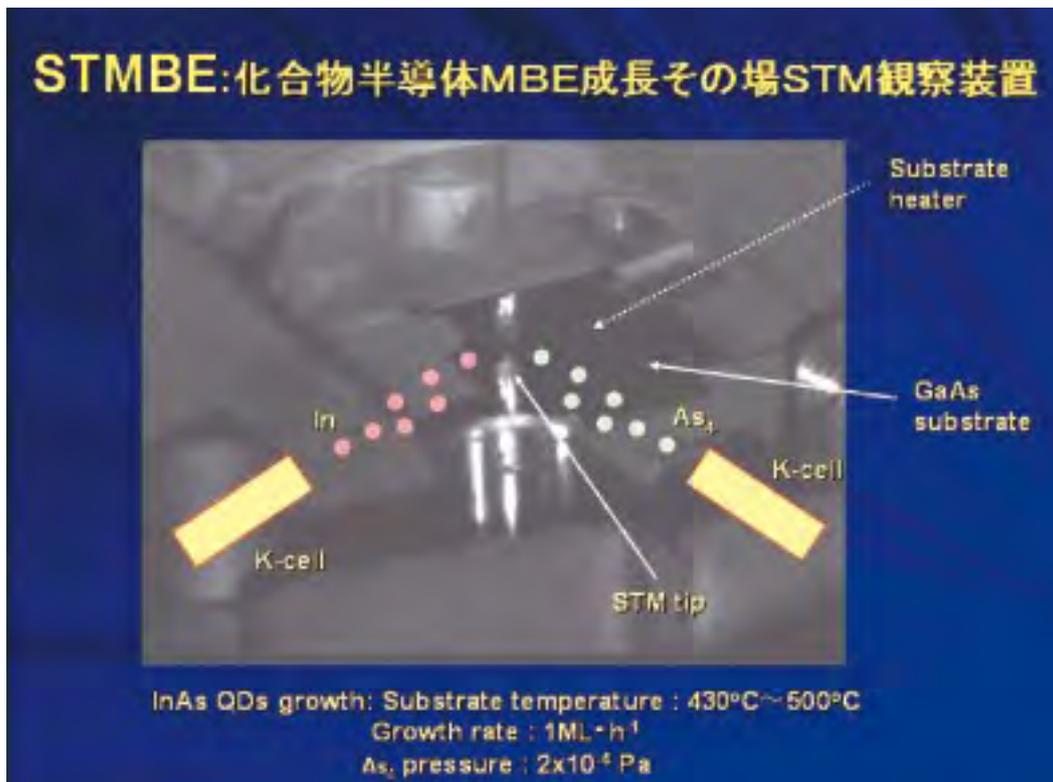


図 3-7 STMBE：化合物半導体 MBE 成長その場 STM 観察装置

3.7 第 2 部討論

〈スピン計測〉

- ・原子 1 個のスピン計測に関しては時間分解も含めリアルタイムの変化を観察したい。今後は超伝導分野でも磁性分野でも静的な観察からダイナミクスへと移行するので、リアルタイムに変化を観察することが重要である。スピン計測に関して時間分解能はマイクロ秒オーダーからミリ秒オーダー程度である。

〈低温環境下における高速計測技術〉

- ・低温環境で高速に計測するためには低温でも動作する増幅器の開発が必要である。高速なゲート操作にはマイクロ波技術が必要である。日本では一時期技術が進んでいたが、NTT のマイクロ通信撤退などの影響で開発を続けている企業・機関はほとんど残っていない。米国は軍が強力な技術をもっている。

〈故障解析ツール〉

- ・デバイス関連の計測には、デバイス開発のための計測装置、プロセスモニタリング装置、故障解析装置の 3 種の装置がある。中でも故障解析装置は非常に重要である。計測装置はほぼ米国製である。電気的な故障を測定する装置の技術は日本のメーカーもあるが、物理的な対象を計測する装置は米国の企業に席卷されている。故障を検出するための装置には光学顕微鏡の技術が適している。諸情報を処理するなどのため総合技術となるが技術の融合が欠如している。

〈局所クリーン環境対応の計測装置〉

- ・量産現場で使われる計測装置は局所クリーン環境対応が必須である。ウエハが計測装置に搬送され汚れた状態で返却される場合があると、プロセス技術者を最も落胆させることになる。計測技術本来の性能だけでなく関係する総合技術が問われるので、計測を専門とする研究者だけでは対応できず有用な技術を社会に出すための仕掛けを考える必要がある。一般的に AFM で対象に接触する技術は、製品量産の現場では使用しづらい。光散乱などの非接触技術が求められる。この場合にもシミュレーション等と複合させた技術が必要になる。

〈計測装置の開発〉

- ・ LSI 用シリコン分野の場合の例のように、米国の大企業は、計測のしくみが物理的には解明されなくても、粒子を検出する装置等を開発しデファクトスタンダード（事実上の標準）にする。
- ・日本のデバイスメーカーのプロセス技術者はなぜ測定が出来るのかが明確でない技術を利用しない。

〈微細構造解析評価技術〉

- ・微細構造解析評価技術は有機デバイスに限らず高分子をはじめとする構造解析において要求が高い。手法としては対象を像にしたい場合、原子レベルの分解能をもつ STM や AFM が有効である。高分子系材料は絶縁性があるため ATM が有効である。ポリスチレン等のプラスチック材料の場合、フォトルミネッセンス等の特徴がないために光学顕微鏡での観察は難しい。日本における電子顕微鏡の技術レベルは高いものがあるが、多くの研究者がシリコンや金属等の分野に移行した。

〈新規性のある研究への補助金〉

- ・開発の見通しが立たない研究にも研究資金が投じられないと新規性の高い技術は創出されない。先端機器装置はデバイス1個のコストが高額である。故障しやすい環境下でせざるを得ない研究では莫大なコストがかかる。
- ・ JST の先端計測分析技術・機器開発事業には、機器開発プログラムと要素技術プログラムがある。後者は新規性のある独創的な要素技術の開発を目的としている。
- ・完全に新規性のある開発の場合、補助金としては科学研究費補助金（科研費）が該当すると考える。科研費の問題点は選考委員の器量に左右される場合があるという点にある。科研費の審査員を大御所的人物が行い、採用決定後の行程は科学技術振興機構で引き継ぐといった形式が望ましいと考えている。
- ・ JST はトップダウンで戦略をもってファンディングする形式が主流である。戦略的創造研究推進事業「さきがけ」にはリスクがあっても興味ある研究を推進する目的がある。国立大学や国立研究所は、独立行政法人化されトップマネジメントの判断で運転資金を

確保することも可能となった。様々な方法を考えて研究費を確保するべきである。

- ・萌芽的研究では 100～200 万円単位の少額の補助金であっても積極的に申請するべきである。

〈ニーズとシーズの溝〉

- ・ニーズとシーズの溝は大きい。計測分野ではシーズ側とニーズ側が共同で申請する必要のあるプログラム制度がある。共同申請の場合、可能性は未知ながら育成すべき研究開発に対してもシーズ側とニーズ側の双方にある程度の責任がかかるため、ニーズ側は共同研究に積極的でなくなる。ニーズに合うシーズを育成する方法を考えなければならぬ。制度的なバックアップ体制があればニーズとシーズのマッチングは促進されるのではないか。米国ではベンチャーがその機能を担う。

〈フォトルミネッセンス法の国際標準化〉

- ・フォトルミネッセンス法の国際標準化に関しては例外的に成功したものだと考えている。シーズ側がニーズ側と常時、情報交換を行いつつ技術を育成した。
- ・研究当初はシリコンでの計測は不可能と言われ信用されなかった。標準化に関しては JEITA (電子情報技術産業協会、Japan Electronics and Information Technology Industries Association) と共同して活動を展開した。半導体メーカーが適したサンプルを用意してくれた。しかしながら現在の日本の半導体メーカーは非協力的になってしまった。経済産業省のプロジェクトとの関連では、通商産業省 (現・経済産業省) の「超 LSI 技術研究組合」が別の分野ではファンディングの面で助かった。「光関係研究開発プロジェクト」では GaAs 結晶の開発ができた。大きな支援であった。

4 第3部 医療・ライフサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ

司会：竹山春子（東京農工大学大学院 共生科学技術研究院 生命機能科学部門 教授）

4.1 医療・予防/北野滋彦（東京女子医科大学 糖尿病センター 教授）

生活習慣病について述べる。生活習慣病には、肥満症、高血圧、糖尿病、高脂血症などが挙げられる。メタボリックシンドロームとは、内臓脂肪の蓄積によりインスリン抵抗性（インスリンの働きの低下）が起こり、糖代謝異常（耐糖能異常、糖尿病）、脂質代謝異常（高中性脂肪血症、低 HDL コレステロール血症）、高血圧などの動脈硬化の危険因子が、一個人に集積している状態である。血清脂質、血糖値、血圧が高い場合、それぞれ高脂血症、糖尿病、高血圧と診断されるが、たとえ一つひとつの危険因子の程度が軽くても、重複して存在すると心筋梗塞や、狭心症、脳梗塞、閉塞性動脈硬化症といった動脈硬化性疾患の発症が相乗的に増加するので、強力な危険因子として近年、世界的に注目されている。年に一度は健康診断を受けることが大切である。

生活習慣病のひとつに糖尿病があり、糖尿病の合併症に糖尿病網膜症がある。糖尿病網膜症は、後天的な視覚障害の主な原因となっている。厚生労働省難治性疾患克服研究事業の網膜脈絡膜・視神経萎縮症に関する研究平成 17 年度研究報告書では、1 年間に抽出された視覚障害新規認定者は 2034 名で、全国新規交付総数に対する比率は 12.4% であった。この調査において視覚障害の主要原因疾患は緑内障が 20.7%、糖尿病網膜症が 19.0%、網膜色素変性症が 13.7% であった。糖尿病網膜症で社会生活に支障を来すような視覚障害を発症している人は国内で年間 3 千人に及ぶ。1965 年以来、増殖網膜症の累積罹患率は減少傾向にある。内科的な診療の進歩と眼科的な治療の進歩が理由として挙げられる。しかしながら糖尿病により眼の合併症をもつ患者は後を絶たず、対策が必要である。糖尿病網膜症では、単純、前増殖、増殖という過程を経て、眼球の中に大出血が起き、極端な視力低下が生じる。視力低下までの段階で患者の自覚症状がないため、早期の発見が課題となる。早期に発見し、定期的な眼底の管理をすれば 90% の割合で視力障害を防ぐことが可能とされる。厚生労働省の調査では、国内の糖尿病患者は“予備群”を含めると 1620 万人にのぼる。このうち 38% がすでに網膜症を発症している。糖尿病網膜症の早期診断のため、眼科医や内科医が糖尿病患者のすべてを定期的に診断するのは難しい。そのため眼をコンピュータで自動的に診断する装置が開発されている。視神経乳頭をくりぬき、血管以外の部分で生じている赤や白の斑点（糖尿病の所見）の有無を診断する。眼科医が診断した場合の約 80% の割合で診断結果が合致する。

生活習慣病では高血圧もある。高血圧になると網膜に出血し失明に至る場合がある。動脈の太さを A とし静脈の太さを V とすると、眼底の A と V の比率で高血圧の程度がわかる。また、動脈硬化も眼底の所見により判定することが可能である。自動的に高血圧や動脈硬化の所見の有無を機械で診断させる技術が開発されている。メタボリックシンドロームは予防が大切であり患者への啓蒙が重要である。自覚症状がなくメルクマール（指標）として眼底所見が参考となる（図 4-1）。

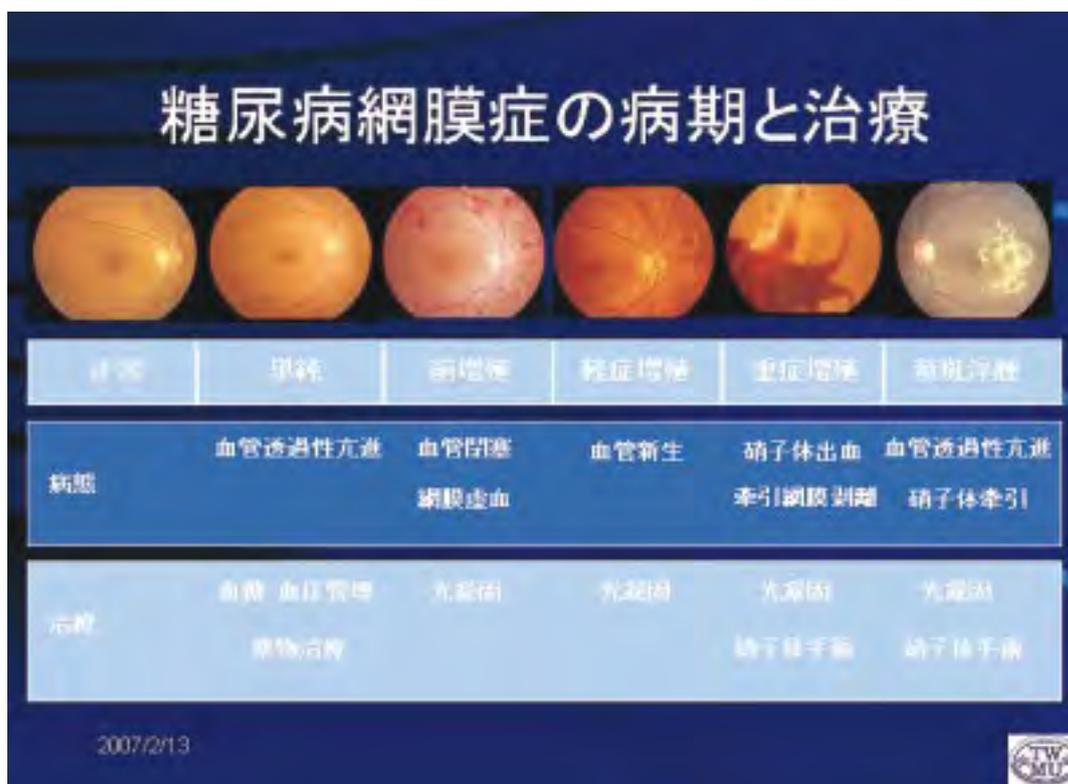


図 4-1 糖尿病網膜症の病期と治療

4.2 非侵襲・その場の検診、多種検査

/竹山春子（東京農工大学大学院 共生科学技術研究院 生命機能科学部門 教授）

ライフサイエンス分野では多種の解析手法が開発されている。生体内の種々の変化を的確に診断・解析することが用途の一つである。バイオ計測では多数の細胞を対象として平均的データ取得することから、個々の細胞をターゲットとした計測へと移行しつつある。2000年初頭頃から、単一細胞レベルでの計測の必要性が強調されてきており、医学、生物学以外に化学分野からも提案が出されている。たとえば mRNA の挙動を調べるのに現在 DNA マイクアレイが用いられているが、その定量性の低さや細胞の平均値として情報が得られることから、個々の細胞での変化を見ることができないという指摘がある。その中で単一細胞において個々の mRNA カウンティングによる解析技術の開発も進んでいる。さらには個々の細胞を観察しつつ、隣の細胞との関係性や組織としての挙動を観察する手法も研究されている。このように分子をデジタルカウントするという技術が進展するためには、要素技術の一つとして、分子レベルで認識や可視化さらにはターゲットを同定する技術が必要である。国内でもこのような研究が着手されはじめている。異分野の研究者間のネットワークを作り新規技術を早期に確立し、その技術を対外的に広めていくための戦略に着手しなければならない段階にある。このような背景のなかで、ナノ計測を積極的に利用したバイオ分野の発展はまだまだこれからである。しかしながらプローブ技術、チップ技術、ナノ粒子技術等の計測技術は、疾病治療、QOL (Quality Of Life) や予防医学の分野で利用されるようになるであろう。

計測方法は対象が生体なのか血液など採集したものや細胞なのかによって異なってくる。

さらに侵襲と非侵襲的アプローチがあるが、非侵襲の場合様々な可視化が重要となる。生体に影響のない各種プローブの開発が肝要となる。光をはじめとしていくつかの方法が考えられているが、光プローブはこれから有効な手段となるであろう。細胞を用いた基礎研究では、細胞内に化学プローブを取り込ませタンパクなどのターゲット分子と結合させ変化を蛍光により観察することによって、細胞レベルでのリアルモニタリングを非侵襲で行う技術が開発されている。またリン酸化タンパクを細胞内シグナルとして、細胞内動態を観察する技術等も開発されている。まだまだ多くの可視化のツールが出てきている。

ナノ粒子を用いた技術のなかで、微生物が合成する、磁性をもった 50~100 nm 程度の粒子の研究を行っている。人工磁気微粒子と異なり分散性も良く、粒子の表面が脂質二重膜で覆われ様々な生体分子を容易にアセンブルすることができる。遺伝子組み換え技術を用いれば、膜タンパク質である GPCR などのアセンブルも可能でありリガンドのスクリーニング等が可能となる。現在このナノ磁気粒子を用いて単一細胞からの mRNA のデジタルカウントの手法を開発中である。

医療分野での大きな目標は体外診断においても体内診断においても迅速さである。それらを踏まえ先進医療的な技術を取り入れながら、セルフケアや臨床での診断等におけるニーズに合わせた技術の確立が必要となる。この分野では実用化を考えるのであれば産業界の役割は大きい。現状ではコストと数年先の市場規模が開発研究に大きく影響を及ぼしておりまだまだ成功例が少ない。一企業による研究開発はリスクが大きい。国からの支援が重要となっている。さらに産業界とアカデミアの双方がバイオ計測には必要であるという構造を理解した上で、多種多様な業種の人材を取り込み研究開発することが重要である(図 4-2)。

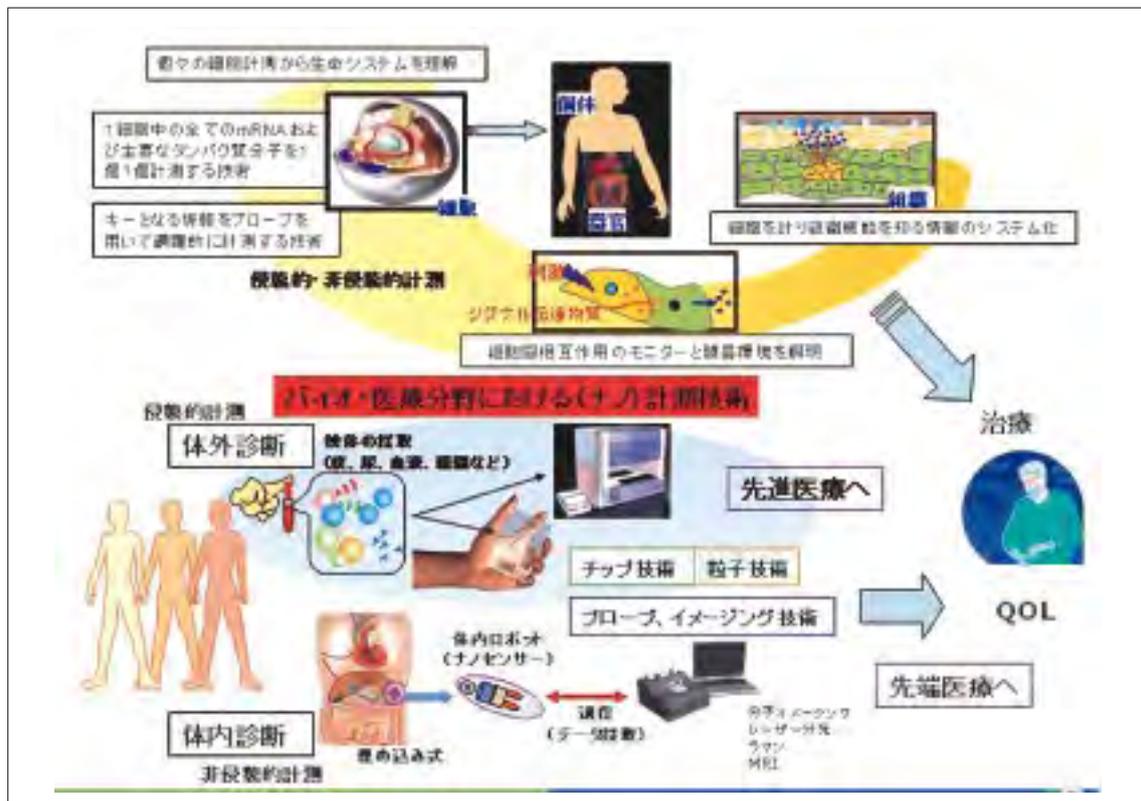


図 4-2 バイオ・医療分野における(ナノ)計測技術

4.3 生体内ナノ粒子 (安全性も含む)/阿多誠文 (産業技術総合研究所 総括主幹)

生体内ナノ粒子との関連で EHS (Environmental, Health and Safety Issues) と計測ニーズについて述べる。

2005 (平成 17) 年度科学技術振興調整費プロジェクト「ナノテクノロジーの社会受容促進に関する調査研究」では、ナノ粒子の物質特性やリスク評価を公的研究機関が進めるべき最優先課題でありデータの蓄積を行った上で法律等の整備、産業化戦略、倫理・教育面の社会的ニーズに反映させるべきであるという趣旨の提言を行った。内閣府総合科学技術会議が纏め 2006 年度 4 月に施行された 2010 年度までの第 3 期科学技術基本計画およびナノテクノロジー・材料分野戦略には、「ナノテクノロジーの責任ある研究開発」という文言とともに、各省庁が取り組む社会的影響に関する具体的課題が盛り込まれた (図 4-3)。

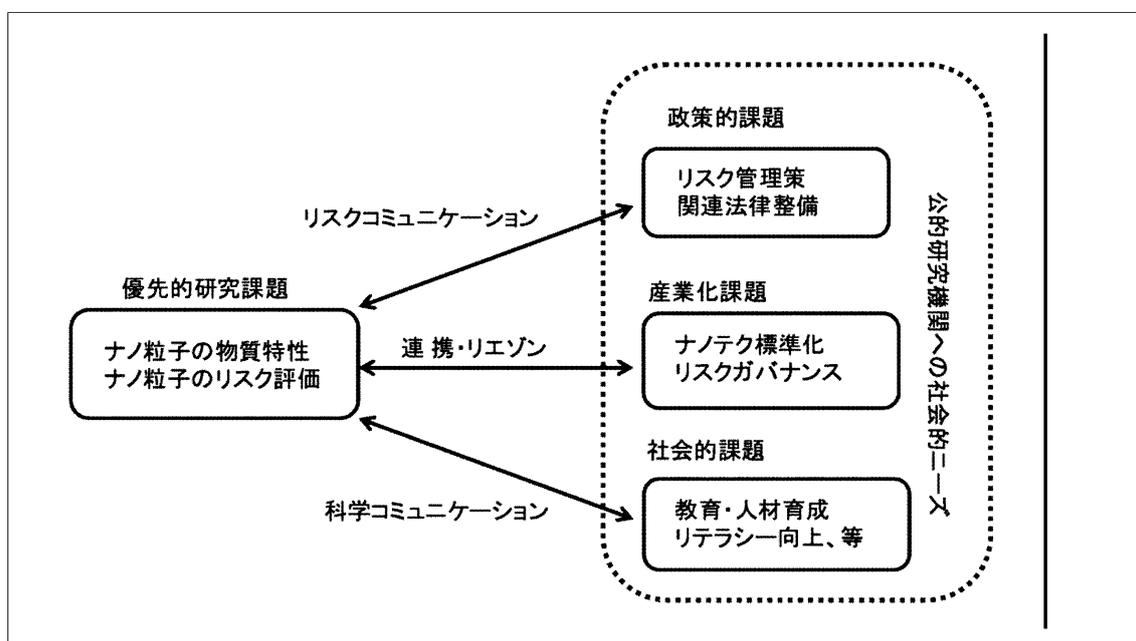


図 4-3 平成17年度科学技術振興調整費プロジェクト「ナノテクノロジーの社会受容促進に関する調査研究」が提言した公的研究機関が進めるべき優先的課題とその社会ニーズ

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) は 2006 (平成 18) 年度からの新規研究開発プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」を支援、中西準子 PJ リーダーを中心にナノ粒子のリスク管理策の策定に向けたリスク評価研究が進められている。言うまでもなくナノテクノロジーの主要な課題はコア技術の研究開発であるが、コア技術の研究開発と並行して社会的影響に関する研究を進めていく。このような新しい研究開発の方法論を実行するには包括的な研究開発戦略が必要である。また強力なコーディネーションがないと、両者が並行に進展しない。社会の必要性という視点から研究等を進めていこうという姿勢が、JST からも提言されている点は良いことである (図 4-4)。

ナノ粒子の生体や環境影響への懸念に関して述べる。2006 年以降新聞紙上や書籍等で、「ナノ粒子の安全基準が確立され、安全が確認されるまでナノ粒子の環境中への放出及びナノ製品が市場に出回るのを一時的にやめるなどを検討すべきである」という趣旨の意

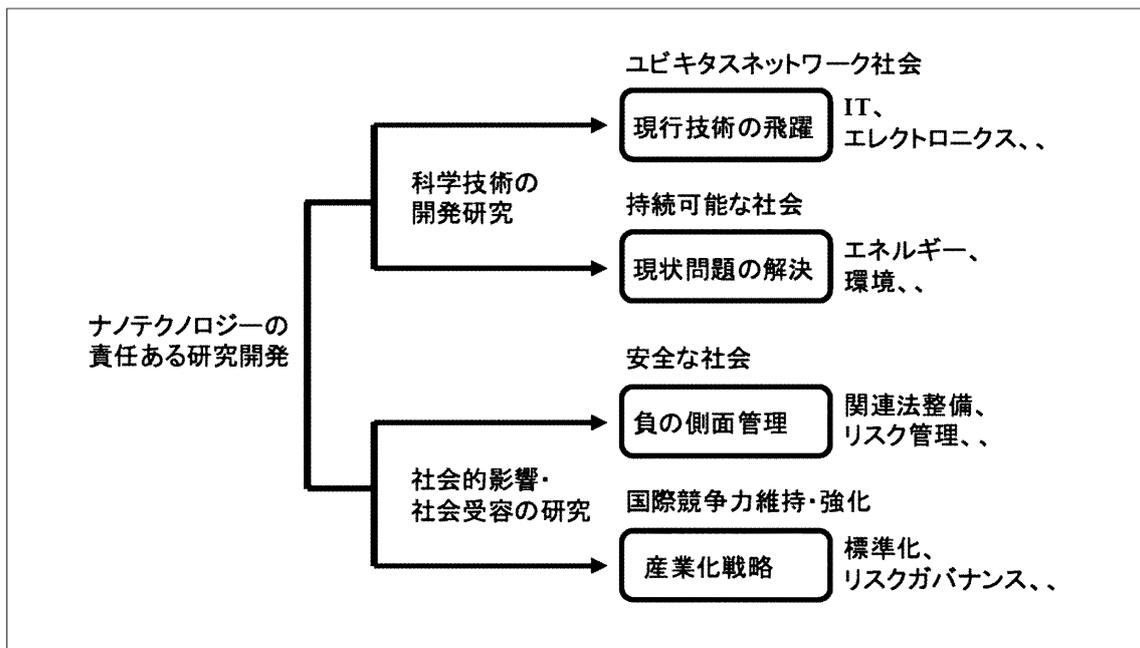


図 4-4 ナノテクノロジーの責任ある研究開発からイノベーション創出へ

見や、「ナノテクノロジー商品を市場から引き上げるべきである」といった意見が掲載された。例えばゴマ粒程度の直径 1 mm の粒子を直径 10 nm の粒子にナノサイズ化した場合、粒子の表面積は 10 万倍に増加する。生体影響が表面積に依存するのであればナノ粒子化することで生体影響が大きくなると考えるのは合理的である。個数に着目すると、直径 1 mm の 1 個の粒子は直径 10 nm にナノサイズ化されると 1 千兆個となる。個数の増えた粒子をどのように管理するかが問われている。1000 兆個の粒子のうち 1 個たりとも経皮吸収しないことを計測で証明するのは困難であるし、粒子 1 個が経皮吸収されると、経皮吸収しないという根拠が崩れることになる。大事なことはゼロリスクを基本とする安全管理ではなく、現実的なリスク管理を基本とした管理策の策定を進めていくことである。

ナノ EHS における技術的なニーズに関しては吸入や経皮吸収といった曝露評価が重要な課題である。ナノ粒子は一定濃度のエアロゾルの状態を維持することが大変に難しいことから、吸入曝露試験にさきだちナノ粒子の気相での一定濃度の分散といった技術的課題がある。また吸入や経皮吸収後のトランスロケーション（転座）評価が焦点となっている。生体内でのトランスロケーションをどのように記録するかはナノ粒子の生体イメージングの技術と共に非常に重要な技術的課題となってくるであろう。単にトランスロケーションとその後の蓄積という考え方だけではなく、ナノ粒子がどのように体外に排斥・排出されるのかといった評価も始まっている。いずれにしても大変な時間と労力の要る計測・評価になる。

欧州連合の NANOSAFE プロジェクトで実際にナノ粒子の生体影響を評価している医学のグループは、経皮吸収の可否を培養した皮膚細胞膜をシリンダの隔壁とし、一方の生理食塩水にナノ粒子を分散させて透過があるかどうかを確認した。最初から全てを動物実験でやるのではなく、こういったビトロ試験である程度のあたりをつける評価の効率も大変重要な検討課題であるように思われる。ナノテクノロジーのコア技術の研究開発、

EHS と計測にかかわる技術開発が最終的には標準化されることを目標に三位一体で連携することが必要である。標準化はナノテクノロジーの産業化にとって単にその物指しや決め事を策定するだけではなく、産業競争力維持のための戦略的課題でもある。このことを忘れないように進める必要がある。

以上をまとめる。ナノ粒子の生体挙動のナノレベルでの解析技術が大変重要なニーズである。ナノ粒子の吸入や経皮吸収の評価手法、生体内でのトランスロケーションや蓄積さらには排出挙動といった包括的な計測・評価手法の開発が望まれる。磁気共鳴、放射線、イメージング技術等との融合も重要である。ナノ EHS に関わる研究は研究者のシーズではなく社会ニーズに応える姿勢が求められる。研究の目的と受け渡し先を明確にして進めることも重要である。分野融合に関しては標準化を目的に含めるとナノ EHS、ナノ材料、ナノ計測の分野融合が不可欠であり、各分野の研究者の連携を図ることで大きな進展が期待できる。大学や企業の安全性研究所等は研究の基盤として良い。その枠組みに対応して省庁にも連携的な政策策定の場ができることを望む。

4.4 コメント 1/小野崇人 (東北大学大学院 工学研究科 助教授)

ナノ計測の基盤技術としての MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) について述べる。半導体の微細加工技術を用いてマルチプローブ記録やマルチプローブリソグラフィ、科学計測等の研究を行っている。MEMS の微小デバイスは、観察、評価、操作、修飾等への応用が可能である。微小化により高感度応答や高速度応答が可能となるのが特徴である。また要素の集積化や多機能化も特徴である (図 4-5)。

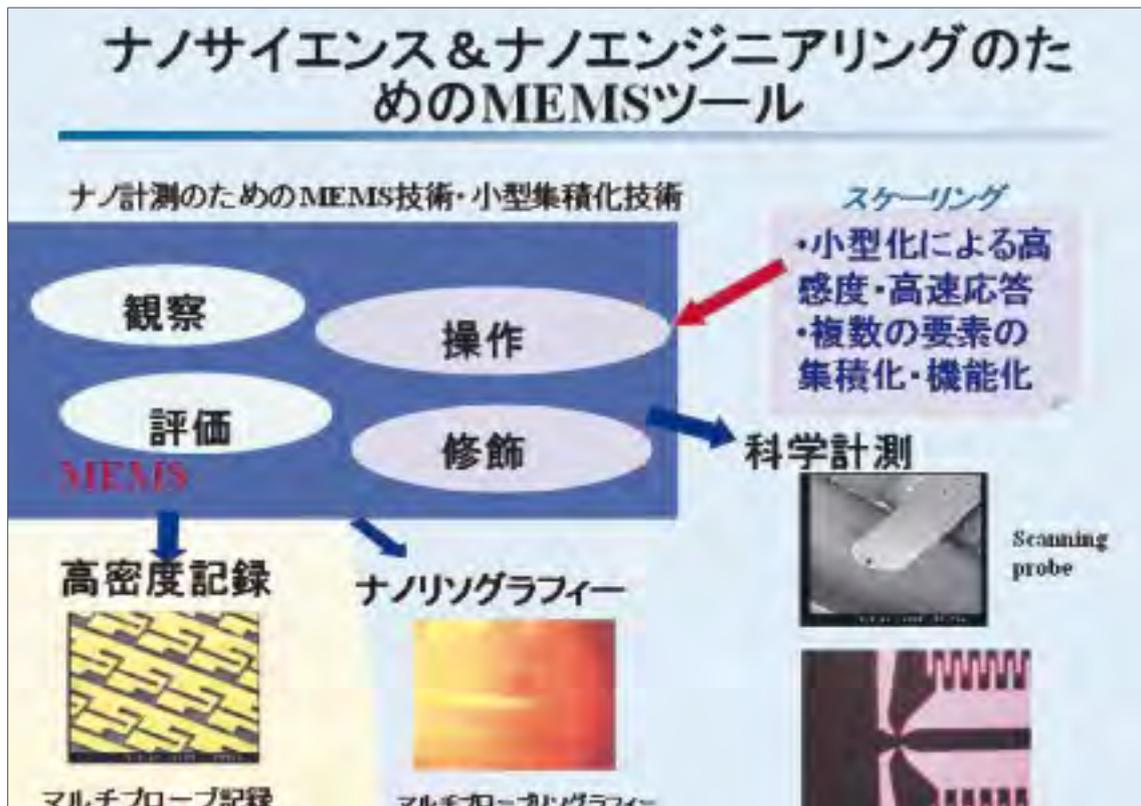


図 4-5 ナノサイエンス&ナノエンジニアリングのための MEMS ツール

AFMの弱点の一つとして、原子の質量を化学値として計測できない点がある。現在、表面を観察し分子を採取し質量分析器に送り質量分析をする操作型プローブ顕微鏡の開発を行っている。また同じく走査型プローブ顕微鏡において、4つの探針を独立に動かしてイメージングや特性評価を行う多探針計測技術の開発も行っている。ダイナミックな現象を観察するためAFM自体にアクチュエータが駆動する機能を付与し、PZT(チタン酸ジルコン酸鉛、 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) スキャナーよりも高速の操作を可能にしている。また高感度センサーにより質量のリアルタイム変化を測定することが可能である。ヒーター上に質量センサーが付いており加熱により飛散した質量を観察する。高感度化が進めば力検出型核磁気共鳴プローブによるバイオ試料の3次元イメージングへの応用も可能となる。他にテラヘルツ波の計測、分光を可能にする輻射センサーも研究されている。電子をサブミクロンの膜に通過させる技術により、電子分光や電子顕微鏡への応用が可能になるのではないかと考えている。MEMS技術により高感度化、高速化、多機能化、集積化した計測システムが実現できると考えている。

4.5 コメント 2/田村守 (北海道大学 大学院先端生命科学研究所・教授)

光計測の研究をナノ技術に結実させるという観点から述べる(図4-6)。

医療とバイオのナノ計測
—バイオフォトンクスとメディカルフォトンクス—
北海道大学 先端生命科学研究所
田村 守

- 1) 光と医療は21世紀の未来技術
— 光の利点をどう生かす? —
- 2) 光と医療の世界の動き
— NIHとFDA, そしてNSF, EUも動き出した。
- 3) 光イメージングの最前線
— 光CTは日本で最初に始まった。しかし・・・
- 4) 真の意味での産・官・学の協力をオールジャパンの体制で
— 日本における光診断のコンソーシアムを作る
(米国での具体例を紹介する— NITROI)

図 4-6 医療とバイオのナノ計測

光の透過技術により個人認証が可能となった。また時間分解計測により3次元の高解像度で脳の機能を厳密に計測する等の応用も実現しているが、病院内で実用化されるためにはシステムの小型化が必要である。ナノバイオロジー分野では遺伝子やたんぱく質等の対象が元来ナノスケールであるため、最近のナノテクノロジーの進歩にもそれほど関心が持

たれない。オングストロームの単位のスケールに突入すれば魅力的となる。光計測の分野からの立場として真に目標としているのは、遺伝子を中心にすべての生命活動を分子レベルで理解することである。分子やたんぱく質の各々の役割や病気のしくみの解明、さらには治療法の探究等が今後 10 年の全体の方向性となるであろう。その方向性の中では分子 1 個のレベルから観察が可能で、生体組織に損傷を与えない点が特徴である光計測技術が中心的役割を担う。

最近の米国は、NIH (国立衛生研究所、National Institutes of Health) に見られるように世界への情報開示を厳しく限定している。米国にはコンソーシアムが存在し大学や NIH や NSF (米国科学財団、National Science Foundation) 等の機関が一体となり運営している。10 年先の計画等が念頭に置かれているため、コンソーシアムの会員になるには試験が課せられるほどの厳密さである。米国では企業と政府は独立しているため、政府は企業に直接的に研究資金を出さず施設面での援助も制限がある。

日本国内で中途半端な産学官の共同研究体制を構築しても成果は少ない。目的をもち強力なリーダーのもとに研究体制を推進していく方法が日本でも実現されるべきと考える。光に関する技術は膨大である。トップダウン式で研究を推進する体制を構築しなければ後発国になってしまう。徹底的な議論を行い真の意味の成果を出していきたい。

光とバイオ、光と医療は分子イメージングの中心課題であり、巨大機器メーカー (GE、Philips、Siemens 等) と巨大製薬企業の結びつきや買収等急激な再編が行われている。光技術の生命科学・医学応用は今後の最重点課題である。

4.6 コメント 3/菊地和也 (大阪大学大学院 工学研究科 教授)

機能性のある化学プローブの開発研究をしてきた。細胞や生物の固体をばらさずに生きた状態のまま観察するには分光学の応用技術が重要である。MRI (核磁気共鳴画像法、Magnetic Resonance Imaging) で使うラジオ波も光の一種である。目下隆盛しているケミカル・バイオロジーからケミカル・ジェネティクスへの研究の流れでは、表現型からもとになるたんぱく質やリガンドを見出す「フォワード・ケミカル・ジェネティクス」と、特定の生体内分子の機能を解明する「リバース・ケミカル・ジェネティクス」の 2 種類がある。米国のケミカル・バイオロジーの焼き直しの研究を日本で行っても意味がない。生物学的課題 (バイオロジカル・クエスチョン) に応える精度をもつ分子をどのようにデザインするかが重要となる。スペックを生物に対応するように合わせた上での化学原理が重要となる。光等を用いて細胞や固体内の情報を得るためには、精度の高いスイッチを分子に組み込む必要がある。現在、生物に対応したスペックをもつ蛍光カルシウム指示薬としては「Fura-2」が挙げられる。最近では MRI プローブでスイッチを入れる技術も開発されている。

波長を変化させる原理には蛍光共鳴エネルギー移動 (FRET、Fluorescence resonance energy transfer) がある。距離と重なり積分を変えていくことで生物応用が可能な分子を作る。例えば酵素オートタキシンによる切断によって色が変わる分子を作っ

いる。また NO と酸素の反応により蛍光を出すための DAF-2T の開発も行っている。今後、固体全体の可視化を考えるとラジオ波や長波長等の固体を通過する光が必要となるため、MRI 関連の技術が重要となる。MRI に使用される Gd³⁺系 MRI 造影剤では、T₁ を強く短縮することにより高い造影効果を得ることが可能となる。最も重要な点は、生物のスペックに対応するスイッチをいかに分子に組み込むかといった点に集約される (図 4-7)。

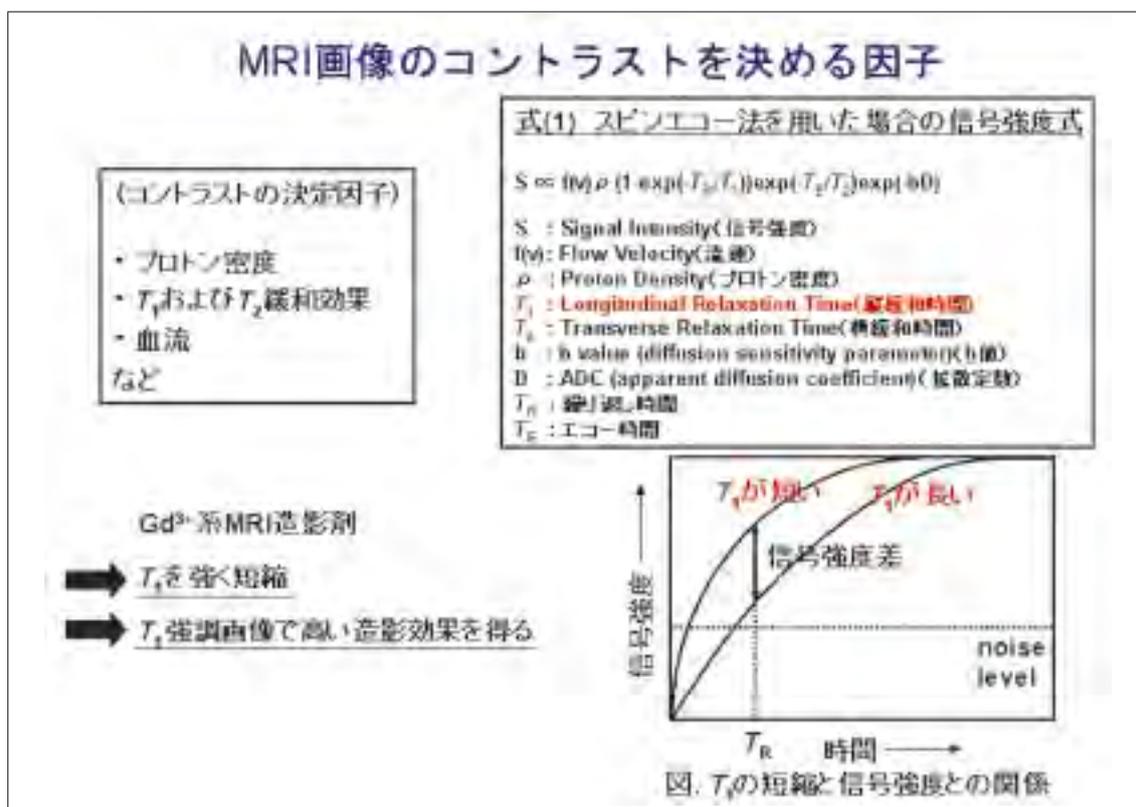


図 4-7 MRI 画像のコントラストを決める因子

4.7 コメント 4/安田賢二 (東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 教授)

自身の立場はニーズ側であるもののシーズが不足しているため、自らでシーズを作りニーズとマッチングさせてきた。その事例を紹介する。

DNA 解析等に見られるように分子認識技術の開発が進展してきた。一方で生命全体を知るという点では、機能解析という観点と環境との相互作用に適応する機構 (後天的獲得情報) に関する知見が重要である。そのために生命情報を維持した形でダウンサイズした生命システムのモデルづくりと計測技術との接点での実時間での機能計測が、現在のアプローチとなっている。

計測では細胞単位を基本としている。内界と外界が境界をもつ最小要素である細胞がヒステリシス (後天的情報) を計測するための条件であるからである。「ナノ」計測には、時間的スケールの短縮と空間的な厳密性の二つの意味が含まれていると考えている。前者では、世代間での非連続的な情報の伝承の観察に興味がある。後者では、空間に関して厳密な物質の制御が可能となっている。時間軸で制御する場合も微小空間の状態を瞬時に変化させることが重要である。

生命を知るためには階層構造の理解が重要となる。各階層における情報を再構成し要素の数を制御する等して自然界と同じ反応が生じるかを確認する。モデルが正しい反応を示せばそのモデルを使用していく。その点でサンプルの純度を高める技術が重要となる。最小要素を組み立てる技術も求められる。さらに組み立てた要素の時間変化を非破壊的に観察する技術も肝要となる。破壊を伴う場合でもある瞬間でどこまで厳密に計測できるかが重要となる。

精製技術に見られるようにハードウェア技術の完成にはプロトコルやソフトウェアの技術開発が重要となる。ソフトウェアとハードウェアの組み合わせによりセルソーティング等の技術が完成する。

モデル系の長所は個体レベルでは不可能であるヒトへの薬剤効果の検査を、臓器や組織のモデルやその組み合わせによる個体モデルを作ることによって実現することができる点にある。実現のためには光計測の他に電気計測が有効である。ニーズが先にある上でシーズを考えるべきである。培養中のもう一つの重要な指標に分泌物がある。ナノプローブを用いて個々の分泌物を計測する技術も開発している。

電子顕微鏡の潜在能力は非常に高いと考えている。計測する粒子にラベリングができる技術が重要である。例えば金のナノ粒子に別元素をドーピングすることで、3000色以上のマーカーを同時に作ることが可能である。

要素技術はニーズ側として非常に重要である。電子顕微鏡のみならず、AFMでも計測が可能になるようなシーズを取り入れていきたい(図4-8)。

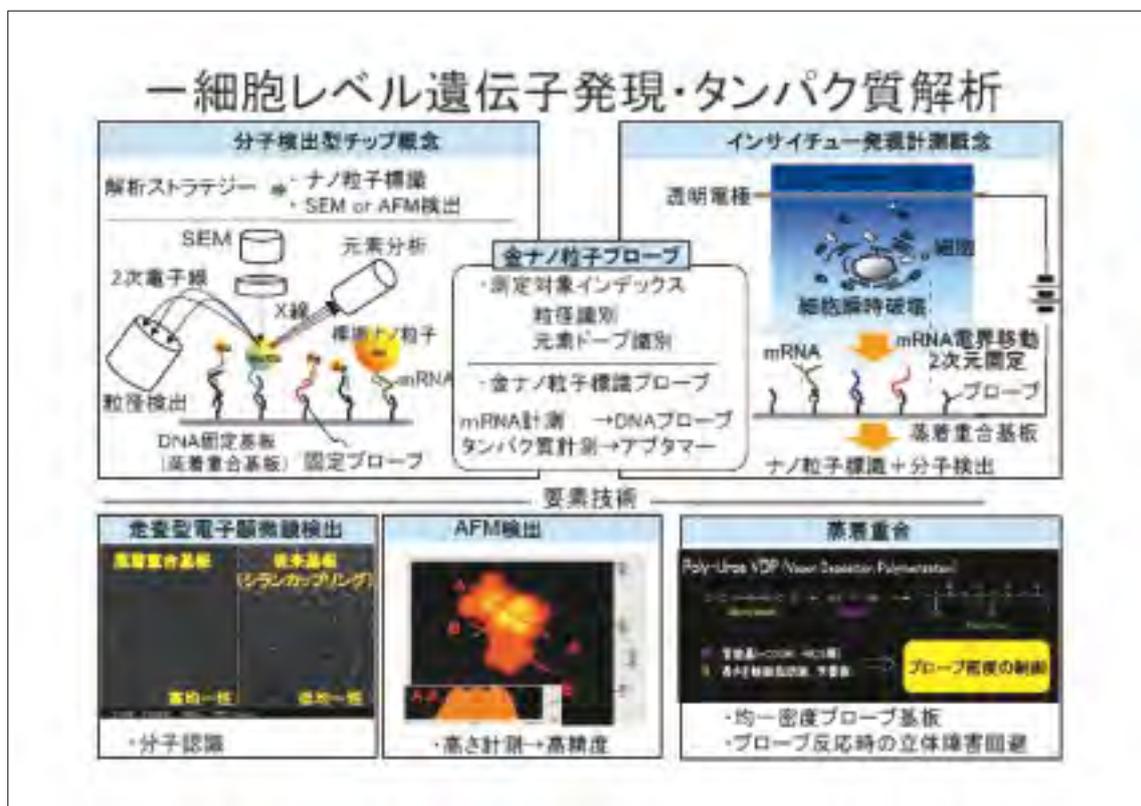


図 4-8 細胞レベル遺伝子発現・タンパク質解析

4.8 第3部討論

〈医療分野に求められる計測手法〉

- ・眼科の医療では、伝達物質のサイトカインを手術時に採取し分泌量を瞬時に計測できれば非常に助かる。糖尿病には診断が曖昧な点が多い。血糖値以外にも個人的な情報を把握できれば、個々人が将来糖尿病に罹る可能性なども判別でき助かるであろう。
- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では眼底カメラの高精度化や眼底部のスペクトルスコーピーによる酸素含量の計測等の研究が企業と共同で行われている。

〈分光学的手法〉

- ・ナノ計測で分光学的手法を扱う場合網膜の血中酸素濃度を正確に検出することはほぼ不可能な状況である。ハードとしては信号がとれるが中身の把握ができていない。基本的な問題点は地味であり日本ではほとんど研究が着手されていない。理論的また実験的にフェムト秒パルスを用いた時間分解により、計測の定量化への手がかりは掴めている。大型のレーザーでなく手のひらサイズで波長領域が変更できるような計測機が実現すれば、多くの問題が解決する。ナノ計測のニーズは圧倒的に医学分野に存在する。

〈ニーズとシーズ〉

- ・物理系機器の進歩と比較すると化学プローブの分野はようやく始動した段階にある。機械ごとのスペックを化学プローブの技術者すべてが把握しているわけではない。どのような測定器があればよいのか等生物学のニーズを把握できる対話の場があるとよい。
- ・医学部には研究成果を論文として公表することが最優先の教授がいる。論文を出すため極めて局所的な研究をしている教授とニーズ側が連携してしまうと、市場に通用しないマイナーな成果物が開発される場合がある。対等な立場で連携ができる人物を見つけることが重要となる状況がある。非侵襲型の計測は日本の技術として確立しなくてはならない分野である。侵襲型の計測には安全性確保の問題がある。シーズ側はシーズを有しても真のニーズを聞こうとしない。シーズ側と対話できる場がない状況は問題である。

〈特定の波長領域をもつレーザー機器の需要〉

- ・医療分野のレーザー機器等は需要自体が少ないためメーカーが製品化しない。診断の立場では3~4 mmの光の波長領域が必要となるが、医学分野で最も需要があるのは1.1~1.8 μm の波長領域である。光デバイス関係でこの波長領域をもつ化合物が実現されれば必ず有用される。例えば1 mWのパワーで安定度が0.1%程度のスペックのものをメーカーに求めると、技術的には可能であるが需要が少ないため製作しない。しかし単価が高額となっても需要はある。
- ・量子ドットレーザー分野では量子ドットのバラつきがあるため、1.4 μm の波長領域は比較的簡単に実現することが可能ではないか。
- ・大手メーカーは通信波長帯用のレーザー開発をする中で、米国のベンチャーから欠陥品

等を集めていると思われる。研究者が交渉すれば装置の入手も可能である。

〈レーザーの光源〉

- 医学分野で最も困っている点は検出器やレーザー等の光源となる材料が不足している点である。病院で機器を使用するためにも安定供給のための企業支援を JST がするとありがたい。半導体等のレーザーの開発研究の支援があれば病院等での量子ドットレーザーや量子井戸レーザーの使用等へと応用される。
- 研究用として1~10 個単位であれば光源を入手することができるが、例えば 5 年間安定的に供給するような供給源がない。NEDO や JST のプロジェクトから援助があると高性能な測定機器を日本から創出することも可能となる。
- 実験室レベルでレーザーを試作してみて企業に製品化等を説得してみる方法も考えられるのではなかろうか。

〈バイオマーカー〉

- バイオマーカーの潜在能力は高い。医薬品の場合だと承認を得るまでに 20 年程度の期間が掛かり、高収益率が期待される薬品しか製品化されない。一方バイオマーカーのラベル剤は検査の直前に瞬時に体内に取り込むだけで、使用後は排尿等で体外に取り出せばよいという程簡易なものである。米国の FDA (食品医薬品局、Food and Drug Administration) ではバイオマーカーに承認を出すまでの期間を 5~6 年程度とするガイドラインを作成中である。承認までの期間が短いという収益確保の利点がある。加えて有機化合物の π 結合ベースであるかぎり波長変換は可視領域でしかない。変換半導体のようなものを研究開発の出口とすれば、厚生労働省ではなく経済産業省の管轄下とすることが可能であろう。既存技術の置き換えではマイクロフルイディクスを使用した血液検査技術等の事例でわかるとおり、高コストが障害となり市場参入は厳しい。新規の現象、原理、検査対象の創出に挑戦することが重要でありそのため基礎研究型の形式が重要となる。

5 第4部 安全・環境・エネルギー領域におけるナノ計測ニーズ

司会：金村聖志（首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 教授）

5.1 非接触な認証・検査/谷田貝豊彦（筑波大学大学院 数理物質科学研究科 教授）

非接触な認証・検査について述べる。光計測分野でマイグレーション干渉等の古典的干渉を用いて、半導体デバイスや液晶デバイスの膜厚や構造の計測の研究を行ってきた。研究では干渉性のない光も使用してきた。通常の光の波長は $1\mu\text{m}$ 程度のサイズであり、ナノサイズの膜厚や構造の計測には常に工夫を必要とした。白色の干渉を生体の計測に用いたフーリエ領域の光干渉断層計 (FD-OCT、Fourier Domain Optical Coherence Tomography) の研究を行っている。非接触・非侵襲で生体の断面構造を計測する。高速度で計測すれば3次元の構造も計測することが可能である。通常レーザーを設置する箇所に白色干渉のランプを置くと、コード長がゼロの域だけ干渉縞が確認される。参照鏡を前後に移動させることにより干渉縞の情報を集めサンプルを観察する。

検出器（ディテクター）と情報処理の技術が進歩したことにより精密なナノサイズの計測が可能となった。例えば液晶フォトスペーサの計測では並列した複数のスペーサの形状を数秒間で計測する。計測を繰り返すと 5nm の精度で計測することも可能となる。大面積の中では数 μm の精度で計測することが可能である。工業的に重要な技術である。また回析格子（グレーティング）も対象物の形状をほぼ把握することが可能である。光の散乱に関するデータベースを用意し整合することにより、形状やピットを計測する方法もある。上記のOCTとほぼ同様の技術を生体の計測に適用することを考案した。ただし生体の場合は分光器で分光することにより断面を計測する。光の時間信号を分光しフーリエ変換をしてパワー・スペクトラムをとる。パワー・スペクトラムをコンピュータ処理するとともに信号の自己相関関数を得ることができる。

非同期の検出器 (Non-synchronous Detector) を用いて人間の指の断面を観察することが可能である。認証の際指紋でなく指の断面を計測する方法も可能となる。眼の層状構造を計測することにより糖尿病や緑内障の検査をすることが可能である。測定する速度が上がることにより解像度が格段に向上している。3次元的に網膜の構造を観察することが可能である。深さ方向に積分すると眼底写真と同様の画像を得ることができる。同様に視神経の乳頭部の構造や血管の位置等も観察することが可能である。3次元構造を2秒程度で計測することが可能である。ただし生体を対象であるかぎり生体が動くより前に計測をすることが望まれる。1991年にOCTが発明されて以来、2007年までに10万倍程度の速度の向上が見られた。現在の光源の周波数は 200kHz に達している。さらに1~2桁程度の速度をもった光源または検出器アレイの出現を期待している (図5-1)。

現在の手法では対象物の屈折率の揺らぎによる後方散乱を計測しているため、スペクトルデータは把握できない。今後の段階では蛍光映像、ラマン顕微鏡、光音響、偏光計測等の情報を取り込むことにより、対象物の3次元的分光データ、吸収、発光分布、偏光、分子の配向状態等を計測していきたい。応用として眼底や網膜中の3次元の血管分布を生体

認証等に利用することも可能であろう。白色干渉では、サブナノスケールへの挑戦や構造のみならず物質の同定や定量分析も目指したい。

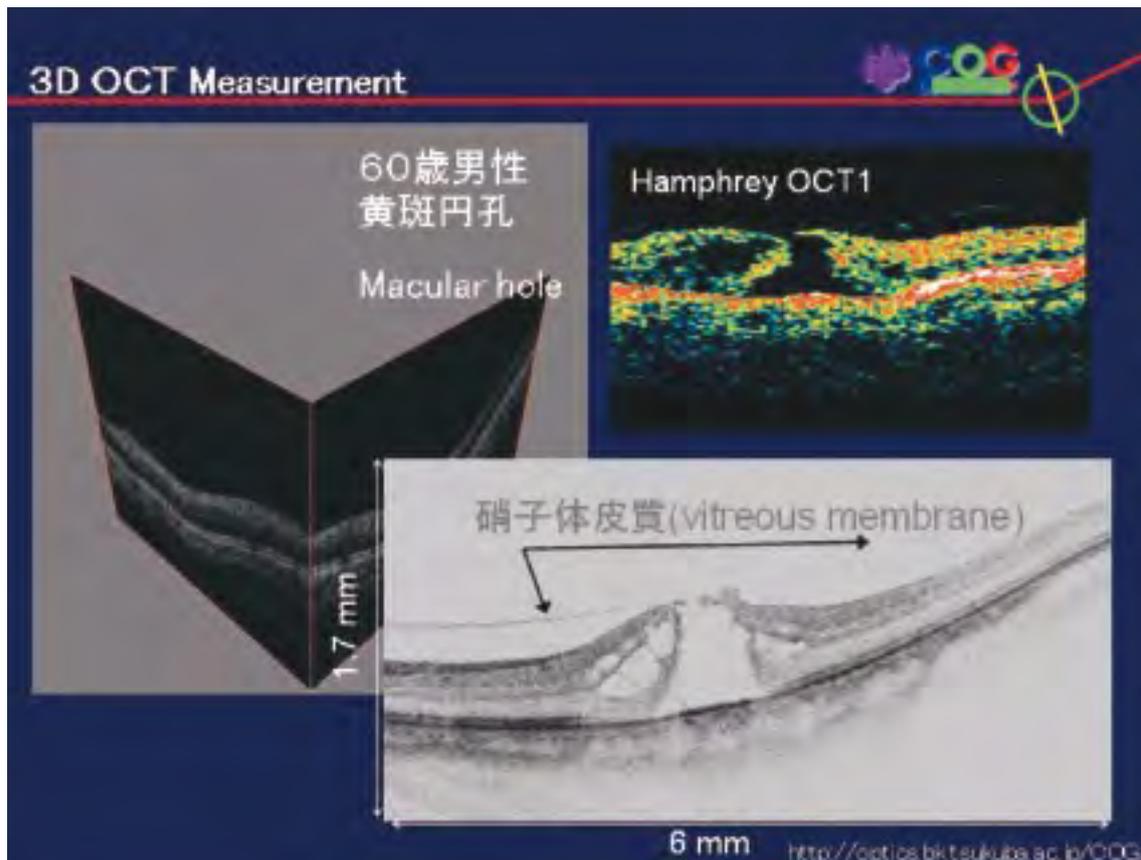


図 5-1 3D OCT Measurement

5.2 燃料電池、触媒/金村聖志 (首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 教授)

分析分野の企業と共同研究による固体高分子形燃料電池の分析に関して事例を紹介する。燃料電池の構造は、プロトン導電をする高分子膜の両端に黒色の電極層（触媒層）が存在する形をとる。カソード側の触媒層を拡大すると、電解質、炭素、白金の触媒が $10\ \mu\text{m}$ 程度の厚さの中に混在していることが見られる。この構造が燃料電池の核心部である。構造を観察することが大きな課題である。ウェットな状態ではまだ観察に成功していない。水素イオンが動くと白金表面から出現した電子がカーボンを通過する。水素や酸素が加わる。このような触媒反応が生じている部分を「三相界面 (Triple Phase Boundary)」と呼ぶ。実際の燃料電池の内部では反応場の状況が最近まで解明されていなかった。その解明に着手した。

TEM (透過型電子顕微鏡、Transmission Electron Microscope) で触媒層の断片を観察する際、炭素、白金、電解質の量の比を変えていく。触媒層の構造を順次変えて実際の燃料電池の性能と照らし合わせることで、電極触媒層を作る。可能なかぎり均一な触媒層を作るため、電気泳動法を用いた。カソード側の触媒層では炭素の表面に白金が付き、そこにナフィオン高分子が加わった複合粒子ができている。濃度が濃いためレーザー散乱を使用した粒子構造の分析は不可能である。ただし電気泳動法により低下した濃度で

あれば、レーザーの散乱を利用して分析ができる。分析した情報を用いつつ、電気泳動法でイオン交換膜の上に複合粒子を堆積させ、触媒層を作った。その触媒層を TEM で観察した (図 5-2)。

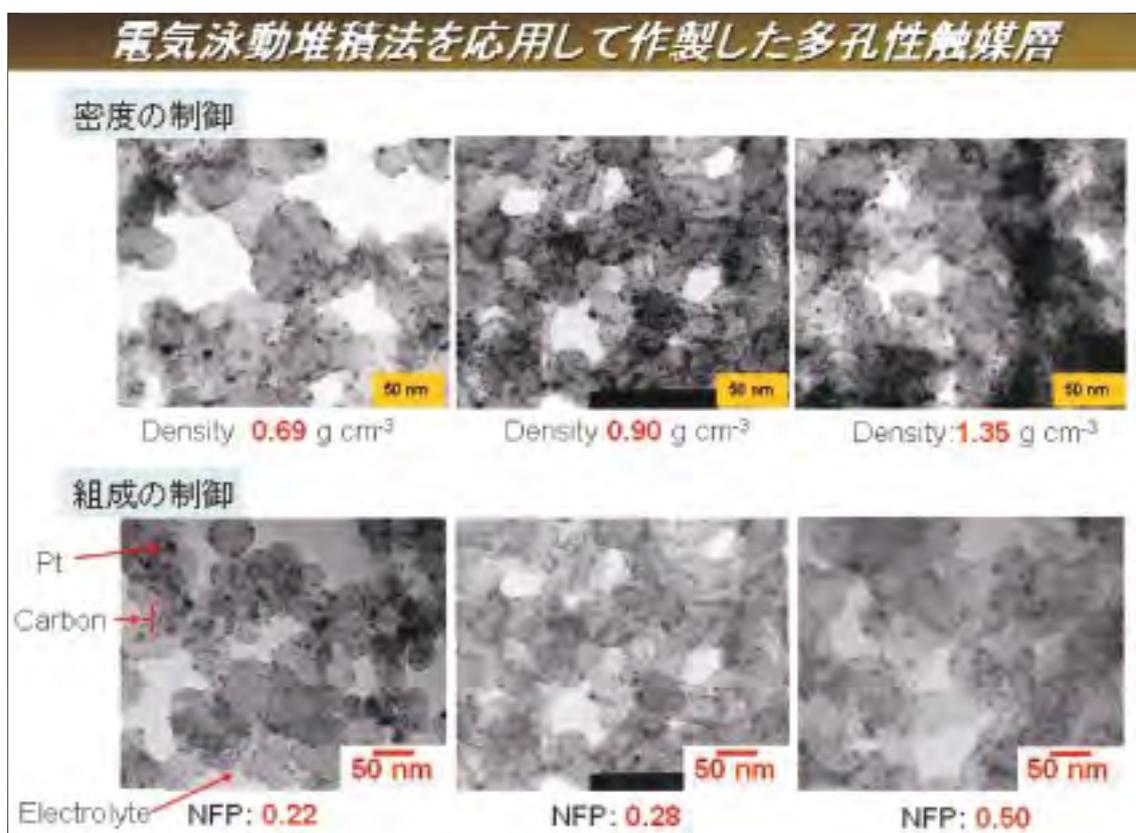


図 5-2 電気泳動堆積法を応用して作製した多孔性触媒層

粒子の断面を TEM で観察する際は FIB (集束イオンビーム、Focused Ion Beam) を用いて粒子を切断した。密度の制御や組成の制御をしつつ断面を観察した結果、触媒密度の燃料電池特性への影響をグラフ化することができた。触媒層組成の燃料電池特性への影響も計測している。上記の方法では白金とカーボンの位置を把握することはできたが、アイオノマーの位置は把握することができていなかった。元素分析も時間がかかるために不可能であった。そこで粒子の断片を見ることで解明できることがあるのではないかと考えた。粒子断片の内側と外側の EELS (電子エネルギー損失分光、Electron Energy-Loss Spectrum) をとってみると、アイオノマーと炭素のピークの差を計測することができた。 σ^* と π^* の強度比を計算し、アイオノマーと炭素の分離に成功した。白金はアイオノマーの中に沈んでいることを確認した。

企業との共同開発では初期の撮影の際に立ち会い、企業側に撮影の勘所を覚えてもらった。以降はサンプルを企業に提出するだけで希望する写真を撮影してくれた。今後は AFM などによるリアルタイムの観察が期待される。白金の表面とナフィオンの接着部分の界面構造をその場 FTIR (赤外分光法、Fourier Transform Infrared spectroscopy) で観察した。白金とナフィオンの接着状態は流動的であり環境に応じて界面の状態が変化することを示唆している。AFM を用いた三層界面の表面測定も行っている。イオン交換樹脂

の疎水性と親水性の測定をしている。

5.3 材料劣化(腐食)/水流徹(東京工業大学大学院 理工学研究科 教授)

腐食や腐食事故に伴う経済的・資源的損失が増大している。腐食事故や防食対策による経済損失は GDP の 2% 以上となる。防食対策に多額の資金が投入されている。電子機器や配線等では高精度・高密度化が進んでいる。またプロセス、装置、製品に対して高度化の要求が高まっている。こうしたことから微小な腐食が重大な事故・損失につながる場合が多い。日本経済は 15~20 年後、社会資本における整備面への経済負担が増大しているであろう。既設社会資本の延命・保守が必要となるので適切な保守管理や長寿命化設計、ミニマムメンテナンスが非常に重要となる。

常温における腐食のほとんどは水が関与する電気化学反応である。逆にいえば、腐食反応や腐食速度の検出は電気化学測定を可能にする。電気化学計測で μA のオーダーを計測すれば、1 年間に $1\mu\text{m}$ 以下の腐食速度を計測でき精度がよいといえる。ただし通常の電気化学測定は電極の平均情報のみ限定される。全面腐食に関しては対応が可能であるものの局所的な腐食に関して対応は困難である。したがって腐食部位(位置)の同定と局所電流の測定が必要となる。水が関与している環境下では空気中や真空中での計測と比較して空間分解能が劣悪になるという問題もある。電流、電位あるいは電極活性の局所分布計測は実験室レベルではある程度可能となっている。大型構造物レベルでの計測が課題としてある。リモート計測に関しては非接触電位計測やプローブの埋め込み等は可能となっている。大型構造物の計測の場合本物を分極することはできないため、プローブ試料を本物の環境と可能なかぎり同様にして腐食を計測している。しかしながら材質・環境が同一でも同じ腐食が起こるとは限らない。差異を解決することが求められる。

ナノ計測の場合、腐食反応機構の解明には材料側の組織・組成・結晶性の変動と環境側の同様な変動を計測する必要がある。結晶粒界近傍の偏析や析出物、結晶の乱れに起因する特性の違い、環境溶液の乱れ、揺らぎの検出等を記述する計測技術が必要となる。現状では空間分解能や電流・電位の計測・制御の精度が不足している。マクロ計測の場合、実用的な腐食計測や腐食モニタリングでは膨大な数の微小部分を正確に観測し総和を求めるよりも、マクロな計測から局所の異常を検出することが必要である。平均的な情報から異常の発生の有無や発生の位置、腐食の速度等の異常の程度等を検出・推定することが必要である。現状では位置の推定や腐食の程度を知ることは困難である。

電流・電位の局所分布計測においては、電位差と抵抗率と距離がわかると電流の分布を計算することができる。空間分解能は $100\sim$ 数十 μm 程度に達している。ただし $10\mu\text{m}$ には到達しないであろう。空間分解能を高める方法が今後求められる。電極活性の局所分布計測に関しては、走査電気化学顕微鏡を用いた方法が挙げられる。媒介物質(メディエータ)として酸化還元(Redox)系を添加し、試料極とプローブ極をそれぞれメディエータが酸化および還元反応を起こす電位に分極することによって、活性サイトでの電流変化として計測できる。腐食反応では反応生成物(イオン)の直接的な反応も検出することが可

能である。試料面積の制限による方法も挙げられる。ルギン管に O リングを付け溶液を外側と内側で絶縁させ、局所領域の分極曲線、分極抵抗、交流インピーダンス等を測定する。現状での空間分解能は 10 μm 前後が限界であり、さらなる高分解能には SPM の応用を考える必要がある (図 5-3)。

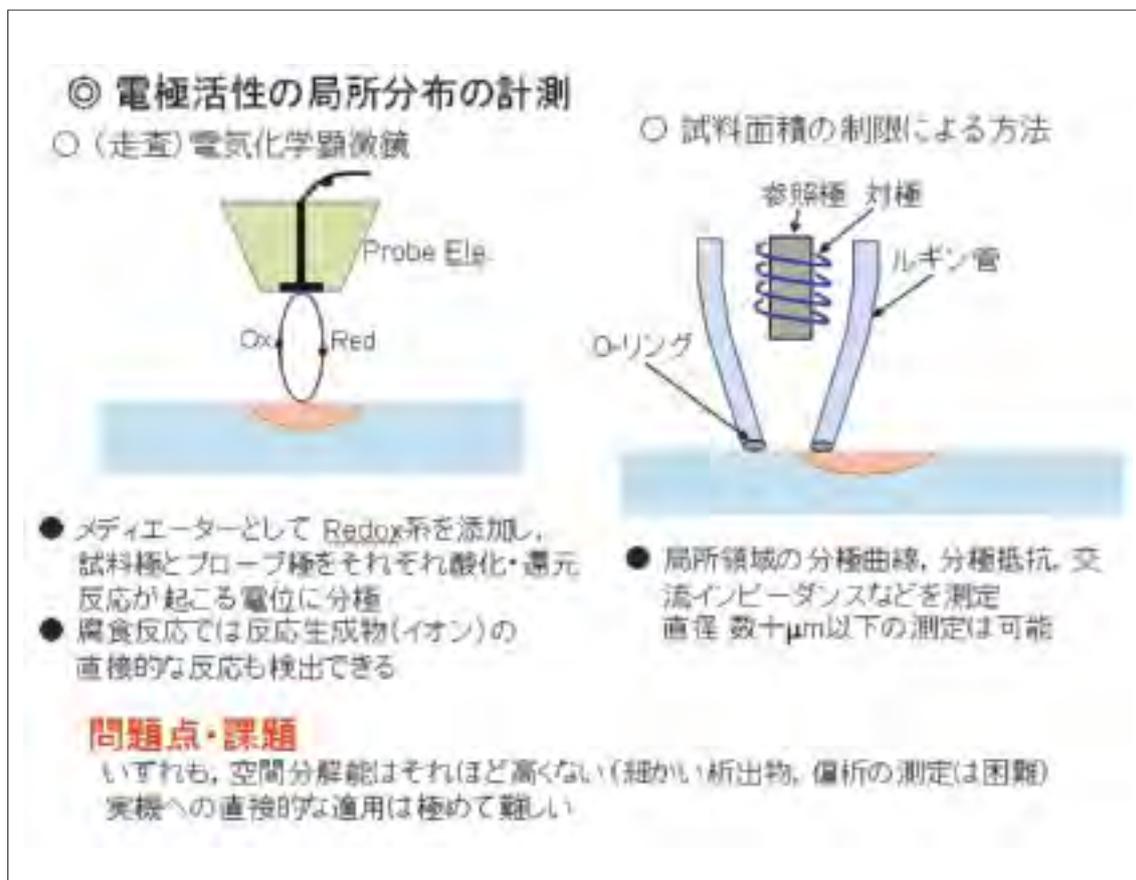


図 5-3 電極活性の局所分布の計測

リモート計測に関しては付着水、吸着水等の薄膜水層における腐食ではルギン管は使用できない。そのため非接触による電位分布測定法や Kelvin Probe 法 (振動容量法)、Kelvin Force Microscope (表面電位顕微鏡) 法等が用いられる。ただし速度に対応する電流に関しての情報が得られない点が問題である。遠隔地での計測・制御・監視に関しては、インターネットや携帯電話等の使用により実験の範囲が広がりつつある。コンクリート中、地下埋設物、管・タンクの内壁等について、外部から腐食状況を正確に把握する方策がない。

今後は応力腐食割れ等の環境との関係を計測する技術が求められる。また電界顕微鏡を用いて大型の試験片にレーザービームで走査し、励起により当該部分を計測できるように形式が実現するとよい。電子材料に関してはその分野の排他性からか情報が来ない。電気化学的な方法と多面的な方法とを融合させた測定法の出現が期待されている。

5.4 コメント

/塚本史郎 (東京大学生産技術研究所 ナノエレクトロニクス連携研究センター 特任助教授)

環境調和型有機金属触媒について述べる。薬学と工学の共同研究分野である。マンザミン A のようなマラリア特効薬を化学合成により作ることができれば、多くの命を救うことが可能となる。マンザミン・グループのナカドマリリン A では、有機金属触媒を使用している。高脂血症やがん関連の薬品を作成する際、有機金属触媒反応を利用して炭素-炭素結合を形成する。しかしながら触媒の生成物からの除去は、工程が莫大となり非常に難しい。製薬メーカーは薬品を作成する技術はもっているものの、需要が少なかったり、収益が上がらないと判断したりして、販売に積極的でない。この状況に対し、GaAs 上の表面である S 終端 (サルファー終端) に関する研究を行ってきた。結合の状態や原子構造等を観察している。基板上にこの触媒を固定させれば、生成物の中に触媒が混入することがなくなる。また、GaAs ごと排出すれば触媒を取り出しも容易である。

分子線エピタキシー装置 (MBE) を用いた S の定着法を開発し、サンプルを作成した。サンプル作成後、有機金属パラジウム触媒を加熱定着させ、炭素結合を行う Heck 反応を工程に取り入れた。微量なパラジウムの使用のみで、90% 程度の活性が複数回続いた。現在では、活性率はほぼ 100% となり 30 回以上のリサイクルを実現している。通常の均一系では、70% 程度の活性でリサイクルは不可能である。ただし、As は猛毒であるため GaAs の使用は避けたい。シリコンや金等の別の物質で実験しても、GaAs 程度の効果は見られない。GaAs を用いると活性が上がる構造を解明したい。そのためには第一原理計算により価数の変化を観察する方法が最適である。

界面の構造の解明が実用化に向けた課題である。原子レベルの (2×6) 構造と有機金属触媒との結合関係の解明が課題である。特に結合子である硫黄と有機金属触媒との原子レベル 3 次元的空間的結合関係が不明である。STM/BE システムを用いれば、GaAs の正常表面、(2×6) 構造を作ることが可能で、3 次元的空間的 in-situ (その場) 観察しながら有機金属触媒を定着可能である。触媒活性の確認や第一原理計算を行う研究協力者との協力が展望される (図 5-4)。

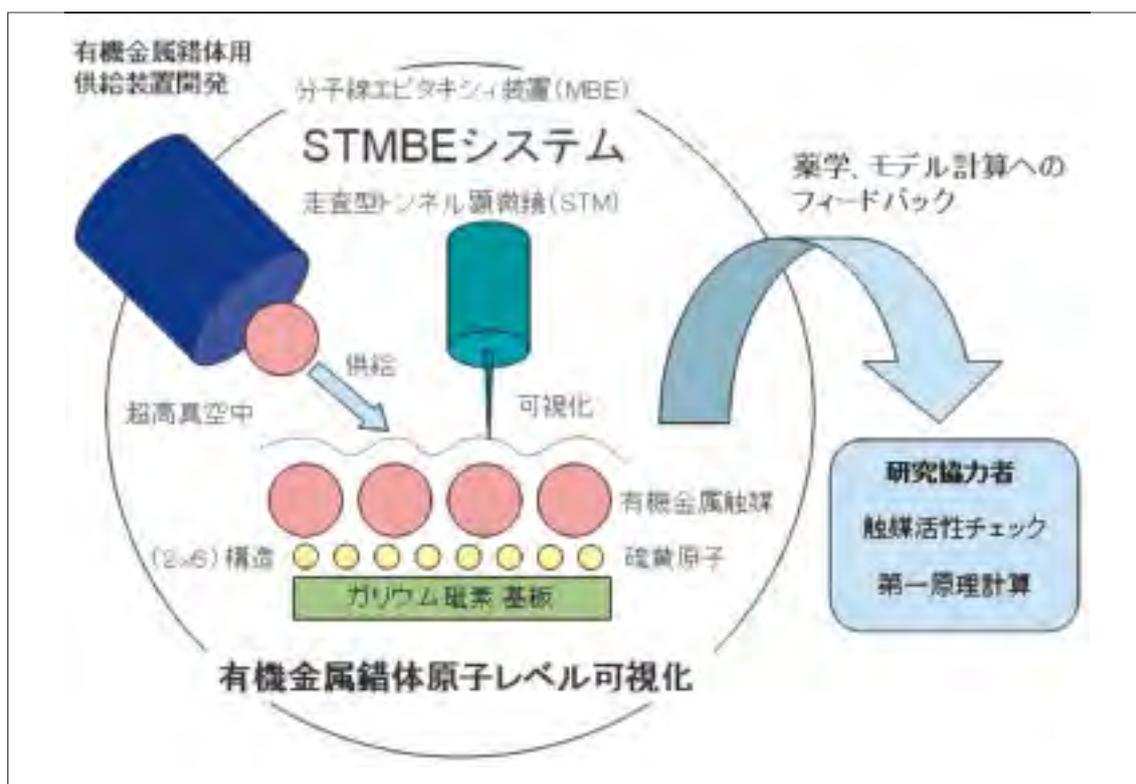


図5-4 有機金属錯体用供給装置開発

5.5 第4部討論

〈有機金属触媒に関する研究〉

- ・ GaAs 以外に Au でも電荷を与えることが可能ではないか。電荷を与え有機触媒周辺の環境を制御するナノコントロールが、既存の有機触媒では不可能であった。GaAs 自身が電気二重層の特性が異なるために効果が現れた可能性も考えられる。→ Au は効果が得られなかった。
- ・ V 族である As に S が加わるために効果が上がるのであろう。Ga 面の上に触媒を載せるとよいのではないか。GaAs 以外では ZnS や他の III-V 族もしくは S が表面に出る固体が適しているのではないか。→ Ga との接触面で電荷のやりとりがある可能性がある。それを証明する方法は確立されていない。当該部分をすべて計算して観察することが望ましい。
- ・ Heck 反応に関しては膨大なメカニズムの研究がされている。ここ 20 年反応機構に関する討論がされている。電荷の扱いのみで有機化学の反応論を論じることは不可能であろう。均一反応での機構が詳細に解明されるなどしている。様々な議論がある中で有機化学の分野に正面から挑むとなると大変である。→ 共同研究者はその分野の専門家である。研究で示された反応は Heck 反応であるに違いない。反応自身が溶解したものでなく完全に固定されたものであることは確認している。

〈溶液を用いた電荷の観察〉

- ・ 燃料電池の触媒反応を計測する場合、XAFS (X-ray absorption fine structure)

法や、XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) 法といった、電解質溶液中で観察する手法がある。電荷の変化に関しては、溶液の中で観察することが手法として考えられる。

- ・その場測定もしくは in-situ の測定で、中間体の構造を観察することは重要となる。

〈燃料電池の触媒層〉

- ・燃料電池のカソード触媒層における白金粒子は、室温領域で非常にゆっくりではあるが運動をしている。TEM により観察することができる。白金の代替物を用いる可能性としては、タングステン・カーバイトや白金コバルトも考えられるが、触媒としては白金が最適である。

〈IC タグ〉

- ・MEMS 分野においても、建築物の劣化調査に IC タグを用いたり、光ファイバーをコンクリートに埋め込んで観察したりといった手法が見られる。
- ・IC タグにはアクティブ型を使用する。現在のリチウムイオン関連の技術では、5~10 年の期間で機能するアクティブタグは電源の問題等があり、実現されていない。タグ自体は印刷技術で容易に作成できる。形態は無線式が考えられる。

〈血流の観察〉

- ・光干渉断層計 (Optical Coherence Tomography) 技術でドップラー解析を付加することにより、血流の有無を計測することが可能である。しかし流速の計測は実現していない。2 μm 程度の分解能で計測することが可能である。薬物の経皮吸収の状況の観察については、屈折率の揺らぎを後方散乱により観察する手法であるため、薬品 (材料) の変化等を直接的に観察することは不可能である。しかし分光学的手法と組み合わせれば多様な応用が考えられる。

〈半導体の計測〉

- ・半導体の非破壊検査等の際に、対象への染み込みの深さの波長による違いを用いた技術は、対象物によって可能である。半導体計測の場合は主に薄いものを観察対象としている。様々な角度から多種の偏光を照射し、はね返り方をデータベース化し半導体の構造を推測している。

〈化学反応との関連〉

- ・電子のやりとりの解明や原子・分子の素過程を解明は重要な分野である。有機金属触媒の研究は理論計算との相性がよく、今後も分野を融合する機会が増えるであろう。燃料電池の研究では性能向上のために、さらなる機構解明が追求されていくであろう。第一原理計算は電子のやりとりのある化学反応には用いられてないので導入すべきである。

6 第5部 全体討論

司会：鯉沼秀臣（科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー）

6.1 コメント1

/金山敏彦（産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター 副研究センター長）

新規な技術シーズは、他の周縁的技術との整合なしには一般に成立しえないものである。逆に例えば、半導体技術では光学的技術はミクロンオーダーのみの情報しか得ることができないものの、シミュレーションやデータベースと融合させることにより、ナノメータに及ぶ情報を入手することが可能となる。このように計測技術の評価では、他の技術との融合性を勘案する必要がある。

研究開発目的か量産目的か、というように使用される状況に応じて計測技術の手法も大きく変化する。計測技術は基礎研究段階のアイデアが実用技術に結実しやすい分野なので、基礎研究の研究者がより参画できる状況が望まれる。複合的計測技術を実現するには、試料を標準化するという考え方を取り入れたり、知りたい情報を入手するための手法を考えたりしなければならない。シミュレータに情報をインプットすることで複数の技術をつなぎ、必要な情報を入手できるような実際のデバイス構造を模した構造を作ることが有効な手法となる。デバイス分野では TCAD (Technology Computer Aided Design) に代表される総合的シミュレーションの手法がある。知識を集約する媒体として有用性が高い。

シーズとニーズのミスマッチ等に見られるように、基礎研究分野の研究者とデバイス開発の技術者のマインドの違いを埋めていかなければならない。コーディネーション機能が求められる。デバイス開発の技術者側には、ニーズの提出と同時に試料を提供して基礎研究分野の研究者側を育て上げる気持ちをもってもらう必要がある。長期的にはそれが、デバイス開発の技術者側の利益にもつながる。長期的な計画をもちつつ、ファンディングを実現できればよい。計測技術を社会に応用するためには、装置メーカー、プロセス装置メーカー、シミュレータメーカー等に関与してもらう必要がある。扱う情報が開示可能かどうかを区分しながら、協力する仕掛けも必要となる (図 6-1)。

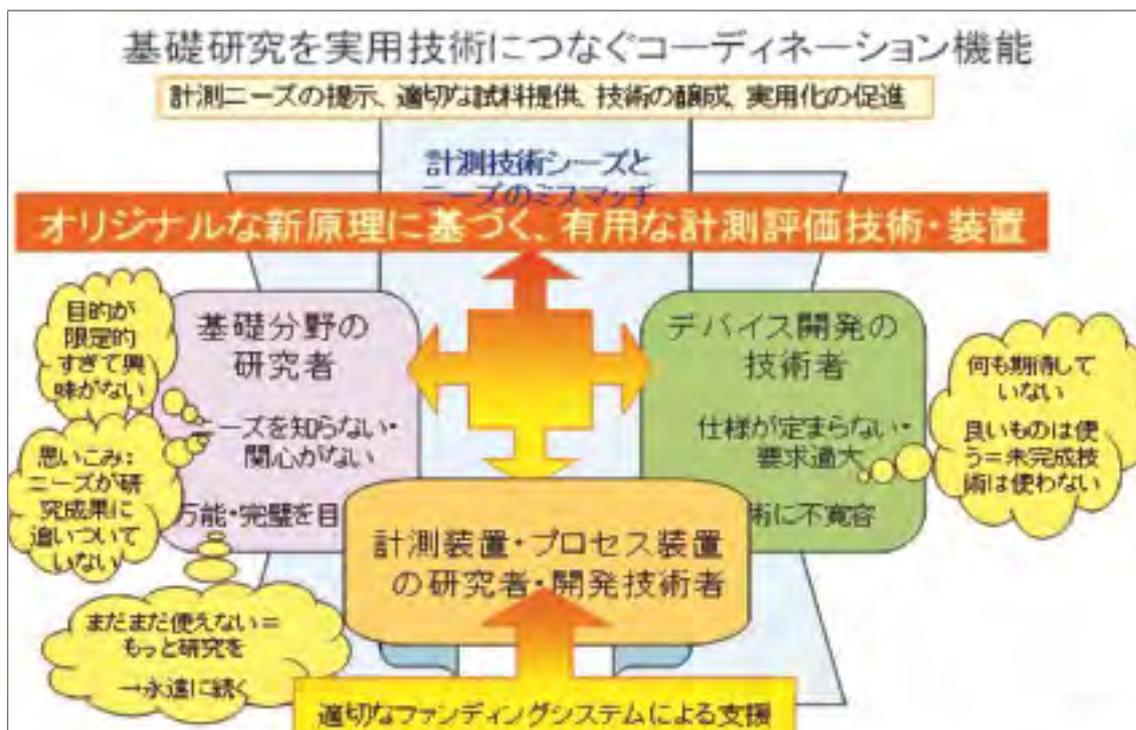


図 6-1 基礎研究を実用技術につなぐコーディネーション機能

6.2 コメント 2/今石宣之 (九州大学 先導物質化学研究所先端素子材料部門 教授)

新規の技術や装置が発展するには、リファレンスとなる情報の蓄積がなければならない。たとえば熱物性に関するデータベースが望まれるが、進捗は遅々としている。データの提供者が減少している背景がある。大きな産業基盤が衰退するのではと心配している。国の方針を決定する際、汎用的な技術や研究者の基盤を育成し、技術者の基盤を育成するといった方向性も重視されることを期待している。日本の学生は修士課程卒が多い。高度な研究にはポストも含め博士課程以上の学生の増加が望まれる。企業は博士課程以上の人材を敬遠しがちである。博士課程以上の層を受け入れるような社会の雰囲気づくりに大学の研究者がさらに努力すべきではないだろうか。

科学研究費補助金等の競争的資金の申請には「ナノ」などの流行の言葉が溢れている。しかし本当にナノの効果を正しく評価出来ているのか、疑問点が多く見られる。たとえばナノ粒子の添加により流体の熱伝導率が著しく増大するとの“ナノ流体”ブームについても、実は正確に測定すれば従来の推算式を用いても正確な推算は可能であることが判明する。一方、所属の研究所では微細な白金線を利用し、カーボンナノチューブの熱伝導を計測する手法を実現化している。このような新しい計測技術の開発と測定精度を高めていくことが、ナノ物性の計測やマクロ分野への応用という点で基本的課題となるであろう。

科学技術研究設備に対する国からの財政的支援の額が近年、縮小傾向にある。大学の部局への配分額は10～20年後には半減し、研究室単位では3～10年で赤字化する心配もある。汎用機器の維持管理が困難な状況になるのは問題である。若手技術者の養成にも支障をきたすのではないか。分子科学研究所と共同で、他大学の装置等を相互利用するネットワークの構築を検討した。化学関連の75大学と分子科学研究所が参加する。2007年

度予算として当初、年間 60 億円を要求 (分子科学研究所から一括概算要求) したものの、新規機器購入は除外され、28 億円で再要求をした。ところが先日の内示では、950 万円との回答であった。「自分の装置という意識を強くもっていた各大学の研究者が、相互利用を果たせるのか」といった疑問符を付けられた (図 6-2)。

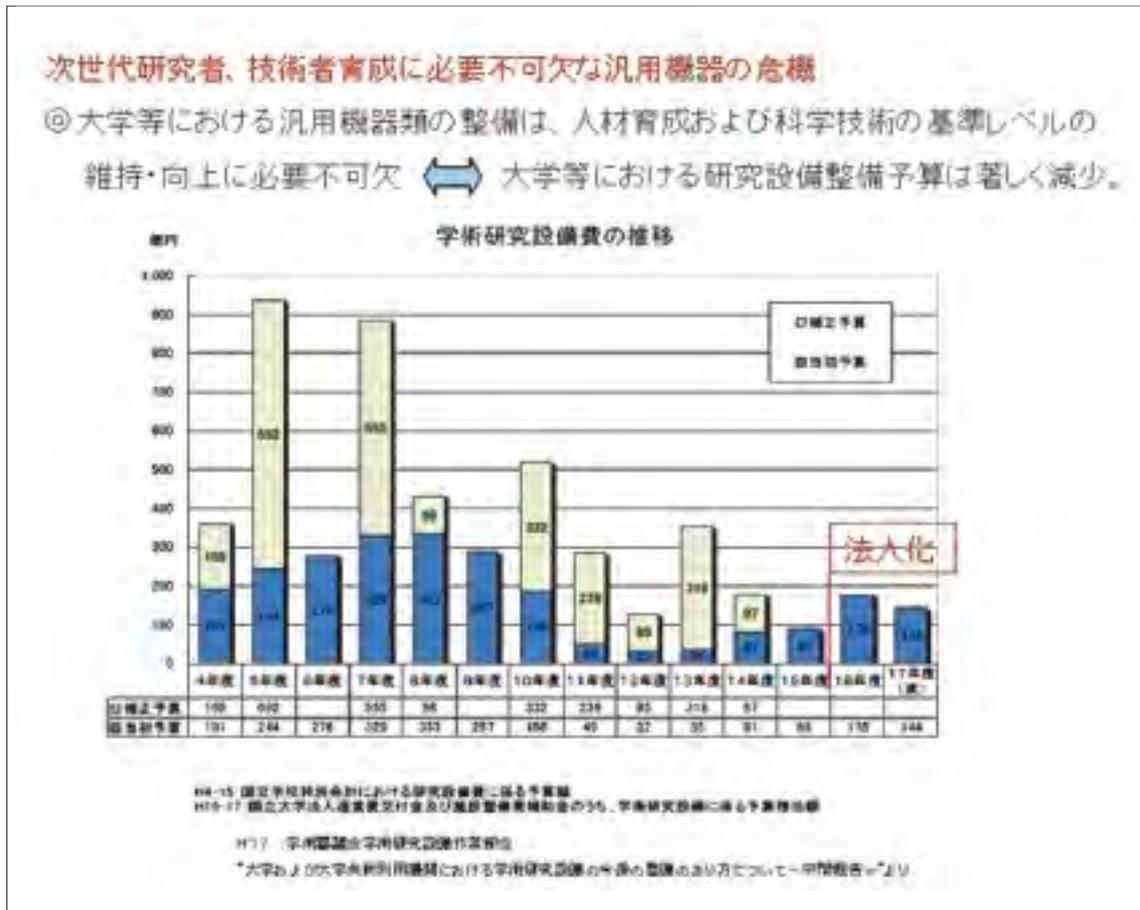


図6-2 次世代研究者、技術者育成に必要不可欠な汎用機器の危機

6.3 コメント 3

/湯村守雄 (産業技術総合研究所 ナノカーボン研究センター 主管研究員)

ナノテクノロジー分野では標準化の動きが国際的に急展開している。経済産業省の支援で1998年より実施されているフロンティアカーボンテクノロジープロジェクトでは、2002年から本格的にカーボンナノチューブ技術プロジェクト、2003～2005年には、ナノカーボン応用製品創製プロジェクト (FOCUS21) として、資金投資を受け成果を上げてきた。その代表例が単層カーボンナノチューブの開発である。化学的合成を用いながらも、欠陥はほぼ皆無で純度が高い。直径を 0.1 nm 刻みで制御することができた。

画期的な単層ナノチューブ合成法であるスーパーグロース技術の開発も進んでいる。触媒効率を向上させ、純度 99.98% のカーボンナノチューブの作成に成功している。

近年は、国際的な市場創出・拡大のためには知財戦略と並行して国際標準化が非常に重要になっている。ナノテクノロジー分野では製品が普及する前段階で標準化を推進する動向がある。標準化と知的財産が密接な関わりをもっている。ナノテクノロジーの市場を立

「ナノ計測」検討会
第1部 ナノサイエンス領域におけるナノ計測
第2部 情報通信エレクトロニクス領域におけるナノ計測
第3部 医療・ライフサイエンス領域におけるナノ計測
第4部 安全環境エネルギー領域におけるナノ計測

第5部 全体討論

まとめ

Appendix

ち上げるためには、これから到来する技術革新において、標準化と知的財産権を併用した産業化を構築することが重要となる。

最近は重要視されている安全性の評価の観点からも、計測に用いられる方法を標準化項目として整備することが求められている。台湾では「ナノマーク」を用いた製品の認証制度を導入している。安全性の評価確立等のために、ISO(国際標準化機構、International Organization for Standardization)でも、TC229(Technical Committee229)という標準化の専門委員会が発足し、2005年11月以来、昨2006年6月の東京開催を含め3回の総会を重ねてきた。同委員会では、計測とキャラクタリゼーションの規格、用語と命名法、製品規格を検討している。同委員会のワーキンググループ2では、カーボンナノチューブやフラーレンの計測評価手法の早期標準化の検討が、日本、米国、カナダの共通認識のもと、中国、韓国、イギリス、オーストラリアも参加して開始された。これを受け日本国内でも、ナノカーボン標準委員会が発足した。日本の戦略は、単層カーボンナノチューブの計測手法の標準化を通じて、日本しか開発していない高品質なカーボンナノチューブに焦点を当て、世界のデファクトスタンダードにしようとするものである。

標準化においては、ユーザ側に立った既存の評価技術と計測の標準化を進めるとともに、製造現場や取引現場でも機器持ち込みで使用できる、簡便で低コストの手法が望まれる(図6-3)。

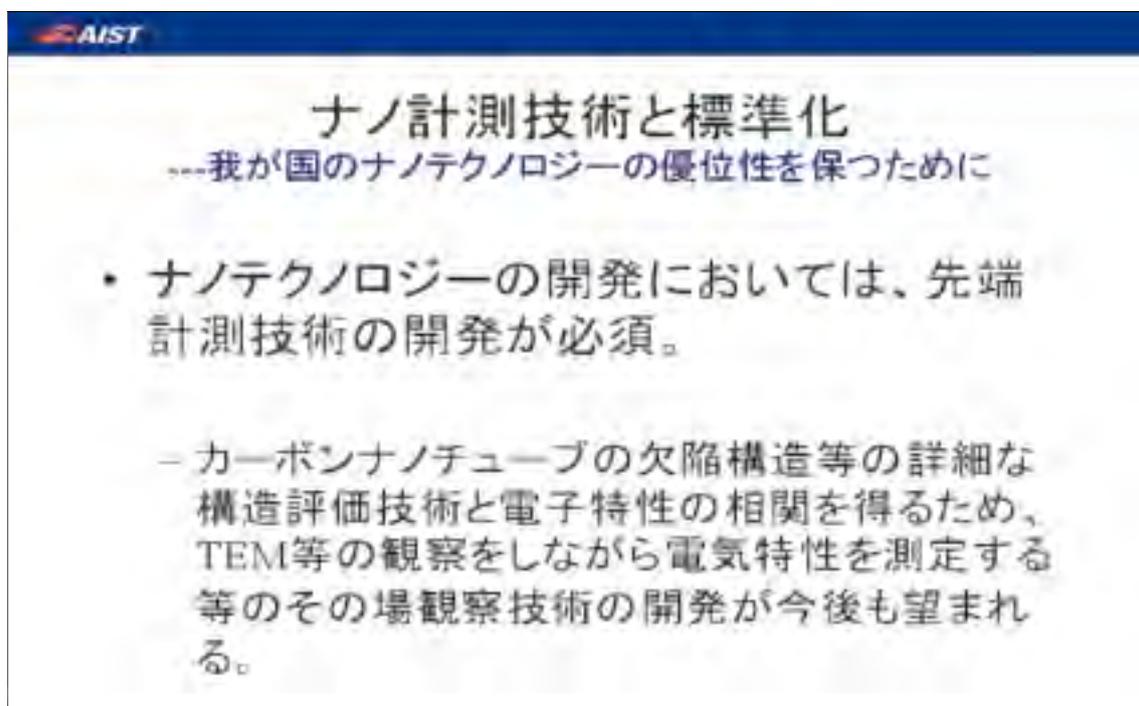


図 6-3 ナノ計測技術と標準化

6.4 コメント 4/安田賢二(東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 教授)

大学研究者が予算申請をする際、科学研究費、JST、NEDO等の役割分担の境界が明確でない。また、研究プロジェクトの次段階がどのようになっているのかが明確でない。科学研究費に関しては、シーズの芽やニーズの発見という萌芽的な部分を中心とするのが基

本であろう。次段階として、JSTには大学の枠にこだわらず、シーズとニーズの出会いを中心に取り組んでいただきたい。総合的な目標設定が可能なのは、実際に成果を活用するニーズ側であるので、ニーズ側に主導権をもつことが重要であると考えている。大学の枠を超えて実施する研究では、マネジメント的人材の存在も重要である。

ニーズを満たす技術を成熟させ市場に展開する段階を、NEDOが中心に担当することが望ましい。プロジェクトの設定時に連携型であることを参画者らに明確に示していただきたい。公募型以外に非公募型でNEDO担当者(経産省担当者)が主導権をもち、推薦や指命をする連携があってもよいであろう(図6-4)。

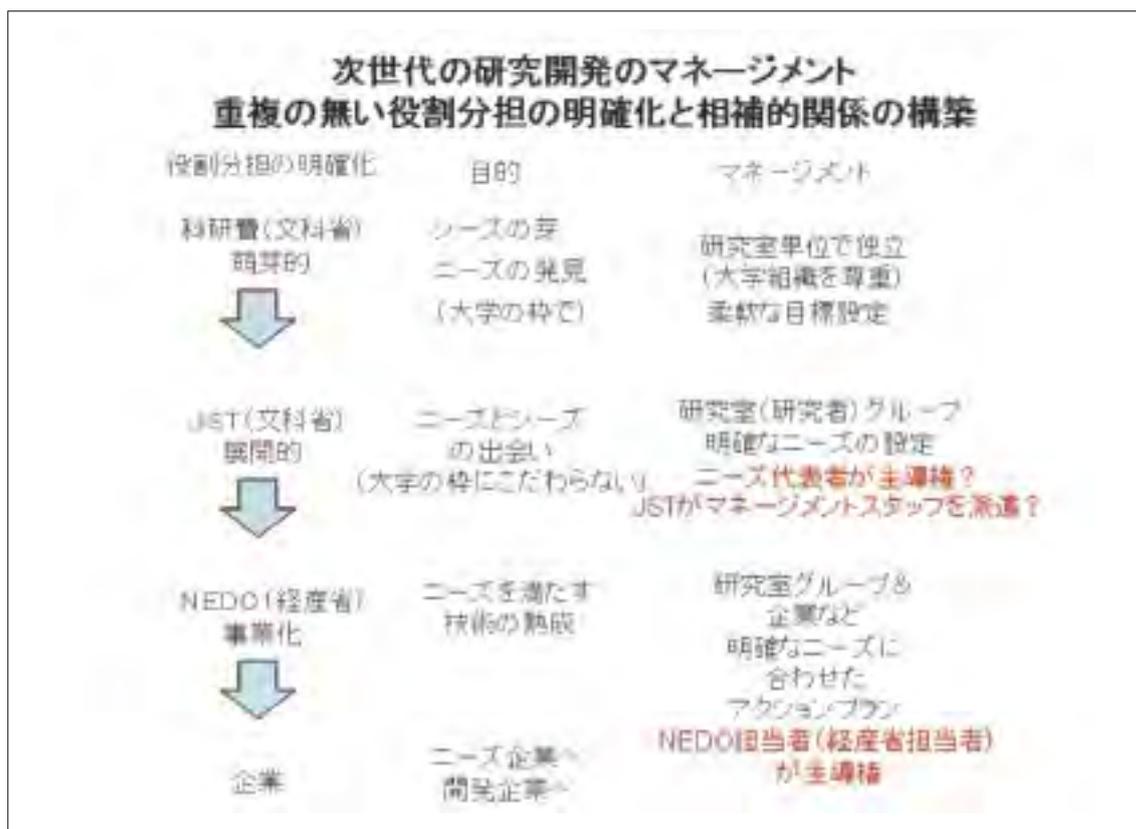


図 6-4 次世代の研究開発マネジメント

研究目的には「何のために行うか」を意味するコミュニケーション・パーパスと、「どのように行うか」を意味するテクニカル・パーパスの二つがある。前者を軽視する場合は多いが何のために研究をするのかを明確にしたうえで研究を開始することも重要であろう。研究開発には改良を目的とする「改善型」と、方法論は既存のまま新規分野に取り組む「革新型」と、理論から構築する「基礎型」の三種の種類があると考えている。どの種類に属するのかを明確にしつつ研究開発に取り組むべきである。研究プロジェクトが、次段階の別の研究プロジェクトとどのように関連・融合していくのかという観点からの枠組みづくりも重要である。技術を蓄積する主体は物や特許よりもむしろ人である。人材を確保しその人材が安心して研究を継続することが可能な枠組みの構築が要点となる。研究プロジェクトのコーディネータにはコミュニケーション・パーパスを意識した上で、新規シーズの育成のみならず既存シーズの活用も念頭におき、ニーズ側の立場からその技術の研究

を継続すべきかどうかの判断をする、といった役割が求められる。

米国の研究体制を喩えると原核生物型といえる。大型生物にはならないが経済的環境が急変した場合でも適者は生存する。一方日本は真核生物型であった。各臓器が役割分担をする大型生物になれるが、順応でしか対応できないために環境が急変すると壊滅的な被害を受ける可能性がある。バブル崩壊の頃日本は米国の原核細胞型を目標にしてしまった。しかし日本の強みは環境に順応する点にある。研究予算のファンディング面でも短期的、競争的にならずに、一時的に急変にも順応して生き残る機会を与えてほしい。

ナノ計測は技術の開発とコンセプトという理論の構築、プローブ技術の開発、計測技術の向上の三位一体で成立する。

6.5 第5部討論

〈米国の新規ネットワーク〉

- ・米国では軍が使用していた既存のネットワークがまもなく開放される。国民の福祉目的つまり医療目的のために用途が限定される。開放されたネットワークを用いれば遠隔操作手術などが進展するであろう。米国のFDAは、日本の厚生労働省よりも強い力をもってプラットフォームに参加する民間企業の技術者をコントロールしている。以上の技術は4年後には公開されるであろうが一切国外には知らされない。米国のシステム構築法や政府の指揮統制手法に関しては、積極的に情報を得ていかなければならない。日本でも国が確立した体制をとって臨まなければ遅れをとる。

〈標準化〉

- ・WD2 (第二次作業文書、Working Draft 2) はナノテクノロジーの標準化に大きな影響力がある。標準化に関しては表面電子分光分野で1982年のVAMAS(ベルサイユサミットに基づく新材料と標準に関する国際共同研究、Versailles Projects on Advanced Materials and Standards) が開始し、その中から電子分光系や電子顕微鏡系では、ISOのTC201(表面化学分析)やTC202(マイクロビーム分析)が派生し、標準化が進んだ。2004年TC202で走査型プローブ顕微鏡に関して標準化に向けた動向がある。
- ・台湾に関してナノテクノロジーへの投資計画は米国の形式とほぼ同様である。能力のある人物たちが統括役をしている。台湾は中国の一部と見なされているのでISOには参加できない。そのためAPEC(アジア太平洋経済協力、Asia-Pacific Economic Cooperation)を巻き込みつつ標準化への取り組みを以前より行ってきた。科学技術政策の戦略面で学ぶべきところがある。
- ・中国は国際標準化に向けてとりわけ戦略的に取り組んでいる。分析装置の市場開拓段階等では実際の効果が表れるかもしれない。日本の経済産業省と文部科学省には、心に留めておいてもらいたい。
- ・2006年12月に韓国で開催されたISOのTC229第3回総会では、韓国と中国が

カーボンナノチューブ分野を中心に意欲的であった。韓国サムスン社1社のカーボンナノチューブへの投資額は日本の研究費総額を上回っているかもしれない。国際標準を決める国際会議では競争だけでなく協調もしながら主導して、最終的に日本に利益がもたらされるように進めるべきである。

- ・技術開発が実現すると標準化が行われる関係から、標準化のための予算は技術開発予算の一部になると考える。研究している対象物の計測技術の開発も標準化の領域に含まれている。日本にとって有利になるようなカーボンナノチューブの標準化が目標の一つである。島津製作所の国際標準を目指した計測技術の開発が想起される。

〈省庁連携〉

- ・省庁連携で実際に研究テーマを開始するとプロジェクトの担当領域が不明瞭になる場合があり、難しい問題を抱えている。NEDOの「ナノテクチャレンジ(ナノテク・先端部材実用化研究開発)」制度では、シーズ側とニーズ側の異業種連携を条件とした提案公募の形態をとっており効果を上げている。一方トップダウン型のプロジェクトでは、産業ごとに課がある省内の組織体制と合致しない難しい部分がある。
- ・文部科学省の元素戦略と経済産業省の希少資源代替プロジェクトは、両者同時期にファンディング・公募をするといった連携を取る。文部科学省は物質の科学的特質面を担当し、経済産業省は物質の使用量の改善等の面を担当している。合同戦略委員会を設置し相互乗り入れの体制づくりを実施している。ナノエレクトロニクス分野でも同様の方法を実施していきたい。

〈総括〉

- ・米国のGE(ゼネラル・エレクトリック、General Electric)を例に挙げると、ビジネスユニットを統合させたうえでユニットのリーダーにイノベーションの創出をさせる。ビジネスリーダーが異動の際優秀な人材を伴わせて異動することが可能である。この点は日本企業と大きく異なる。半導体分野において米国企業は各社が基本的な部分に共同で取り組む点が多い。今後は各分野の企業のベストプラクティスに習うしくみが重要となる。ナノテクノロジー全体に通用する核となるプロジェクトを構築し、その中で知的財産を確保していけば機能するのではないか。日本では各企業の利益を考慮しつつプロジェクトを進めていく方法が課題となる。GEのような米国企業は社内のユニットで動くのに対し日本の企業は融合的に動く。研究の現場、開発の現場で困難が生じたら研究者は出向く。各部署間で簡単にすりあわせや融合をできる点が日本の強みである。
- ・バイオ分野では「その場での計測」が非常に重要となる。片手に乗る程度のデバイスとしてケミカルプローブには期待がある。ケミカルプローブに定量性をもたせるブレイクスルーが非常に重要である。
- ・計測研究の側とニーズ側とのマッチング方法に関しては政策誘導的な方法が必要である。双方が協力するようなインセンティブを与えるような競争であれば、競争的資金も

成立するであろう。今後 5 年間である程度の成果を出さなければナノテクノロジーの必要性が問われることになる。システムやデバイスの構築時に計測分野のグループをセットにしてプロジェクトを運営するといった政策誘導方法が考えられる。

7 まとめ

日本の計測技術は個々の要素技術に対しては世界をリードする部分も多い。しかしながらそれだけでは役に立たない要素技術が多いのも事実である。個々の革新要素技術は日本の先端基盤技術としては大切であり今後も推進すべきであるが、従来の日本の計測戦略は計測技術・装置開発自体に少々偏っている印象は否めない。計測技術・装置開発自体に特化せずナノテク全体の進化からの視点で取り組む必要がある。そのためにはニーズを出発点に解決すべき要素技術を選択する必要がある。本検討会はその最初の取り組みとして非常に意義があったと考えられる。

「ナノ計測」とは試料作製技術、測定環境技術、理論計算等、これら全ての総合技術である。ある具体的ニーズに向かってあらゆる科学技術を総動員する中で、最も重要な要素の1つとして「ナノ計測 (プロジェクト)」があると捉えるべきである。また分野融合の典型的な場であるナノテクにおいては、異分野で用いられている計測技術間の融合、新物理・化学現象のナノ計測技術への応用等を強く推進すべきである。“計測ベンチャー企業を作る”ことが目的になってはいけない。その種となるべき新しい概念・技術を生み出すことに軸足を置くべきである。これら観点からニーズを正しく反映するようなプロジェクトの仕組づくりも必要である。例えば特定のニーズを目標にしたプロジェクトの中で、その鍵となる計測の研究開発を必ず入れるようにするという具合に、ニーズ側の研究者をリーダーとしたプロジェクトが必要であろう。

ニーズを達成する可能性が高い計測シーズ (技術) の多くは、走査プローブ計測、電子・イオンビーム計測 (TEM 等)、光学 (X 線含む) 計測の基本・派生技術に、試料作製技術、測定環境技術の融合である。ニーズとシーズのカップリングを効率的に行うには、この点を考慮することも重要である。

本検討会では異分野を融合した計測や、高いニーズにもかかわらず未だ達成されていない計測の例が数多く挙げられた。今後はこれらを精査し深堀を行っていく予定である。

Appendix

1 本検討会の開催日時・場所

日時：平成19年1月13日(土) 9時00分～19時00分

会場：研究開発戦略センター 2階大会議室

2 本検討会のプログラム、参加者の構成

表1 本検討会のプログラム

プロローグ	9:00～9:25
開会の挨拶及び趣旨説明	田中 一宜/永井 康介
第1部 ナノサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ	9:30～11:15 司会：塚田 捷
ナノダイナミクス	塚田 捷
単一量子、極限スケール等	花栗 哲郎
ソフトマテリアル・合成	大須賀篤弘
コメンテーター	古宮 聡/二又 政之/渡部俊太郎
第2部 情報・通信エレクトロニクス領域におけるナノ計測ニーズ	11:30～13:15 司会：金山 敏彦
製造プロセス、その場検査ニーズ	金山 敏彦
Beyond CMOS	高柳 英明
有機エレ	八瀬 清志
コメンテーター	藤田 大介/田島 道夫/塚本 史郎
第3部 医療・ライフサイエンス領域におけるナノ計測ニーズ	14:15～16:00 司会：竹山 春子
医療・予防	北野 滋彦
非侵襲・その場の検診、多種検査	竹山 春子
生体内ナノ粒子 (安全性も含む)	阿多 誠文
コメンテーター	小野 崇人/田村 守 /菊地 和也/安田 賢二
第4部 安全・環境・エネルギー領域におけるナノ計測ニーズ	16:15～17:35 司会：金村 聖志
非接触な認証・検査	谷田貝豊彦
燃料電池、触媒	金村 聖志
材料劣化(腐食)	水流 徹
コメンテーター	塚本 史郎
第5部 全体討論	17:45～19:00 司会：鯉沼 秀臣
コメンテーター	金山 敏彦/今石 宣之 /湯村 守雄/安田 賢二

表2 本検討会参加者一覧

(a) 発表者

氏名	所属・役職 (いずれも検討会開催当時)
阿多 誠文	(独)産業技術総合研究所 技術情報部門 総括主幹
今石 宣之	九州大学 先導物質化学研究所先端素子材料部門 教授
大須賀篤弘	京都大学大学院 理学研究科 教授
小野 崇人	東北大学大学院 工学研究科 助教授
金山 敏彦	(独)産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター 副研究センター長
金村 聖志	首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 教授
菊地 和也	大阪大学大学院 工学研究科 教授
北野 滋彦	東京女子医科大学 糖尿病センター 教授
高柳 英明	東京理科大学 理学部応用物理学科 教授
竹山 春子	東京農工大学大学院 共生科学技術研究院 生命機能科学部門 教授
田島 道夫	(独)宇宙航空研究開発機構 教授
田村 守	北海道大学 大学院先端生命科学研究院 教授
塚田 捷	早稲田大学大学院 先進理工学研究科 客員教授
塚本 史郎	東京大学生産技術研究所 ナノエレクトロニクス連携研究センター 特任助教授
水流 徹	東京工業大学 大学院 理工学研究科 教授
花栗 哲郎	(独)理化学研究所 高木磁性研究室 専任研究員
八瀬 清志	(独)産業技術総合研究所 光技術研究部門 副研究部門長
藤田 大介	(独)物質・材料研究機構 ナノ計測センター センター長
二又 政之	(独)産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクトゥクス研究センター 主任研究員
古宮 聰	(財)高輝度光科学研究センター 産業利用推進室 特別研究員
安田 賢二	東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 教授
谷田貝豊彦	筑波大学大学院 数理物質科学研究科 教授
湯村 守雄	(独)産業技術総合研究所 ナノカーボン研究センター 主管研究員
渡部俊太郎	東京大学 物性研究所 副所長・教授

(b) その他の参加者

	氏名	所属・役職 (いずれも検討会開催当時)
内閣府	矢ヶ部 太郎	内閣府 総合科学技術会議事務局 研修員
	猿田 紀子	内閣府 総合科学技術会議事務局 参事官補佐
文部科学省	氏原 拓	文部科学省 研究振興局基礎基盤研究課ナノテクノロジー・材料開発推進室 室長補佐
	宇野 佳生	文部科学省 研究振興局研究環境・産業尾連携課 科学技術・学術行政調査員
	河本 洋	文部科学省 科学技術政策研究所 特別研究員
経済産業省	岩野 宏	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課/ファインセラミックス室/ ナノテクノロジー・材料戦略室 課長/室長
	穂積 篤	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課/ナノテクノロジー・材料戦略室 産業技術企画調査員
	稲垣 勝也	経済産業省 製造産業局 ファインセラミックス室/ ナノテクノロジー・材料戦略室 ファインセラミックス専門職/係長
	新居 勉	経済産業省 産業技術環境局研究開発課 研究開発専門職(ナノテック・材料)
物質・材料 研究機構	小嶋 典夫	(独)物質・材料研究機構 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
	平原奎治郎	(独)物質・材料研究機構 ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 企画部門長
科学技術 振興機構	北澤 宏一	(独)科学技術振興機構 理事
	相馬 融	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 先端計測技術推進室 室長
	澤田 嗣郎	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 先端計測技術推進室 開発総括
	高木 誠	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 先端計測技術推進室 開発総括
	本河 光弘	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 先端計測技術推進室 開発総括
	古屋 美和	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 先端計測技術推進室 主査
	速水 昇	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 先端計測技術推進室 主任調査員
	真造 謹爾	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 先端計測技術推進室 主任調査員
	古川 雅士	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 特別プロジェクト推進室 主査
	荒岡 礼	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 特別プロジェクト推進室 主査
	生嶋 達史	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 特別プロジェクト推進室 主査
	正木 法雄	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 研究企画調整室 主査
	松村 郷史	(独)科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 研究領域総合運営室 主査
	落合 幸徳	(独)科学技術振興機構 科学技術振興調整費業務室 プログラム主管
	田中 一宜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー
	安藤 健	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	大木 義路	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	江口 健	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	鯉沼 秀臣	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	松村 光雄	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
横溝 修	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー	
木村 茂行	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー (社)未踏科学技術協会 理事長	
田中 秀治	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー 東北大学大学院 工学研究科 助教授	

科学技術 振興機構	長谷川哲也	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー 東京大学大学院 理学系研究科 教授
	宮本 宏	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー (独)産業技術総合研究所 評価部 首席評価役
	村上 正紀	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー 京都大学大学院 工学研究科 教授
	雄山 泰直	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	久保内昌敏	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー 東京工業大学大学院 理工学研究科 助教授
	本間美和子	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	永井 康介	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー 東北大学 金属材料研究所 助教授
	中山 智弘	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	大矢 克	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシエイトフェロー
	横田 修	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシエイトフェロー
	石田 千織	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 事務補助

研究開発戦略センター報告書

「ナノ計測」検討会

報告書

CRDS-FY2007-WR-06

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19年1月

田中グループ

(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19年1月

© 2007 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。

