

ナノテクノロジー・材料分野
俯瞰ワークショップ報告書
ナノ計測技術領域分科会

2014年2月7日（金）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

エグゼクティブサマリー

本報告書は、(独) 科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) が平成 26 年 2 月 7 日に開催したナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ「ナノ計測技術領域分科会」に関してまとめたものである。CRDS ではナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書を 2 年毎に発行しており、直近では平成 25 年度に「研究開発の俯瞰報告書ナノテクノロジー・材料分野 (2013 年)」を発行している。これに続く 2015 年版を検討するにあたって、光、ナノ計測、バイオナノテクノロジー、物質・材料、製造・加工技術の 5 つの領域に焦点をあてた活動を行っている。今回、その一環として「ナノ計測技術領域」についてのワークショップを開催した。計測技術は、ナノテク・材料分野におけるあらゆる研究と一体不可分であり、今後は、3 次元計測、動的・リアルタイム計測、界面および内部計測、さらに生体物質・組織の計測や、プロセスの微視的解明のための使用環境下のその場計測に向けた技術開発、等に対するニーズがより高まっている。このワークショップでは、「今後のナノテク・材料分野における研究ニーズを切り拓く、ナノ計測技術」という視座から、各領域における先端技術動向の俯瞰、国として取り組むべきナノ計測の技術課題、注目される科学技術の潮流、方向性などについて議論し、今後の展望や推進方策を巨視的に考えることを目的とした。産学独の第一線の識者を招いての集中的な議論をおこなった結果の概略を以下に示すとともに、これら活動結果は CRDS でさらに検討を加えて、2014 年度末に発行を予定する「ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書 (2015 年)」に反映させていく予定である。

○ナノ計測技術

物質や材料の物性は、一般に原子あるいは分子が数個から数十個程度集まった大きさ、すなわちナノスケールの構造に起因する。複雑に見える現象でも、ナノスケールの領域で生じる少数原子 (あるいは分子) 間の相互作用に起源がある場合が多い。したがって、材料の物性や諸現象の起源を理解するためには、ナノスケールの構造や物性、さらにはその動的変化を直接計測できるナノ計測技術が必須となる。材料物性や物理化学現象の起源を理解できれば、それらを制御し改善するための方向性や指針が得られる可能性がより高まることになる。また、その方向性や指針に応じたナノ構造制御技術を開発・改良する場合にも、構造・物性の変化を評価する技術が必要となる。このようにナノ計測技術には、物性や現象の起源を理解し、それを制御するための方針を立て、そして実現するための手段を確立するすべての過程において研究開発ニーズがある。これらに対応できるナノ計測技術の研究開発は、幅広い学術・産業分野の発展にとっても、すでに欠かせないものとなっている。

○重要技術課題：ナノテク・材料研究における計測・分析は、物質開発と一体不可分である

ナノ計測では、計算科学と計測技術、材料創製との連携による Plan Do See のポジティブフィードバック構築が非常に重要となる。複雑な材料や、材料のその場観察・リアルタイム観察のニーズが高まり、ニーズとシーズのマッチング機会の創出が肝要である。特に生命科学やエネルギー・環境用途の材料においては、水中や大気中、表面ナノ形状や異種界面の接合、摩擦の状態など、多様な環境場における“その場ナノスケール計測”へのニーズが増大

している。例を挙げると、生体系において原子・分子レベルから細胞レベルまでをシームレスにつないでデータが連続的に見えるような計測体系の開発や、創薬・再生医療に関わる細胞の品質管理の計測データを分析し、予測しようとした場合の、分子レベルの観測。分子レベルでそれぞれの小器官の相互作用を解明していくシステムが必要であり、大きな課題である。さらに、材料の機能発現状態における原子レベルの計測・分析技術が求められている。例えば、二次電池や触媒などのような機能性材料が対象になる。機能性材料を、反応状態や大気中、あるいは電圧をかけた状態など発現状態や力学的応答による変形状態など、*in-situ* 測定を原子レベルで計測して分析する技術が重要となる。また、時間分解能や、材料変化の時間的予測につながるダイナミックな計測・分析技術が今後の課題である。とりわけ戦略的な仕組みを構築しなければならないのは、ナノ材料のリスク評価や、新材料開発と社会受容とを両立させる計測システム開発である。開発の初期段階から異なるステークホルダー間がコミュニケーションをとりながら連携して取り組む必要がある。

○日本としての取組体制に求められること

- ・ 先端的なナノ計測技術は、継続して独自の技術を開発し続けることが大事であり、そのためには、国が関与した長期的な体制があるかどうかは、世界的にも鍵になっている。また、国家プロジェクト等で開発した装置を広く展開するためには、展開のための導入措置が必要であり、例えば 10 機関程度で導入するようなまとまった整備をして開発装置を活用すれば、その前段となる企業の開発投資リスクを低減することにつながる。産学両体として国の戦略的取り組みが決め手になる部分である。このような長期体制に伴う独自技術があれば、多くの新しい発見ができ、飛躍的な知の創出にもつながると考えられる。新しい測定技術は、効果を発揮する用途を見出していくことが重要であり、例えば研究開発の公募の際に、技術開発と応用研究の異なるチーム同士が一緒に取り組むことを条件にするなどの工夫が考えられる。
- ・ 日本では、最初のトレンドが去った後の研究投資が極端に減る点に課題がある。投資がトレンドに偏重するのはどの国でも同じだが、しかし、過去に投資して世界最高レベルに育てた技術分野を急速に失ってしまうリスクがあり、一度失った技術を取り戻すことはほとんど不可能であるということを忘れてはならない。結果として、長期的には無駄な投資になる恐れがある。計測のような研究開発の基盤となる技術をトップレベルに維持し続けるためには、一課題単位とは異なる一定の範囲を持ったスキームが必要である。応用研究やエネルギー分野などの共同研究として加わって、サブテーマとして取り組むだけでは、世界をリードして新しい可能性を発信することは極めて困難である。
- ・ 文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム事業に代表される先端装置の共用化を進めることで、様々な人が装置を利用し、そのアイデアでさらに新しい装置開発が進むきっかけともなり、シナジー効果が出て産業界でのイノベーションが進むと期待される。このような共用化プログラムでは技術支援人材を雇用しているが、高度な技術を持つ装置運用の専門家と、研究者との役割とは、重なる部分はあるものの完全な一致はしない。研究者が支援・共用化に業務を特化すると、オペレーター化してしまう恐れがあり注意

を要する。例えば、透過型電子顕微鏡の測定データから情報を最大限に引き出すためには、複合的な知識を有していることが極めて重要であり、そのためにも自ら基礎的な研究に関わることが欠かせない。隣接する複数の分野を俯瞰的に見ることでできる研究者を養成することが必要である。そのためには、若手研究者が自ら責任を持って骨太のテーマに挑戦できるような、公募型の研究開発プログラムは重要となる。

- ・標準化戦略の重要性が指摘されて久しいが、標準化の取り組みには、その分野で国際的に対応できる人を育てるという意味がある。国際会議の舞台で日本の主張を適切に発信できる人材を、標準化活動を通じて育成することは重要であると同時に、長期的な対応組織を整備することが必要である。

○分析機器の世界市場とビジネスの変化に際して求められること

分析機器の世界市場は 2011 年時点で 4.4 兆円、実験台等のファシリティを除いた正味の市場は 3.7 兆円、そのうち 1.1 兆円をライフサイエンス分野の機器が占める。2000 年以降、年平均で 6%の成長をしている。市場を占有する上位 50 社のシェアでは、米 (65%) に続き日本は独 (14%) と並ぶ同 2 位 (14%) である。米国のトップメーカーの市場寡占化と、ドイツ企業の成長が著しく、日本企業のプレゼンスは相対的に低下傾向にある。その背景には以下のようなビジネス構造の変化が起きている。これまでは、ユーザー顧客からの最新技術の相談が新製品開発の一次情報となり、技術をブラッシュアップすることにより分析装置として普及していく、また、装置の普及によってブランドが構築されていくという流れをたどるものが多かった。しかし、成長率の高いライフサイエンス分野などの分析機器は、既存技術の延長線上ではない「不連続なイノベーション」により新技術が開発されるケースが目立ってきた。ユーザー顧客からの相談が新製品開発の一次情報となるサイクルとは異なり、これまでのビジネスモデルが通用し難い。米国では大手企業が参入しにくい不連続なイノベーションを、ベンチャー企業が担っている。研究開発した製品、アフターマーケットでのビジネス、サービス、のそれぞれを世界市場に投入して利益を生み出し、その結果を税収として政府に戻すという戦略的な投資概念（利益循環型戦略）が米国などにはある。日本のこれまでの産官学の国家プロジェクト等では、分析手法の基礎研究が中心であったが、不連続なイノベーションに対応するため基礎研究に加えて、産業化のための市場を創造する応用研究を組み合わせた、日本の産学全体で推進する仕組み・方策を検討する必要がある。今後期待されているのは、未だ適切なソリューションが存在していない計測ニーズを同定し、それに応えるソリューションを探索するための枠組を産学官で作ることである。

目 次

エグゼクティブサマリー

ワークショップの趣旨説明 河田聡、佐藤勝昭、永野智己（JST-CRDS）	1
--------------------------------------	---

第一部 今後のナノ計測技術への期待

分析機器業界の現状と期待すること 中川利久（島津製作所）	6
ナノ計測分野における分析機器メーカーの役割と課題 杉沢寿志（日本電子）	14

第二部 研究ニーズに対する意見

話題提供 1 木を見るナノ計測と森を見るナノ計測 大久保雅隆（産総研）	23
話題提供 2 最先端計測技術の開発と共用によるシナジー効果とイノベーションの 加速 藤田大介（NIMS）	32

第三部 ナノテク・材料研究を拓く先端計測技術（前半）

話題提供 3 日本の透過型電子顕微鏡技術の現状と課題、将来展望 柴田直哉（東京大学）	40
話題提供 4 有機機能性材料開発の現場で求められるイメージング質量分析技術 豊田岐聡（大阪大学）	47
話題提供 5 先端 AFM 技術を用いた学術・産業分野における研究の重要性と課題 福間剛士（金沢大学）	53
話題提供 6 NMR；装置、周辺技術、応用 大木進野（北陸先端大）	60

第四部 ナノテク・材料研究を拓く先端計測技術（後半）

話題提供 7 生体分析・フルイディクス 渡慶次学（北海道大学）	66
話題提供 8 材料表面における「官能基」レベルの化学状態分析とこれらの 「水分子」との相互作用計測の重要性 由井宏治（東京理科大）	72
話題提供 9 陽電子消滅測定 大島永康（産総研）	82
話題提供 10 量子ビーム計測と物質設計 坂井徹（日本原子力研究開発機構）	94

総合討論（コーディネーター 河田 聡）	99
---------------------	----

付録 1. プログラム	106
付録 2. 参加者一覧	107

ワークショップの趣旨説明

河田聡、佐藤勝昭、永野智己（科学技術振興機構 研究開発戦略センター）

研究開発戦略センター（CRDS）は、国内外の科学技術動向を調査・分析し、国として重要な研究開発領域の特定や研究開発の推進方法等について、戦略プロポーザルというかたちで提言書をまとめ発信する、いわば公的シンクタンクとしての機能を担っている。提言にあたっては、科学技術全体の動向を構造的に俯瞰したうえで、戦略的に検討をおこなうことが最も重要であり、ナノテクノロジー・材料分野においても全体の研究開発動向をまとめた俯瞰報告書を2年毎に出している。俯瞰活動の過程において今年度、ナノ計測、光、バイオナノテクノロジー、新物質・新材料、製造・加工技術の5領域を集中的に調査・検討することとしている。この5領域は、これまでの俯瞰活動において十分な調査検討がなされていなかったとの認識のもと行うものであり、その一環として今回はナノ計測技術領域の俯瞰ワークショップを企画した。

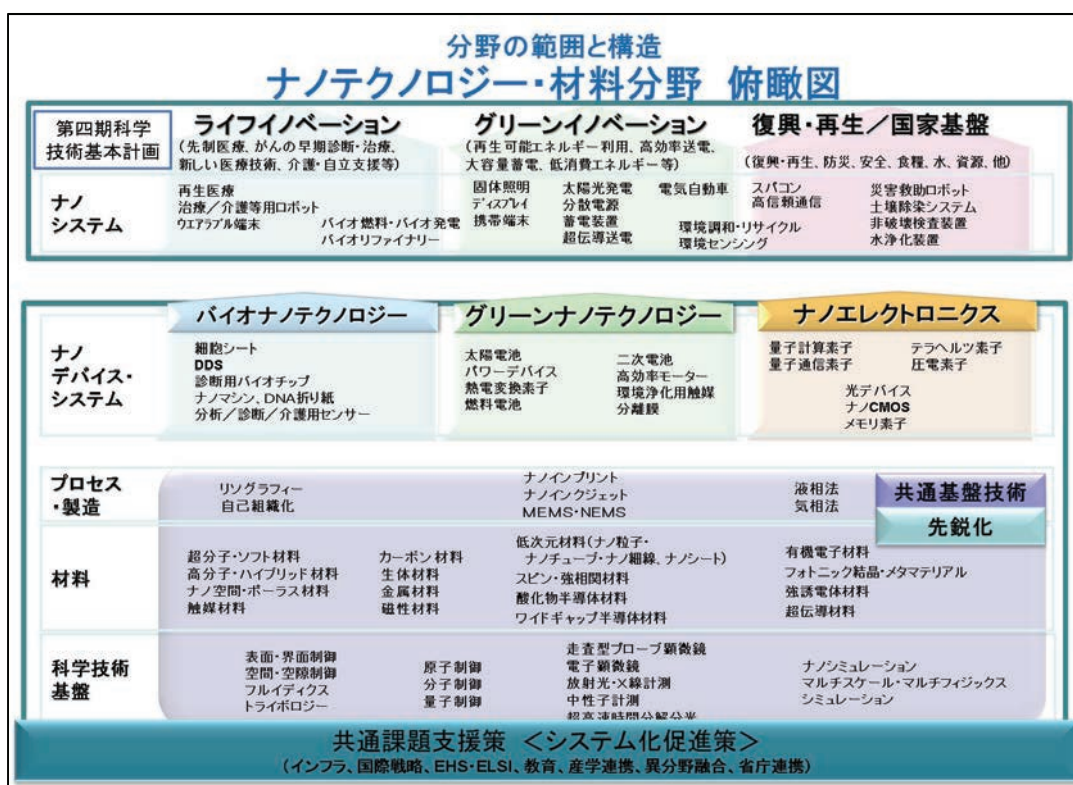


図 1-1

図 1-1 は昨年度作成したナノテクノロジー・材料分野全体の俯瞰図である。上部は社会あるいは第 4 期科学技術基本計画で掲げるライフイノベーション、グリーンイノベーション、復興再生との符号を考慮した構成としている。ナノテクノロジー・材料分野の科学技術はその直下に位置づけており、下方の政策としての共通課題支援策および科学技術基盤からナノデバイス・システムまでを下から上に向かう流れとして縦に記載している。これらの科学・技術を融合あるいは統合することによって、社会・産業の諸領域での本質的な貢献を企図している（ナノテクノロジーのシステム化）。俯瞰図には様々なキーワードをちりばめており、

計測技術に関するワードも当然入っている。これを今年から来年にかけて更新し、さらにナノ計測技術領域としてのマップを作成することを目指している。ナノテクノロジー・材料分野の研究ニーズを切り拓く上では、一体不可分であり欠かせない計測技術研究開発を「ナノ計測」と定義して今回のワークショップでは扱っている。こうした活動のなかから、ナノ計測に関する研究開発を国として戦略的に取り扱うための、論点や方向性を明らかにしていきたい。俯瞰図はそのような議論の土台となるものであり、未来を見据えるような俯瞰図を検討したい。

「計測は科学の母」、マザー・オブ・サイエンスであるとも言われるが、それにもかかわらず、わが国の現在の計測・分析機器開発は順調とはいえない。CRDS には現在、各技術分野のユニットを横断するかたちで計測技術に関する横断グループを設置しているが、グループでは単に計測技術そのものではなくて、科学の未解決問題にどのように迫るのか、科学の大きな未解決・未解明の問題をターゲットとして、分野を越えてシーズを結びつけながら計測・分析技術がかたちを成していく、そのための調査検討をするという方針を CRDS 吉川センター長が示している。

俯瞰(ナノ計測領域)の事前認識



- 材料の物性は、一般には原子あるいは分子が数個から数十個程度集まった大きさ、すなわちナノスケールの構造に起因。
- 複雑に見える現象でも、ナノスケールの領域で生じる少数原子(あるいは分子)間の相互作用に起源がある場合が多い。
- したがい、材料の物性や諸現象の起源を理解するためには、ナノスケールの構造や物性、さらにはその動的変化を直接計測できるナノ計測技術が必須。
- 材料物性や物理化学現象の起源を理解できれば、それらを改善するための方向性や指針が得られる可能性はより高まる。
- また、その方向性や指針に応じたナノ構造制御技術を開発・改良する場合にも、構造・物性の変化を評価する技術が必要。
- このように、ナノ計測技術には物性や現象の起源を理解し、それを制御するための方針を立て、それを実現するための手段を確立するすべての過程において研究開発ニーズがある。
- これら研究開発ニーズに対応できるナノ計測技術の開発は、幅広い学術・産業分野の発展にとって欠かせないと考えられる。
- 以上から、ナノ計測に関する内外の研究開発の動向とニーズを俯瞰し、今後のナノ計測研究開発全体の方向性に関する議論を深め、認識共有を図る。

図 1-2

今、20 年前とは違って、ナノ計測というすでに多くの製品化された機器があり、研究開発の世界では、その製品に「使われている人」が多いのではないかという声も聞こえる。少なくとも 20 年前の研究室では、多くの研究者は自ら装置を作っていたわけで、そこでは当然新たな計測技術を作っていた。この機会にぜひ、研究開発の最先端で活躍されている方々に、今後さらに新しい計測技術を生み出し、ナノ材料の開発・設計や応用に貢献するナノ計

測というものを議論していただきたい。

ワークショップの後半で行う総合討論では、ナノ計測全体をどのように俯瞰するのか、すなわちどう構造的に捉えるべきなのかという議論をしたい。俯瞰図の軸、範囲や境界領域をいかに描くべきなのか、そしてまた、これからの具体的な計測技術研究開発の方向性、主要な柱・課題は何であるか、それらを推進していく上での政策・制度上の課題は何であるか。他、異分野融合、産学官連携、国際連携、日本の特徴的な問題、などを時間の許すかぎりでも議論したい。

過去に CRDS では数回、計測技術に関するワークショップを開催し報告書をまとめてきた。いわゆる計測技術と言ったときに、どこの立ち位置から、何を見ながら話をしているのか、ということが往々にしてバラバラで議論が混乱してしまうことがよくある。このワークショップでは、ナノテクノロジー・材料分野の研究開発を新たに切り拓く、それは計測と一体不可分であって、切り拓くための計測技術はどのようなものであるかという視座で臨みたい。その際、個別に細分化された技術だけでは成立し得ないので、スコープをやや広げて、様々な産業分野とのインタラクションを考えながら議論することとしたい。

CRDS では 7 年前と 3 年前の二度、ナノ計測に関するワークショップを開催し報告書を出してきた。研究ニーズと計測技術シーズとが如何にして「邂逅」するのかという検討を試みた。しかし、ニーズから紐解こうとしても、具体的に何を測りたいのか、どのような物理量の表現によってキャラクタイゼーションをしたいのかというところまで、同定して俯瞰的に構造化することは容易ではなかった。すなわち、メジャメントからメジャランドに落とし込むところと、それを測定できるプローブ等が実際に何であるか、どのようなシーズが応え得るのかというところまで、議論が届かなかったのである。ニーズとシーズの両者の議論が噛み合えばよいが、使う専門用語にはかなりギャップがあって、何を話しているかお互いわからないということが常に起きてしまう。今回のワークショップに参加している方々は、それぞれに先端技術を有する方であり且つ、技術をどう活用するのか、さらにどのようなかたちでサイエンスに迫るのかというところまで、踏み出して研究開発活動に携わっている方々であり、このような参加者間での議論に大いに期待している。

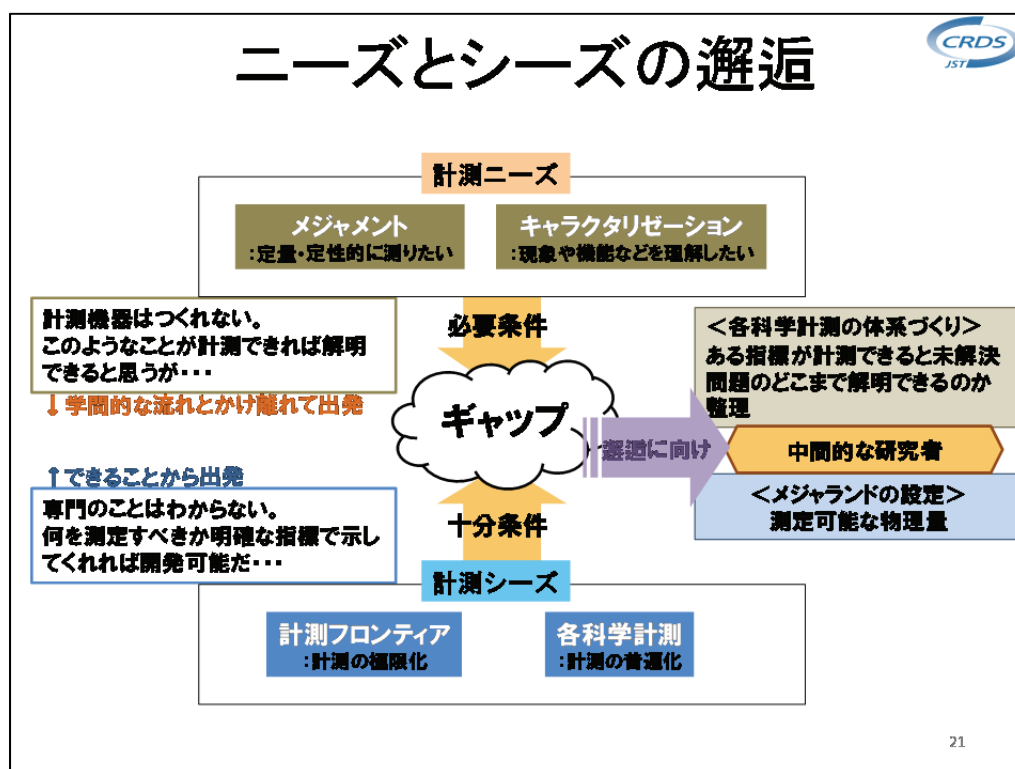


図 1-3

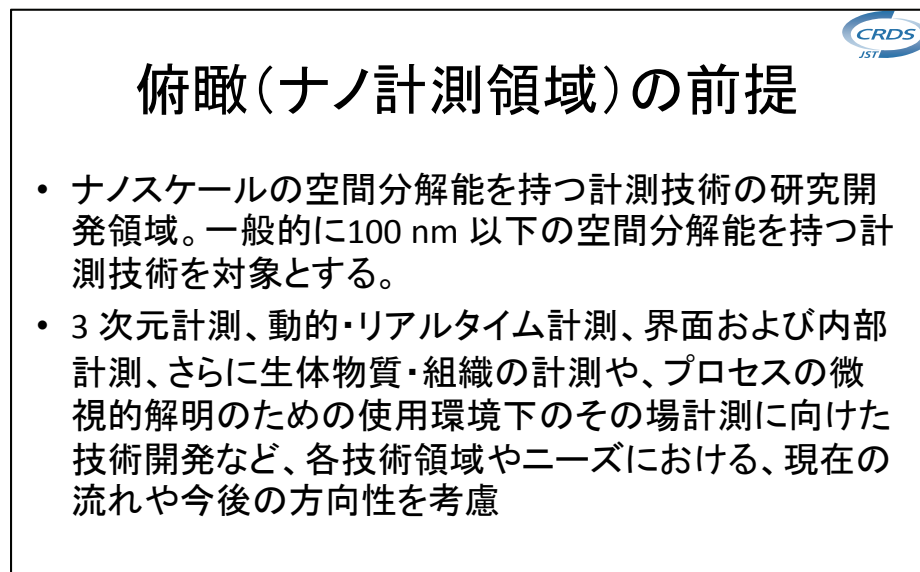


図 1-4

各計測の技術領域における、いわゆる流れや潮流を明らかにしたい。例えば、より複雑で現実の過程を見たいというニーズの高まり、それとは対称的に、ある特定の測定技術の分解能を徹底的に高め極限化を追求する世界、そして、シミュレーションやデータの自動化・解析ソフトなど情報通信技術によって実現すること、また、低コスト化やデスクトップ型などの小型化技術・汎用化技術、標準化に代表されるユーザーニーズへの対応等がある。これからのナノ計測技術の具体的な流れを複数明らかにしていきたい。

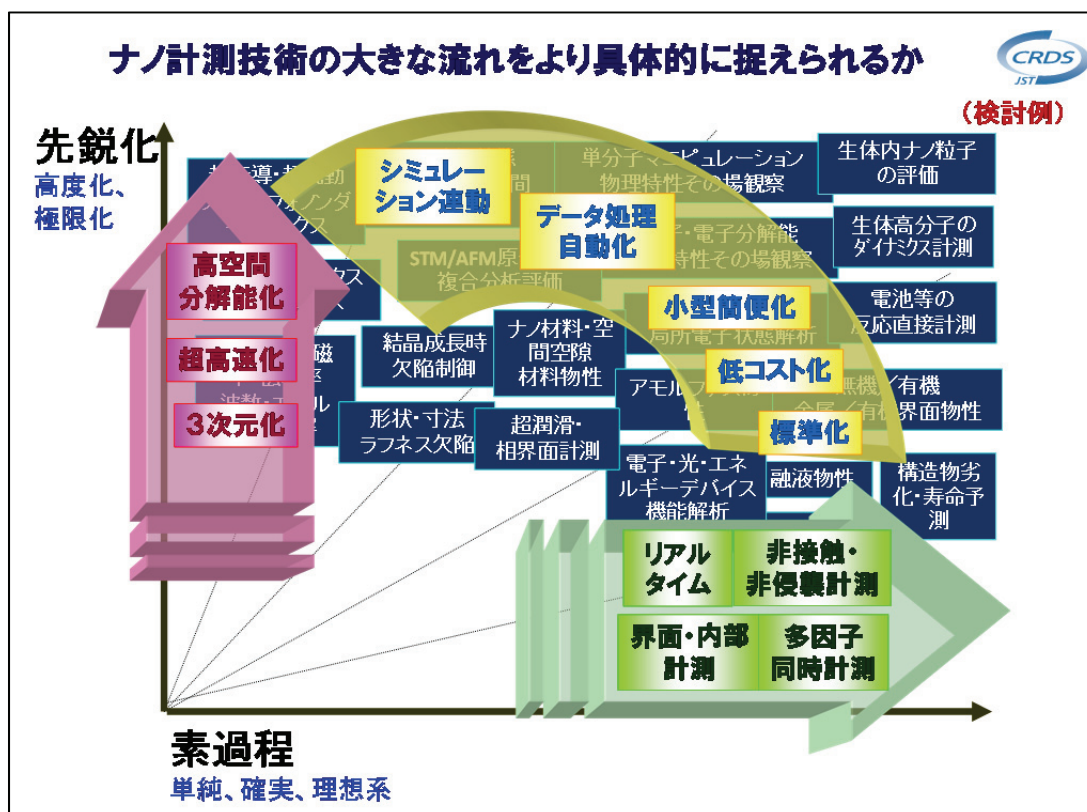


図 1-5

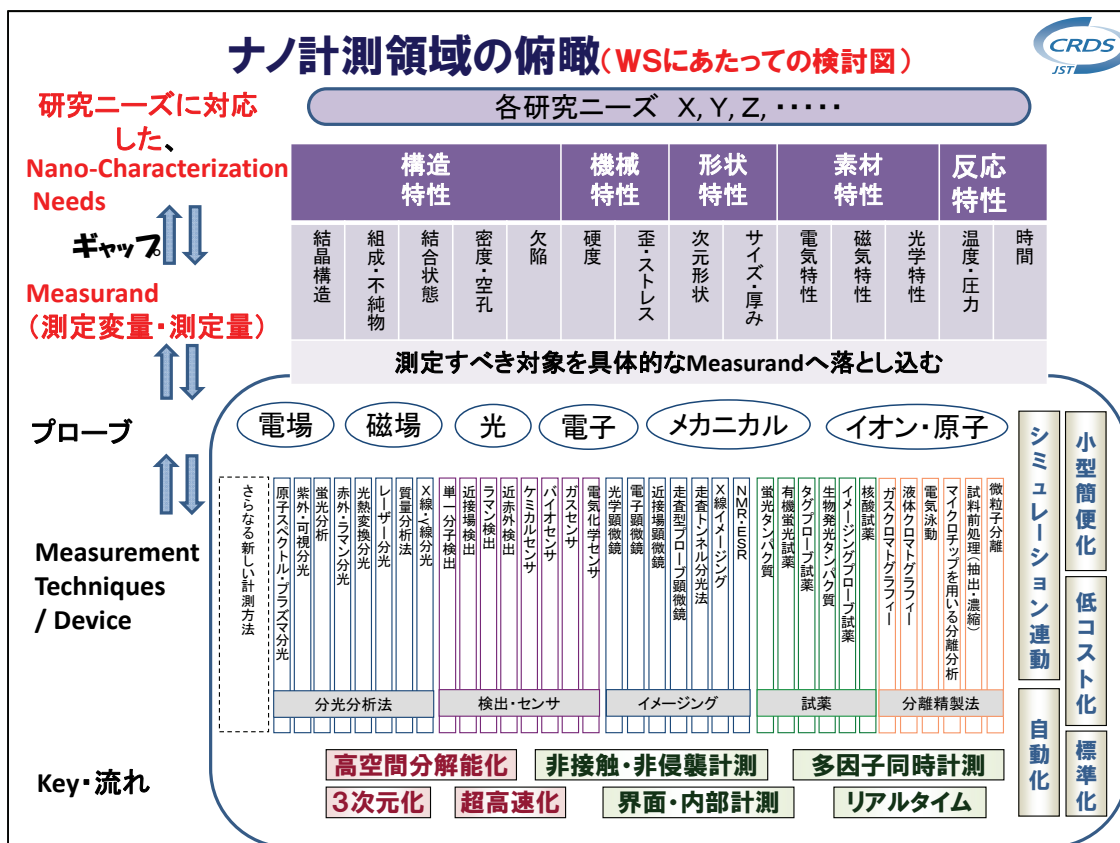


図 1-6

第一部 今後のナノ計測技術への期待

分析機器業界の現状と期待すること

中川利久（島津製作所 分析計測事業部事業企画部）

島津製作所において分析計測機器の戦略・企画を担当している。分析機器業界が直面している現状と、その課題について紹介する。市場の状況を説明した後、これまでのビジネスモデルと、いま、ビジネスモデルがどんどん変わってきているということを話す。

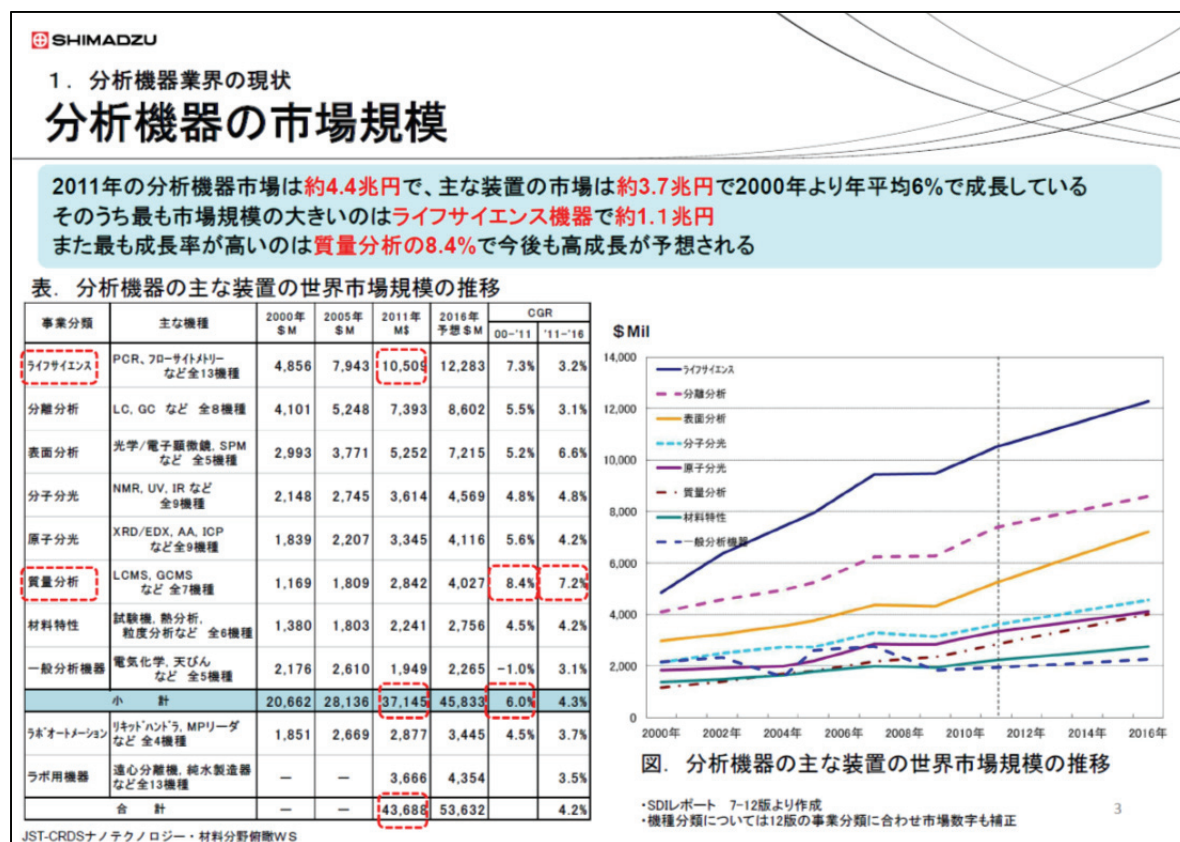


図 2-1

分析機器全体の市場は 2011 年時点で約 4.4 兆円規模である。なかでも実験台やファシリティなどを除いた、正味の分析機器装置は約 3.7 兆円規模となっている。2000 年から 2011 年の成長率は年平均で約 6%である。内訳をみると、最も大きな割合を占めているのが、図中一番上のライフサイエンス分野の機器で約 1.1 兆円、年平均成長率も高く 7.3%である。また、成長率が 8.4%と最も高いのは質量分析装置で、今後も質量分析機器には高成長で進むのではないかと予想している。

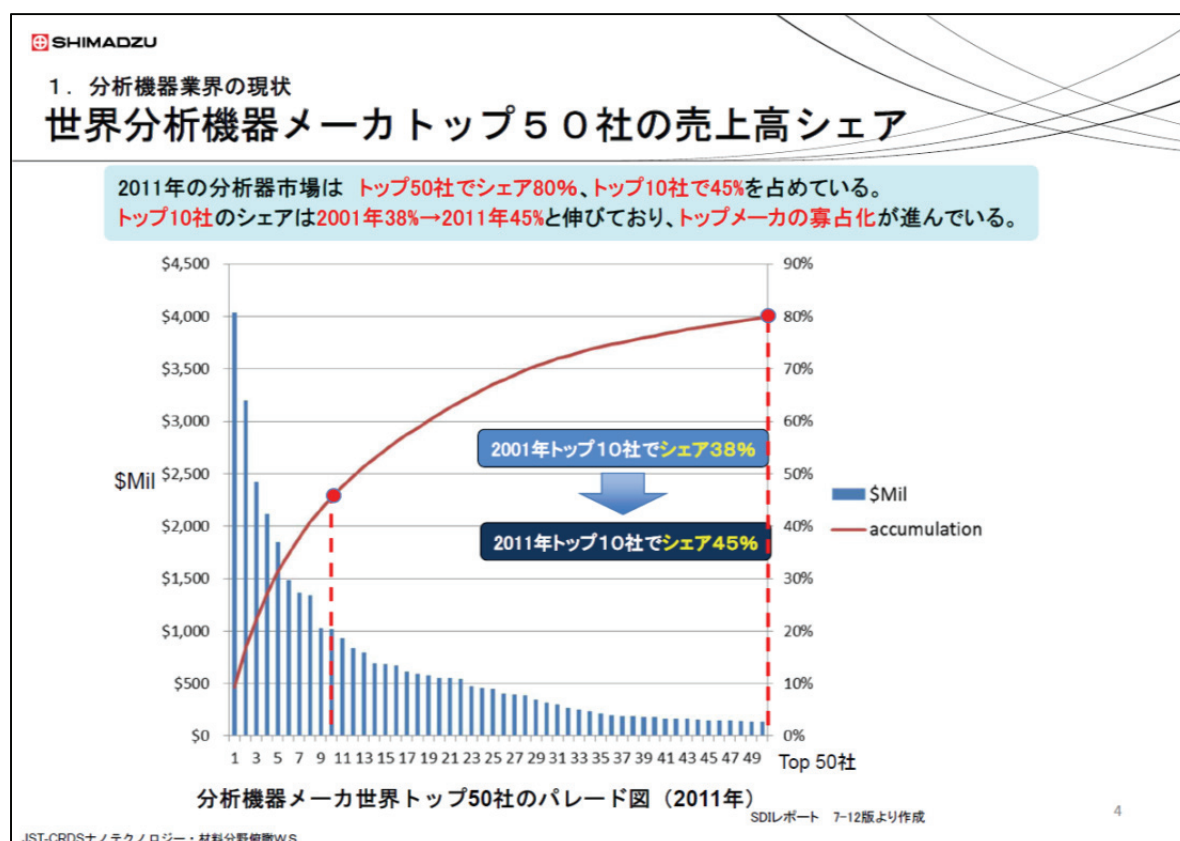


図 2-2

図 2-2 は世界の分析機器メーカーのトップ 50 社の売上について順番に並べ、累積シェアを表したものである。分析機器メーカーは数多くあるが、2011 年のトップ 50 社で全体の約 8 割のシェアを占めている。さらにトップ 10 社で全体の約 45%のシェアを占めている状態であり、2001 年時点ではトップ 10 社のシェアが 38%だったが、10 年後の 2011 年には 45%になった。特に大きなメーカーの M&A による寡占化が進み、トップ数社は 1 兆円規模の企業になっている。

これを国別に解析すると、図 2-3 のようになっている。2001 年と 2011 年について、トップ 50 社に限った国別のシェアを表している。アメリカのメーカーは 10 年の間に 67%から 65%となっていて大きく変わっておらず、また、日本も 13%から 14%ということはほとんど変わっていない。しかし、3 番目のドイツに関しては、5%だったものが 14%と大きくシェアを伸ばしている。今後ドイツメーカーのシェアがさらに伸びてくることが予想されている。

ドイツメーカーがなぜ伸びているのか、理由は一つではないが、その一端に政策面の強化が挙げられるのではないかと。ドイツは政府のナノテク関連のアクションプランにおいて、分析機器・分析技術を重要技術として掲げている。また、分析機器の開発から顧客を見つけて装置を導入するところまで、政府の研究機関が関与している。基礎研究、応用研究、製品化をマックス・プランク研究所やフラウンホーファー協会などがつながって、一連の流れを形成している。

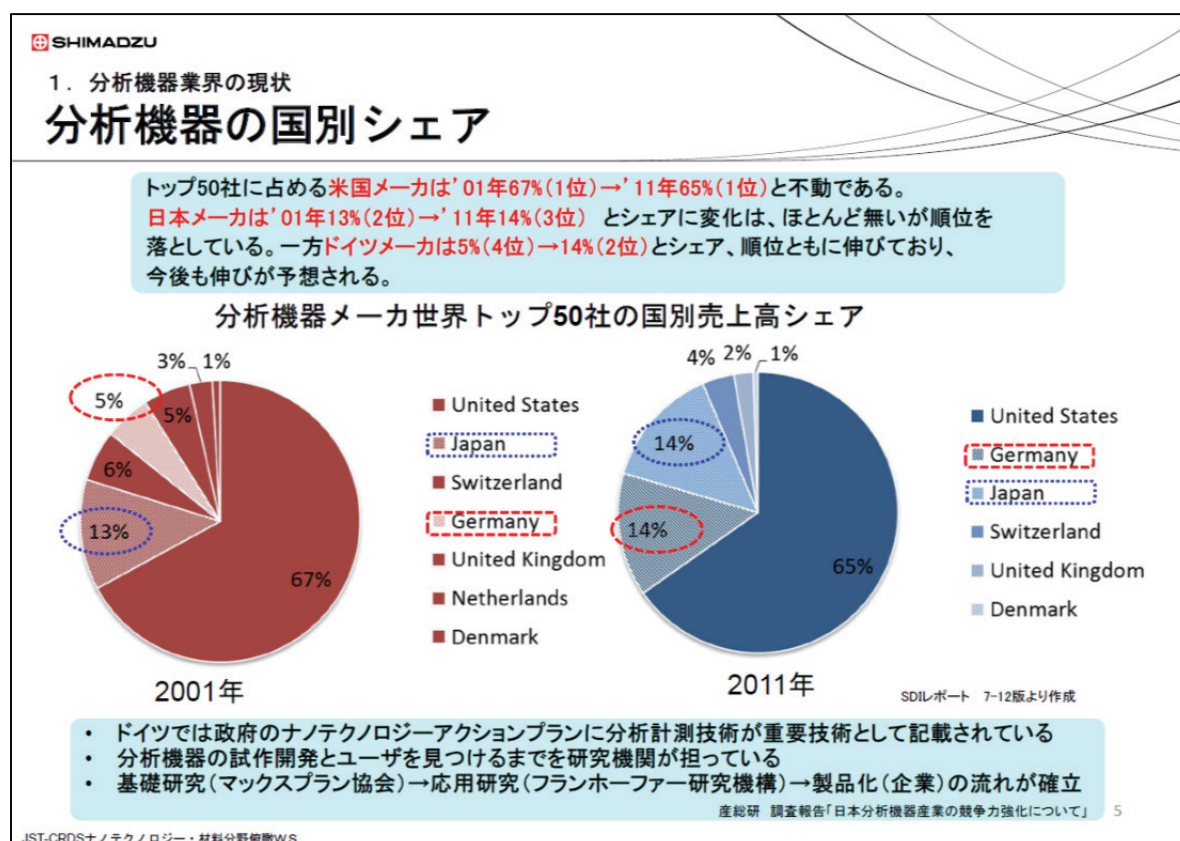


図 2-3

分析機器市場を、分析機器の本体と、アフターマーケットと呼ばれる部品や消耗品関連、そしてサービス関係の三つに分類して表したものが図 2-4 である。2001 年、分析機器本体の割合というのは 57%だったものが、2011 年の状態では 52%に減少している。一番上のサービスの部分はずっと 12%前後の値が続いておりほとんど変わっていないが、一方アフターマーケットの部分は 31%から 36%に伸びている。ライフサイエンス関係の機器の伸びに伴い、消耗品や試薬、カラムなどの使用が増え、この比率は今後も高まっていくのではないかと。

分析機器業のビジネスモデルを考えた場合、新たな分析技術としてのビジネスがある。最先端の研究者の顧客から依頼や相談を受け、その相談によって事例が蓄積されていく、その蓄積された事例に対して、こういうことができますよ、という提案をしていく。するとブランドが構築されていって、また新たな研究者から依頼を受けて、という循環が回り進んでいくと、専門知識がない人でも最先端技術を工業的に使うという汎用化が進む。このサイクルをずっと回していくことによって、最初ニッチな市場で展開していたものが、台数シェアが上がっていくことによりデファクトスタンダードになっていく。認知度が上がりながら、ブランドが向上するというのがこれまでの分析のビジネスモデルである。

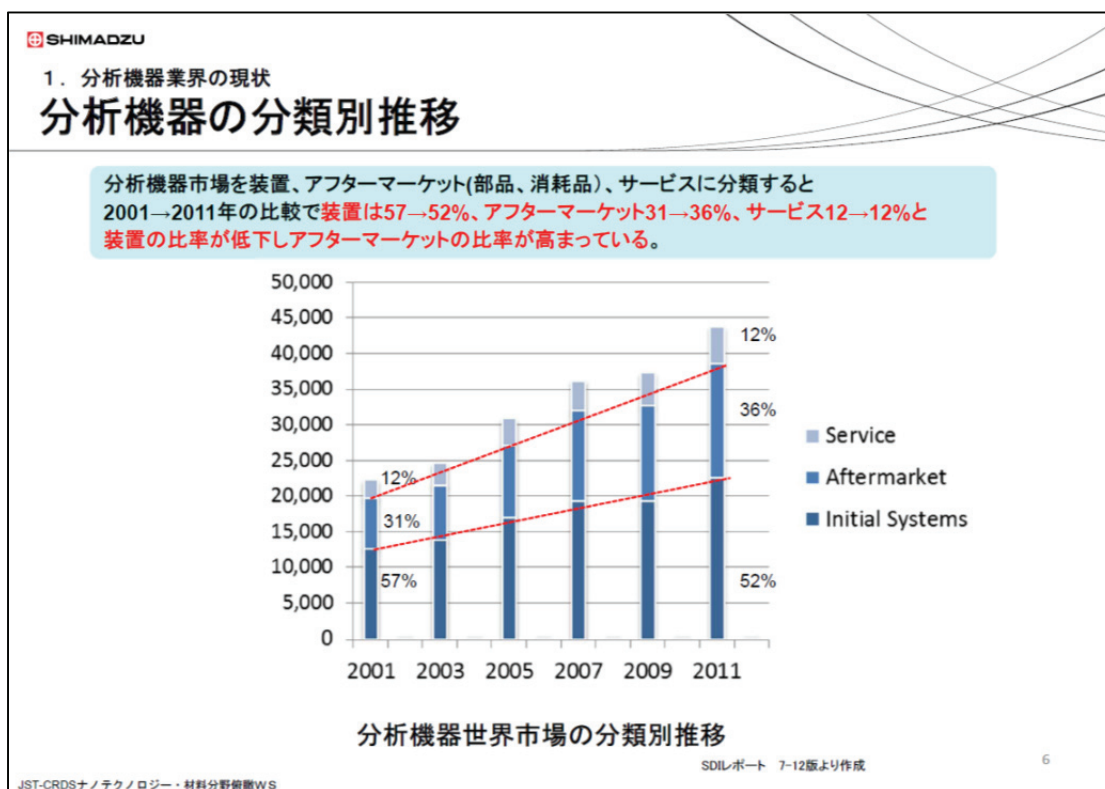


図 2-4

分析機器は開発難度が高く、技術力が必要で且つ業界の認知度が求められることから、上位数社が収益を上げられる構造になっており、そのことが参入障壁になっているというのが、これまでのビジネスモデルであった。しかし、それが最近少しずつ変わってきている。新たな技術がこの循環サークル上に起こるのではなくて、全く違うところでイノベーションが起こり、これまでの連続性の上には成り立たない事例が出てきている。まさにイノベーションのジレンマでいうことが起きるのが、最近の分析機器の新たなビジネスモデルとなっている。これをうまく活かしているのが、アメリカだろう。アメリカの場合、国の予算が NIH や DOE、DOD などから大学にも流れていき、また民間の企業にも流れていく。この研究費の一部はベンチャーに流れていって、またそこに開発投資をする、その技術を元にライフサイエンス関係の機器であったり、特許ライセンスが世界の市場に流れていって日本にも入ってきたり、欧州に流れてきたりというふうになる。世界の市場で稼いだお金がまた民間企業に戻り、税収として戻ってくる。このサークルを回すことによってアメリカの研究開発戦略は利益を循環させて進化しているのではないかな。

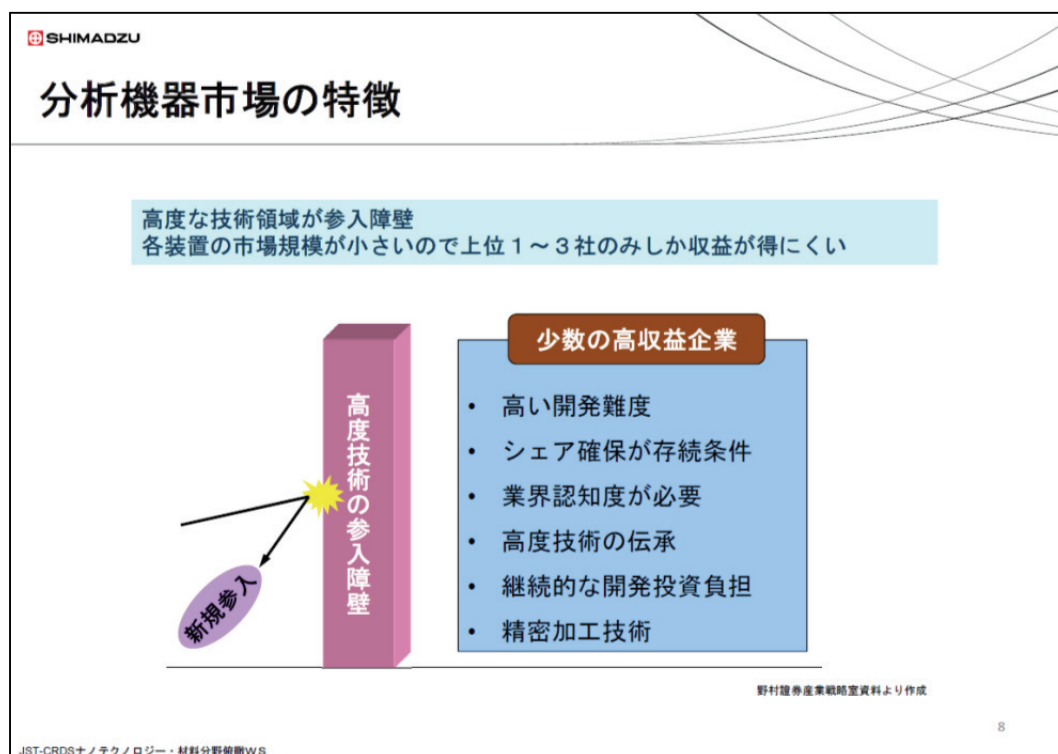


図 2-5

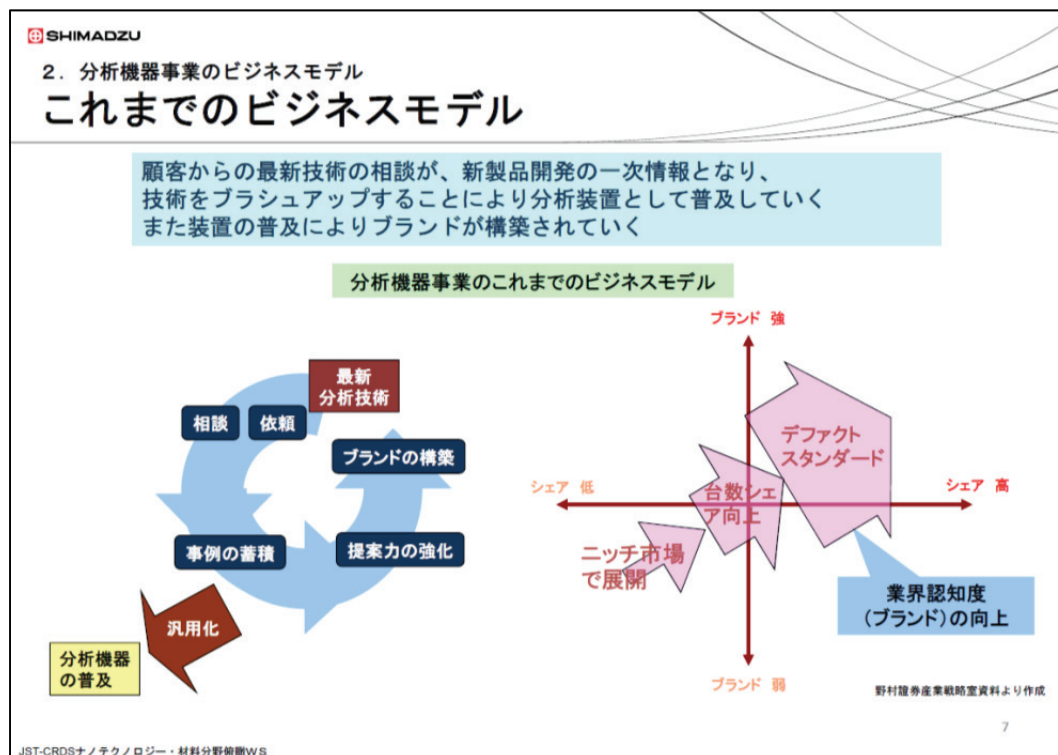


図 2-6

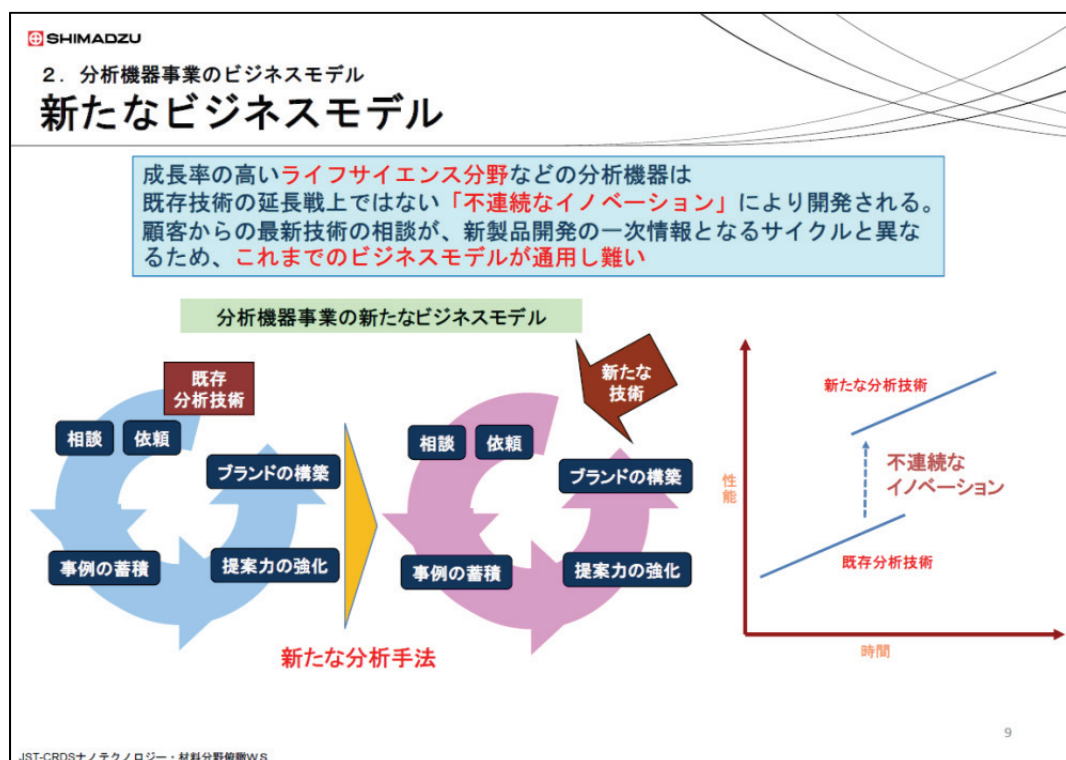


図 2-7

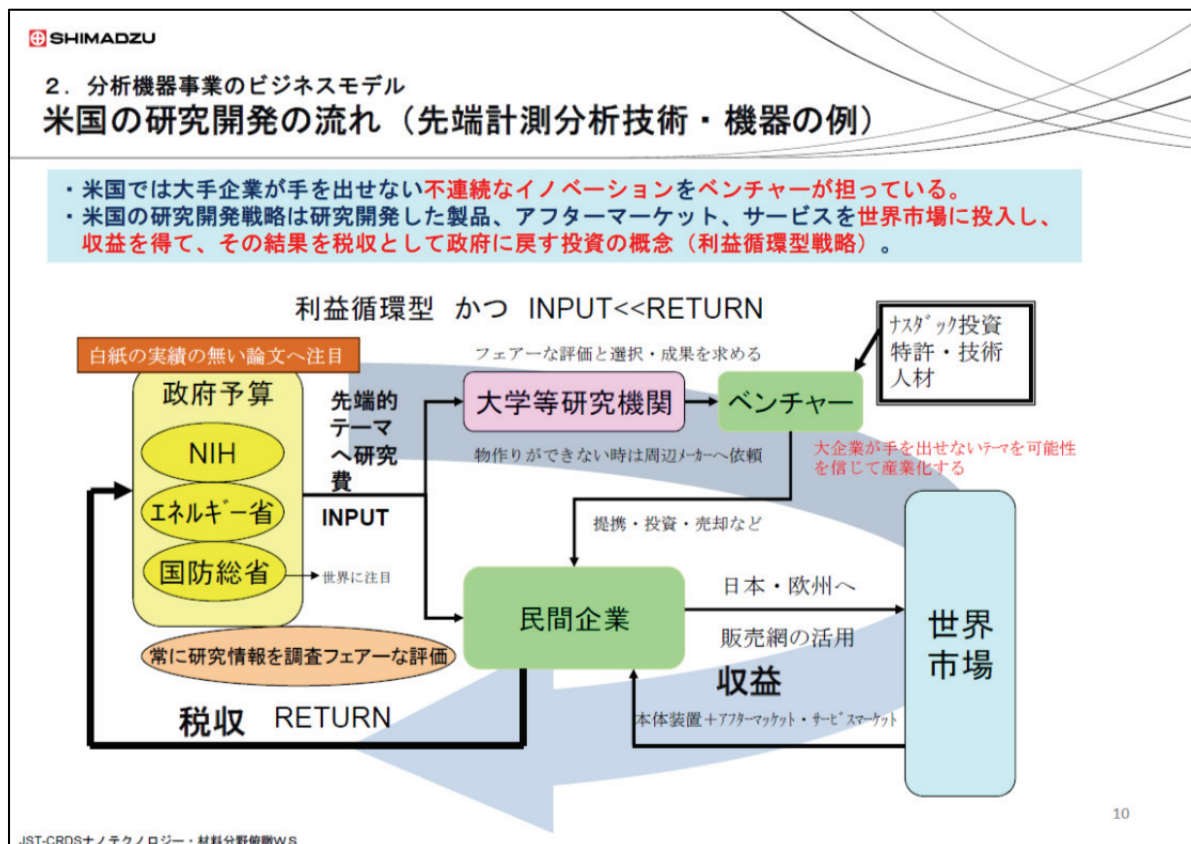


図 2-8

公的な研究開発施策に期待することを簡単にまとめた。基礎研究で分析の手法などに関する研究が実施された後に、装置として開発されていくこと、それが世の中で広く使われているためには小型化などが必要であり、そのためのデバイスを新たに開発し装置に搭載されることで変わっていくなどである。または、いくつかの装置が複合化されて製品化されることや、装置にデータベースがくっつくことによって一般的に使われるようになるなどである。それ以外にも、アプリケーションソフトの開発や、ISO などレギュレーション関係、これらが進むことによって、世の中にたくさん使われていく。このような流れを促進する施策についても今後期待したい。

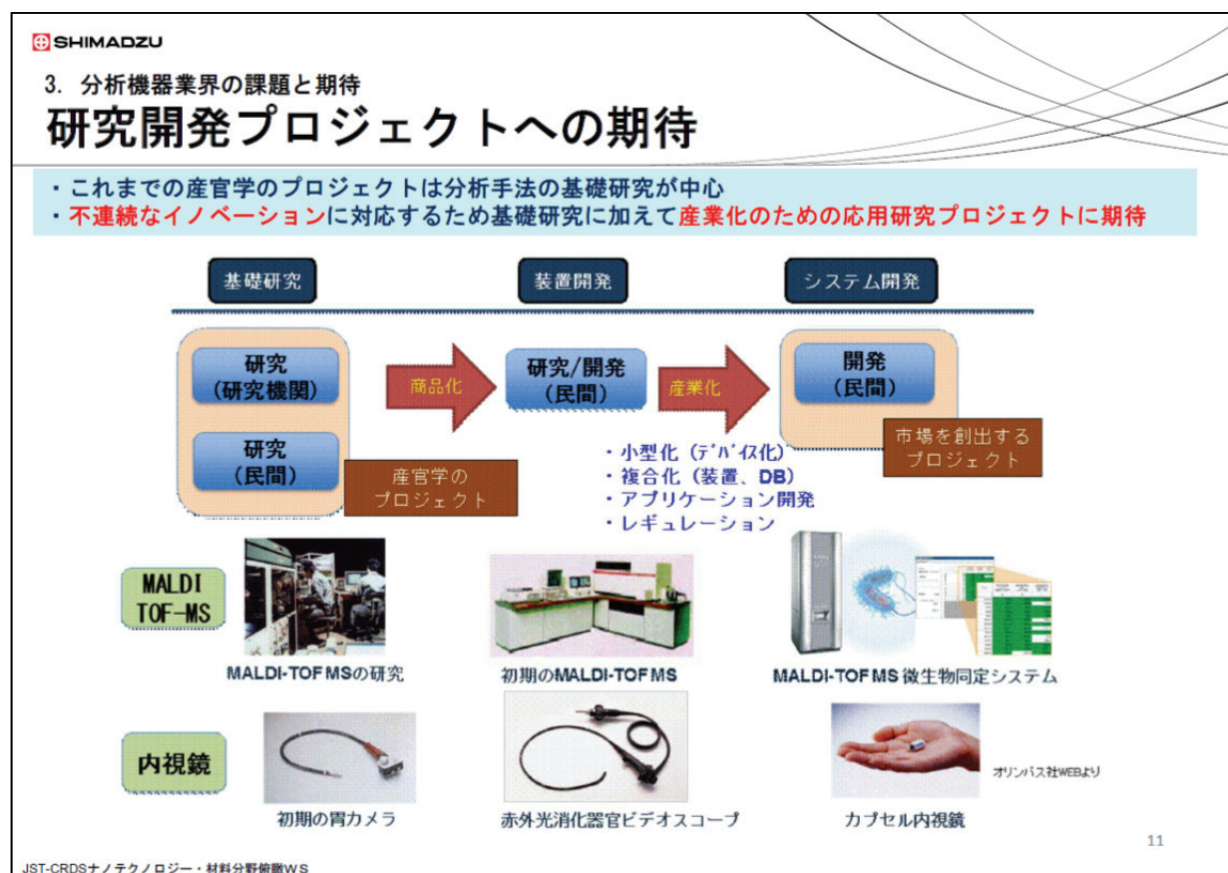


図 2-9

質疑

- 日本の大学や独法もいろんな技術を開発しているが、メーカーにぜひ製品化してほしいと思ってもなかなかしてくれない。仮にそれが世界トップの技術があったとしても、海外のほうに流れてしまうのではないかと思います。企業で製品化にもっていくためには、他に何か必要なのか。

→製品化するためにはある程度の助走期間と投資が要る。開発された技術を装置化して、さらにその装置をある程度成熟させるために年数というものもある。日本の場合、余裕がなく、かなり短期間で成果を出さなければいけない。しかし日本のメーカーは、いろんなものをやっていてなかなか切って捨てるということが難しい。これはもうやめました、とか、その人たちはもう要りません、ということはできなくて、

なるべく抱えてしまうというところがある。その結果、それぞれひとつひとつが非常に小さな単位になっていて、時間のかかる大きな開発投資がしにくくなっている。

- ・日本にはいい装置会社がたくさんあると思うが、例えば、メーカー各社が強いところを持ち寄ってパッケージでナノテクセンターみたいなものを提案するというようなことができないか。日本の最新鋭のものをセットで提案することで、特に新興国は非常に喜ぶと思うがどうか。

→ぜひ考えたい。これまでは日本メーカー同士で競争してきたが、近年は、そのような状況ではなく、特に海外のメーカーとの競争が激化している。要は半導体の業界と同じようなことが起きている。今生き残っている分析機器メーカーは、それぞれ得意なところが分かれていて、同じようなことをやっているメーカーは少ない。したがって、企業はオールジャパンで民間だけではなく、国の研究機関や大学とも組んで成果を出していきたい。水道や鉄道などのインフラがいい例だろう。

- ・分析機器全体の説明だったが、これを最先端のナノ・分析計測機器はどうかと考えると、感覚的には日本はもっと低くて、それでドイツはもっと高く、スイス、イギリスももっと高いと思うがどうか。

→感覚的にいえばおっしゃる通り。ナノやバイオの分析機器での日本の位置付けは、分析機器全体での位置づけよりも低い。

- ・その場合、寡占化が進んで3社くらいしか生き残れないというのが予想であり、そこで起きるのは買収劇。どんどん買収して、あるボリュームにならないと生きていけない。ドイツのパーセントが大きいのも、アメリカの小さい会社をどんどん買収しているということではないか。ということは、ベンチャービジネスが生まれて、それがあつた大きくなったときに集まっていくということで、フラウンホーファーがあつて、マックス・プランクからつながって製品化するという、このドイツの流れが日本にない。国の研究機関も、技術移転だけではなくて自分で誰かと会社にして作れるようにして、それを大手が買収するというようなビジネスモデルが、おそらくドイツ、アメリカのビジネスモデルであり、そのプロセスを経ないとなかなか大学研究所と大手メーカーとの間を埋めることはできないだろう。

ナノ計測分野における分析機器メーカーの役割と課題

杉沢寿志（日本電子 経営戦略室戦略企画部）

私の認識も、最初の島津製作所の中川氏と同じであり、その現状認識が常に頭にある。それに対して我々としてどのように対応するかを検討しており、これまで取り組んできた事例と考え方を紹介する。

計測・分析機器の役割を整理すると、下図のようになる。

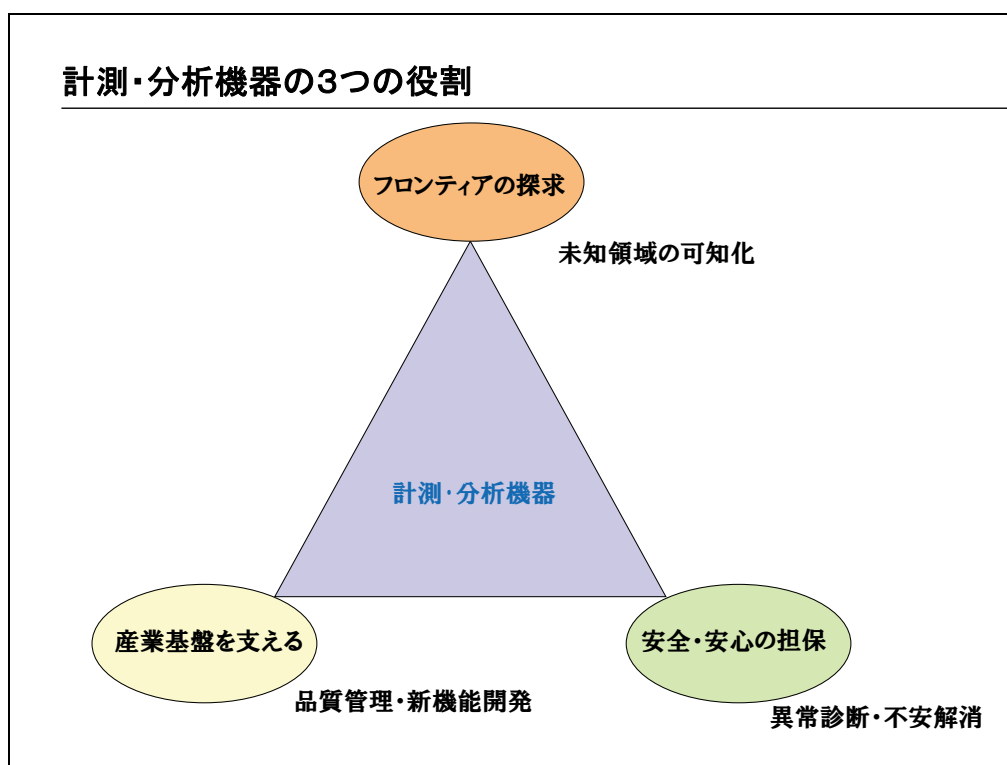


図 3-1

大きく分けると三つの分野があつて、科学技術の先端を切り開くようなフロンティアの探求、産業技術・産業基盤を支えるための技術、安全・安心を担保するための技術である。ただし、計測・分析機器はそれ自体が何かを産出するものではなく、科学技術、すなわち再利用可能な知見の体系を産出し、それを利用するための基盤的なツールである。また、特定のツールが特定の応用分野に対応している訳ではなく、一つのツールが広範な分野に応用されるという特徴を持つ。

さて、ここでは、計測・分析機器を産出す母体となる技術を計測シーズと呼ぶこととする。一方で、計測・分析に対するニーズがあり、多くの場合ニーズは明確である。例えば、環境安全のためにこういう計測をしたい、二次電池のセパレーター材料の性能向上のためにある分析をしたい、ナノ材料の安全性を評価するために、ある物理量や化学的特性を測りたい、などである。しかし、その計測ニーズと計測シーズをつなぐパスを簡単に見出せるとは限らない。このパスを探すおこないを、「計測ソリューションの開発」と考えている。計測ソリューションは企業や大学、研究機関など、様々な主体に分散して保持されており、その組合せ

は無数にありえる。より広い範囲で計測シーズを探索し結合することで、より良いソリューションが生まれる可能性は高まるが、人や組織の壁を越えて、それらを結合して一つのソリューションにまとめることは多くの場合、大きな困難が伴う。

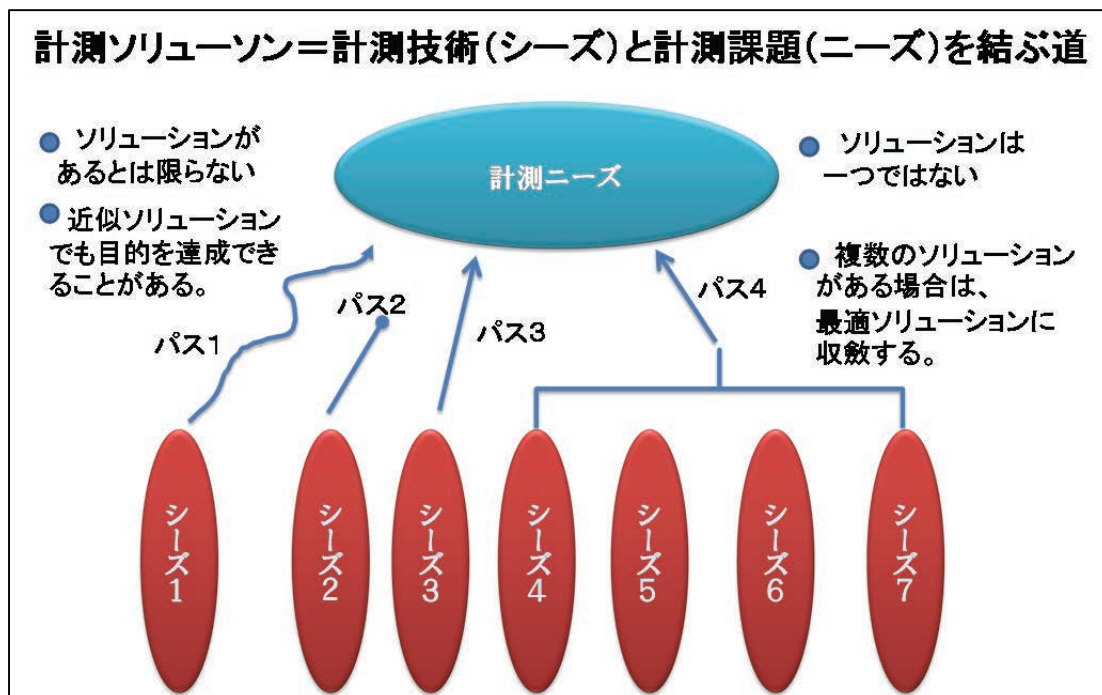


図 3-2

そのため、通常は、単独のシーズからのソリューション探索が試みられる。様々なシーズを持つ主体がそれぞれ独立にソリューションを探索する。計測ニーズへのパスを最初に発見したシーズが、目的の計測ニーズを満たす計測・分析機器を産出することになる。その後、そのシーズの利用技術やシーズの高度化が進み、よりよいソリューションに発展していく。別のシーズによる別のソリューションが、ある測定ニーズを置き換えるようなこともあるが、稀なケースと言える。一方、複数のシーズの組合せによる新しいソリューションの探索は可能性の数が多いだけに、進化の速度が速いと期待できるが、これを実現するには、シーズの組み合わせからニーズを満たすソリューションを構想する力と、それを構成するシーズの保有主体間の連携が必要となるが、まだ、この方法によるソリューション開発の手法は、発展途上にあると言える。

この計測ソリューションの進化の3パターン（既存のシーズの進化、別のシーズによる置き換え、複数のシーズの組合せ）について、それぞれを開発手法の観点で類型化し、その技術ドライブと担い手を整理したものが、図 3-3 である。

高 XX 化というのは、多くはしっかりとした技術力をもった大きな企業や組織が時間をかけなければならない。新原理の適用はひらめきが重要になるので、ベンチャーや手法研究者が担い手になる。担い手を見つけるのが難しいのが複合化である。複数のシーズを保持する組織が最適なシーズの組合せを見出すという可能性はあるが、一つの組織であっても、別の

事業に属するシーズを組み合わせる担い手が存在することは稀である。まして、異なる組織に分散しているシーズを結合する担い手が見つからないことは常である。異なる組織に分散しているシーズを結合し、計測ソリューションを産出す場＝プラットフォーム作りが今後重要になると考えている。このプラットフォームこそ、近年注目を浴びているオープンイノベーションを創出する場となろう。

計測ソリューション開発の3つの方法				
手法タイプ	概要	技術 ドライブ	具体例	担い手
高XX化	特定の技術を継続的に進歩させることで、到達領域を拡大する方法	累積的な要素技術開発	高感度化 高分解能化 高速化	企業 技術開発拠点 (大学、独法)
新原理適用	ある計測ニーズに対して、これまで利用されてこなかったシーズを活用する方法	ひらめき 新発見	NMR 電子顕微鏡等の初期モデル	手法研究者 ベンチャー企業
複合化	複数の技術を組み合わせることで、計測ニーズを解決する手法	ニーズ主導 のマッチング探索	LC-MS miXcrscopy	必要十分な担い手によるプラットフォーム

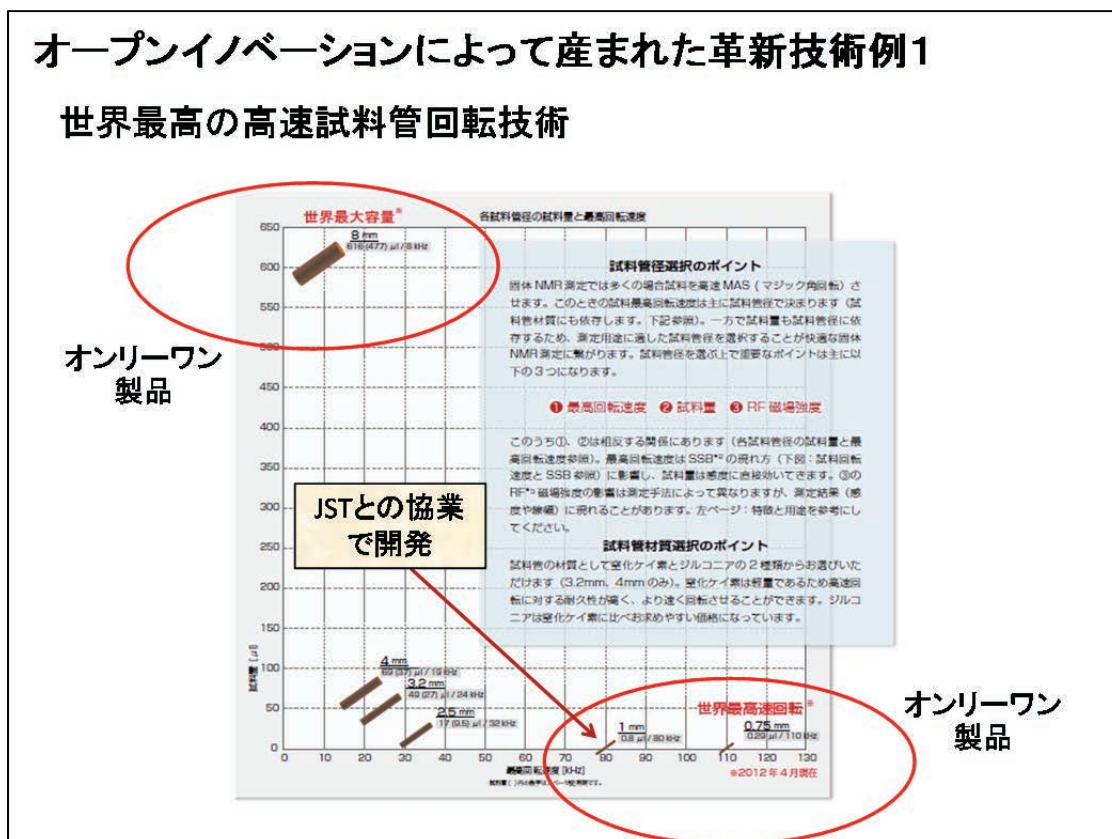
図 3-3

以下、日本電子で取り組んだ事例を紹介する。NMR（核磁気共鳴装置）技術の再構築例である。NMR は様々な先端的な技術を結合して構成される装置であり、複合技術的な装置とも言える。具体的には、超伝導技術、デジタル・アナログ混在の高周波技術、材料の磁性を極限までコントロールする技術、通常の空気軸受け理論の領域を超越するトライボロジー技術、高度な数学処理技術などが必要で、それぞれの技術に革新的な進歩が生じたときに、大きく性能が拡大してきた歴史がある。このような革新的な技術を自社で創出することは期待できないことから、大学や公的な研究機関で生まれた技術や、他社の技術を積極的に取り込む枠組みが必要となる。これらの技術を結集できる仕組みとして、NMR 技術を核として、外部から必要な技術を柔軟に取り込める新たな会社を作った。（図 3-4）

次に、JST の先端計測事業から生まれた例を紹介する。先端計測事業により、固体 NMR のサンプル管の高速回転技術を開発した。これは、直径 1 ミリの非常に細い試料管を、80 kHz で回す技術であり、試料管の外周速度は、亜音速で、通常の空気軸受理論では考えられない世界である。この技術を確立するために、新たな空気軸受理論を産出し、それを実現する加工技術を確立した。この延長線上で、直径 0.75mm で 110kHz の世界最高回転速度を誇る固体 NMR 試料管を実用化した。（図 3-5）



図 3-4



上記の2例は、シーズ主導型のオープンイノベーション事例であるが、今後期待されているのは、未だ適切なソリューションが存在していない計測ニーズに答えるソリューションを探索するための枠組を作ることである。その一つの試みとして、計測シーズを持つ複数の企業や公的研究機関によって構成されるプラットフォーム作りを推進している（図3-6）。この構想を実現するに当たって、具体的なテーマとして設定したのが「ナノ材料規制に適応した計測課題」である。本課題は、ISOのTC229で審議されているところであるが、未だ解決策は見出されていない。ナノ材料には特有の生体リスクが存在するのではないかと危惧されているが、それを特徴付け、判定する標準的な計測手法が確立していないことが大きな問題となっている。ナノ材料の定義については、2011年の10月に欧州委員会が一旦定義を与えている。そこでの定義は、“非結合状態または強凝集体あるいは弱凝集体であって、個数濃度のサイズ分布で50%以上の粒子について、1つ以上の外径が1nmから100nmサイズの範囲である”である（図3-7）。この定義は、計測機器業界に大きな衝撃を与えた。これまでの計測機器で、この定義を満足する答えを出せるものは存在していなかったからである。

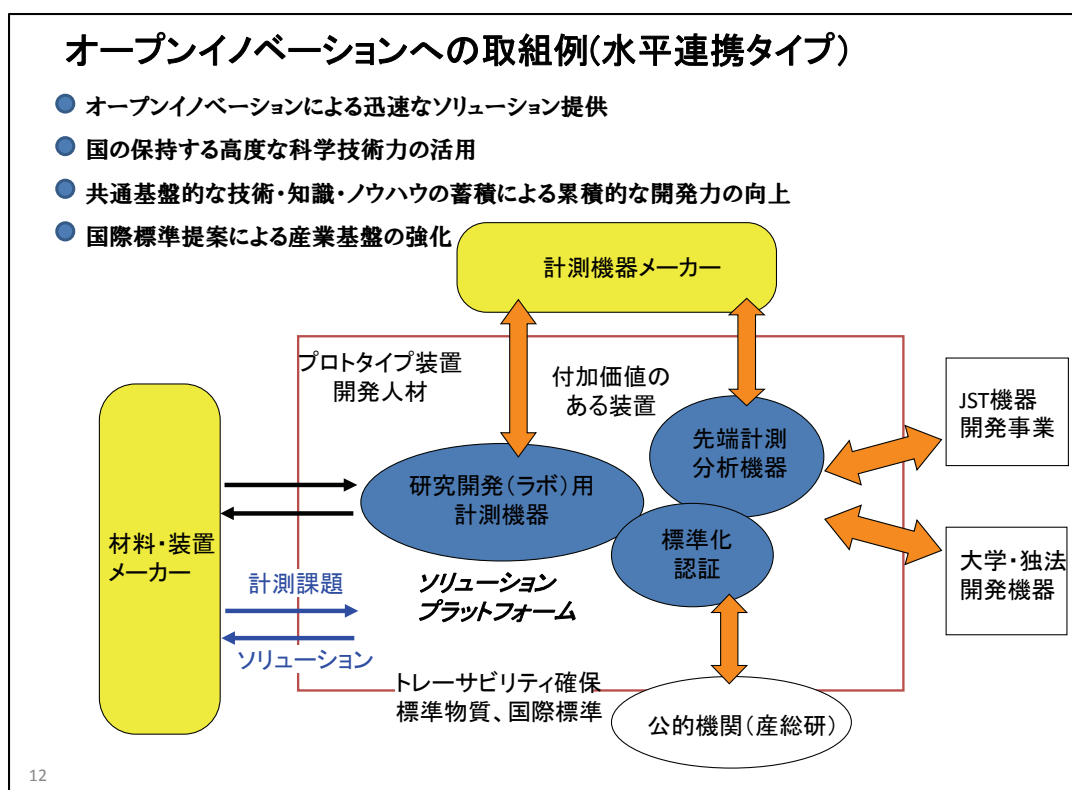


図 3-6

この計測ニーズは、我々が推進してきた計測ソリューションプラットフォームが解決すべき具体的課題として適切であると考え、このニーズを軸として、一つの枠組みを構築した。それが、「ナノ材料の産業利用を支える計測ソリューション開発コンソーシアム」（通称 coms-nano）である。本コンソーシアムでは、「分級技術」を中心に置いている。目的の試料を分級した後、様々な計測・分析装置で測れるようなトータルシステムを構築する。このトータルシステムは、共通のインターフェースで弱く結合していることがポイントである。まずは、フルシステムを使ってナノ材料の詳細な計測・分析を行うことを目指すが、工場にお

ける品質管理や野外現場におけるモニタリングにこのような大掛かりな計測システムを適用することは非現実的である。その場合は、このシステムの一部を切り離し、部分的なデータ計測で対応することを想定している。部分的なデータであっても、このシステムを使うことにより、フルシステムでの計測結果へのトレーサビリティを確保できることが重要と考えている。

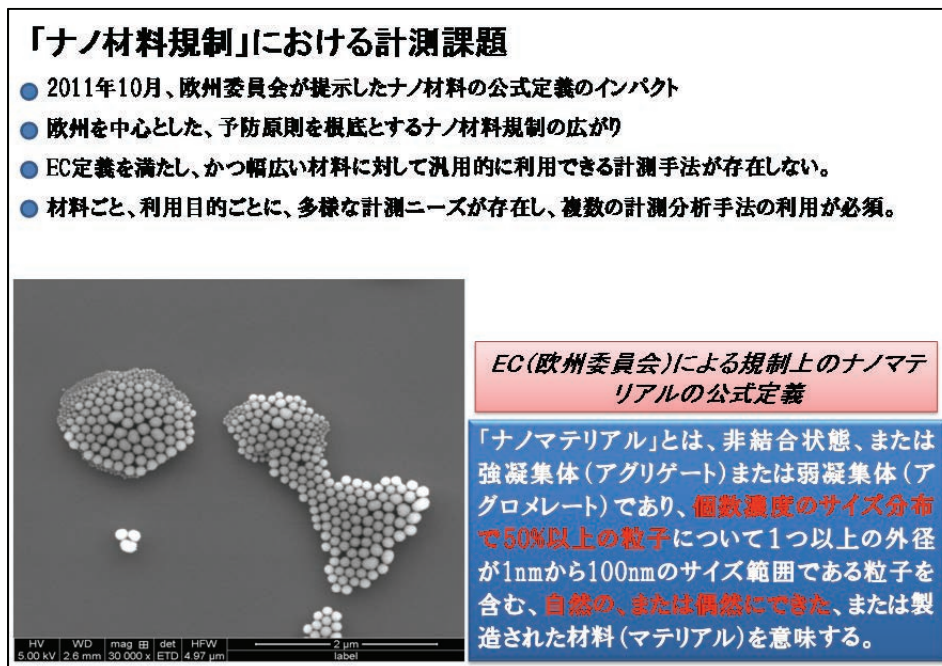


図 3-7

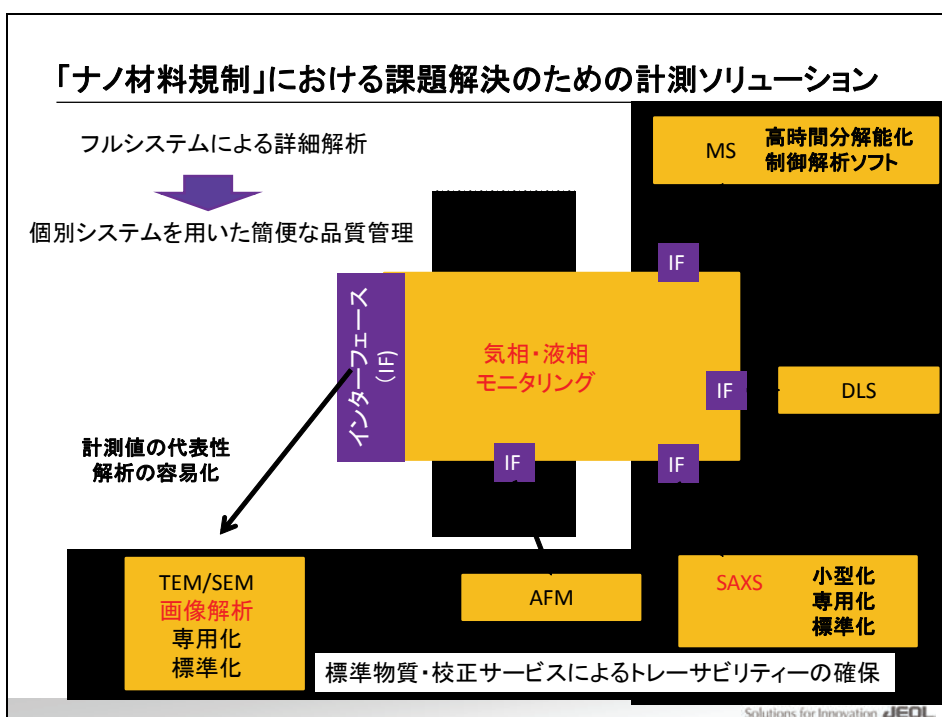


図 3-8

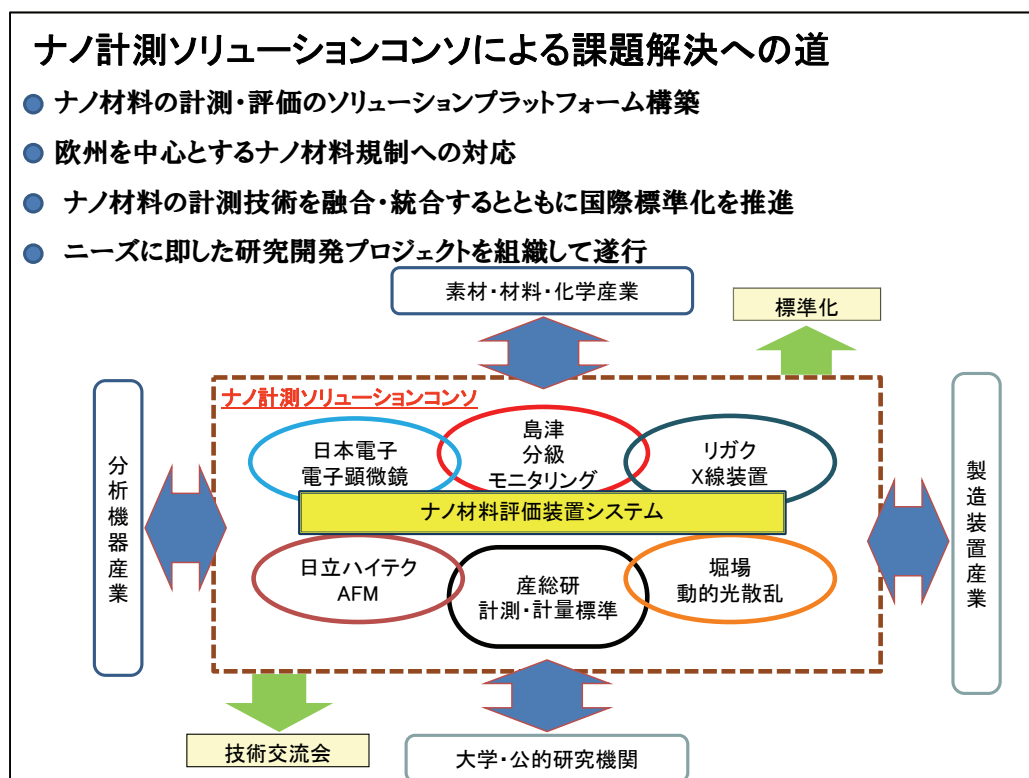


図 3-9

最後に、今後取り組むべきナノ計測の重要課題を3つ例示する。一つ目は、今のコンソーシアムでも対応しようとしているが、ナノ材料の安全性あるいは材料開発と社会需要を両立させる計測システム開発である。二つめは、生体系において原子・分子レベルから細胞レベルまでをシームレスにつないでデータが連続的に見えるような計測体系の開発。創薬や再生細胞の品質管理の計測データを分析し、予測しようとした場合は、最終的にはやはり分子レベルまで観測データを落とさないといけない。分子レベルで、それぞれの小器官の相互作用を解明していくシステムが必要であり、これは非常に大きな課題である。三番目は、材料の機能発現状態における原子レベルの計測・分析技術である。具体的には二次電池や触媒などのような機能性材料が対象になる。機能性材料を、反応状態や大気中、あるいは電圧をかけた状態などの発現状態で、いわゆる *in situ* 測定を原子レベルで計測して分析する技術である。

ナノ計測分野における重要課題

● ナノ材料の機能開発と社会受容を両立させる計測・分析技術。

ニーズ: ナノ材料の同定とその適正管理のための計測システム開発。

ナノ材料の機能開発のための計測・分析機器開発

目的: 高機能材料の生産とその社会受容のための適正管理

● 生体系において分子レベルから細胞レベルまでをシームレスにつないで見る技術

ニーズ: 細胞内小器官の機能、働き、反応を観察し、その仕組みを理解し、予測するための計測・分析機器開発

目的: 創薬、再生細胞の品質管理、脳機能解明、病理診断

● 機能発現状態における原子レベル計測・分析技術。

ニーズ: 材料の機能発現状態で、原子レベルで計測・分析できる技術開発

目的: 2次電池、触媒などの機能性材料の開発

図 3-10

質疑・コメント：

- ・ナノリスクに関係した計測について、現在 EU の FP7 で MARINA (Managing Risks of Nanomaterials) というプロジェクトでは、細胞レベルから計測・評価も含めた大規模なプロジェクトが進んでいる。日本の大学や独法も参加しているが、日本でもコンソーシアムで民間企業がやってくれているのであれば、共同したらよいのではないかと。
- ・NMR 事業のカーブアウトについて、会社を立ち上げたということだが、どのくらい恒久的に続くものと考えているのか。
 - この枠組を使うことでこれまでの枠組みでは実現できなかった技術成果が生まれた。この成果を評価し、2013 年の 12 月に当社が INCJ の株を買戻した。ただ、このオープンイノベーションの枠組は非常に有効と判断しており、組織としてはこのまま独立した形で運営する予定である。NMR を軸にしながら外部と共同できることは、どことも共同しましょうという体制でやっている。今後 NMR 市場が成長していく、あるいはその中で競争力を失わないかぎりには永続するという考えになる。
- ・ブルカーなどは NMR をいろいろな大学や研究機関に設置して、未完成の段階からデータを収集して、ソフトウェア面の使い勝手をよくしている。そういうことは日本では難しいのか。
 - 過去 3 年間でハードの基本的な要素技術はほぼ確立したので、今後はむしろソフトウェアの開発や、ユーザビリティの向上に注力する。様々なアプリケーションを蓄積していくという方向でこの会社を発展させたい。その際には、開発の初期の段階からユーザ機関と協働しながら開発する手法が重要と考えており、その枠組み構築

を進めてゆく。

- ・ヨーロッパで新しい規制・規格ができたということは、何もないところに新しいニーズを作り出したという一面がある。これは新しいニーズをいきなり作り出してくれたともいえる。このような役割を国に期待しても良いのではないか。

→ニーズをひねり出したというよりは、潜在的に存在していたのだと思う。その潜在ニーズを、欧州委員会が顕在化したと考えている。潜在ニーズを健在化し、到達目標を示したことがポイント。このように定義されると、はじめて我々は目標が明確になる。ナノ材料は危なそうだとか、ナノ材料は複雑で扱いにくい、測定法が沢山あるがどの測定法を使って何を測ったらいいのか分からない、段階では我々計測機器メーカーは進めない。しかし、このような非常に厳しいニーズであっても、明確に目標が定義されれば先に進むことができる。潜在ニーズの顕在化と到達目標の設定を如何に行うかが重要で、その仕組みを作ることで、この分野での新たな進歩が生まれるのではないかと期待している。

第二部 研究ニーズに対する意見

話題提供1 木を見るナノ計測と森を見るナノ計測

大久保雅隆（産業技術総合研究所 TIA 推進本部）

産総研の報告書(https://staff.aist.go.jp/m.ohkubo/materials/Anal_innobe_2011.pdf)において、図4.1 に示すラボ用分析機器の世界シェアの推移を示している。図の左側が全世界のもので、青がアメリカである。それ以外の主要生産国は、日本とドイツである。全世界の研究開発は、これらの3ヶ国製の機器で成り立っていると言える。日本は残念ながらシェアが飽和傾向にある。一方、ドイツは直線的に伸びている。2011年の統計では、2010年に対して日本もある一社が頑張っただけだが、ドイツがほぼ全社が伸びて、残念ながら合計では、ほんのわずかにだけ抜かれたことになっている。いろいろな捉え方があると思うが、この推移は非常に憂慮すべきであると考えられる。一方、日本の分析機器は輸出超過であって、外貨を稼げる輸出産業として見ると、この業界に対する政策は非常に重要だと考えられる。

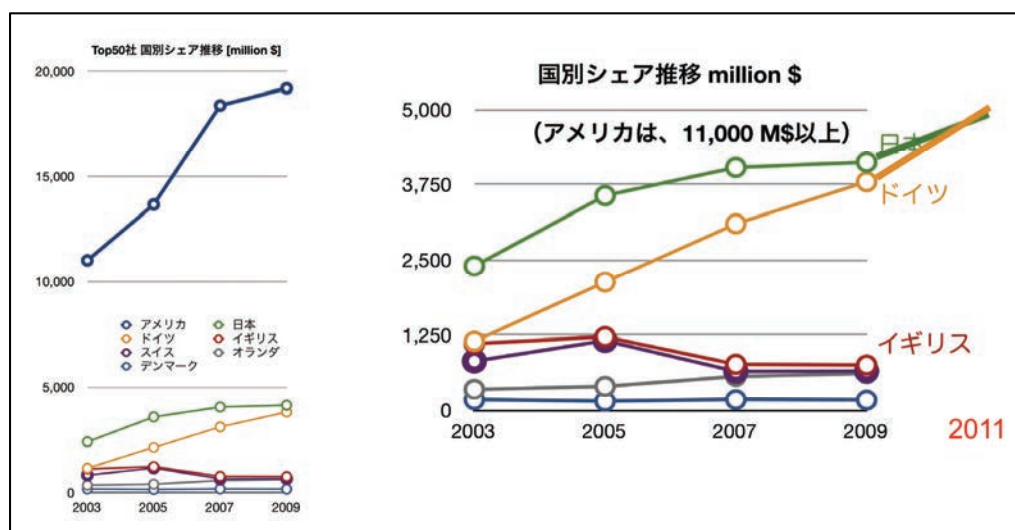


図 4-1

図 4-2 は、日本の2つの機器産業の統計推移を示す。上がラボ用の分析機器、下が半導体用のプロセス製造機器である。どちらも一定の国際競争力があり強い産業と言える。世界シェアは上がドイツに僅かに抜かれたが14%で、下が30%から40%である。分析機器とプロセス機器の大きな違いは、赤線の変動幅である。上の図は非常にコンスタントに伸びている。リーマンショックを経ても伸びている。一方、半導体の製造装置の赤のグラフを見ると、非常に大きく変動している。従って、変動が多い産業で、なかなかコンスタントに成長することとはできないし、リスクも伴う。それに対して、ラボ用の分析機器は、コンスタントに変動なく成長している。この安定した市場を日本が取らないでどうするかというのが、以前から申し上げてきたことである。まだ、世界的競争力がある内に、この機器産業を日本として重点化すべきではないか。

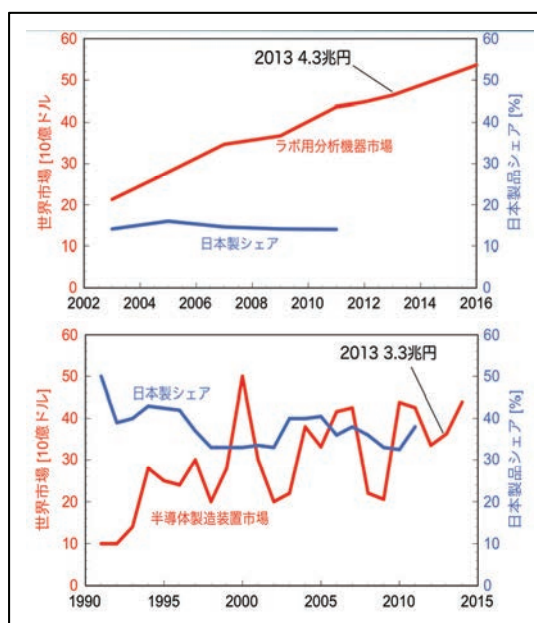


図 4-2

分析機器産業の中でも、ナノテク関連の分析装置が数多く有り、ライフ系の機器と比較すると日本が強い分野である。このナノ計測を、私は、「木を見るナノ計測」と「森を見るナノ計測」ということで、2種類に分類している。この2つを、私が今まで30年くらい研究開発をやってきた経験を絡めて紹介させて顶きたい。

「木と森」というキーワードは実は借り物で、ニスベット先生が書かれた「THE GEOGRAPHY OF THOUGHT」という本にもとづく。記者が「木を見る西洋人 森を見る東洋人」という非常にいい訳をしており、この本のタイトルを「計測」に変えて使わせていただいている。この書籍では、「木片を見ると、ギリシア哲学者は多数の粒子からなる対象物であると考えたであろう。中国哲学者はそれを単一の実体、または互いに融合しあった何種類かの実体から成る、継ぎ目のない統一体として捉えるであろう。」という記述が出てくる。ここで中国となっているのは、中国を東洋、アジアと置き換えていただいても結構である。

さらに、「ギリシア人は、自立的で自己主張や討論に力を注いだ。中国人は、他者との協調を重んじ、個人の自由でなく調和（道教では人と自然の調和、儒教では他人との調和）をモットーとした。」「ギリシア哲学の目標は真実の発見であった。一方、中国哲学の目標は道の発見であった。」と続く。最後に、「中国人が世界を見るときの基本姿勢は、個々別々の対象物の寄せ集めとしではなく、ひとまとまりの実態として捉えるということである。」とまとめられていると私は読んだ。ナノ計測分析技術に非常に関わり合いの深い記述だなと非常に驚いた。

こういう記述に対して、私がどういう研究をやってきたかを少し紹介させていただく。ナノ計測、木、森の関連について述べる。私は、企業に所属した当時、セラミックスエンジンを作るというテーマがあった。セラミックスを使うと、破壊靱性が足りず、エンジンを作ると壊れる。セラミックスの改質を目的として、上司が、「イオン注入をして表面を改質するとバルク全体の強度が変わる」という話をしていた。

そこで我々がとった手法は、「固溶するような不純物を入れるのは当たり前だが、セラミッ

クスに普通は固溶しないような金属元素をイオン注入で無理矢理入れると、平衡状態で新しい相ができるのではないのか」という材料科学の研究を行った。結果としては、イオン注入すると10%、20%破壊靱性が上がるというデータが出ていたが、それがどういう理由かは明確にはわかっていない。私が行った実験は、理想的な系で、サファイア $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ に金を注入するという系である。そのTEMを見たのが図4.3である。これが私の最初のナノ計測の例である。1988年頃で、まだナノテクノロジーというようなキーワードがあまりクローズアップされていないときであったが、左のTEM明視野像を見ると、数十nmの金の粒子が、いわば固溶できなくて析出していることがわかる。それに対して右側の暗視野像で見ると、表面 Al_2O_3 層は α 相から γ 相に変わっている。その内部にナノ粒子が集まっているという、その当時もサーメットといったような複合剤があったが、今見るとこれはナノ材料創成として見られないこともない。

TEMを用いてナノレベルで見たのだが、これと破壊靱性とどう関係するのかというところは、試料の一部をみただけではよくわからない。破壊靱性等は、非常に膨大なサンプルを測って統計的に求めたデータなので、1個の試料の一部を見てどうなのということで、なかなかそのメカニズムの解明まではいかなかった。当然TEMは必要なのだが、単に、TEMで非常に細かいところをみただけではマクロ特性との関連は分らないという1つの例である。

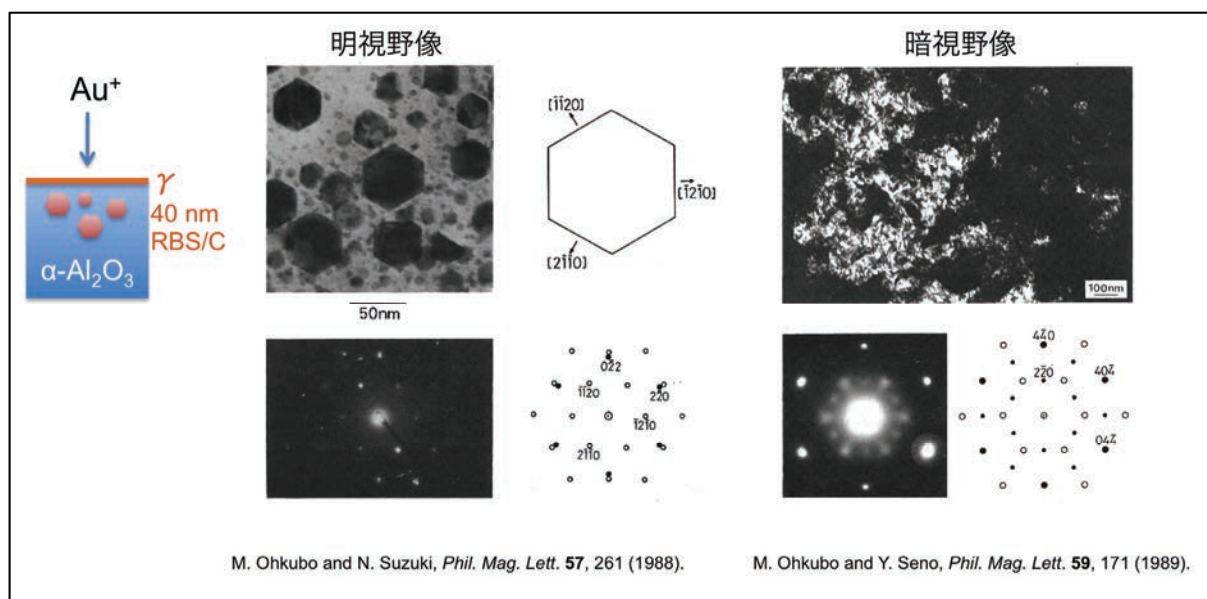


図 4-3

次に紹介するナノ計測の例が、1986年ごろ発見された高温超伝導である。図4-4の左の図はパルスレーザーデポジションで作製したYBCO薄膜の断面を見たTEM像である。図においてc軸が縦方向で、これに沿って単位胞がきれいに並んでいることがTEMで見える。図の下の方に1個スタッキングフォルト（積層欠陥）が入っていることがナノレベルでわかる。YBa₂Cu₃O_xは酸素濃度xを6から7%の範囲で変えることができ、それに対応して、絶縁体から超伝導体まで特性が変わりc軸長も変化する。

この c 軸長を TEM で測れるかどうか？ 原子 1 個 1 個はカラムとして見えるのだが、TEM では c 軸長の変化を正確には測れない。 c 軸長を測るのに何を使うかというと、古典的な X 線回折を使う。誰も X 線回折をナノ計測とは呼ばないと思うが、私はこれもナノ計測と呼びたい。X 線回折では、 c 軸長の変化 1.169nm から 1.184nm をピコメートルの精度で測れる。X 線回折は、ナノ計測どころかピコ計測なのである。

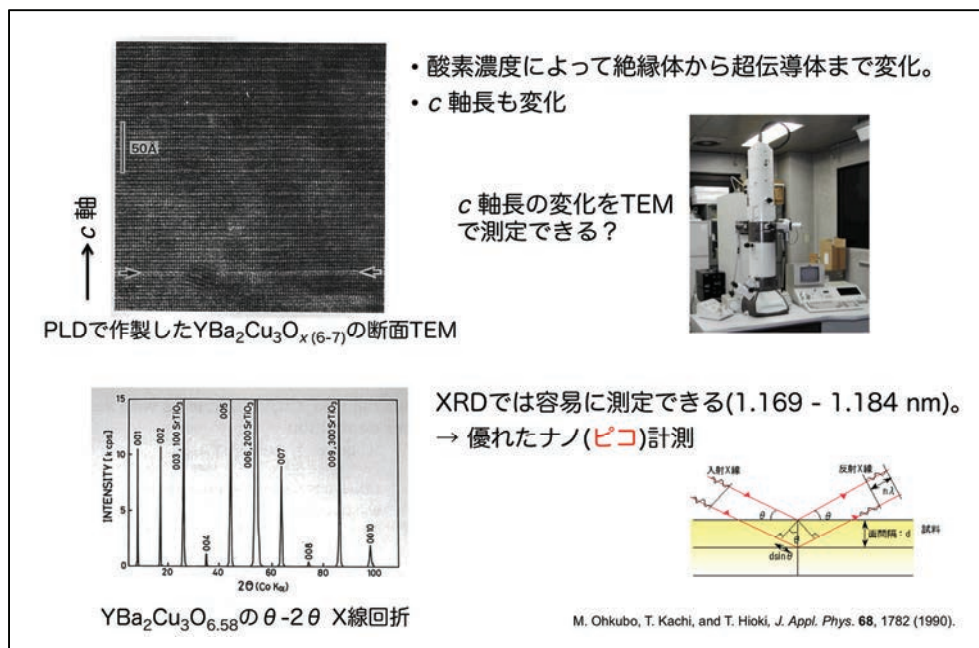


図 4-4

結論としては、こういう組み合わせが必要じゃないのかなと考える。それはあらゆる方がやっておられることだとは思う。単にナノ計測というと、物を拡大してイメージを見るところがクローズアップされるのだが、もう少し試料全体の状況を平均としてナノスケールで見ることのも一種のナノ計測ではないだろうか。このとき得られるナノ情報は、原子集団の平均としてであるが pm の精度が出る。

これを私は、TEM に代表される「木を見るナノ計測」に対して、「森を見るナノ計測」と言っている。こういう例に見られるように、木を見る計測手法と森を見る計測手法を組み合わせることが必要ではないかということである。

以上までは、20 年くらい前の古い計測例だが、最近取り組んでいるのが、これも「森を見るナノ計測」の 1 つで、X 線吸収微細構造(XAFS)分光という手法である。図 4-5 のように、X 線の吸収端を見ると、近接原子の距離であるとか、近接原子の数であるとか、あるいは電子構造までわかる。これは放射光施設に行って実験するが、ビームサイズはミリサイズであるにもかかわらず、得られる情報は、隣接原子までの距離や化学結合状態といった原子スケールの平均情報である。

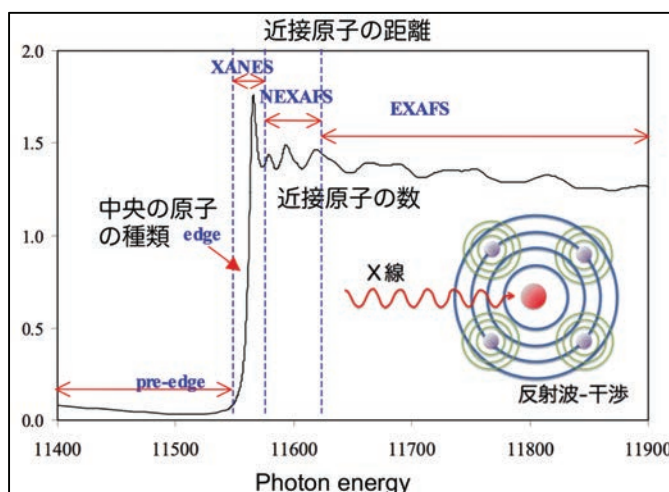


図 4-5

図 4-6 は、従来できなかった微量軽元素の XAFS を測るために超伝導検出器を作り、放射光施設で実験した結果である。この装置は、ナノテックプラットフォーム事業で共用設備として公開している。XAFS のデータは、TEM に比べてわかりづらい。得られるデータは右のスペクトルで、このスペクトルを計算と比較して、このこぶがどうだこうだ、構造が出た、出ない、と言って我々は喜んだりしている。けれども、一般の人には非常にわかりにくい図である。しかし、計算と比較すると、窒素ドーパントの格子位置がどこにあるのかがわかる。今まで誰も SiC の窒素ドーパントというのは難しくて測れなかったが、超伝導を使うとマトリクス中に微量存在する窒素の隣接原子との結合が分かる。TEM では測りにくい微量軽元素の情報が、数 mm の領域の平均として「森を見るナノ計測」ではわかる。また、原子が 1 個抜けた原子空孔やそれが数個集まったナノボイドというのは、TEM では見えないが、陽電子消滅という方法を使うと、その大きさや密度が平均情報として得られるという例もある。

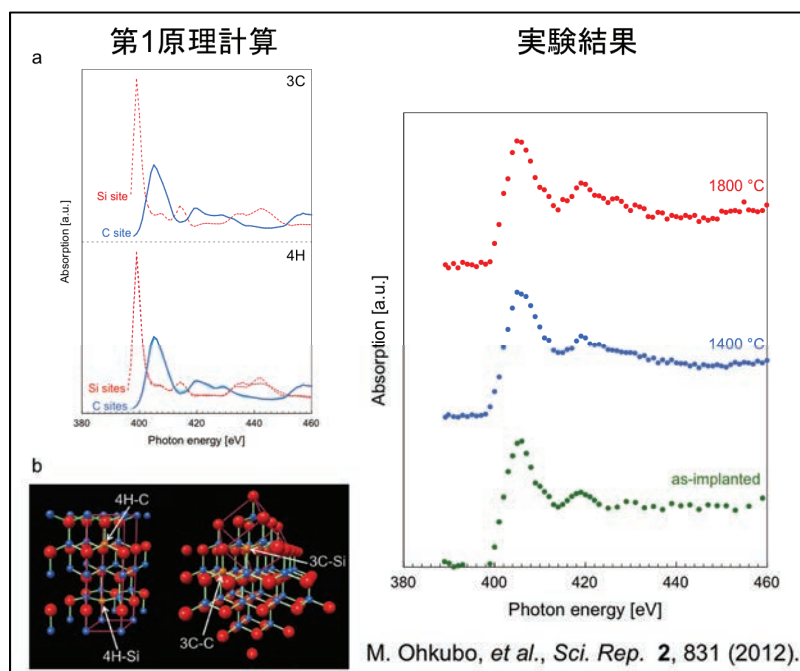


図 4-6

ここまでをまとめると、TEMに代表されるナノ計測は、「木を1本1本見る」計測で、最近では、原子1個も見えるようになり、直感的で非常にわかりやすい。一方、XAFSのような「森を見るナノ計測」というのは、スペクトルが出て解析で初めてナノ情報が得られるので、非常にわかりづらい。けれども、原子1個見て、材料の特性と比較できるわけではなくて、どちらかというバルクの平均情報が最終的なナノ部材の機能と関係しているという場合が多いのではないかと思う。従って、木と森の2つはナノ計測において必要不可分であると考ええる。

もうひとつ、ナノテクを利用したナノ計測の例を図4-7で最後に紹介する。超伝導体を5ナノの厚みで数百ナノの幅にする。この幅は、免疫グロブリン(IgG)という生体高分子のサイズと比べると、同等である。ここまで小さくすると何ができるかということ、マイクロチャネルプレート(MCP)検出器ではできない、分子量に依存しない100%の検出感度、なおかつそれを1ナノ秒という高速応答も実現できるということを最近報告した。ナノ構造を実際に使用する場合に重要なのは、ナノサイズの構造をマクロスケールのサイズに渡って均一に作ることである。ナノサイズのままだと、イオンが衝突せず検出できない。これを使うと免疫グロブリンという非常に重いものも高い感度で検出できる。ここで言いたいのは、ナノ計測だけで閉じるのではなくて、やはりナノ加工とナノ計測が一緒に回るパスというのが必要ではないかということである。多くのナノ計測がナノ加工を必要としており、またナノ加工も測れてはじめて設計通りできているか確認できる。

以上をまとめる。「木を見るナノ計測」は、ナノスケールでイメージング、直感的で非常に分かりやすい。どちらかというナノテク製品の研究開発の基礎段階で使われることが多いかと思う。もう一方、最終的な製品として出すときはマクロサイズの特徴が重要なので、「森を見るナノ計測」が必要になってくる。しかし、ナノ情報はスペクトル表示であって非常に分かりづらい。今までなかなか注目されなかった「森を見るナノ計測」をナノ計測の一員に加えて協力することが相乗効果を生むのではないだろうか。どちらかという日本も西洋かぶれと言うか、西洋の科学に引っ張られてきたので、従来のナノ計測というところが非常に重点化されるかもしれない。しかし、元々東洋がもっている全体を1個として捉える調和というか、そのような考えをアジア人はもっているはずで、「木を見るナノ計測」と「森を見るナノ計測」の両方の思想を持てるのではないか。なおかつ、計測だけではなくて「加工と計測の協力」で、加工を使ってナノ計測装置を作る、あるいは、ナノ計測装置でナノ加工に必要な計測をやるという協力のポジティブループが重要であろう。

「木を見るナノ計測」と「森を見るナノ計測」という2つの切り口でナノ計測を見ると、空間スケールと寸法計測精度といった2つの軸を取った図4-8が考えられる。縦軸は、寸法計測精度以外にも色々と考えられるかもしれない。この図上に計測手法名をプロットすると位置付けが分かるのではないか。ほとんどの手法が右上の方向を目指しているのではないだろうか。

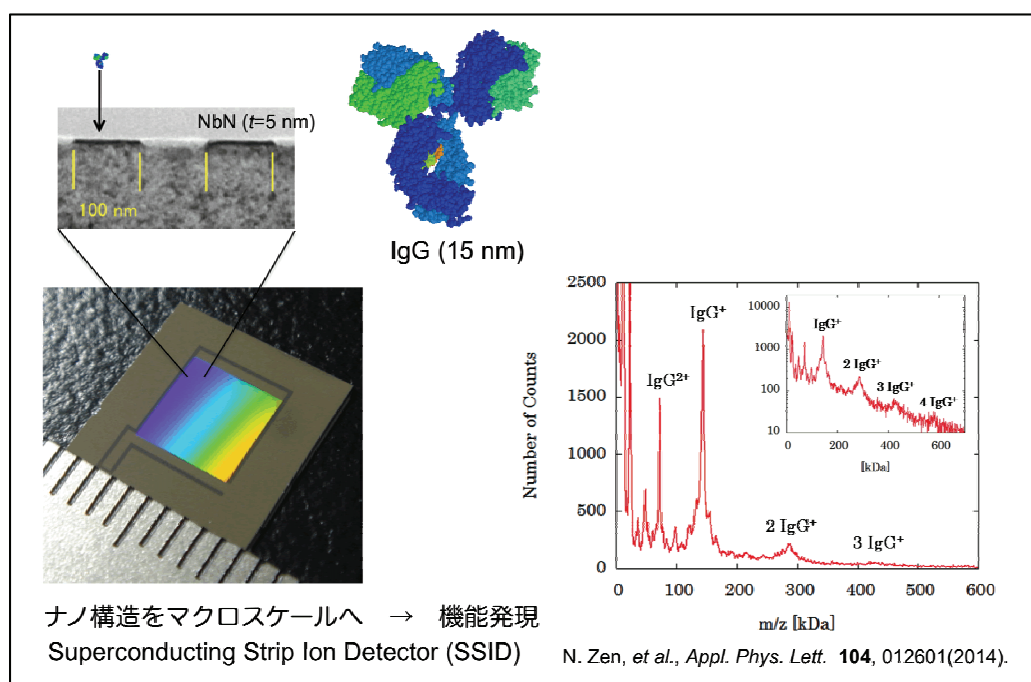


図 4-7

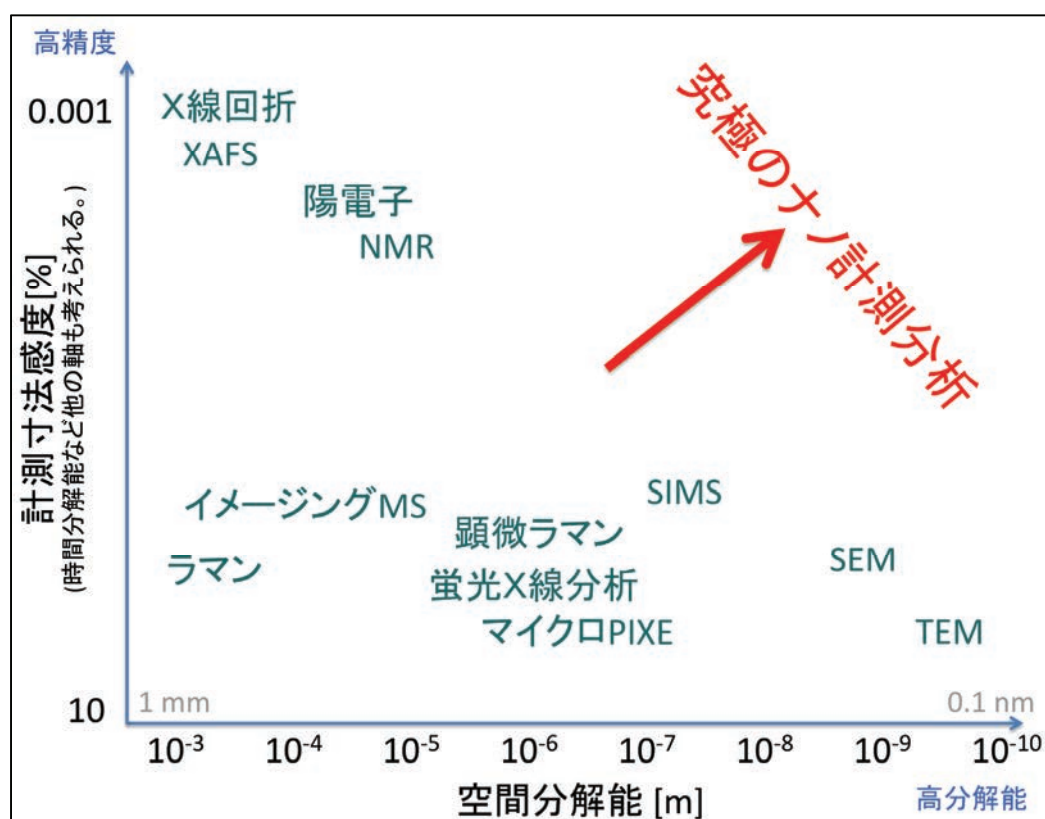


図 4-8

質疑応答

- ・森という意味からいうと、光を使うと結構ナノ計測できる。特に縦方向については、非常に薄い膜の膜厚でも見られる。むしろ光はそういうナノ計測で森を見るのに相応しいのではないか。

→その通り。散乱等がそれだ。あとは、小角散乱と TEM の組み合わせというのは非常にいい組み合わせになると思う。光、電子とのコラボレーションがご指摘のように重要だろう。

- ・木を見るナノ計測も森を見るナノ計測も、どちらも重要だと思っているので、別に分離しないで、両方、もちろん特徴があり有効なので、当然融合して使っているというのが実態ではないか。

→そうだと思う。最先端の TEM というのを重点化するとともに、それ以外のものも使う。それはその通りだと思う。けれども、議論されるときに、どちらかということ X 線回折はナノ計測とは分類されない。注目されない分、森の方の研究開発体制は貧弱ではないだろうか。両輪として両方とも強くしていけないか。

- ・ナノ計測のコンソーシアムでは今まさにそのような努力をしており、TEM の技術と X 線の小角散乱の技術を複合化させることがひとつ、それから標準化することでそれぞれにトレーサビリティをとって、どちらかがあるだけでも利用していただけるということは考えている。どちらかを買ってしまったときにもう 1 台は買えないという民間の方はかなり多いと思うが、これからは、そういう方にも違う利用機会をもっていただくことを考えなければいけないと思っている。

- ・最先端の計測になればなるほど、おそらくそれぞれの機器が試料に求める要求というのはかなり高くなってきている。実際に触媒の研究で、電顕、分光、X 線、EMF など多様な専門家が集まって何かやろうというときに、どういう試料を共通化してどうやって全部で同じ試料を測れるようにするかは、必ずしも容易ではなく、取り組むときはケース・バイ・ケースでやっているところがあると思う。

→ご指摘の通り。アトムプローブで見た試料を何かの回折法で測れるかということ、なかなか難しい。その辺りのルーティンというかプロトコルがうまくいけば、本当に木と森を全部見て、ソリューションが得られる。

- ・先ほどのコンソーシアムでも、実は個々の技術開発というのは個々の企業にお願いしているのだが、一番重要なのはそのインターフェースの部分。同じ試料をそれぞれの分析機器でかけたときに、それも同じ試料だということを保証できるような仕組み、我々はインターフェースと呼んでいるが、その部分は非常に難しく、コンソーシアムの中で一番議論すべきところはそこだと考えている。議論しながら同じサンプルを別々の装置で見てもそれは同じものだよ、ということを保証できるようなシステム、つまりインターフェースを開発していこうというのがひとつの大きな骨子になっている。

いろいろなところで同じような現象は起こるのだが、実はそれ自体が非常に技術開発のハードルが高い技術で、今までなかなか研究開発テーマとして認識されてこなかった。

実は個々の装置を開発する以上に難しい課題であることが多い。従って、そういった開発テーマというのが大事なのだと認識していただけるとよい。

→やはりハードウェアというのはわかりやすいが、プロトコルやサンプル・プリパレーション、そこがなかなか明示的に言うのが難しい。

話題提供 2 最先端計測技術の開発と共用によるシナジー効果とイノベーションの加速

藤田 大介（物質材料研究機構 先端的共通技術部門 部門長）

ナノ計測の重要性、先端的なナノ計測の開発、共用化、標準化についてコメントし、最後に提言について話す。ひとつ重要なのは、「There's Plenty of Room at the Bottom.」と言ったファインマンは 1959 年に原子スケールの加工も原子分解能の電子顕微鏡も DNA の構造解析もできると予言したが、これはもう実現したということである。

アメリカは計測技術に国として力を入れて取り組んでいる。特に NIST の 2007 年のレポートで、計測技術がバリアになって、計測技術がないためにイノベーションができないということが多くあると分析し、計測技術に多くの投資をする国レベルの戦略を持っている。



図 5-1

これに関して、二瓶好正先生（東大名誉教授）は詳しく調べている。たとえばアメリカでは計測分析装置のプロトタイプ作製はベンチャーを使っていると言っているが、基本的には国費で開発を進めている。ヨーロッパはドイツの例があり、カールスルーエでは NMR を国費でブルカーと一緒に開発し、EU 全体の 10 機関くらいに公共調達で最先端の NMR を入れている。要するに、国が投資してその回収もできるように EU 全体でやっている。そういった意味で、国レベルできちんと取り組んでいく必要がある。

NIMS には 20 の中期計画プロジェクトがあり、そのうちの 5 つが先端的共通技術領域である。そこには、私の担当の先端的ナノ計測技術、シミュレーション、ナノ創製加工・量子機能材料、ナノ粒子プロセス、有機プロセスがあり、非常に基本的で重要なおかつ横断的なものを開発している。これら全部をまとめてコアのテクノロジーとして、いろんな材料研究に使ってもらおうとしている。Plan-Do-See (PDS) のサイクルが重要であり、イノベーションの加速と飛躍的に結びつけていきたい。

計測に関しては、機能発現機構の根源的な理解を進めるための計測技術を開発して、材料の研究開発に使ってもらいたいと考えている。また、国際標準化、産学官の連携、外部共用などの機能をもつような中核拠点として、NIMS の技術を使ってもらおうと考えている。NIMS の計測技術はほとんど全てを含んでおり、最表面から固体中の界面、アモルファスからナノ結晶、スタティックからダイナミック、国レベルの大規模な中性子、J-PARC、放射光の計測技術も含めて包括的且つ相補的にやっている。

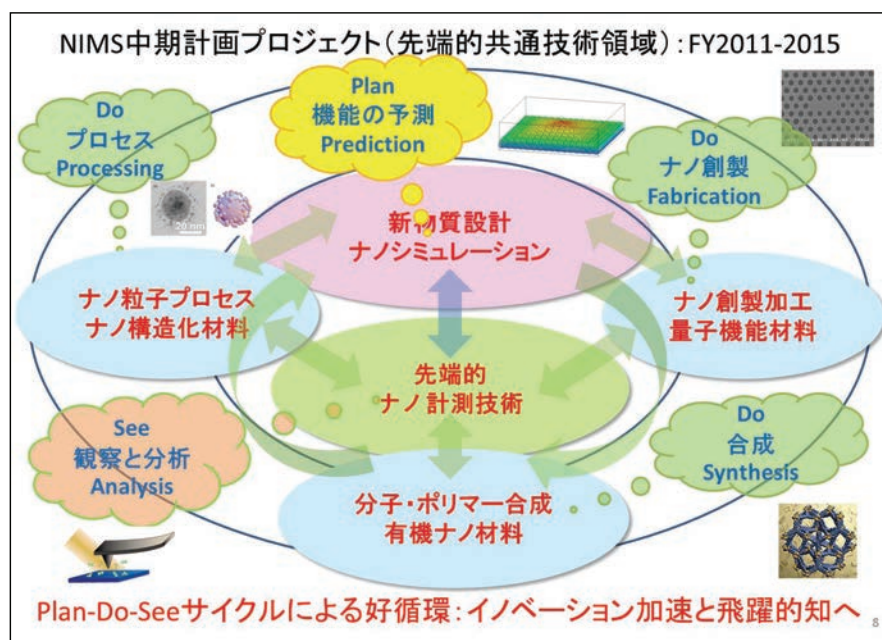


図 5-2

コア技術について紹介したいところであるが、全部紹介すると大変なので、電子顕微鏡を例に紹介する。非常に高い空間分解能で原子 1 個でも見えるような高感度の顕微鏡は世界のトップだと思う。また、電子顕微鏡は深さ方向の分解能はないが、共焦点という技術と試料をスキャンする技術を組み合わせ (NIMS の特許)、深さ分解能で 10nm クラスを可能にするオンリーワンの技術開発をしている。

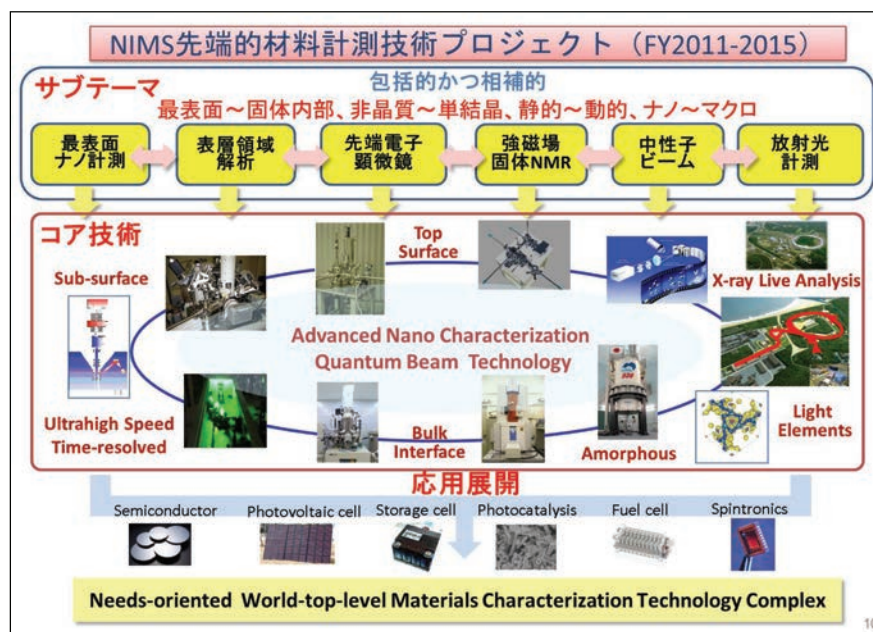


図 5-3

また、NMR について述べておく。NIMS は 930MHz の強磁場固体 NMR (10 年くらい前に開発) で当時は世界トップの性能を持っていたが、ブルカーが 1000 メガヘルツ (1 ギガヘルツ) の NMR を出した。そこで、NIMS は 1030MHz の NMR をこの数年間開発していたが、運悪く 3.11 で壊れてしまった。復旧の努力をしており、今年度中には動かしたいと考えている。これができればブルカーに対抗できるだろう。

我々はデファクトスタンダードになるようなソフトウェアも供給している。粉末の X 線や中性子のディフラクションデータを解析して、きちんと三次元の可視化までできる。リチウムイオン伝導体のリチウムの拡散パスも見え、デファクトスタンダードになる。今では、世界のいろんな研究者がこのソフトを使っており、利用件数もどんどん増えている。

共用化については、文部科学省ナノテクノロジープラットフォームにおいて、私は微細構造解析のプラットフォームを担当している。図 5.4 はナノプラが始まる前のナノネット事業のときのアンケート結果である。潜在的なユーザーにどんなものが使いたいと聞いたところ、トップが電子顕微鏡である。トップテンのほとんどはここに書いてある通りでだが、先端的な計測技術を使いたいという要望が多い。

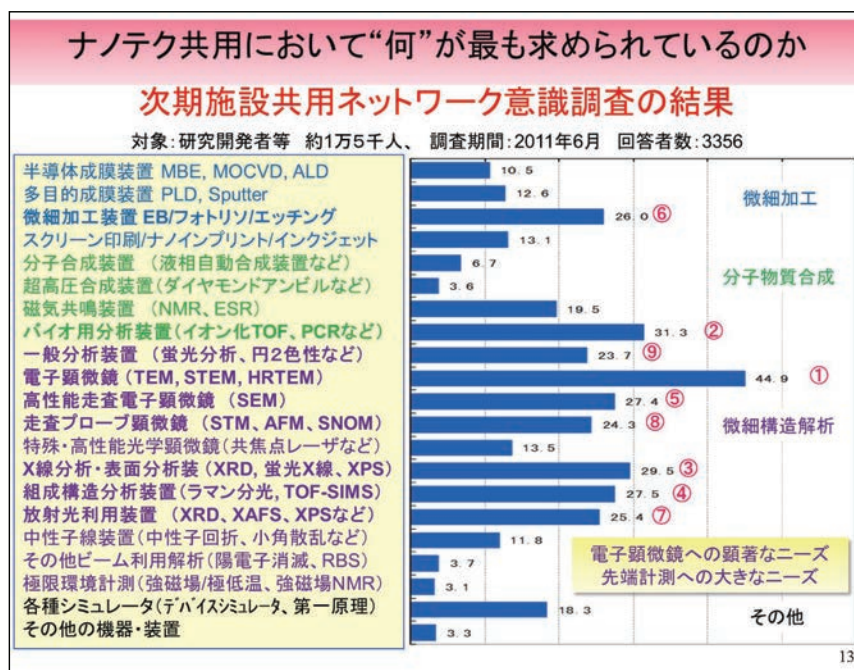


図 5-4

我々はこのアンケート結果に基づき、2012年に微細構造解析プラットフォームを北は北海道から南は九州まで、産総研も含めて10機関で対応している。キーポイントは、北海道から九州までどこでも最先端の電子顕微鏡技術が共通で使えるようにしたことである。もうひとつは、それ以外の多様な先端計測へのニーズに対しても対応できるように放射光のビームラインを4本、NMR、走査型プローブ顕微鏡、表面分析、極限環境計測、陽電子マイクロビームアナライザーなどを揃えている。特殊であっても、最先端でニーズは少なくとも対応したいというのがあり、全体として供給しようとしている。

NIMSの中期計画プロジェクトで開発した装置をそのままプラットフォームにのせていこうとしている。全部は紹介しないが、一部を紹介する。ひとつは私どもが開発している極低温、高磁場、超高真空で表面の電子状態が原子分解能で見える顕微鏡である。これはドイツが世界でずっとトップを走っていた。ドイツの14テスラに対し、NIMSは16テスラで、さらに良い真空を目指して作り上げ、プラットフォームにのせている。産業界のニーズとしては、ナノエレクトロニクスでドーパント1個の周りの電子状態や、バンドの曲がりといったものが見えることがある。また、最近流行のグラフェンのような2次元系に対しては磁場をかけてランダウ量子化が十分な空間分解能で見えるといったニーズがある。これらが可能になると、飛躍的な知の創出につながるのではないかと考えている。

もうひとつは、産総研にも入っているが、走査型ヘリウムイオン顕微鏡である。これは2011年の3.11の直前に入り、地震で壊れたが、今は修理して動いている。単一原子イオンソースを使っているので、非常に高い空間分解能の顕微鏡であるとともに、非常に細かいリソグラフィができる。3nm幅のグラフェンナノリボンのような加工もできる。こういった装置を、我々の工夫を加えた様々な治具と一緒に提供している。

次はNIMSのフラッグシップ機で、単一原子レベルでの50ピコメートルという空間分解能を有するSTEMである。EELS(電子エネルギー損失分光法)を持っており、70meVの

エネルギー分解能を有して、ドリフトの小さい工夫を加えて安定に動作している。この装置を使うとドーパント 1 個の観察もでき、グラフェン 1 枚（単層グラフェン）の原子分解能観察も可能である。これは FEI という海外企業の装置だが、メーカーのスペックよりも良くしている。安定に動くような工夫をたくさん加えて、70 ピコメートルの空間分解能保証のものを我々は 50 ピコメートルまで達成している。

もうひとつ、日本電子の、ダブル収差補正がついている顕微鏡がある。高温での測定、ガス雰囲気、光照射下、触媒、太陽電池、リチウムイオンバッテリーの観察などいろいろなものに使えるように、様々なホルダーを作っている。また、グローブボックスからそのままトランスファーできる試料ホルダーも開発している。これらにより、たとえば 800℃ のような高温でも原子 1 個 1 個が見えるような観察技術をプラットフォームで提供している。

それから、930MHz の NMR では、今まで見えなかったような各種元素に対して固体で見えるような技術を提供している。基本的な構造が X 線とか TEM ではわからないようなものに対応したいと考えている。

最後に標準化について話したい。電子顕微鏡とプローブ顕微鏡両方を包含する先端的な顕微鏡のマーケットは、だいたい 10% 近い伸びでずっときている。図 5.5 は私が勝手に作った表だが、プローブ顕微鏡 (STM) については、実は NIST が 1971 年に STM の原型にあたるトポグラフィナーというものを作っている。昨年亡くなったローラーたちの STM の発明が 81 年である。

その後、いろいろなナノテクの研究が進んできて、国レベルでは標準研究所 (NMI と呼ぶ) でメトロロジカル AFM というものが 90 年代に開発され、その寸法計測のナノメトロロジーというのが始まった。2000 年に入ると、様々な標準化が進んだ。ISO とか VAMAS というところで標準化の研究と実際の標準化が進んできて、日本も対応している。国内委員会もあり、167 委員会という学振の委員会ではプローブ顕微鏡の中で標準化に対応している。このように、ここ 15 年くらいの間に産業、先端的な計測について標準化が進んできている。

これは非常に重要である。イギリス、アメリカ、ドイツといった国々は、自分のところのマーケットを伸ばしたいので、国際標準化については非常に熱心になっている。アジアでは韓国が非常に熱心で、中国も熱心である。国際標準化というのは、実は国際協力の下に異なる意見の集約を先導し、その産業をリードできるということである。

私が関係しているのは TC201 の表面化学分析であり、様々な分析の技術とプローブ顕微鏡が入っている。電子顕微鏡 (EPMA、SEM、TEM など) は TC202 であり、これも日本がやっているが、議長国は中国である。TC201 は日本が議長国であるので、産総研と NIMS としてはこの分野はしっかり守っていきたいと考えている。企業の方々にも標準化で協力してもらいたい。なお、ラウンドロビン・テストとか、標準試料の供給といったものを ISO の舞台、そしてもう 1 段階前の VAMAS (Versailles Projects on Advanced Materials and Standards) というところでやっている。

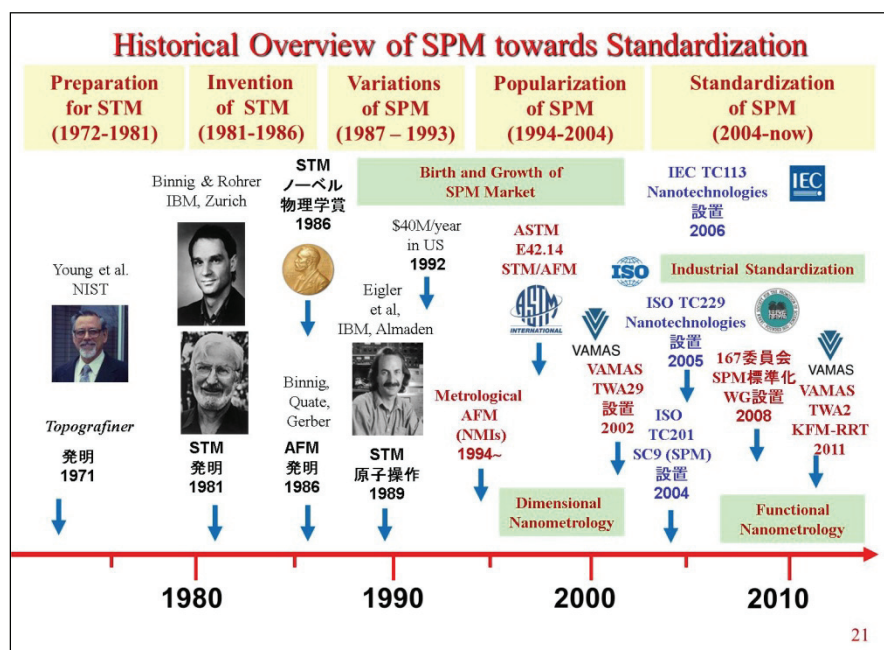


図 5-5

最後に提言を述べる。先端ナノ計測に関しては、継続して独自の技術を開発し続けることが大事で、国レベルでの長期的なサポート体制があるかどうかは鍵になる。また、国レベルで開発した装置をきちんと予算措置して、一気に 10 機関くらいが整備できるようにすれば、おそらく企業も安心して開発に取り組める。

こういうことができ、独自技術があれば、多くの新しい発見ができるので、飛躍的な知の創出にもつながる。また、装置の共用化をすると、いろいろな人が使いにきて、そのアイデアで新しい装置開発も進み、シナジー効果が出てきて産業界にもイノベーションがどんどん進む。

標準化について話したが、これは人間を育てるという意味もある。国際会議の舞台で日本の主張をどんどん言えるような人材も、この標準化の活動に入っていれば育成できる。プラットフォーム事業については、全国 10 機関を地域ごとに拠点として整備することが重要である。その場に地域の方が集まってきて、人材の育成の場にもしてほしい。最後に、私の尊敬する本多光太郎先生の言葉「学問のあるところに技術は育つ、技術のあるところに産業は発展する、産業は学問の道場である」をまとめとしたい。

質疑応答：

- ・ 共用プラットフォームで依頼された場合に誰が測るのか、高度な要求の計測課題の場合にはどういう人が対応するのか。
 - 基本的に研究者が対応するが、実際のオペレーションは研究者とポスドクレベルの技術支援者、テクニシャンが行う。テクニシャンはサンプル調整などを行い、技術支援者が主に測定する。研究者の場合は、NIMS のミッションとしてやっているのので、共用事業でも対応してくれる。
 - 補足すると、ナノテックプラットフォーム共用事業は全国 37 機関でやっているが、

ユーザーに対して技術サポートまたは測定技術で対応する人（プロジェクトで時限的に雇用されている人）は100人弱いる。この中にはポスドクという立場の方もいれば、技術支援に特化してやっていきたいという人、パートタイムのバイトでやっている人もいます。

- ・ポスドクや技術支援の立場は研究者として歩んできた人にとっては、難しい話になる。この問題に対し、たとえば高度な技術専門職を各拠点、機関で定常的に雇用することができるのか。文科省ナノテクノロジープラットフォームでは、その具体策の検討を進めているが、非常に問題点を感じている。

→現場で実際に若い研究者を雇用していて、同じような悩みを抱えている。研究者をやりたい人たちが、この事業をやった後にどういうキャリアがあるのか明確に見えない中で、非常に優秀な人たちを連れてくるのはなかなか難しい。一方で、最先端の計測では、対応する研究者の能力が非常に高くないと、たとえばデータの解釈もできない。この状況がずっと続くと、若手研究者というよりも、むしろオペレーター化する危険性がある。次世代を担う計測研究者あるいは開発研究者を育成するという観点からいくと、この共用化に何か付け加えるようなアイデアや仕組みがあると、うまく回るのではないかと。我々としてやっていることは、なるべく主体的に関われるような研究テーマを共同研究という形で発展させることを意図的に行うようなことをしている。

→日本は大学院重点化が起きてから、地方大学に至るまで技術支援、技術職員、助手といった人たちがいなくなってしまい、全部研究者になってしまった。それによって最先端の計測、最先端の加工というものの技術維持ができない。装置産業からアフターサービスが増えてきているが、少なくとも大学においては、マシンショップがなくなり、技術職員がいなくなったところに最先端の装置が入ることが問題で、ポスドクは本来そういうことをやる人ではないはずだ。高専を出たような人が昔はたくさんいた。イギリスもアメリカもドイツもそういう人たちの数がきっちりと担保されているのに、日本はそれが全部なくなっているのに、特にこのナノ計測からはっきりと発信するような議論をしておく必要がある。

- ・装置開発を続けるというのは個々の施策単位では国としてもなかなか難しい状況があるが、この辺りに何か意見、考えはあるか。

→共用化プロジェクトをやっていると、実は次の開発のシーズが多くある。ところが、共用化プロジェクトだということで、先に行きづらい面がある。シーズがあるのに、どこまですくい上げられるのか苦しい思いもあるので、そういう展開もあってほしい。

→共用化という言葉を聞くと、ただ単に支援していると思われる人もいると思うが、大きく分けて四つカテゴリーがある。共同研究、技術代行、技術補助、個人がオペレートする機器利用というカテゴリーである。我々としては高度な研究、最先端の研究について、提案する方と共同研究契約を結べば、十分にディスカッションしながら最高レベルの共同研究としてやっていけると思う。そういった意味で、単なる

技術共用、共用化ではなく、基本的には最先端の研究を支援するという位置づけにしている。

→最初の取り掛かりとしては共同研究が良いが、そこから新しいシーズが出て大きく開発研究をしようとしたときには、今のプラットフォーム事業では対応することはできない。そもそも事業のたてつけが違う。もちろん、他のファンディングに応募する手もあるが、果たしてそれだけで良いかというところもあるので、今後文科省とも相談していきたい。

第三部 ナノテク・材料研究を拓く先端計測技術（前半）

話題提供 3 日本の透過型電子顕微鏡技術の現状と課題、将来展望

柴田直哉（東京大学総合研究機構）

私は現在、ナノプラットフォーム事業において計測支援や計測開発、電子顕微鏡に関わる開発などに携わっており、現場の立場から日頃考えていることを紹介したい。

透過型電子顕微鏡（TEM）の重要性とは、ずばり局所を拡大してそのまま観察できることにある。材料の特性は、界面や表面などの局所構造が重要な役割を担う。この局所構造におけるエネルギー変換や輸送現象、破壊、疲労、あるいは化学反応などを深く理解すれば、新規のナノ材料の設計指針が構築できる。

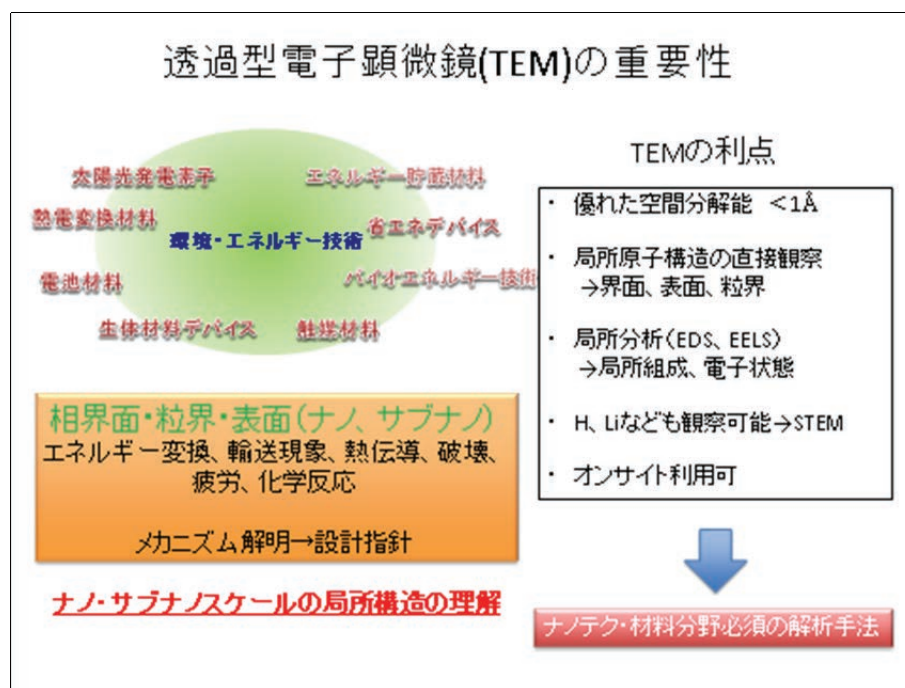


図 6-1

TEM の利点は、まず優れた空間分解能にある。現在の最新鋭 TEM では、1 オングストローム以下の空間分解能を達成している。さらに最近では、これまで非常に観察が難しかった水素やリチウムなどの原子も直接観察できるようになってきた。例えば、リチウムイオン電池材料や水素吸蔵合金の研究に TEM は急速に用いられるようになってきている。また、装置規模が大学や研究機関に置くことができるサイズであるため、オンサイトで研究にタイムリーに活用できる利点がある。現在のナノテク・材料分野の研究には必須の解析手法である。

電子顕微鏡分野の歴史は長い。日本の歴史も戦前にまで遡るが、20 世紀末に非常に大きな革命的なブレークスルーがあった。それが「収差補正技術」であり、残念ながらこの技術は日本発ではなく、ドイツ、アメリカを中心に開発が進んできた。図に示すように、このブレ

ークスルーにより、2000 年を越えたあたりから空間分解能が飛躍的に向上した。日本は収差補正技術開発の初期こそ欧米の後塵を拝したが、現在の技術力はドイツ、アメリカとも勝負できるレベルに達しており、2014 年現在、収差補正器は日本メーカー商用機にも標準装備されるに至っている。

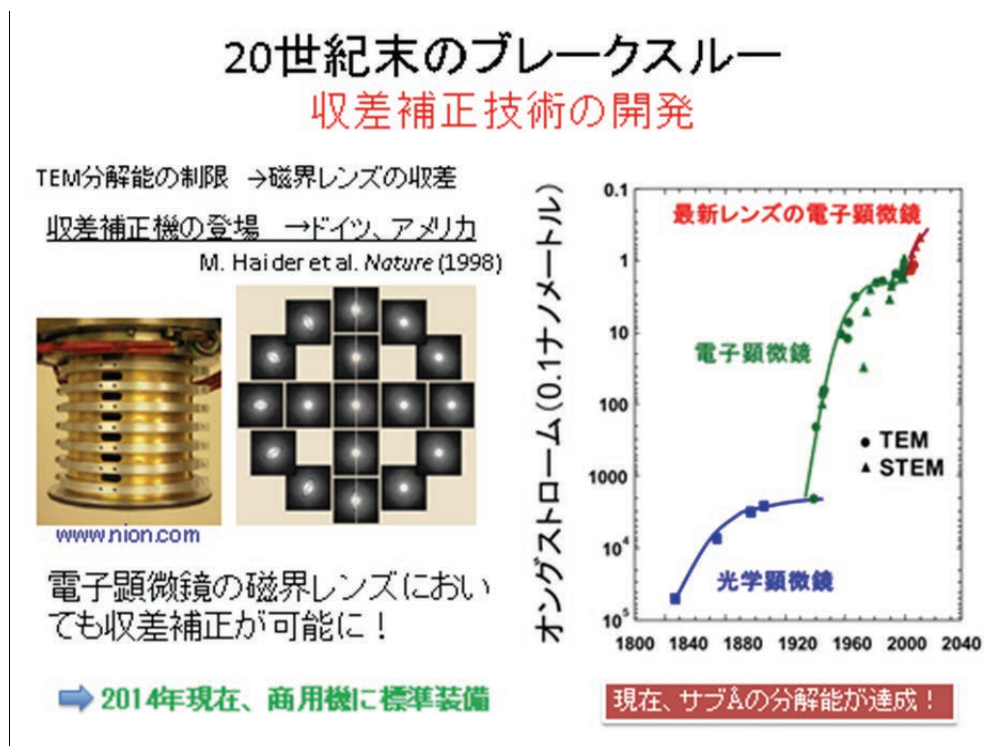


図 6-2

日本のこの分野の取り組みで特徴的なのは全国規模の共用化プロジェクトである。文科省のこの施策は非常に有効にはたらいっている。ナノテクネットワーク、低炭素ネットワーク、ナノテクプラットフォームと続いてきた共用化プロジェクトにより、最先端 TEM 技術が非常に早い段階で日本中の研究者に利用できる体制が整った。現在では、日本の TEM 分野は世界のトップレベルの技術と共用体制を整えていると言える。

TEM の世界的な動向に関しては、アジア地区の活動が活発なことがあげられる。アジア新興国地域の電子顕微鏡センターは 70 機関以上あると言われている。これは、アジア諸国がナノテクノロジーを国策として重要視していることと相関している。実際、私の所属する東大のセンターには 2007 年ころからアジア地域の見学者数が急増している。これは、日本を参考にしてナノテク計測センターを設立することにより、ナノテク立国を実現したいとの思惑があると考えられる。このことは、日本の TEM 技術が世界的なプレゼンスを有している証左でもある。

今後も日本がこの分野で世界をリードしていくために必要なことは、絶え間ない技術開発である。その中で重要な分野をいくつか紹介したい。

まず、日本が世界をリードしている開発領域は今後もさらに強化していく必要がある。具体的には電子光学系や収差補正技術などの本体開発であり、分解能競争では絶対に負けてはならない。常にトップを目指し続ける姿勢こそが重要である。もう一つは、試料と電子線の相互作用から出てきた信号の検出方法である。これで TEM で取得できる情報の多様性が決まる。日本はこの分野でも世界をリードしており、引き続き開発を強化する必要があると考えられる。

次に、日本が世界から後塵を拝している領域の重点化についてである。「その場観察」は、日本が長い歴史を有するものの、商用機として世界に出回っているものの主流は欧米の装置である。日本が非常に遅れている開発領域としては、高い時間分解能かつ空間分解能で現象を観察するダイナミック TEM と呼ばれる分野である。これが実現すると、化学反応を直接観察したり、構造変態、相変態機構を直接観察したり、あるいは非常に弱い生物試料でもダメージを受ける前に観察することが可能になると考えられる。ここは必ず重点化すべきであろう。

以下、具体的に考えてみたい。

重要な開発①は、本体と収差補正技術の更なる進展である。現在、日本の収差補正技術のレベルは非常に高く、高次の収差補正や色収差補正をも実現している。これによって 0.5 オングストローム以下の空間分解能が実際に可能になった。これらを更に高度化すれば、低加速電圧においても原子分解能観察が可能になり、今まで見えなかった生物試料なども原子レベルで観察できる時代が到来するであろう。

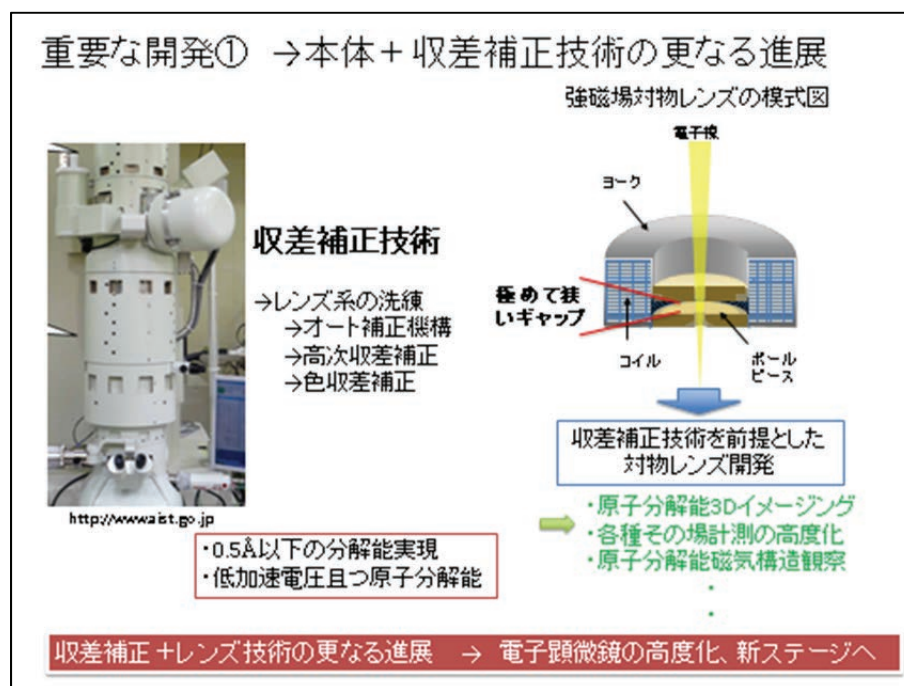


図 6-3

重要な開発②は検出系である。検出系開発は日本が世界に先駆けている分野である。下記は東大、日本電子及び JFCC などが中心となって考案した ABF 法という手法であるが、これによりこれまで観察できなかった水素あるいはリチウムなどの可視化が可能となった。また、私自身が独自に開発した手法として、原子レベルの電場観察手法も世界的な注目を集めている。最近では EDS や EELS による原子分解能組成マッピングも可能になってきている。このような分野をさらに発展させれば、非常に定量性の高い原子レベルの原子構造解析、組成マッピング、あるいは電子状態マッピングなども可能になると考えている。

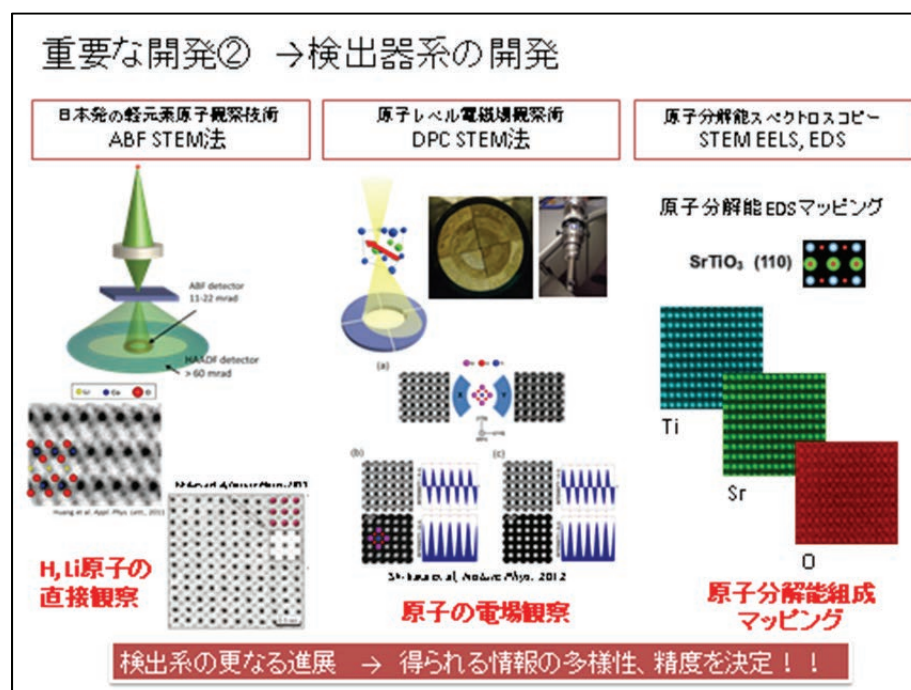


図 6-4

重要な開発③は「その場観察」である。例えばナノインデンテーションをしながら材料の変形過程を観察したり、触媒がガスと反応するところを観察したりすることにより、材料の動的な挙動をミクロに捉えることができる。しかし、残念ながらこれらの技術は現在欧米主導であり、欧米のベンチャー企業がその場観察用特殊ホルダーなどの開発を精力的に行っている状況にある。

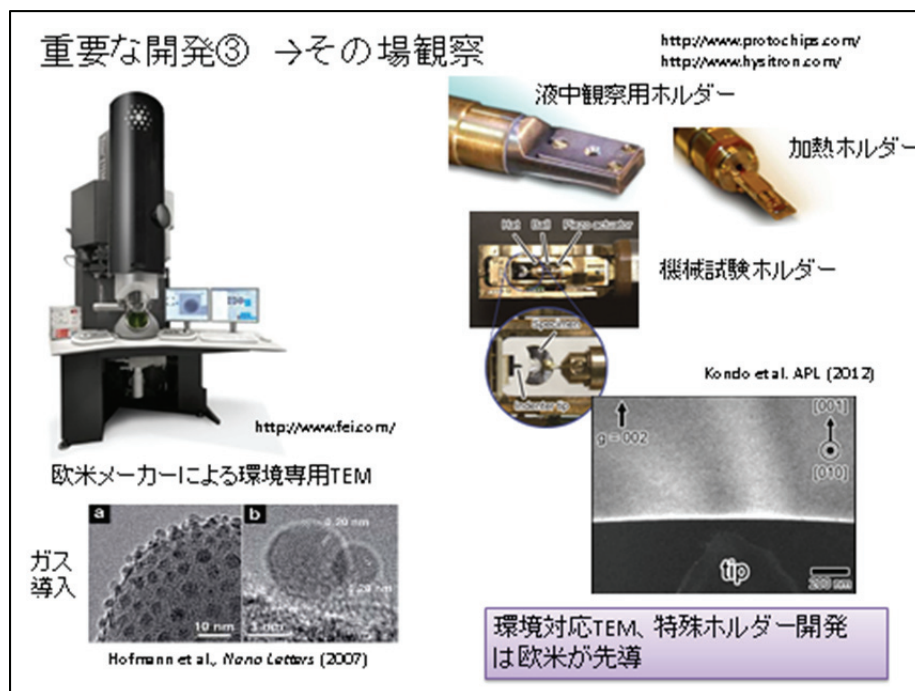


図 6-5

重要な開発④は時間分解能、すなわちダイナミック TEM である。この開発はアメリカが完全に先行している。アメリカでは特にノーベル賞学者の CALTECH のズバイルらが 4D STEM を開発している。これは、高空間分解能でかつ高時間分解能を実現するもので、米国の国策として進められている。日本ではほとんど手付かずの状態であるため、米国で実現されると完全に主導権を握られてしまうことを危惧する。実際に FEI がプロトタイプ機を販売し始めていると聞いている。

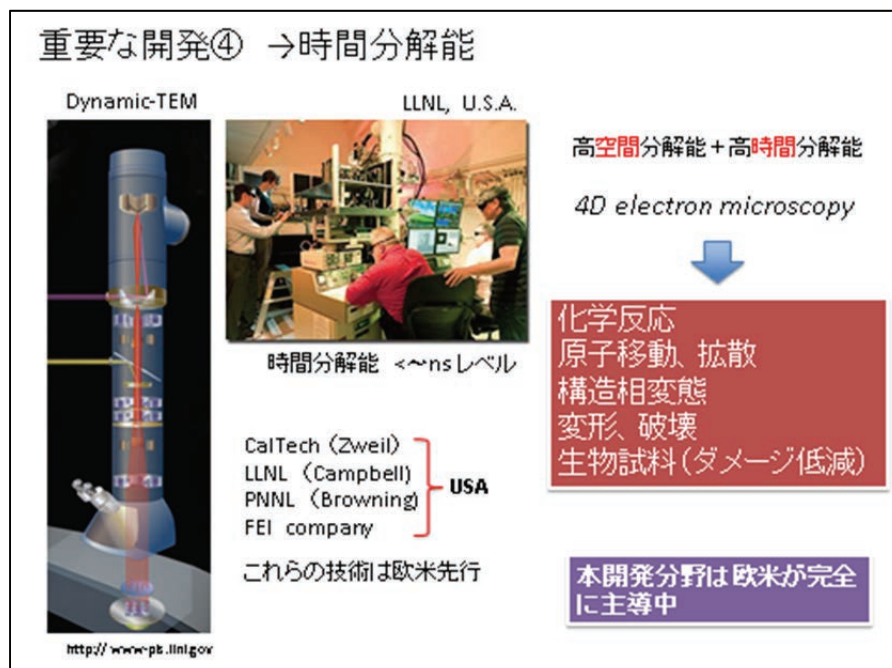


図 6-6

最後に私が非常に重要だと思っていることを申し上げたい。一つは人材育成である。現在、この分野の若手研究者の枯渇が問題となっているが、その理由は電子顕微鏡に関わる若手研究者は解析支援・共用化等が主な仕事となっているからである。これは大変必要なことではあるが、真の研究者を育てるならば、若手時代に基礎的な研究や装置開発に携わる機会を与えるべきである。実際私自身はそのような機会を与えてもらったので、今日ここに立って話をさせていただいていると思う。ところが、支援・共用化が主な仕事となると、どうしてもオペレーター化してしまうのが現実である。TEM の情報を最大限に引き出すためには、複合的な知識が極めて重要であり、そのためにも基礎的な研究は欠かせない。私はいつも、TEM は総合格闘技だと言っている。多くの分野を網羅的に見ることができる研究者の養成が必要である。

二つ目は、若手研究者が自ら責任をもって取り組める挑戦的な開発プロジェクトやファンディングの重要性である。私自身は基礎研究をさがしげや NEDO の若手グラントでやらせていただき、極めて重要な経験を積むことができた。今後も若手研究者が意欲を持って骨太なテーマに取り組めるグラントを続けていってほしいと思う。

最後に、透過型電子顕微鏡は、元々産学連携から始まったことをお伝えしたい。学振の瀬藤委員会に端を発し、長年積み上げてきた諸先輩方の努力によって今や電子顕微鏡は日本のお家芸と言われるまでに発展している。今後もこの分野の研究開発を大いに推進することにより、ナノテク・材料やバイオ分野の発展、底上げに大きく貢献するとともに、日本の科学技術力の世界的プレゼンスが高まりつづけることを確信している。

質疑応答

- ・収差補正で、日本がドイツに負けた理由は？ 例えば産学連携の仕組みなのか、あるいはベンチャーに関係しているのか。
 - ⇒ 日本もこの期間、電子顕微鏡の開発をサポートしていたが、それでも負けてしまった。ドイツからこの技術が出た背景は、1940 年代にシェルツァー先生が収差補正の提案をされ、そこから脈々とローズ先生など、後進が受け継いで育ててきたからである。後進の人材育成と長期間に及ぶ骨太な研究継続の重要性が分かる。
- ・顕微鏡本体を見直すには、設計思想を変えないといけないが、シミュレーションである程度までできるのではないかと？
 - ⇒ レンズの設計はかなりシミュレーションで可能になっている。設計思想を変えれば、全く新しい電子顕微鏡の形が見えてくるかもしれない。そのような分野への取り組みにも大いに期待したい。
- ・収差補正の知財はまだ生きているのか？ 生きているなら、日本は特許料を払って開発をしているのか？
 - ⇒ まだ生きているようだ。 残念ながら、特許料を払っている。
- ・電子顕微鏡と SPM を組み合わせる技術はどの程度進んでいるのか？

⇒ SPM を備えたホルダーを、スウェーデンのベンチャー企業が販売していたが、その会社は倒産してしまい、現在その技術は FEI 社が知財を買い取った。最近アメリカではアトムプローブと TEM を合体させる動きもある。欧米は産学連携でスピーディーにやってくる。日本でも技術的には可能なので、研究分野のトレンドに敏感に対応しながら、重点投資をすることが重要ではないか。

話題提供 4 有機機能性材料開発の現場で求められるイメージング質量分析技術

豊田岐聡（大阪大学大学院理学研究科附属基礎理学プロジェクト研究センター）

イメージング質量分析という技術は、元々は細胞などを見るための技術として出てきたが、材料系に適用できないかという視点で取組んでいる。

現在、様々な有機機能性材料が開発されている。有機薄膜太陽電池や有機 EL、そして高機能性のポリマーはスマートフォンのガラス表面などに塗られて撥水、撥油の機能をもたらしている。そのようなポリマー、あるいは有機薄膜の太陽電池等の有機分子をどのように分析していけばよいのか。分子が機能を持つような材料に関しては、分子そのものがどのように表面に分布しているかという状態を把握する必要がある。ナノスケールで観察できれば、高機能性材料の開発や、その後産業化したときの製造の安定化に貢献できる。これら有機の機能性材料の表面分布を見るための技術は様々ある。図 7-1 は、横が空間分解能、縦は何を見ているかになる。分析装置によって、空間分解能が高いところが得意なものもあれば、分子の官能基や化学結合を見るようなものが得意なものもある。ところが、分子そのものの状態を見るというところが欠落しており、ここを補うことが、今後の有機機能性材料開発のための分析技術にとっては不可欠である。

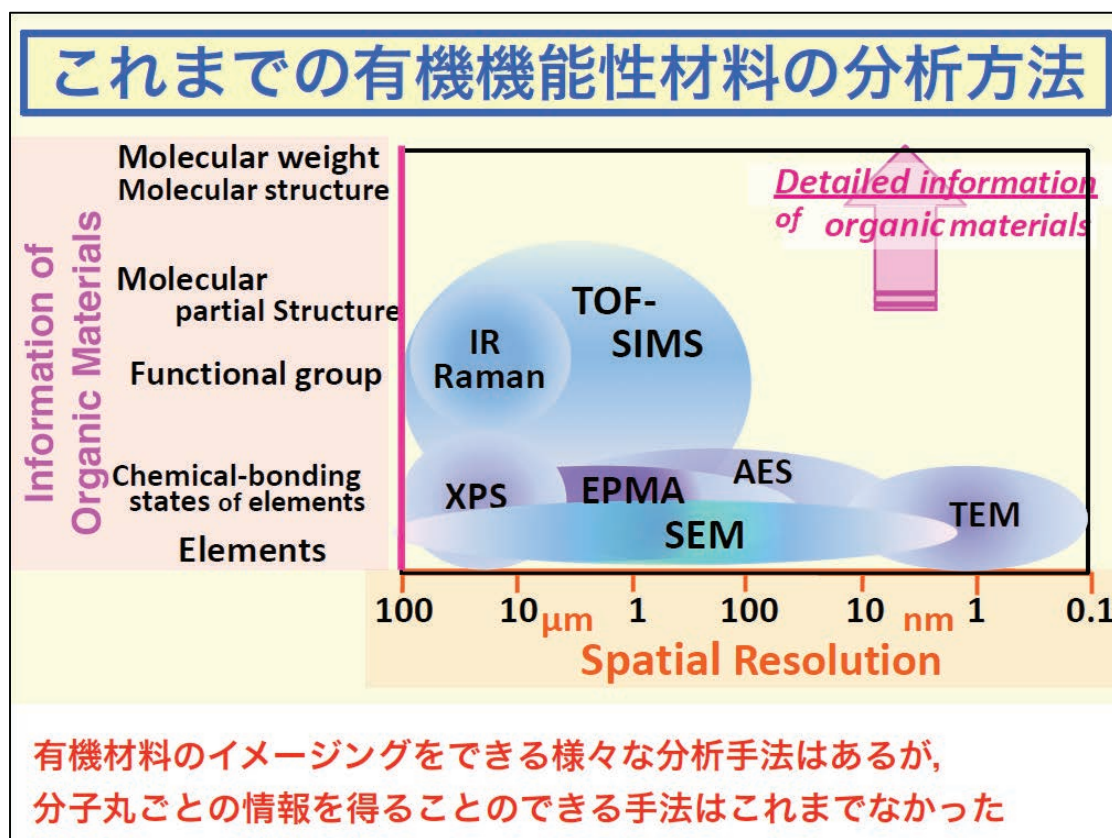


図 7-1

解決する方法のひとつとして、イメージング質量分析が使えるのではないかとすることで、10 年近く前から JST のプロジェクトなどで開発し、今も脈々と取り組んでいる。細胞の例

でいうと、細胞のどこにどの質量の分子が分布しているのかの情報を得ることができる。

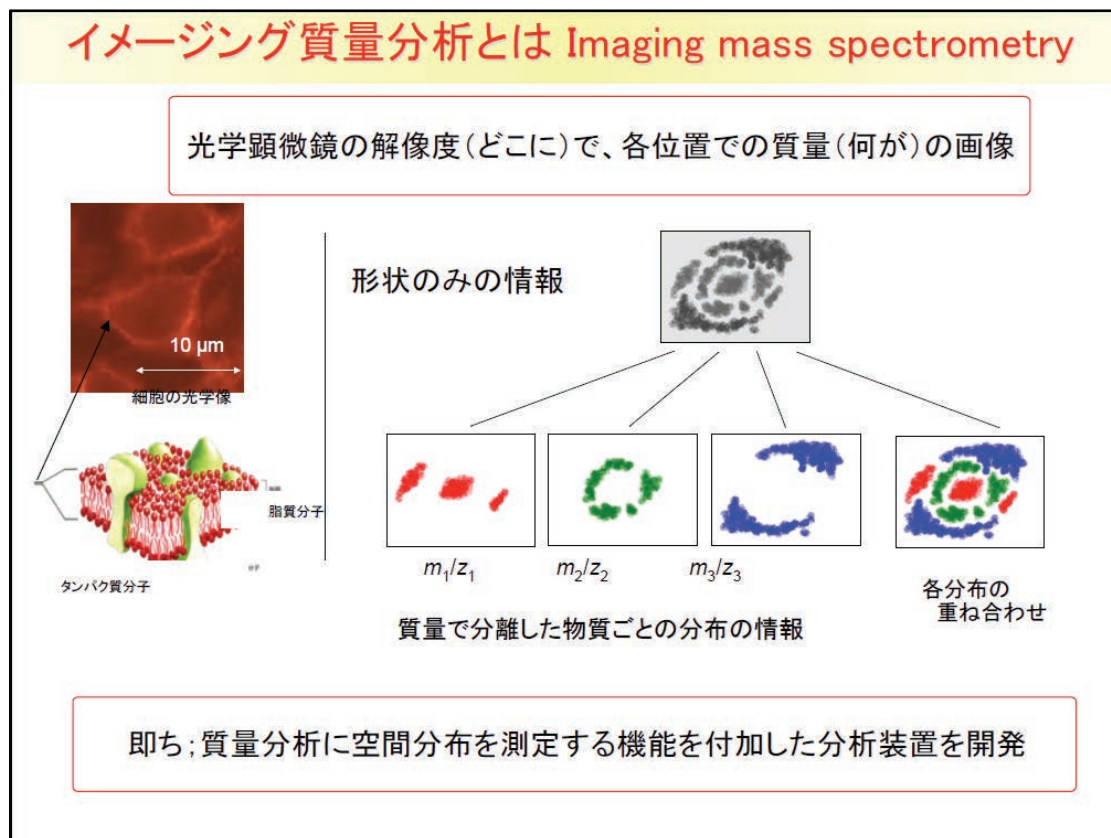


図 7-2

イメージング質量分析の方法としては二通りある。レーザー、あるいは SIMS のようにイオンビームでイオン化する。走査型では、そのイオンビームやレーザー光を収束させて、小さく絞って照射し、そこから出てきた質量スペクトルを得る。そしてターゲットを動かすなりビームを動かして走査していき、一点一点データをとったマススペクトルを合成してその像を得る。これは従来の質量分析装置でもターゲットを動かす技術があればできるということで、市販品はほとんどこれである。もうひとつ、我々のやっている投影型という方法であり、たとえばレーザービームを広い範囲で照射してそのサンプルの表面の全域をイオン化して電場で引っ張り出し、静電レンズ系で収束させて検出面に投影する。レーザーを用いてイオン化する理由は、SIMS のようにイオンビームでイオン化すると分子が壊れるからである。TOF-SIMS では分子のフラグメントしか見られないが、レーザーを使うと分子丸まをイオン化できる。このとき飛行時間型を使うと、質量は時間の差として現れる。空間はそのまま像として投影する。検出器のところで位置と時間を両方とも検出できれば、イメージングができる。

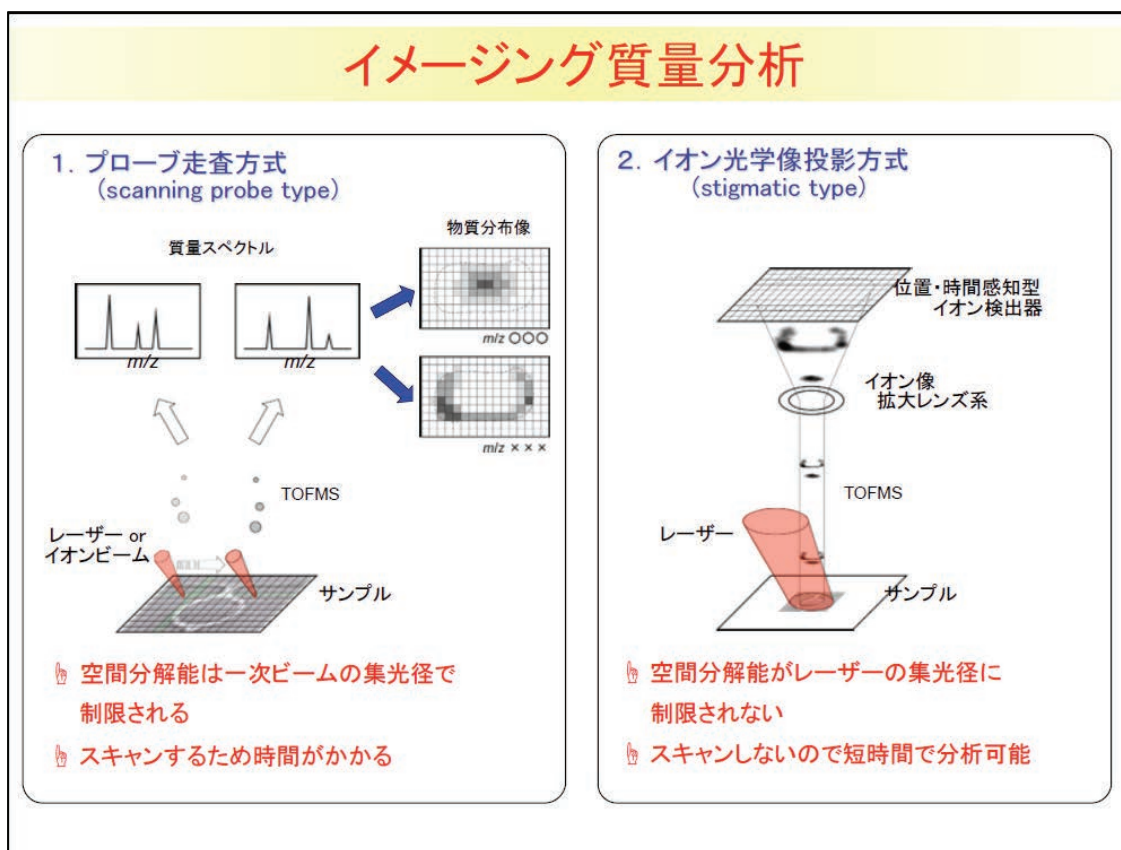


図 7-3

例えば、有機 EL 素材の劣化をイメージングで見ようとする。光学像では劣化しているといっても実際何が起きているのかがわからない。しかし、元の分子が壊れて、その分子が何かというところまで決められるのがイメージング質量分析の特徴である。走査型の技術ではレーザーの集光径で制限され、現在は 20 ミクロンの空間分解が限界である。もっと空間分解能をあげるためには投影型を用いなければならない。投影型ではレーザー光を絞る必要がなく、空間分解能がレーザー光で制限されない（実際には検出器の空間分解能により制限される）。我々は MULTUM と呼ぶ大阪大学で開発したマルチターン飛行時間型質量分析計を用いている。まず、イオン源にレーザー光を照射する。仮にターゲットが星形をしているような形状のサンプルだとすると、それが星形のままイオン化され引き出される。イオン化したイオン群を静電レンズ系で、結像させて MULTUM に入射し多重周回させる。この時、MULTUM の周回部では完全収束を満たしているため、一周回ってくると元の像に戻る。そしてそれがそのまま検出器にもう一回静電レンズ系を通過して投影される。このようにして像を投影させてみるというのが投影型である。

現在 MULTUM を用いた投影型では、空間分解能 $1\mu\text{m}$ 以下、質量分解能 1 万以上を達成できている。これにより図 7-4 に示すように、サブミクロン領域まで分子そのままの空間分布の情報を得ることが出来るようになっている。

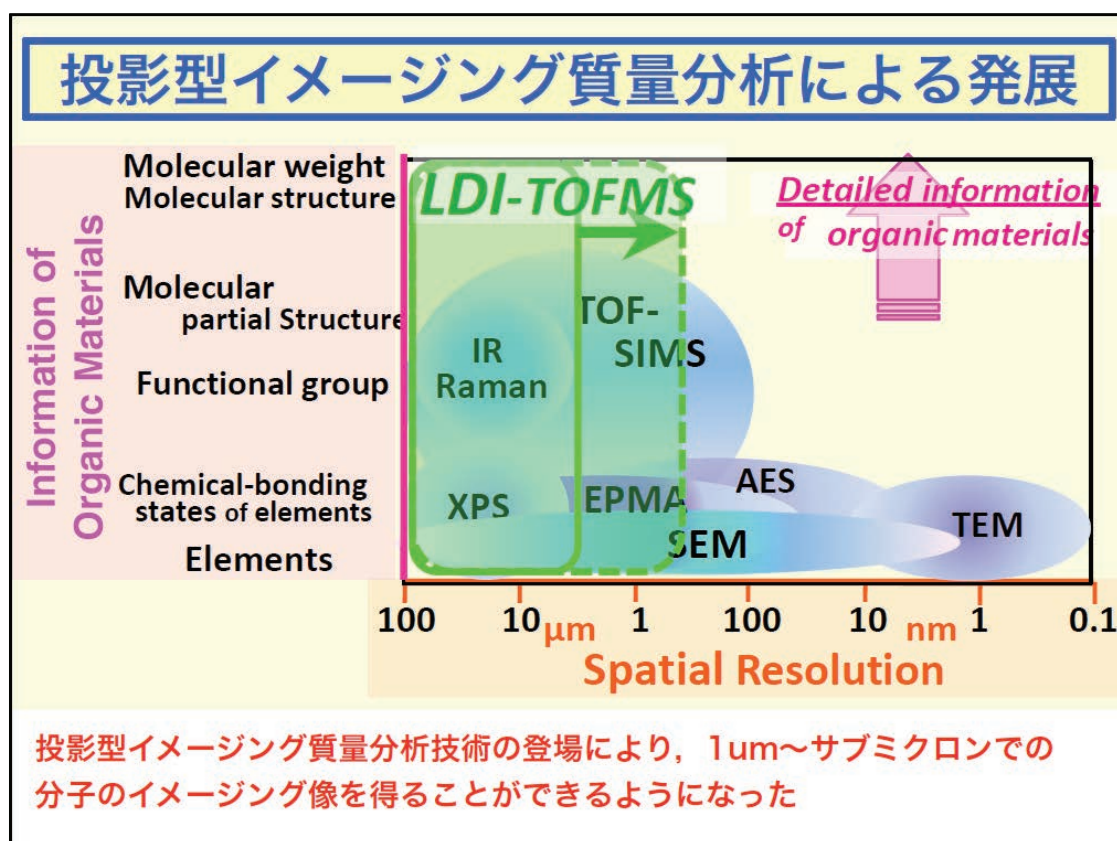


図 7-4

図 7-5 は、有機 EL を投影型で測定した結果である。質量 456 のイオンが劣化部位に特異的に分布していることが分かる。分布は 1 μm の空間分解能で観測できている。現在この質量の分子の構造の特定を試みて、劣化のメカニズムの解明に取り組んでいる。

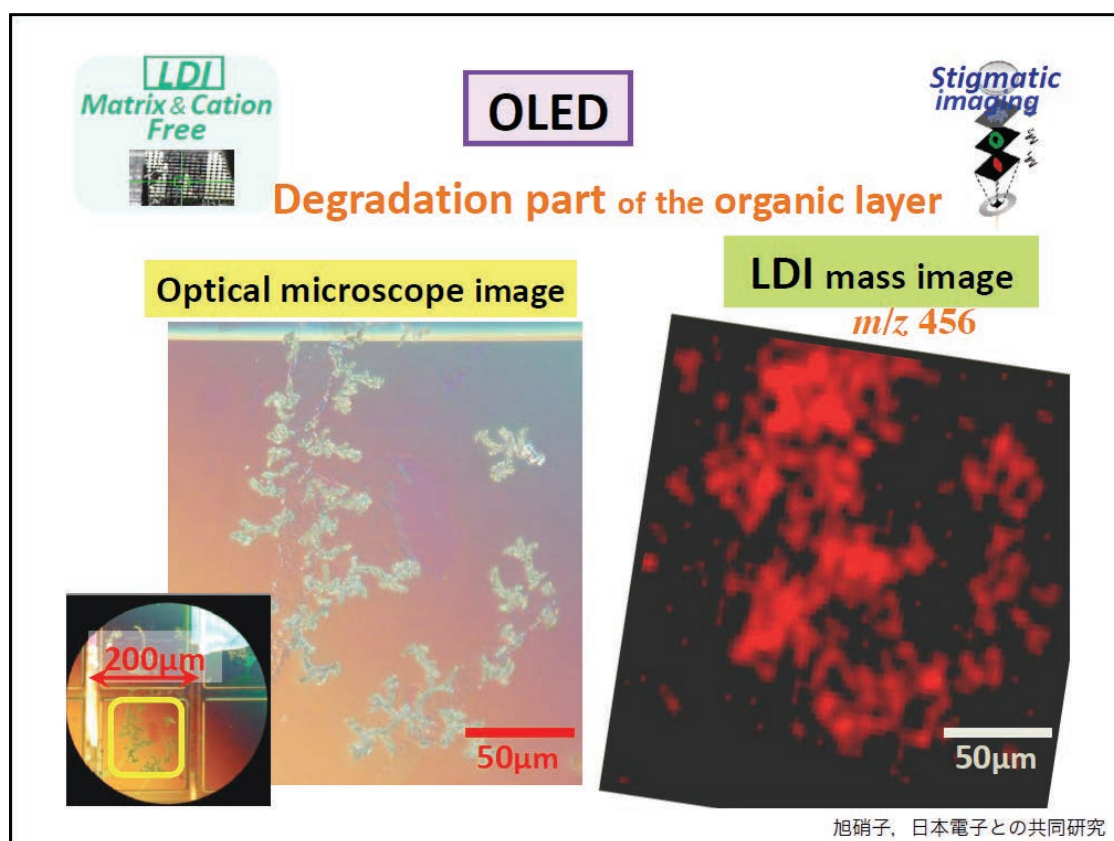


図 7-5

他にも、フッ素系の撥水・撥油剤がどのようにコーティングされているのかという観測も行っている。ガラス上にポリマーをコーティングした時に、一様にべたっと載っているのか、あるいはどこかに島を作っているのかというのは既存技術では分からなかった。そこでイメージング質量分析で測定してみたところ、走査型では、20μm 程度の空間分解能であるが、ムラ状に分布しているということが見えてきた。そこで、投影型を用いてさらに空間分解能をあげて観察すると、もっと細かいスケールで点々と分布していることが見えてきた。イオン化効率を考慮すると見えている分布はガラス表面にコーティングされた1層の分子の分布ではないと考えられるため、ミクロンスケールでクラスタリングしていると思われるが、このような情報が得られたことは、材料開発の現場にとっては有益なことである。現状で空間分解能を制限している検出器の見直しを進めており、近い将来には100ナノメートルのオーダーまでは到達できる見通しである。そこまでいけば、分子をそのまま見るという技術は非常に求められているため、ナノ計測の分野に貢献できるだろう。

ここまでをまとめると、分子をミクロンやナノメートル単位で見る技術として、イメージング質量分析を用いる試みがなされるようになってきている。これにより高機能性の有機材料を評価できるようになってきた。成果は出つつあるが、問題点は、まずイオン化できないと見えないのであるという点である。現在対象としている分子は、紫外レーザー光を照射すると、効率よくイオン化する分子ではあるが、他の分子をどのようにイオン化していくのかという課題がある。また、深さ方向の情報を如何に得るのかという課題もある。これだけで

すべて解決するわけではないので、他の分析技術とうまく組み合わせて、互いに補いながら材料開発の分野に貢献していくことが重要だろう。

政策上の課題としては、ニーズとシーズのマッチングの仕組み整備がやはり非常に重要である。実際我々が企業と共同研究をしていると、「こんな技術があるのは知らなかった」という企業技術者がたくさんいる。やはりマッチングできていないので、そこをどうつないでいくのが課題である。装置開発の側からすれば、具体的にこんなものをこのように見たいのだと言われれば、それに対してアプローチしていくこともできるが、その情報の交流が重要になる。また、「夢」に向かってやっていくというところが大事だろう。

質疑応答：

- ・研究者と開発をしている人というのはコミュニケーションをとる場所が今のところないということか。
→例えば、ポリマーを研究している人たちの学会に参加するといったことを装置開発の人にはしないので、何を求められているのかわからない。どこできっかけができるのか、が課題である。
- ・企業でライフサイエンス向けに質量分析の顕微鏡の販売を始めているが、材料メーカーから同じような話があった。材料系の話というのは元々想定していなかったが、そういうニーズがあるということが初めてわかった。足下の話として質量分析の学会には出ていたが、それが使われるような材料系の学会に質量分析の技術者が行くということは今までやはりなかった。我々がまずはそういう学会などに参加して、情報を仕入れることが必要だろう。無駄足なこともあるだろうが、そういうことをやらなければいけない。また、材料系と計測系で、アプリケーションの話ができるような仕組みや機会が必要である。顕微鏡でやっているようなことで、質量分析が測れるなんていうことを材料系の方たちは想像していない。

話題提供 5 先端 AFM 技術を用いた学術・産業分野における研究の重要性と課題

福間剛士（金沢大学理工研究域バイオ AFM 先端研究センター）

原子間力顕微鏡（AFM）の仕組みを最初に簡単に紹介する（図 8-1）。原子間力顕微鏡は、マイクロメートルスケールのカンチレバーと呼ばれる片持ち梁を使う。その先端に付いているナノスケールの尖った探針を試料の表面に近づけて、探針先端と試料との間に働く力を検出する。そしてその力が一定になるように探針と試料間の距離を制御しながら、探針を試料表面の近傍で水平方向に走査すると、探針は試料表面の凹凸をなぞるように上下し、その際の探針の軌跡から表面の形状を観察できる。AFM の大きな特徴としては、金属、半導体、絶縁体、特に絶縁体の計測に制限がないということである。また、測定環境としても、真空中、大気中、液中を問わず使うことができるようになってきた。そして多くの場合、原子・分子スケールの分解能で観察でき、よく光学顕微鏡と比較した際にラベルフリーであるという点も有利な点として挙げられる。力を検出するという点で、力の起源には様々なものがあるがそれをうまく使うことで、電気的、化学的、力学的な物性計測とを結びつけられるということが特徴である。

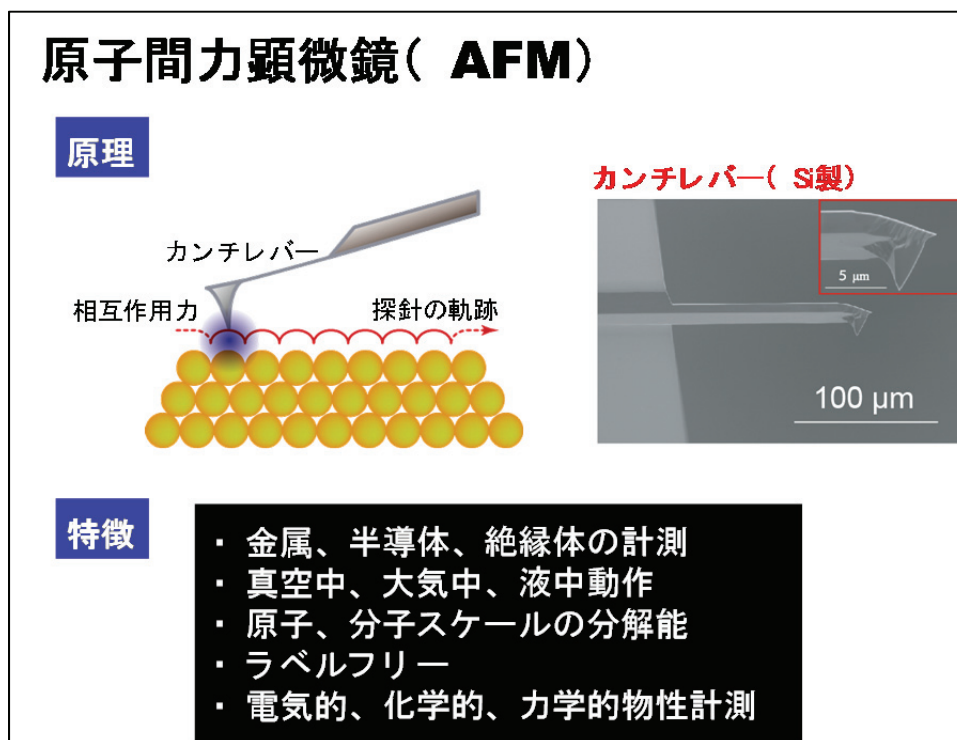


図 8-1

2000 年代前半、日本を含めて世界中で大規模な投資がナノテクの開発に行われたなかで、私の見てきた AFM 研究の分野では特に、ナノテクとともに分子エレクトロニクスの研究を推進するという空気が世界中であった。AFM 分野では特に真空中での原子・分子レベルの計測技術が大きく発展した時期でもある。そして、実際にそういったものを使っていくつかの分子デバイスの動作も確認された。分子エレクトロニクスは、具体的なものにするのが難しいとされるが、本当に無理かということ、生体中ではタンパク質という分子機械が機能して

いることから、これを理解して模倣しようではないかという分野も出てきた。

そのような流れのなかで、高分解能の AFM を大気・液中でも動作できるようにしようということで、原子・分子レベルの液中 AFM 計測技術は大きな発展の時期を迎えた。そして 2010 年以降、AFM 自体の基本計測技術から、各論的な応用研究が主流になってきたという印象を私は受けている。

これまでの注目すべき技術の事例をいくつか挙げる。一つは、大阪大学の森田清三先生がおこなった例で、AFM の基本機能として安定性というものがあるが、非常に地道な開発によって探針の位置が徐々にずれていくドリフトを抑制する技術を開発し、真空中ではあるが世界で初めて室温で原子操作するということを実現した。ここで重要な点は、ドリフトを抑制するという極めて地味な技術開発によってこれを成し遂げたという点である。

また、その他に大きな発展としては、ドイツの Giessibl と IBM チューリッヒの Gross らの実験である。水晶振動子を利用した力センサーを使って、その探針の先端に一酸化炭素の一分子を修飾して使ってしまうというものである。これまで分子の中を原子レベルで見るということは極めて難しかったが、これを使って非常に再現性よく分子骨格を可視化することが可能になった。

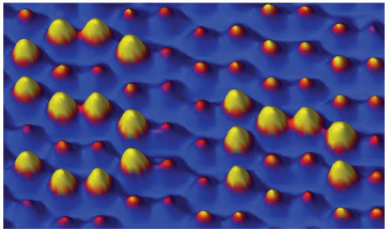
技術動向と注目すべき科学技術

室温原子分子操作

- AFM 探針位置のドリフトを抑制
- 飛躍的な安定性の向上
- 1 nm/min → 0.1 nm/min
- 原子操作、識別を室温真空中で実現

森田@阪大

室温での原子操作



分子の原子分解能観察

- 水晶振動子を利用した力センサ
- 探針先端を CO 分子で修飾
- 分子内原子分解能観察を実現
- 分子内の電位分布観察も可能に

▪ Giessibl@ Regensburg

▪ Gross@IBM

ペンタセンの原子分解能観察

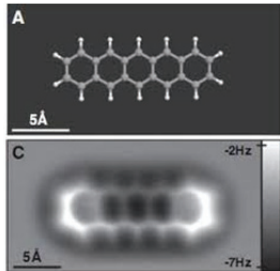


図 8-2

その一方で、2005 年以降に急速に発展してきた液中 AFM の分野では、特に日本が非常に大きな貢献をした。安藤敏夫先生は、AFM を構成するすべての要素をこまめに見て、共振

周波数と帯域を改善するという地味な作業を通じ、世界で初めて 30 frame/sec 以上のいわゆるビデオフレームで動くような AFM を開発した。現在は生命現象の可視化を中心に応用されている。これは当然他の分野にも応用されることが期待されている。

手前味噌になるが我々のグループでも高分解能 AFM を開発し、回路系あるいは光学系のノイズを徹底的に排除することによって、従来と比較して 100 倍程度の飛躍的な変位ノイズの低減を実現している。理論限界のノイズ性能を達成することで、生体分子の高分解能観察、あるいは固体と液体の界面の水分子の分布を原子スケールで可視化するということが可能にした。また、最近ではその高速化も実現し、原子レベルで液中で結晶成長する過程を直接観察するようなことも可能になってきている。

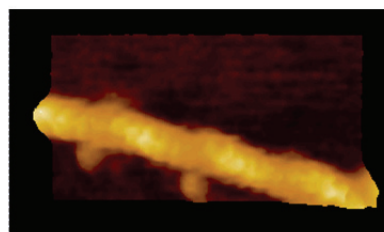
技術動向と注目すべき科学技術

液中高速AFM

安藤@金沢大

- ・ AFMを構成する要素をすべて高速化
- ・ 共振周波数と帯域を改善
- ・ 飛躍的な速度の向上
- ・ 1 frame/min → 30 frame/sec
- ・ 生命現象の可視化を中心に応用
- ・ 他の分野への応用も期待される

液中でのミオシンVの挙動



液中高分解能AFM

福間@金沢大

- ・ 回路と光学系のノイズを徹底排除
- ・ 飛躍的な変位ノイズの低減
- ・ 500 fm/√Hz → 5 fm/√Hz
- ・ 理論限界のノイズ性能を達成
- ・ 生体分子の高分解観察を中心に応用
- ・ 水和構造の3次元計測へと発展
- ・ 化学分野への応用が広がりつつある

マイカ／水界面の水和構造

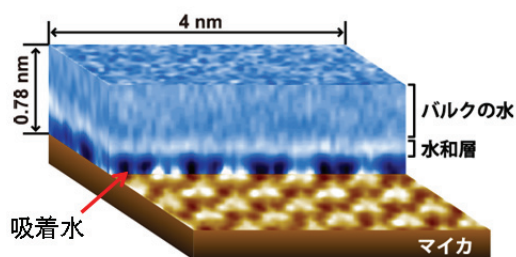


図 8-3

我が国の問題として、私が考える点をいくつか挙げさせていただく。トレンドが去った後の投資が少ない点である。投資が現在のトレンドに偏重するのはどの国も同じで、当然世界的にその流れはあって、どこもそのように偏重する。しかし、日本はその偏りがやや極端すぎるのではないかと、その結果、過去に投資して世界最高レベルに育てた分野をあっさり切り捨てている印象が否めない。それは言い換えればトレンドが去った後にサポートしないので、長期的には非常に無駄な投資になっている恐れがある。

我が国の問題(推進・政策上の課題)

トレンドが去った後のサポートがない

- ・投資が現在のトレンドに偏重するのはどの国でも同じ
- ・ただし、日本はその偏りが極端すぎる
- ・その結果、過去に投資して世界最高にまで育てた分野を切り捨てている
- ・トレンドが去った後にサポートしないので、長期的には無駄が多い

原子レベルのSTM・AFM技術

投資 
世界をリード 

	1990	1995	2000	2005	2010	現在の順位
真空STM						米国＞欧州＞日本
真空AFM						欧州＞日本＞米国
液中AFM						日本＞欧州＝米国

真空AFM ・2000年代前半：大きな投資→世界をリード
 ・2000年代後半：支援しない→トップから転落

液中AFM ・2000年代後半：大きな投資→世界をリード
 ・2010年代前半：支援しない→過去の遺産で何とかトップを維持
 ・現在：トレンドの研究課題のサブテーマとして支援されている

図 8-4

例外や別の意見はたくさんあるだろうが、その前提でこのような表を見ていただきたい。AFM・STMの原子レベルの分野に限って言うと、真空STM、真空AFM、液中AFMのような技術がある。真空AFMについては、日本は世界的に見ても大きな投資して技術開発を行った。しかし、非常に大きなプレゼンスを見せて、今どうなっているかという、その後一気にトレンドが移行して、あまり投資をしなくなった。反対意見を持たれる方もいると思うが、現在は以前と比べれば明らかに世界的な順位は下がっているだろう。それに対して液中AFMは、投資をして発展し、上述したような例で現在世界をリードしている。ただ、ここで先ほどの状況と違うのは、現在トレンドである環境・エネルギー分野への投資によって、そこで求められる計測技術として固液界面の計測技術が必ずあることから、液中AFMは間接的に投資され、過去の蓄積・遺産によってなんとかトップを保っているということである。このまま核となる基盤技術の開発をやらなければ、諸外国にトップをさらわれることになるだろう。トップレベルを維持し続けるために継続して投資していこうというような、1課題単位ではないもう少し広い範囲のスキームがあるべきではないか。応用研究、エネルギー分野の共同研究として加わりサブテーマとしてやるのでは、世界をリードし続けることはできないだろう。

固液界面現象の原子・分子スケール理解に向けた計測基盤技術の確立

背景・社会的意義

- ・ 現在、社会で問題となっている多くの技術課題の中心に、固液界面現象がある
- ・ 原子・分子レベルでの理解には、液中での原子・分子スケール構造・物性計測が必要

想定される成果

グリーンイノベーション 電極／電解液界面、触媒(助触媒)／水溶液界面

ライフノベーション 生体システム・人工医療材料／生理溶液界面

研究課題

高速3次元計測

- ・ 2次元凹凸像→3次元分布像
- ・ 高速化、大面積化、定量化

電位・電荷分布計測

- ・ 電極、触媒、腐食反応
- ・ 分子の移動、吸着、認識

吸着分子分布の計測

- ・ 3次元可視化と解釈

国内外の注目すべき技術・研究開発

液中高速AFM @安藤(金沢大)

生体分子の動的挙動をナノスケールで可視化

液中高分解能AFM @福間(金沢大)、山田(京大)

水和構造や表面揺動構造を原子スケールで可視化

推進方策

- ・ 応用研究のサブテーマでは世界に追い抜かれる
- ・ 現在、世界最先端の技術をさらに発展させる研究

図 8-5

近年 AFM 技術の大きな発展に貢献した例を見てみると、たとえば高速化がある。非常に地味な作業である。高速化の実現と低ノイズ化、安定化によって室温原子操作が実現した。こうしたことが大きな発展を導いてきたということには非常に重要な示唆があるだろう。飛躍的な性能改善には、必ずしも独創性、新規性は必要ない。多くの場合は始めの入口としては正攻法、王道で臨むのが良い場合があり、それでやってみると、そこから独創的なアイデアが生まれるということのほうが多い。研究プロポーザルの評価項目には必ず独創性や新規性があるが、すべてにおいて研究申請段階で独創性を求める必要はない。

もうひとつ、制御開発に対する過小評価というのが全体的にある。過去 5 年間の AFM 装置の開発リソースの進化を見てみると、我々が使うことのできる材料、ハードウェア、ソフトウェアはそれほど進化していない。一方、5 年前の FPGA と今の FPGA を見ると、雲泥の差というくらい進化している。日進月歩で進化していて、次元が違うくらいのことできるようになっている。過去 5 年で最も進化したのは間違いなくファームウェアというリソースだが、このリソースをうまく活用できている計測技術は思いのほか少ない。これを使えば、たとえば AFM の場合、探針を走査している途中の瞬間瞬間に、リアルタイムにインテリジェントな制御をすることができるようになる。必ずしも装置メーカーが商品開発レベルでやる話ではなくて、重要な研究課題として認識して、研究を行うべきである。そういう認識がない結果、これらのリソースを使うものに関しては、AFM 開発の分野では日本は立ち遅れている。

計測技術の研究開発に関する課題

計測技術開発の計画に独創性・新規性を求めることの弊害

近年のAFM技術の大きな進展

- ・ 高速化 → 高速AFM
 - ・ 低ノイズ化 → 高分解能AFM
 - ・ 安定化 → 室温原子操作・識別
 - ・ 飛躍的な性能改善に独創性、新規性は必ずしも必要ない
 - ・ 多くの場合は正攻法が功を奏する
 - ・ そこから独創的なアイデアが生まれる
- ・ 申請段階で独創性を求めることはナンセンス
- ・ 評価項目にあることで害の方が益より多い
- ・ 実績と計画の妥当性を重視すべき

制御技術開発に対する過小評価

過去5年のAFM装置リソースの進化

- ・ ハード、ソフト → ほとんど同じ
 - ・ ファームウェア → FPGAの急速な進化
 - ・ 過去5年で最も進化したのはファームウェアである
 - ・ 多くの計測技術で未活用
- ・ リアルタイム、インテリジェント制御が計測の常識を覆す
- ・ ただの商品開発ではなく、重要な研究課題と認識すべき
- ・ 日本はこの分野で非常に遅れをとっている

図 8-6

産学連携の重要性と課題

重要性

- ・ 計測技術は共通基盤技術であり、研究開発に使われてこそ役に立つ
- ・ 実際、AFM計測に対するニーズは非常に多い
- ・ メーカーが商品化して、ユーザにわたって、研究開発が進むのでは遅い
- ・ 特に、AFMは操作、試料作製、データ解釈に専門知識が不可欠
- ・ 実際、AFMは多くの企業にあるが、ほとんど使われていない
- ・ 共同研究の申し込みも多く、産学連携のニーズが多くある

課題

適当な人材の確保が最重要課題

- ・ 教授、准教授：忙しすぎて実験できない
- ・ 助教、PD：キャリア形成の途上、論文にならない研究は困難
- ・ 学生：教育的見地からのテーマ設定、戦力として計算できない
- ・ 研究(補助)員：キャリア形成を考えていない、計算できる戦力 ← 最適人材！

本当に産学連携を支援するには

- ・ 長期(最低5年、できれば10年以上)、研究(補助)員を雇用できる費用を支援
- ・ 論文や特許を成果として評価せず、実際の従事実績を問う評価体制
- ・ 消耗品費は、企業からの資金で十分な場合が多く、旅費もほとんどいらない
- ・ 埋もれている女性研究者の発掘、育成、活用につながる

図 8-7

AFM というのは共通基盤技術であり、研究開発に使われてこそ役に立つ、非常にニーズも多い。しかし、メーカーが商品化してからユーザー企業に渡って、そのユーザー企業で研究開発が進むというサイクルは遅い場合が多い。特に、AFMは操作や試料作製、データ解

積に専門知識が不可欠な場合が多いということも挙げられる。私が相談を受ける企業はAFMを持っていることが多いが、企業ではうまく使われていない。共同研究の申し込みも多く、産学連携のニーズはある。ただ、適切な人材の確保が難しく、これらの人材には研究補助員のような形態が有効ではないか。産学連携を進めるといときに、ポスドクを雇えというのではなくて、こういう人をピンポイントに雇うようなスキームがあったほうがいい。

質疑：

コメント：5年間で予算が突然切れるという不満があることはよくわかる。しかしAFMはもう皆が実用化したと思っている部分もある。世の中でたくさん売れていると思っている。そうすると、どれだけ世の中に売れるかで、それがどんどん売れてビジネスになっていけばそこから応用が広がってまた予算も付くが、誰か一人がすごいデータだけ出しただけでは、一般のナノテクへの貢献にはなっていない。だからもっと使われるところまでもっていくことが大事。論文でネイチャーの表紙に載っただけではやはり研究者は続かないと思う。

→おっしゃる通りで、我々もひとついいケースが最近あった。NEDOのプロジェクトである技術を宣伝したら、多くの企業から共同研究の申し込みがあった。企業と連携していく中で、実際企業が自分たちのAFMに付けたいということがドライビングフォースになり、技術移転が進んだ例があった。研究者が営業までやる余裕はないが、ないながらも、AFMの一番の課題は売れていても使われていないというところであり、それをなんとかするためにはダイレクトに研究者とユーザー企業、ユーザー企業とメーカー、メーカーと研究者みたいな三位一体の協力体制が必要である。

話題提供 6 NMR；装置、周辺技術、応用

大木進野（北陸先端科学技術大学院大学 ナノマテリアルテクノロジーセンター）

私の専門はタンパク質の NMR であり、装置、周辺技術、応用のうち特に周辺技術と応用の二つが専門である。液体クロマトグラフィーのカラム自体を NMR のマグネットの中に入れ、カラムに付くものを流しながら直接観測することや、NMR 用のタンパク質試料で大腸菌や酵母で作れないものを植物の細胞で作ることなどをやっている。試料調製では、例えばアクチンなど他の系では作ることが難しいものも作れるようになり、メチル基の選択標識もできるようになっている。ナノテクノロジープラットフォーム事業を通じて装置の共用も進めており、このような特殊な技術を持っていることで、外部ユーザーが多く来てくれて共同研究の機会が増えている。

文部科学省が 10 年ほど前に「先端的計測・分析機器の現状と今後の課題」というレポートを発行しており、5 年から 10 年先に開発される可能性があり且つ自分が使ってみたい装置にはどのようなものがあるか、ということが表に整理されている。そこには、NMR 装置で 2000 メガヘルツ、固体のプローブが必要、高分解能で一分子の反応解析をしたい、高輝度 X 線源や NMR のシステムとレーザーを組み合わせたらどうか、タンパク質の分子運動をリアルタイムで可視化する、というようなものが掲載されている。NMR 装置やソフトウェアに関係するものでは、磁場の高度化をしてほしい、であるとか、NMR による有機化合物の自動的な同定、といった課題が挙げられている。実際に NMR の分野はこの方向性で研究開発が進められてきた。今後もしばらくはこの方向性が大きく変わることは無いと考えられる。

専門家向けに表現すれば、大型化（高磁場化）、高感度・高分解能、多彩な測定方法を達成することが必要である。大型化は、NIMS、JASTEC、理研などで線材の開発から取り組まれている。現在は、一時的にブルカーに負けているが、今後ぜひ逆転してほしい。開発には、ブルカー社が欧州でやっているように、継続的な国からの支援が必要である。途切れ途切れの研究費では、大型装置の開発は難しいだろう。近年のヘリウム価格高騰や品不足に対応するような、ヘリウム低消費型磁石の開発も望まれるところである。高感度化では、ふたつの動きがある。まず、クライオプローブという極低温に冷やした検出器のコイルで、電気的なノイズを減らして感度を上げるという方法であるが、これは 15 年ほど前から溶液の NMR で使われている。

NMR装置：現状と将来

専門家向け装置の現状と将来

- ・ **大型（高磁場）化**
線材、冷却、ヘリウム再利用
NIMS、JASTEC、理研
課題：磁気飽和、漏洩磁場、効率的な冷却、試料の加熱、ヘリウム蒸発量、再凝縮、振動、電力
- ・ **高感度化**
クライオプローブ、DNP
京大・竹腰ら（固体用） 阪大・藤原ら
課題：冷媒、小型化、発信器
- ・ **多彩な測定方法**
時間短縮 (NUS: non-uniform data sampling)



Bruker社HPより



Bruker社HPより



図 9-1

最近、これの固体NMR用のものの開発に京大の竹腰先生や日本電子が取り組んでいる。次に、DNPである。DNPというのは、偏極するラジカルになるような分子をサンプルに混ぜ、そこにマイクロ波をあててスピン偏極を核に移し、感度良く測定する方法である。これは阪大の藤原先生が開発しているが、数年前にオックスフォードが、去年ブルカーが製品化してしまったという状況である。

NMRの非専門家にとっては、小型の卓上型NMR、たとえばクリーンルームの中に入れられるものや、グローブボックスの中に入れられるものというのがあれば普及するだろう。簡便な操作ができ、解析を助けるツールも必要である。小型化では、サーモフィッシャーやブルカーから卓上におけるレベルの、クリーンルームに置くぶんには全然問題ないようなものが出てきている。簡便な操作や保守が必要だが、これはソフトウェアの問題である。イメージングの装置は小型化がだいぶ進んでいる。例えば、筑波の中小企業（エム・アール・テクノロジー）が開発した、食品用や骨粗鬆症やリウマチによって骨がどのように変形するかを測るといった用途別の各種小型MRI装置がある。

NMR装置：現状と将来

一般向け装置の現状と将来

・小型（卓上型）化

課題：磁石材料、漏洩磁場、効率的な冷却、検出系

・簡便な操作・保守

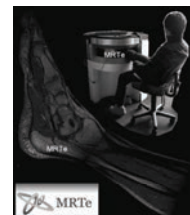
課題：自動化

・幾つかの測定・表示方法 （イメージングを含む）

課題：多様なデータ処理と解析の自動化



Thermo社HPより



MRTe社HPより



図 9-2

別の方向ではどうかというと、最近面白い論文が発表されている。日本発の技術で、質量分析と NMR をタンデムに組み合わせたものが出てきている。まだ開発段階だが、気体の NMR を測るものがないので、これがもし実用化できれば、多様な分野で使えるだろう。ドイツのグループからは非常に小さい、一片 5nm くらいの小さい試料で NMR 測定をしたという論文が出ている。このようなテクニックが確立されれば、例えば大腸菌など、イメージングによって 1 細胞の NMR ということが可能になるかもしれない。

NMR装置：現状と将来

専門家向け装置の現状と将来

・新しい技術の芽

・質量分析NMR（気相のNMR）

Review of Scientific Instruments (2012) 83, 085106.
神戸大・富宅ら

・微量サンプルのNMR

Science (2013) 339, 561-563.

1細胞NMRが可能に？



図 3

周辺技術に関しては、測定前の技術としてサンプルを調製するテクニックが必要である。NMR はカーボンであれば 12 ではくて 13 での標識、窒素は 15 で標識することが必要である。これらの技術は日本の研究者が健闘している。例えばセルフリーという技術、理研の木川氏らが取り組んでいるものは、太陽日酸からキットが製品化されていてサンプルが作れる状況にある。SAIL、Stereo-Array Isotope Labeling という、名古屋大学の甲斐荘先生が開発した特殊なアミノ酸を利用した試料調製方法があり、ベンチャー企業も作っているが、SAIL アミノ酸が高額なことがネックになっており、まだ汎用技術とは言えない。普及と共に価格が下がることを期待したい。ソフトウェアについて言及すれば、日本はこの分野では非常に遅れをとってしまった。測定後の技術としては、測定データから、化合物がどのような立体配座になっているかが簡便に出てくるようなデータベースや、NMR データの自動解析やタンパク質の立体構造計算のソフトウェアがあげられる。それらの自動化のプログラムなどが国内ではまったく進展していない。タンパク質 NMR の分野でいえば、2002 年にノーベル賞を受賞したスイスのヴェートリッヒ教授らのグループが 15 年ほど前に、自動解析ソフトを作ろうとした時期があった。その際、銀行のシステムプログラムを書いている人を引き入れてプログラムを書かせたと聞いている。日本ではなかなか起こらない発想であり、異分野の人が入ってきて、あるいは NMR の分野から他の分野へ挑戦して研究を活性化してほしい。近年、混合物の解析を NMR で行うソフトウェアのよいものが出てきており、今後も発展しそうである。これは、多変量解析や主成分解析といった統計学的な解析を NMR データに対して行うものであるが、網羅的解析を主とする研究分野では利用価値が高い。さらに、質量分析のデータでも同様な解析ができることから、NMR と質量分析両方の装置での分析データを複合的に取り扱う試みもなされ始めている。

装置共用について述べる。アカデミックだけでなく、企業の方々にもぜひ使ってほしい。ナノテクプラットフォーム事業は地域の企業に貢献し、地域を活性化することが求められている。コーディネーターが足しげく企業を訪問しているが、その際、企業の潜在的なユーザーが興味をもってくれるようなデータを見せることも重要である。

NMR のデータではないが、図は日本酒の王冠とその表面を EPMA（電子線マイクロアナライザ）で測定した写真である。日本酒は輸出量が増えているが、付加価値をつけて国際競争力をつけるにはどうしたらよいかを考え、王冠に普通に印刷するのではなく、蒔絵の技術を使い、漆を塗ってその上に金粉や銀粉を蒔いて絵を描くということが石川県のある企業でおこなわれている。この王冠の絵の界面の状況がどうなっているとか、そういったレベルでちゃんとしたサイエンスに仕上げていくのは私たち大学にいる人間の役目なのだろうと考えている。特に中小企業の場合は、このような結果を宣伝に使えるメリットがあるので非常によいのではないかな。



図 9-4

装置共用の仕組みにおいて、測定やメンテナンスを担う技術人材の確保が重要だが、例えば、装置メーカーから 1-2 年間派遣してもらうようなことができないだろうか。企業にとっては、現場で一緒に働くことで現場のニーズが汲み取れるし、研究者側も装置の専門家からメンテナンスについて学ぶことができる。

最後に、装置開発をしている人にとっては、装置の開発に全力を注いでいるために、観測感度が一桁上がったことや、測定時間が半分になったということで満足してしまう人も結構いる。何に使えるのかよくわからないまま、とにかくそのような技術で日本が競争力を持っていることにしてしまう。しかし、その使い道を見出していくことが重要であり、資金配分機関が公募において、技術開発と応用研究の異なるチーム同士が一緒に取り組むことを条件にするなど、そのような取り組みがもっと必要ではないか。私たち自身も、そのような観点でアドバイスをしていただけるとありがたい。

質疑・コメント

- ・要素技術、固有技術を連続的にどんどん高めていくことは、技術が発展すればするほど非常に厳しくなる。そのため、おそらく特定の企業かあるいは特定の機関が継続的におこなない、最後に生き残ったところで戦うしかないのではないかとというレベルになってくる。逆に応用技術のほうは、まさにユーザー、あるいは各種のニーズを持ったプラットフォームのような複合組織を築いて、その中で解決していくべきだと考えている。NMRを核とした新しいアプリケーションをたくさん生み出せるようなプラットフォームということについて、アイデアや要望はないか。

→使ってみたいという人をどのように増やすかというところがまず問題である。NMRは汎用の機器として普及しているが、分野によってはまだ使ったこともない、見たこともないという人もたくさんいる。そういう方々をどのように取り込んで、チームなりグループなりを作っていくかというところが一番の課題であろう。

新しいユーザーからは装置や測定・解析方法について新しい視点での要望が出されるので、それがまた何か新しい技術の開発へつながっていくと考えられる。

- ・企業から技術者を派遣してもらい常駐するということについて。例えば質量分析の分野では、外国の学会での発表では必ず企業の人の名を連ねている。一方で日本の企業はそうしたことがない。日本の企業文化が大きいのだろうが、やはり大学や最先端の研究しているところに常駐し、それでこそはじめて新しい技術が見えてきて、それを製品化しなければならないだろう。企業側はどうすればできるようになるのか。

例えばX線の検出器でも、自分はシンクロトロンに行って、どのように使われているかものすごく興味を持つが、最近の若い技術者は、どうもそういうものに興味をもたないということが出てきており真剣に悩んでいる。X線の検出器なんて部品と思っていたが、やはりそういう放射光で使われているのを見ると、実に役に立っていて、いい機械だな、と思わされる。殻に閉じこもったままというのは、教育の問題もあるだろう。

- ・企業にとってどのようなメリットがあるかということの外せない。中小企業では、この人を教育します、だけでは残念ながらあまり経営陣にとって魅力にならない。例えば、共用施設の一部を企業から提供することで、それを使っただけ、場合によってはショールームとしての使い方をすれば、会社、あるいはそのステークホルダーに対して説明がしやすくなる。企業にとってもこういうメリットがあるというモデルができれば、やっていける可能性は十分あるだろう。
- ・先ほど研究者がオペレーター化することについて、企業の中でも今非常に技術が細くなってきたいて、開発研究者が非常に細かい仕事をしているという状況がある。おそらく20年30年前の技術、NMRが新しかった頃や、質量分析が最先端で黎明期だった頃などは、要はものを作るところから一人の人間がやらなければならないような状態があった。しかし今はもうソフトの人間はソフトだけ、ハードの人間は機械設計だけ、ということがあるので、人材育成の面でやはり企業の中でも考えないといけない。

第四部 ナノテク材料研究を拓く先端計測技術

話題提供 7 生体分析・フルイディクス

渡慶次学（北海道大学大学院工学研究院）

ライフサイエンス分野に特化して分析、計測するという観点で今話題になっているところ
と、私が考える問題点にフォーカスして紹介させていただきたい。

生体分析は、臨床診断のなかでは図 10-1 に示した四つのカテゴリーで行われる。このなか
で一番古典的な血液検査でもここ 10 年ぐらいで大きなブレークスルーが起こっている。血
液検査は文字通り血液中の成分を分析するということだが、血液中には細胞から放出される
いろいろなものが実は入っている。そういったものを計測できれば、これまでの血液検査と
は違うもっと精度の高い診断に応用できるのではないかと、血液検査を Liquid Biopsy
と呼んでいる。

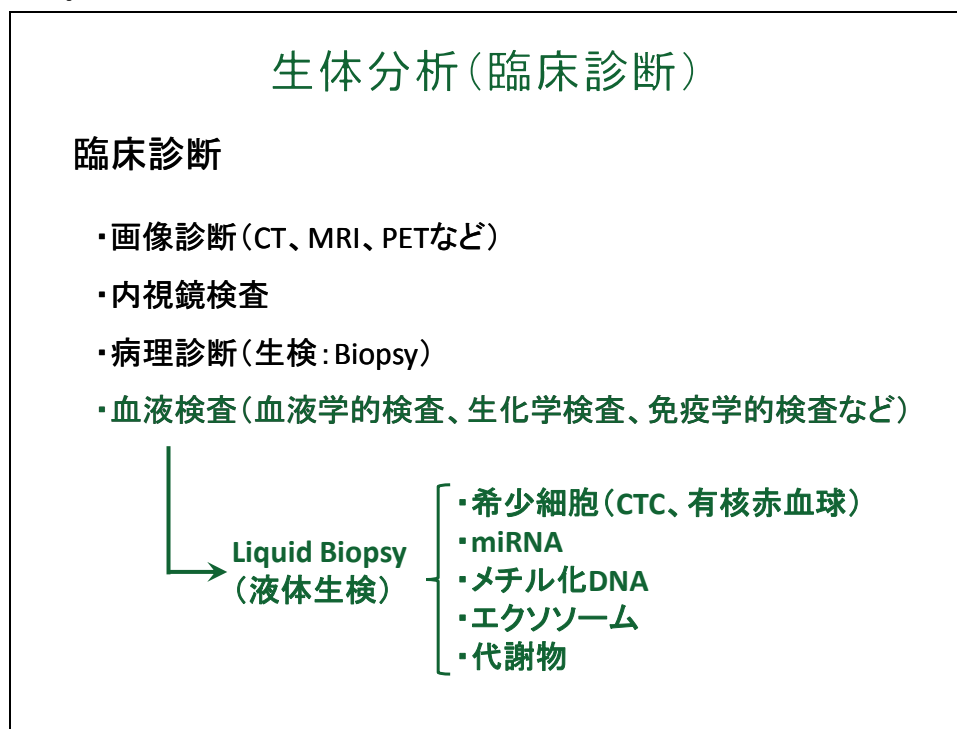


図 10-1

例えば、ある疾病に非常に強い相関を持った希少細胞というのがある。それが血液中にあ
って循環しているが、その数は非常に少ない。それを分取・計測する。あるいは、妊娠中の
女性の血液には、胎児に由来する核のある特殊な細胞（有核赤血球）があるが、これを採取
して遺伝子診断で先天性の遺伝子異常を見つける。ほかにも miRNA やメチル化 DNA、エ
クソソーム、代謝物など、血液は生体情報を多く含んでいる。こういった血液中の情報を正
確かつ精密に分析できる技術があると、これまでの医療が変わるのではないかと考えられて
いる。

その中で、医療診断においても超高感度で、ハイスループットな測定が求められている。
超高感度計測はかなり進んでいて、現状のスペックである程度のこと現在の診断ではでき

る。ハイスループット測定もある程度できるが、この分野で大きな問題は、血液のような複雑な組成の試料から特定のターゲットを取り出すということが非常に難しいことにある。特にターゲットに対してほかのものが 100 万倍も多い場合、ターゲットだけを分取するのは難しい。

例えば、1 mm³ のがんには 100 万個の細胞があり、5 リットルぐらいの血液に 5,000 個ぐらいのたんぱく質を放出する。5 リットル中から 5,000 個しかないものをどうやって計るのかという問題である。HIV 患者の血液にはウイルスが 10³~3,000 個/mL 含まれている。これらを実際の濃度で計算すると、がん細胞が放出するたんぱく質の例では 2 fM、HIV 患者のウイルスの場合は 50 aM~15 fM に相当する。普通の臨床検査で使われる現在の免疫分析の検出感度は大体 pM なので、3 桁あるいは 6 桁足りない。それを上げるための技術開発が必要で、それができればこれまで見えてなかった疾病が見えてくる。あるいは、早期発見、早期医療介入ができるだろうと言われている。

図 10-2 に示したのは最初に免疫の分野で 1 個のターゲットを計るということを実現したタフツ大学の D. R. Walt の研究である。ファイバーバンドルの先端にエッチングでウェルをつくり、その中に抗原抗体反応したビーズを 1 個ずつトラップし、デジタルで計測していくという技術である。この技術により、前立腺がんのマーカーである PSA を目的であった fM を超える感度で測定できている。非常に重要なのは、血清（血液から血球成分だけを除いて残った液体部分）で計れていることである。市販キットでは 3 pM ぐらいまでしか計測できないので、これまで見逃していた例を見つけることができるかもしれない。

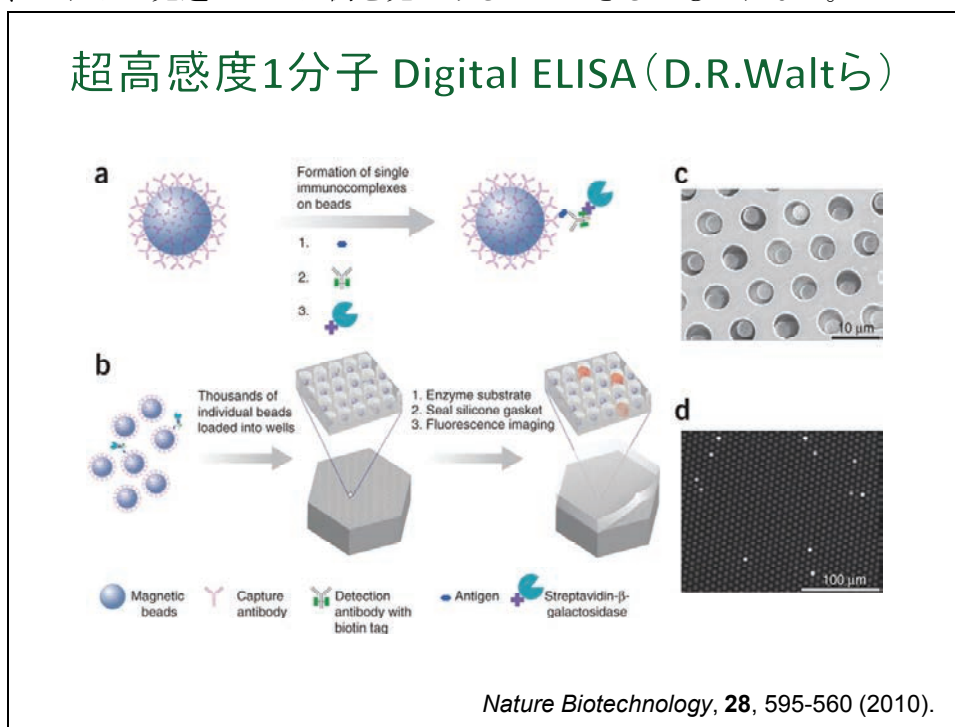


図 10-2

ファイバーバンドル上にビーズを入れてシールをしてというような操作は研究者ならできるが、臨床の現場ではできない。同じような観点で東大の野地先生が研究を進められているが、操作が簡便化されている(図 10-3)。血清ではなく標準サンプルではあるが、aM レベル

の感度を達成している。血清試料では感度は低化するので、検出感度は Walt の研究例と同等レベルだと考えている。

血中循環腫瘍細胞 (CTC) はがんが転移する際に放出されるとされており、これを採取・計測できればがんの転移、あるいは治療後のがんの消滅が判断できるだろうということで、ハーバードのグループの論文 (図 10-4) が 2007 年に『Nature』に出てから、CTC の研究が世界中で大ブームになった。日本でもかなり多くの研究者が取り組んでいる。血中細胞 10^9 個のうち数個しかない CTC をどうやって補足したかという、ピラー構造に特定の細胞を捕まえるような抗体をつけているだけである。いろいろな研究が進んでいて、いろいろな試みがある。

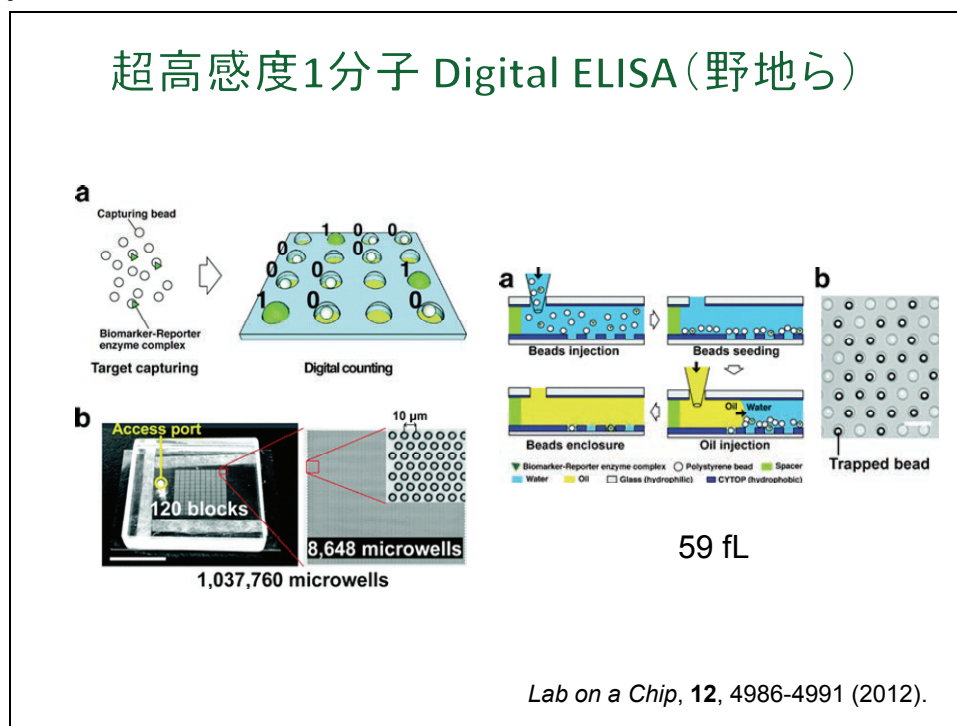


図 10-3

Isolation of Rare Circulating Tumour Cells in Cancer Patients by Microchip Technology

Nature, **450**, 1235-1239 (2007).

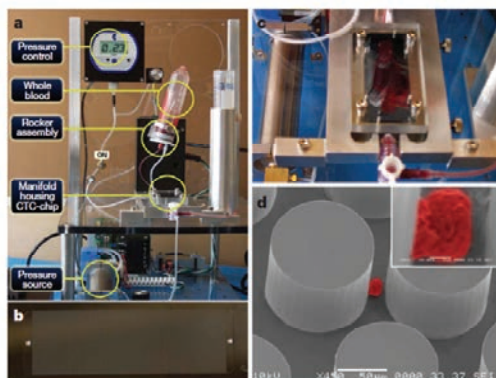


Figure 1 | Isolation of CTCs from whole blood using a microfluidic device.
a, The workstation setup for CTC separation. The sample is continually mixed on a rocker, and pumped through the chip using a pneumatic-pressure-regulated pump. **b**, The CTC-chip with microposts etched in silicon. **c**, Whole blood flowing through the microfluidic device. **d**, Scanning electron microscope image of a captured NCI-H1650 lung cancer cell spiked into blood (pseudo coloured red). The inset shows a high magnification view of the cell.

CTC: 循環腫瘍細胞

多くのがんでは腫瘍から放出された悪性の細胞が血液の中に入って体内に散り、新たな領域に付着してそこに転移する。この循環腫瘍細胞をCTCという。

転移性がん患者:
血液細胞 10^9 個に数個

数個~100個/mL

図 10-4

ここで示したいのは、ハーバードのグループの PI である Mehmet Toner が所属する BioMEMS Resource Center が、NIH の Biomedical Technology Resource Program によりマサチューセッツ・ジェネラル・ホスピタルの中に設置されているということである。MEMS のチップをつくるようなラボが病院の中にあり、Biology、Clinical、Technology & Computational が三位一体になって現場と一緒に開発を進めている。日本のように医学部に行って「われわれはこんなものを作れます。どうですか?」という話をしている、絶対に勝てない。この分野は何か構造上のシステムを変えない限り日本が欧米に追い付くというのはかなり難しいと個人的には思っている。こういうシステムができるような仕組みというのが、今後はわが国でも必要ではないか。

最後に、ハイリスク研究が現状だとなかなかできない。なぜかという、失敗に対するペナルティーというか、成果を求められるということがあって、なかなかわれわれはそこへ踏み込めないところがある。こういうものができるような仕組みが重要であろう。

生体分析・フルイディクス	
<背景・社会的意義> 医療費の高騰を抑え、かつ医療の高度化(予防医療・早期発見・早期医療介入)を同時に実現することで、安全安心な社会を実現する。ライフサイエンス分野の研究水準の向上と産業競争力強化が望まれている。	
<想定される成果> ✓ 病気の早期発見・早期治療 → 医療費の削減、安全安心な社会の実現 ✓ QOL(Quality of Life)の向上 → 患者負担の少ない医療の提供 ✓ 在宅医療・パーソナルヘルスケアの高度化 → 医療費の削減、安全安心な社会の実現 ✓ 食の安全 → 安全安心な社会の実現、食品のブランド化	
<研究課題> ✓ 高感度測定技術 ✓ ハイスループット測定技術 ✓ 1分子・1細胞レベルの新しい分析技術 ✓ 地球上から一人を見つける技術(40～60億個/mL→数個/mLの細胞を検出) ✓ 生体試料(血液、尿など)の革新的分離技術 ✓ 超安価・超簡便な定量分析技術 ✓ 抗体を使わないタンパク質の検出技術	<国内外の注目すべき技術・研究開発・政策トレンド> ✓ 血中循環腫瘍細胞(CTC)の検出(Liquid Biopsy: 液体生検) ✓ Digital ELISA ✓ Single-Cell Analysis ✓ ペーパーデバイス(Global Health) ✓ NIH Biomedical Technology Resource Program(NIH BTR Program) <推進方策> ✓ 基盤技術(Ex. 生体試料の革新的分離技術)＋検出技術のコラボ ・基盤技術: ○技術、□技術、△技術、… ・検出技術: 蛍光分光、質量分析、振動分光、… ✓ NIH BTR Programのようなシステムの構築 ✓ ハイリスク研究(研究領域を政策立案者から提案)への投資 ・失敗に対するペナルティを課さない(目利き必要) ・新しい1分子・1細胞分析技術の開発 ✓ Howard Hughes Medical Instituteのようなシステムの構築 ・特定の研究課題、特定の期間、専任 ✓ BMGFのような取り組み

図 10-5

質疑応答：

- ・最終的にどのぐらいの血液量が目標になっていて、現状どのぐらいまで来ているのか。
 →CTC 検出では、マグネットビーズを使う方法が FDA で認可されていて、それだと血液 10mL 中に CTC が何個あるのかを測定する。なぜ 10mL かというと、感度の問題で、もっと感度がもちろん上がれば少なくすることができる。
- ・医者は血液中の疾患マーカーをあまり信じない。最終段階がやはり細胞を採ってきて病理が確定するということになっていると思うが、その辺りはどうか。
 →医者が血中の疾患マーカーをなぜ信じないかというと、ひとつの疾病に対してひとつのマーカーを計るということをしているから。ひとつの病気に対して複数のマーカーを計るという方向性が出てきている。プロテオミクスのデータからある疾病に対していろいろなタンパク質に変化があるというデータがだんだん集まってきている。今の方法だと、例えばひとつの疾患マーカーに対して 10 項目あるいは 100 項目を計るという技術はあるが、そのデータを取るために、患者さんから 1 項目の測定をするのに必要だった量の 100 倍の血液を採る、ということはいできない。そういうこともあって、なかなか進んでいないが、方向性としてはある。マイクロデバイスで多項目を一挙に計ることができれば、血液検査での確定診断や、あるいは病理でも分からないようなことが分かる可能性があると言われている。
- ・このままでは日本は勝てないという話があったが、日本の中でも各大学に付属病院があって、医学部の先生が臨床と医学研究をリンクさせているところが間違いなくあると思う。問題点はその中にナノテクがもっと入っていかないといけないことなのか。

- 日本でも臨床と医学でトランスレーショナルリサーチがいろいろな大学で始まっているが、そういう枠組みではなくて、臨床を今より進化させようとする診断技術が必ず必要になってくる。それも患者の負担が少ないようにというような方向性だと、サンプル量はどんどん小さくなっていく。そうしたときに、計測技術は今よりハードルがどんどん高くなっていく。独立して計測技術の深化をしている人たちの技術を、あるとき臨床に応用することはもちろんできると思うが、タイムラグが大きくてアメリカに比べると競争力が出せない。
- ・日本でも医工連携は叫ばれ、かなりの資金が導入されているはず。特に MEMS などは医工連携をやっていると思うが、それでもまだ不十分か。どういうところが足りないのか。
- ユーザーとのインターフェースが弱い。特に医工連携の場合、医者サンプルを医者の側に装置を持って行って計るのか、あるいは、サンプルをもらって計るのか、というところからもういろいろな問題が生じる。病院の中に MEMS のクリーンルームがあれば、チップをどんどんつくってそれで計ってみるということがすぐできる。そういうことが可能なアメリカと勝負するのは非常に厳しい。

話題提供 8 材料表面における「官能基」レベルの化学状態分析とこれらの「水分子」との相互作用計測の重要性

由井宏治（東京理科大学 理学部第一部化学科）

はじめに

エネルギーや環境に関わるグリーンイノベーション、医療に関わるライフイノベーションを支える先端材料は、サブミクロンからナノメートルのサイズを有し、その多くは水と接する環境下で作動する。さらに、その先端材料が機能を発揮する場合は、まさにその材料表面であるが、材料表面とそれを取り巻く水の界面の化学状態については驚くほど分かっていない。

材料表面に水分子が付きやすいか、それとも弾かれるかは、材料表面の物理的凹凸だけでなく、例えば、表面水酸基の数密度など、官能基レベルの化学状態が大きく作用する。大気中においても、大気中に存在する水蒸気が表面に吸着し、その材料表面の濡れ性や摩擦性能などに大きな差異が現れる。これらは機械などの安定的かつ高効率な作動に効いてくることが十分に予想される。

さらに、材料表面に吸着している水分子同士のつながり、すなわち水素結合ネットワーク構造に基づく材料表面極近傍の水の構造解析も重要である。例えば、人工血管の表面は、タンパク質の非特異吸着が起こらないような表面化学処理が重要であったり、血流に乗って患部まで輸送されて機能する医療用の先端ナノ材料では、患部に到着する前に異物から身を守る免疫機構につかまらないよう、表面のステルス機能が重要であるが、このような機能の発現には、材料表面そのものの物理構造・化学状態にトリガーされた材料表面独特の水構造が、そのバリアー・ステルス機能に役に立っていると考えられる。しかし、現時点では経験的なモノづくりに頼ることが多く、その具体的な水構造は現時点では推測の域を出ておらず、その解明が待たれている。

**大気中・水中で機能・作動する先端(ナノ)材料の計測・分析
・材料表面の化学状態分析と、表面に吸着した水分子どうし
が作る表面・界面数層分の水の構造解析の選択的計測が
ますますその必要性を増す。**

なぜ、大気中や水中での材料表面の化学状態や、材料表面独特の水構造の計測・分析が遅れているかについては、様々な理由があると思うが、主に以下の2点が挙げられよう。

- ①真空中であれば、電子線などを用いた表面・界面の化学状態の超高感度分光が実現できるが、大気中や水中では、とたんに使用できる計測・分析装置が限られてくる。
- ②材料表面・界面に形成される、バルクで見られないような特有な水構造は、せいぜい分子数層分の厚みしか持たず、数が少なく、これまでの計測法ではその検出限界を超えてしまっているか、逆に、より厚い上層の水に埋もれてしまい、識別できない。

ここでは、ナノテクに基づく近年の先端材料と、その材料表面における水との密接な関わ

りを具体例に挙げながら、今後、「材料表面と水」に関わる課題を解決する際、力を入れていくべき測定ターゲットや、その計測・解析方法や、を俯瞰したい。

最近の材料表面の化学状態と、表面の水構造の計測・解析・予測についての具体事例

この観点からは多くの研究事例の報告があるが、限られた紙面の関係上、グラフェンなどのナノカーボン材料を例にとり、今後の先端材料開発に関わりそうな、示唆に富む2つの研究事例を紹介する。

- (1) 第1例目は、日本の東京理科大学の本間芳和らによって報告された、これまで疎水性と信じられてきたカーボンナノチューブ表面に存在する2層からなる水の吸着・水和層構造の存在について紹介する。(*Phys. Rev. Lett.* **110**, 157402 (2013) 1-4)

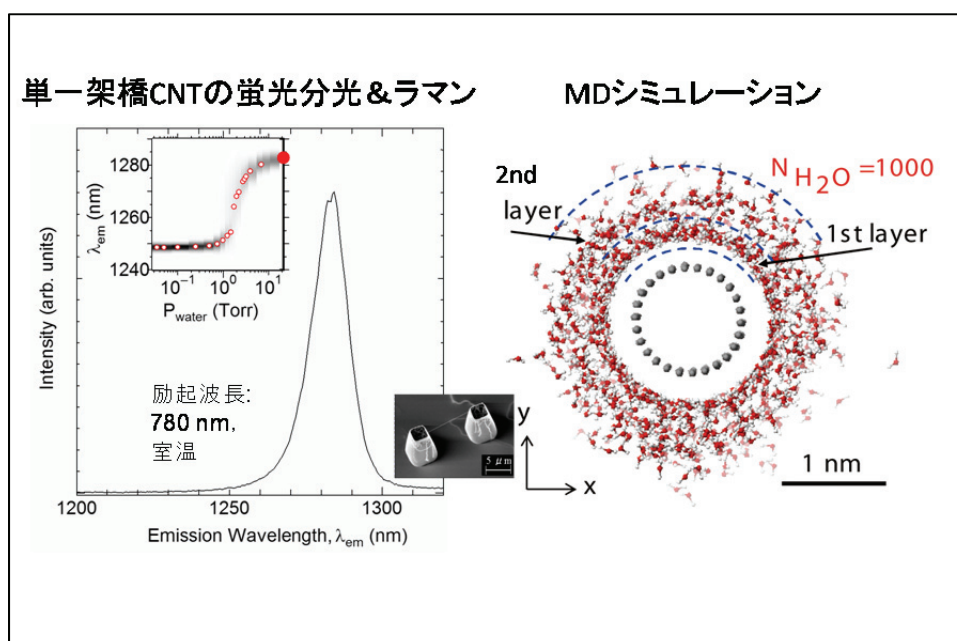


図 11-1

直接、このような水分子を観測することができないため、ラマン散乱分光計測を用いることで、カーボンナノチューブの径方向の呼吸振動モードの表面水吸着に伴うラマンシフトや、カーボンナノチューブ1本を孤立化させ、カーボンナノチューブ特有の励起子による発光の波長シフトなどを巧みに用いて、水分子の吸着を計測している。さらに特筆されるのは、コンピューターシミュレーションとの併用である。コンピューターシミュレーションにより、構造から予想される物性等と実験結果による検証が可能になる。実際、当該研究では、表面水の熱物性（凝縮エネルギー）が通常バルクの水の2倍程度に達すると予測されている。このように表面・界面の水はその特異な構造により、予想しない物性を発現する可能性に満ちている。またシミュレーションにより官能基や分子の配置がビジュアル化されることで直感的な考察を可能にし、機能発現の機構解明や、さらなる性能の向上を飛躍的に助けることになる。

本事例から次世代の先端ナノ材料計測への手がかりが見えてくる。

- (1) 水の存在下で化学状態を得ようとする、振動分光法の中でもラマン散乱分光法が有力なツールになり得る。
- (2) ナノ材料の構造や電子・光学物性は置かれた環境に依存するため、マニピレート技術が欠かせない。
- (3) 分光計測だけではなく、シミュレーションとの併用が物性予測や検証の上で欠かせない。
- (4) 材料表面の特異な水も、バルクの水からは予想できないような構造と物性を有し、これが材料そのものの機能（反応性・機械的特性・熱的特性・生体適合性）と密接に関わる可能性が高く、重要な計測対象となる。

- (2) 第2例目は、米国 MIT の J. C. Grossman らによる海水の淡水化のためのグラフェンの化学処理による先端機能性材料（濾過フィルター）の提案である（*Nano Lett.* **12**, 3602-3608 (2012)）。同論文は E. N. Wang によって、*Nat. Nanotech.* **7**, 552-554 (2012). にも紹介されている。

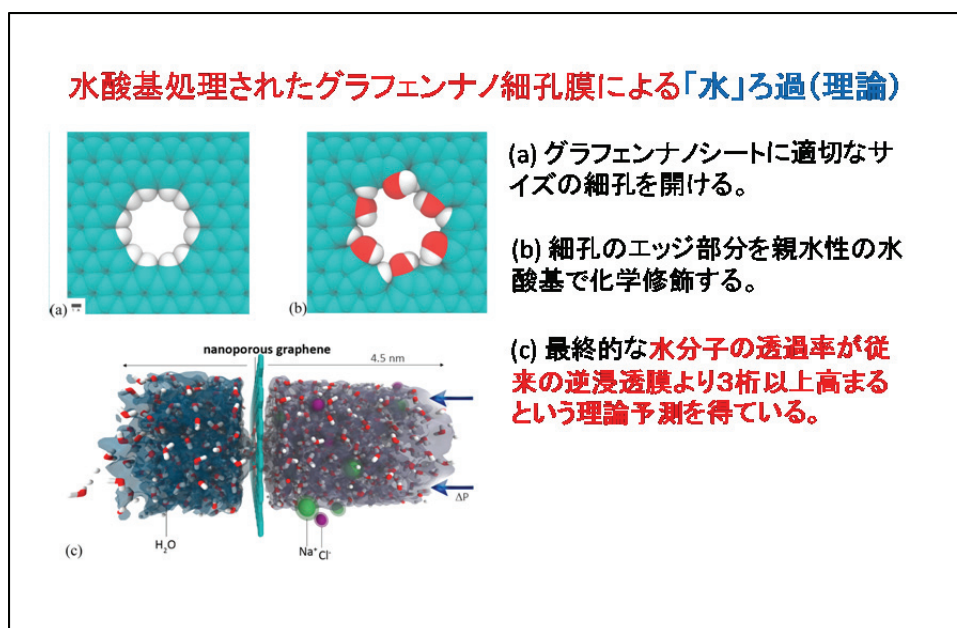


図 11-2

当該研究は、理論計算に基づく研究であるが、将来、先端ナノ材料の表面やエッジ、または欠陥を化学修飾することにより、材料のさらなる機能化を図る研究はますます多くなってくると予想されるが、このような材料の機能や構造の実証・品質管理には、きちんと材料の目的箇所が、目標通りに化学修飾されているか、実験的な検証が必要になる。このような観点から次世代の先端ナノ材料計測には、第1の例に加えて、STM や AFM のようなナノメートルの分解能をもつ走査型顕微鏡と、振動分光法の組み合わせによる計測が、ますます重要性を帯びてくると考えられる。

水蒸気を含む大気中や水中で機能する材料表面の計測
・官能基レベルでの分析を可能にする**振動分光法**
・構造のビジュアル化・物性予測のための**シミュレーション**
・ナノレベルでの分解能を有する**走査型プローブ顕微鏡**
この3要素の複合化が鍵となる。

材料表面の化学状態と、表面の水構造の計測・解析・予測についての現状の俯瞰と展望

それでは、ここまでに述べた今後の要求される計測課題や水準に対して、現状どの程度まで計測技術が来ているのかを俯瞰し、今後の展望を述べたい。

(1) 大気中や水中における表面・界面選択的振動分光計測—和周波発生法—の進歩

大気中や水中における材料表面の化学状態の分析に既に力を発揮しているのは和周波発生法 (sum frequency generation, 以下 SFG) と呼ばれる非線形振動分光法である。励起光や検出する光の偏光条件などを振ることができるため、官能基の配向といった、材料開発にとって重要な情報も得ることができるのが魅力である。

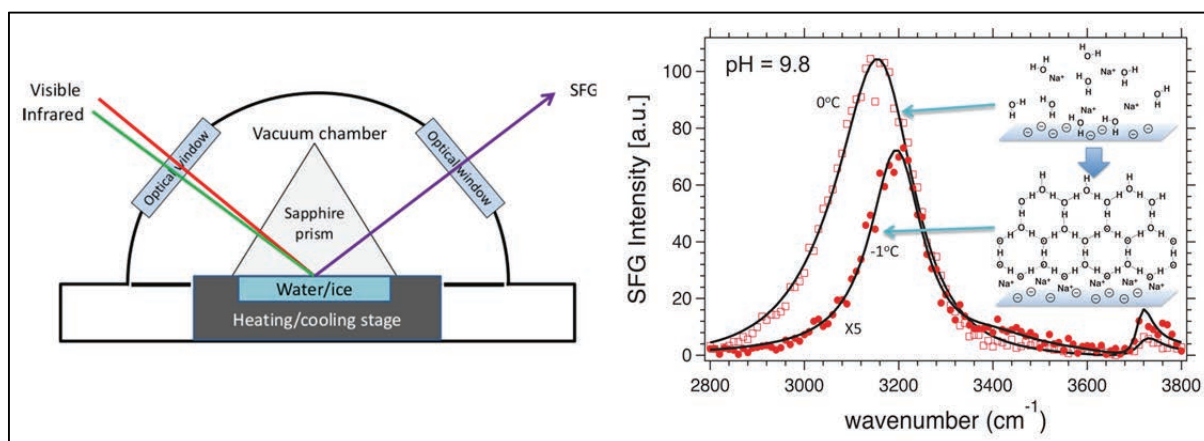


図 11-3

既に様々な報告例や、新しいバリエーションも存在するが、固体材料表面の水数層分の構造解析といった観点から以下の2例を紹介する。まず第一例は米国アクロン大学の AliDhinojwala ら (*J. Am. Chem. Soc.* **135**, 2734–2740 (2013).) による材料表面の水の相転移を捉えている例 (下図) である。

もう一つの例は米国テンプル大学の Eric Borguet ら (*Langmuir* **29**, 7885–7895 (2013)) による大気中における材料表面吸着水層の分光分析 (下図) である。

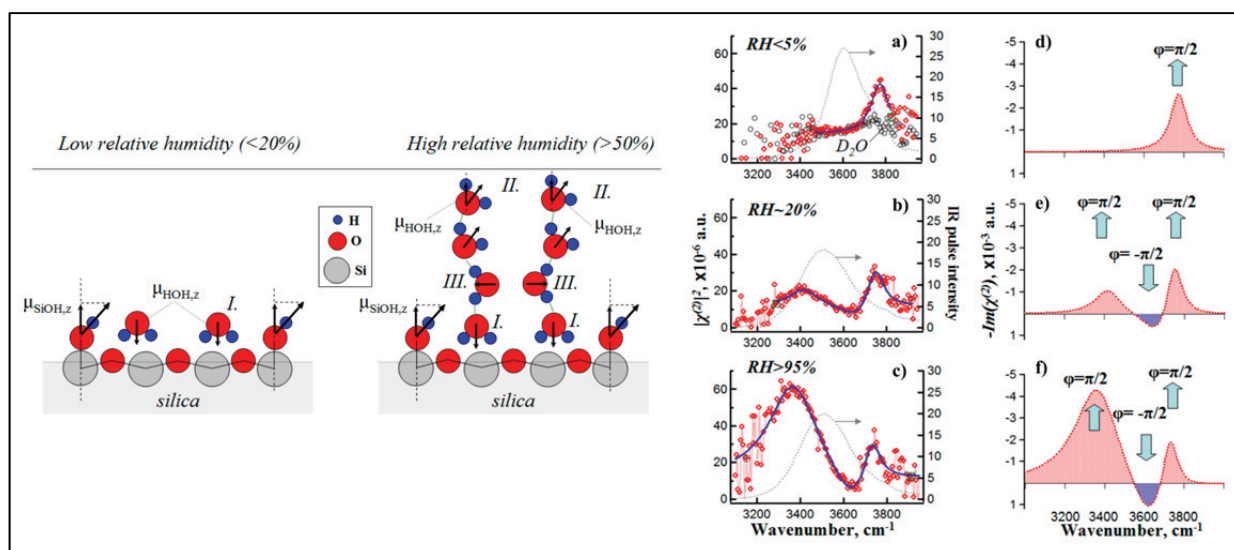


図 11-4

いずれも、表面・界面の水の構造を捉えているが、基本的に SFG スペクトルは、それらの平均描像であるため、水和1層目、2層目といった分離が要求されるようになると、測定条件の工夫や、シミュレーションと予想される SFG スペクトルとの対比などが今後の課題になってくる。また、多くの測定例が基本的に表面の素性の良い、大きく平らな試料に限定されており、今後、サブミクロンやナノメートルオーダーで凹凸のある試料やナノ微粒子表面（金属触媒ナノ粒子や機能性コロイドなど）の化学状態分析へ SFG 法を応用できるような、さらなるイノベーションが要求される。

(2) 水中における材料表面の吸着水層のビジュアル化—走査型プローブ顕微鏡の進歩

SFG 法は、表界面選択的に、材料表面の化学状態の分析に力を発揮するが、表界面の情報が平均化されてしまうことを述べた。確かにシミュレーションをすれば、吸着水和一層目、二層目、・・・をビジュアルに分離できるが、実験的にこれを分離計測ができるか。それを実現するのが、周波数変調方式の分子間力顕微鏡（FM-AFM）装置である。以下の例(下図)は、金沢大学の福間剛士らによる、独自の技術でより高感度化された FM-AFM である Three dimensional Scanning Force Microscopy (3D-SFM) を用いることで、世界で初めて固液界面のサブナノメートルオーダーの水和構造を3次元的に可視化した画像である（*Phys. Rev. Lett.* **104**, 016101 (2010) 1-4）。材料表面の吸着水層が、一層目、二層目、と分離されていることが分かる。また、材料表面のどのようなところに、水分子が存在しやすいか、も見る事ができる極めて画期的な方法である。

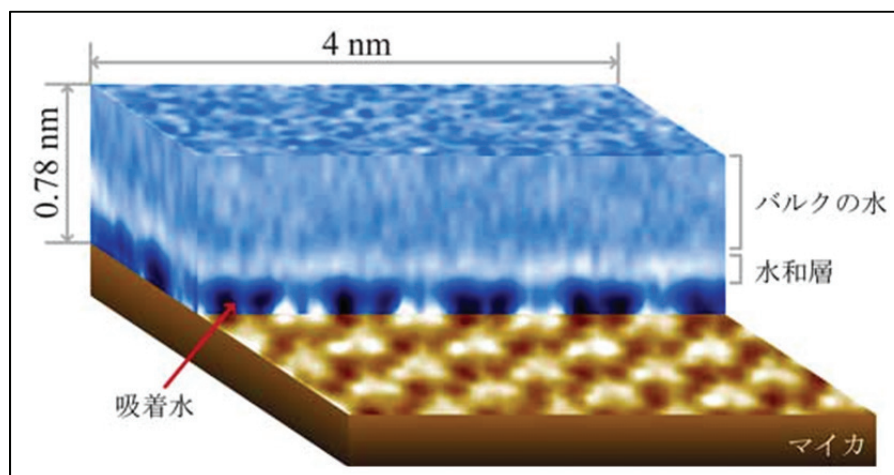


図 11-5

水中でサブナノレベルの AFM 像を取得するには、それぞれの材料にあった多数の最適パラメータの割り出しが必要であり、測定には多くの経験と労力、時間を有する段階ではあるが、将来、材料に応じて測定条件の最適化などがよりオートメーション化され、一般のユーザーに普及すれば、水中における材料表面の化学状態分析に大きな威力を発揮することが期待される。

(3) 走査型顕微鏡と振動分光法の組み合わせ—チップ増強ラマン散乱分光法

(1)で表面・界面選択的計測を可能にする振動分光法を、(2)でナノメートル（かそれを上回る）オーダーの空間分解能を有する走査型顕微鏡を紹介した。では、これらを組み合わせ、ナノメートル程度の空間分解能を有しながら、振動スペクトルを取得できる方法はないのか。これを高度な次元で可能にするのが、チップ増強ラマン散乱分光法（Tip-enhanced Raman spectroscopy, 以下 TERS）である。TERS は金属ナノ粒子表面で見られる表面増強ラマン散乱現象と走査型プローブ顕微鏡を組み合わせた方法であり、走査型プローブの金属探針先端の接する、ないしは近傍のナノメートル領域の化学情報を増強されたラマン信号で取得する分光技術である。

TERS 自体は 2000 年に V. Deckert や R. Zenobi らによってその開発が報告されており、既に 10 年以上の歴史があるが、今現在もその性能が高められ、既にほぼ実用化に近いレベルまで到達しつつある計測法である。日本における TERS 分光法は極めて高いレベルにあり、その具体例をいくつか紹介する。

まず、装置がどこまで進化したかについて、最近の具体事例の一つを紹介する。右の図は、大阪大学/理化学研究所の河田聡らのグループによる、大気圧・常温下で、さらに 1.7nm の分解能を実現した、カーボンナノチューブ表面の化学計測の報告例

（*Nature Commun.* **5**, 3312 (2014) 1-5.）である。従来の走査型トンネル電子顕微鏡（STM）をベースとした STM-TERS では、1nm 程度の分解能を得るのに低温・真空条件が必要であったが、本研究では、それを大気圧・常温下で実現したことが特筆される。

大気圧下で、かつ 1 nm オーダーの空間分解能で化学状態の分光分析が可能になれば、その応用範囲は格段に広がるものと期待される。図では 3つのラマンバンド(D バンド、G バンド、2D バンド)を色分けして、CNT の局所化学状態分析を 1.7nm の分解能で実現した結果を示している（*Nature Commun.* **5**, 3312 (2014) 1-5.の図 4 から抜粋）。

また、具体的なナノ材料表面の化学状態の分析の実例といった観点からは、同じく、大阪大学/理化学研究所の河田聡らのグループによる、カーボンナノチューブの局所張力分布の計測（*Nature Commun.* **4**, 2592 (2013) 1-7.）や、関西学院大学の尾崎幸洋らのグループによるカーボンナノチューブ(CNT)をフィラーとしたスチレンブタジエンゴム表面におけるフ

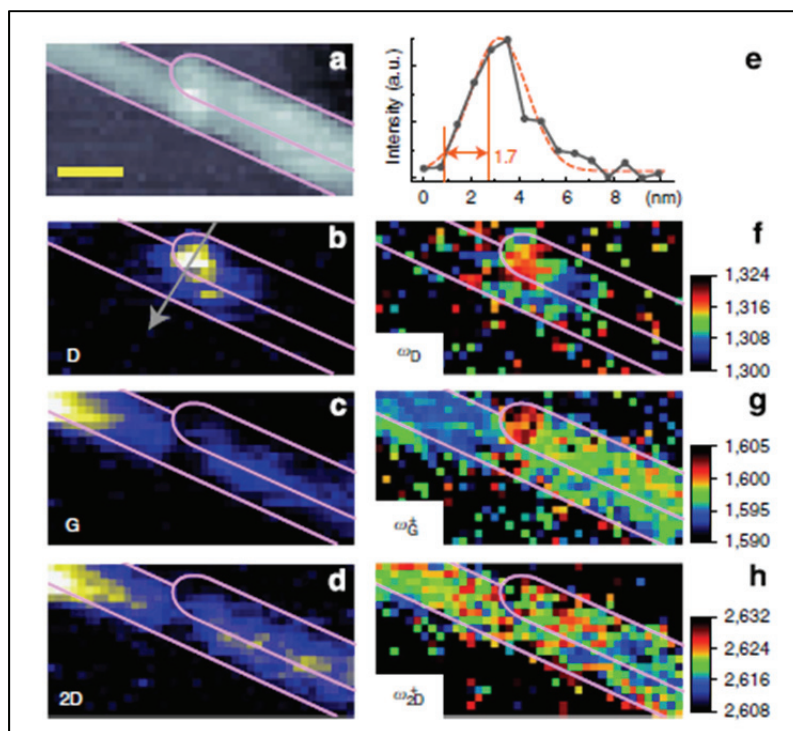


図 11-6

ィラーと高分子の相互作用解析などが挙げられる (*J. Phys. Chem. C* **117**, 1436-1440 (2013).). このような、ナノ材料内部における力学的な状態や、ナノ材料の周辺分子との相互作用など、ナノ材料の物理的・化学的状态の高空間分解計測が、TERS 技術をベースとして着実に進行しつつある。TERS 分光の成功を支える技術は様々あるが、一般ユーザーへの普及といった観点からは、測定諸条件の最適化のオートメーションや、TERS の要ともいえる金属探針の再現性の良い製造技術などが今後の課題となつてこよう。

大気中や水中で機能する材料表面の化学状態計測技術

- ・表面・界面選択的な振動分光を可能にする**和周波発生法 (SFG)**
- ・表面・界面の水和状態を可視化する**3次元走査型顕微鏡 (3D-SFM)**
- ・大気圧・ナノメートル空間分解で化学分析を可能にする**チップ増強ラマン分光法 (TERS)**

これらのさらなる発展により、大気圧下で、表面・界面に吸着水が存在するような条件下における材料表面の化学分析はさらに進化を遂げるものと予想される。

今後さらなる材料表面の化学状態分析が待たれる具体的な材料の例と課題

今後のナノ材料の分析においては、グリーンイノベーション・ライフイノベーションとも「水」とナノ材料表面との関わりがますます重要性を帯びてくるといえる。以下にいくつかの具体事例を挙げる。

(1) 金属（酸化物）ナノ粒子触媒の金属の価数の分析

人工光合成の触媒などで期待される酸化マンガンクラスターは、マンガンの酸化数が、触媒反応の進行に大変重要な意味をもつ。水の電気分解の際、化学熱力学から予想される値（1.23V）よりも過電圧（1.5～1.6V）を印加しないと、水は水素と酸素に電気分解されなかった。特に酸素発生側の電極において、この過電圧を必要とする問題が顕著であった。ところが近年になり、山梨大学の高島敏宏らが開発した酸化マンガンクラスターを含む複合電極を用いることで、過電圧が大幅に抑えられることが判明した（*J. Am. Chem. Soc.*, 134, 18153–18156 (2012).）これは、水の電気分解で水素と酸素を得る際のエネルギー効率に直結する問題であり、将来のエネルギー問題に寄与する大きな発見であり、このような水中における電極表面における、金属の価数を含む化学状態計測は、さらなる性能向上や機構の解明に役立つものと考えられる。

(2) 10nm を切るようなサイズの表面凹凸のある材料表面の化学状態（濡れ性など）の分析

半導体微細加工技術は、いよいよムーアの法則の予測するサブ 10 nm の領域に達しつつある。大阪大学の山口康隆らによる MD シミュレーションによると、（シミュレーションは Pt 原子を用いたものであるが）サブ 10 nm で表面凹凸が加工された場合、溝部分に水が入りにくくなる可能性が示唆された。溝に水が浸入しやすいことは、微細加工された半導体材料の洗浄、動作不良を起こす不純物の除去、ひいては歩留まりの問題にとって極めて重要である。とくに水が溝に入るかどうかは、材料表面の親水化処理なども重要であり、今後、表面がナノメートルレベルで凹凸が加工されている酸化物材料の表面水酸基密度の計測、材料表面の官能基と水分子との相互作用エネルギー、また水分子の吸着具合等の計測分析が必須となると予想される。

(3) 再生医療用細胞シート基材の表面化学分析

再生医療用の細胞シート開発では、細胞シートを安定に成長させ、かつ実際に使う段になってきれいにはがせるような細胞シート用基板の開発も重要である。細胞シートを開発した東京女子医科大学の岡田光夫らの基板は、その表面に温度応答性高分子が修飾されており、細胞シートを育成する段階では基板表面が疎水性に保たれ、実際に手術で使う段階になった場合、基板の温度を変えることで親水性とし、水を含ませて膨潤させ、細胞シートの基板からの剥離を良くする工夫が施されている（*Tokugikon No.27* (2013)）。この温度応答性高分子層の厚みは 10～15nm 程度であり、この厚み内の高分子や水分子の制御が、基板の成否を決定するといえるが、このような厚みにおける高分子の凹凸構造や架橋具合、また親水・疎水の発現機構、水分子の存在状態などの化学分析は極めて難しい。このような材料表面の高分子と水分子との関わりの化学状態分析はドラッグデリバリーシステムに

においても重要であり、今後の計測技術の発展による化学分析が待たれる領域である。

このように俯瞰すると、要求される空間分解能スケールが1~10 nmといった領域に達することがうかがえる。したがって今後の材料開発においては、①振動分光による化学状態分析、②走査型プローブ顕微鏡による高空間分解イメージング、③シミュレーションによる構造・物性予測が一体となったようなアプローチがその重要性をさらに増すものと予想される。

ナノ計測として今後国として投資すべき領域

「水」との関わりを中心に据えた

ナノ材料(無機・有機)表面・界面と「水」の化学分析領域

- ・材料表面で水分子と相互作用する原子・官能基の化学状態
- ・材料表面に吸着している水分子の配向・数層の水和構造
- ・これらを材料の実際の動作環境下(大気圧下・水中等)で

これらを識別・計測できる顕微振動分光法

(例) 走査型プローブ顕微鏡+振動分光(赤外・ラマン)等



グリーン・ライフ両イノベーション領域を加速

図 11-7

「水」との関わりが深い先端ナノ材料の開発と計測	
<背景・社会的意義> 環境・エネルギーのグリーンイノベーション、医療のライフイノベーションにおいても、「水」とナノテク材料・素材・生体分子との関わりは極めて重要。資源の乏しい日本で豊富な「水」資源。光と水からの水素発生などの高効率エネルギー創成、水の浄化や高効率淡水化技術、再生医療用材料など、新しいナノテク材料で世界をリードする。	
<想定される成果> ・水を酸化分解する正極触媒の精密設計による過電圧抑制、水素発生エネルギー効率の飛躍的向上 ・ナノテクに基づいたフィルター開発により、エネルギー効率の高い淡水化・浄水技術 ・ナノテクに基づく表面微細加工・化学修飾技術により、10nmを切っても洗浄可能な高密度半導体デバイス開発 ・再生医療技術やドラッグデリバリー技術を支える、水中で機能する高機能バイオナノデバイス開発	
<研究課題> 以下のような「水」と密接に関わるナノテクノロジー・材料開発について・・・ ・サブ10nm表面微細加工材料と水洗浄 ・触媒複合クラスターによる水分解 ・電極材料表面における水の反応 ・再生医療用生体高分子ナノシート ・高効率水処理・海水淡水化用膜 ・ナノ流体・ナノライポロジーの問題	<国内外の注目すべき技術・研究開発・政策トレンド> ・表面の親水性・疎水性の精密制御(再生医療用基板の開発) ・新規酸化物クラスター開発による高効率水分解(エネルギー) ・ダイヤモンド電極などの先端炭素材料による高感度環境センサー ・生体高分子と水との関わりに着目した新発想に基づく材料開発(潤滑・低摩擦技術→機械の効率的作動・省エネルギー化) ・Mega-ton Water System (FIRST Program, 内閣府, 政策 2009~) ・省水型・環境調和型水循環プロジェクト(NEDO, 政策 2009~)
↓ ・実際の材料そのままで計測可能 ・動作環境下で計測可能 ・品質管理に具する高速計測可能 ・新規ナノ計測手法・装置の開発、特に「材料表面・水分子間の官能基レベルの相互作用が計測できる顕微・分光手法」「シミュレーションによる可視化と定量的予測と顕微・分光計測とのリンク」	<推進方策> ナノ計測の立場からは・・・ ・「現場」-「計測」-「シミュレーション」の三位一体体制による「実際に使える」計測・解析技術の後押し。ここで現場は実際に見たい材料で、かつその実際の動作環境下のことを指す。シミュレーションは第一原理計算、分子動力学、流体力学による解析など、水は流れるのでそのスケールはナノからマイクロへ多岐にわたる。 ・手法の新規性も大切だが、具体的な測定対象・目標達成型の計測技術も後押しする。既存の装置・手法の改良・工夫による「実際に計りたいものが計れる計測」にむけた実用的な試みも推進する。

図 11-8

話題提供 9 陽電子消滅測定

大島永康（産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門）

陽電子消滅法には材料隙評価のためのいろいろな手法があるが、特にその中でも陽電子寿命測定法、ドップラー広がり測定法を紹介する。これらは材料の中の非常に微少な「孔」を評価する方法である。多くの分析方法が「もののあるところ」を積極的に見るのに対して、この手法は「もののないところ」を積極的に見るという点が非常にユニークな方法だといえる。本講演では、計測装置やその応用例、課題などを私自身が行ってきた研究を中心として紹介する。

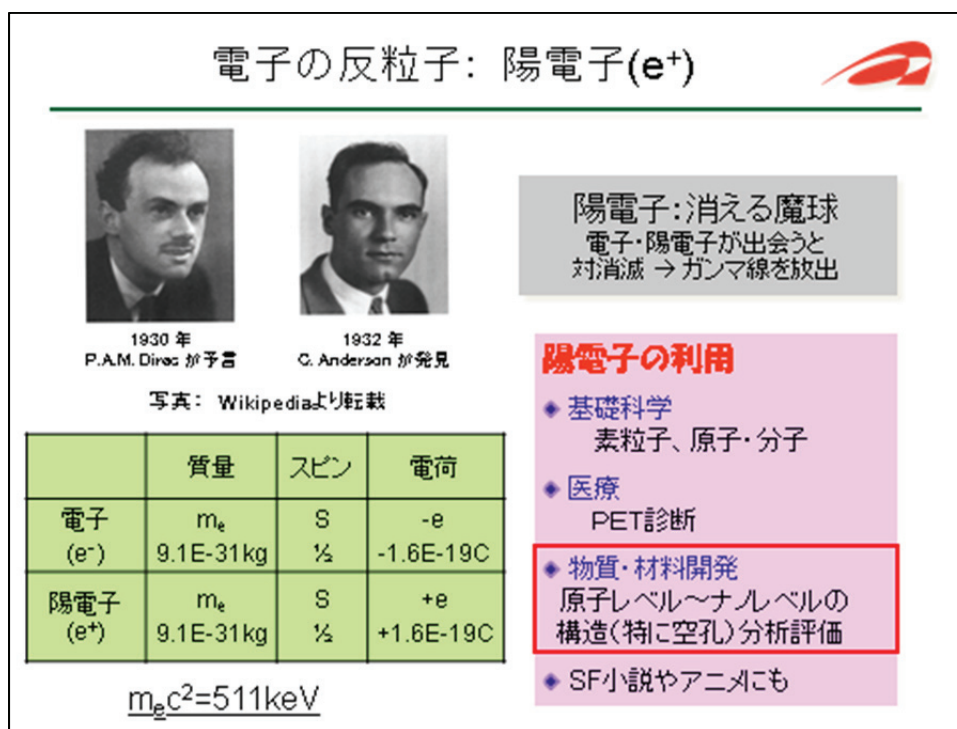


図 12-1

図 12-1 は、陽電子について簡単にまとめたものである。陽電子は電子の反粒子に区分される素粒子の一種で、電子と質量とスピンが同じで、ただ電荷だけが逆転している。したがって、プラスの電荷を持った電子である。陽電子は、電子と出くわすとペアとなって消える。この現象を対消滅と言うが、その際ガンマ線を放出する。それで「消える魔球」などと親しみを込めて呼ぶ人もいる。他のプローブにはない非常にユニークな性質を持っている。

この陽電子は、素粒子、原子分子のような基礎科学の分野、あるいは医療、PET（陽電子断層法）による初期のがん診断などにも使われている。ここで紹介するのは、物質・材料の開発現場で用いられている原子レベル、ナノレベルの空孔評価法としての陽電子の利用である。

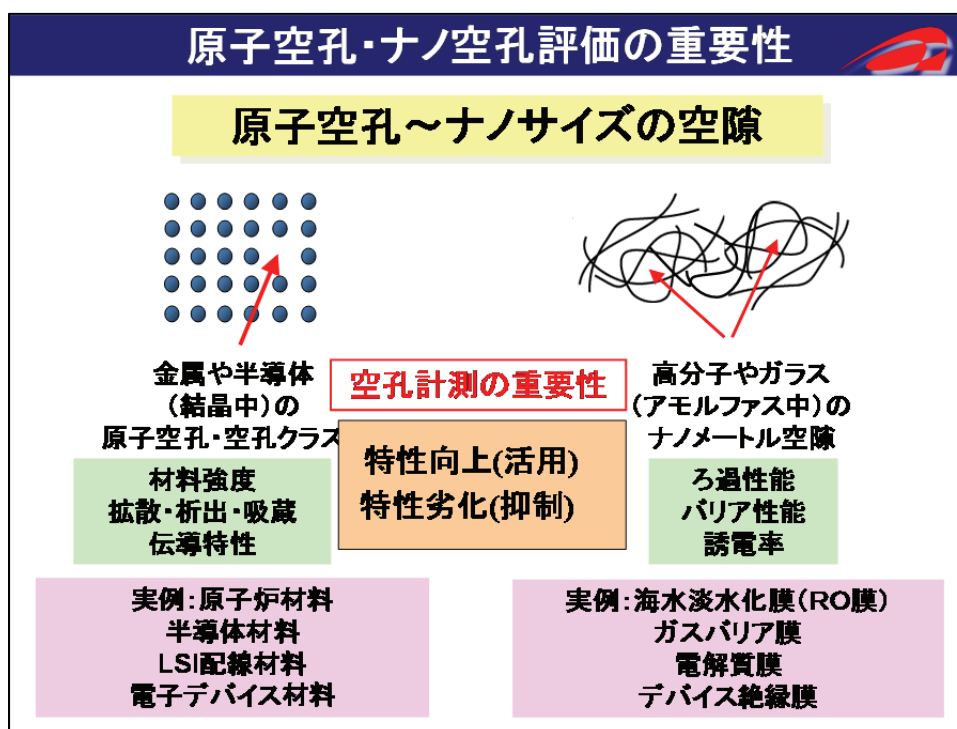


図 12-2

陽電子がプローブするところの対象は、図 12-2 に示すように、金属や半導体のような結晶性材料の中にある原子が 1 つ抜けた「原子空孔」と呼ばれる孔、あるいはこれらが集積したような空孔クラスターである。空孔クラスターは、ナノボイド、マイクロボイドと呼ばれることもある。また、陽電子は、結晶性材料ではなくても、高分子やガラスのようなアモルファス材料中の空隙評価にも有効である。この分子と分子のすき間は、一般にサブナノメートルの大きさだが、こういったところも計測できる。これらの小さな孔は、材料の特性を支配する要因のひとつとして考えられている。一般にものの移動は、空孔を介して行われるので、材料強度、拡散、析出、吸蔵、あるいは、孔が散乱体として働く伝導特性などにかかわってくる。高分子材料であれば、このすき間を抜けてある種のガス、溶剤などが拡散するので、ろ過性能、バリア性能に、さらに、密度を支配するので、誘電率にもかかわってくることになる。

このように微小な空孔・空隙は、先端材料、機能性材料といったものを支配する要因として考えられており、評価をしたいというニーズがある。評価の原理に関して、まず陽電子寿命測定法を紹介する。上述したように、陽電子とは電子の反粒子であってプラスの電荷を持っており、電子と対消滅してガンマ線を放出する。陽電子は反粒子なので自然界にはほとんど存在しないが、非常に軽い粒子なので、加速器や RI(放射性同位元素)によって、人工的に比較的簡単に生成することができ、それを利用する。

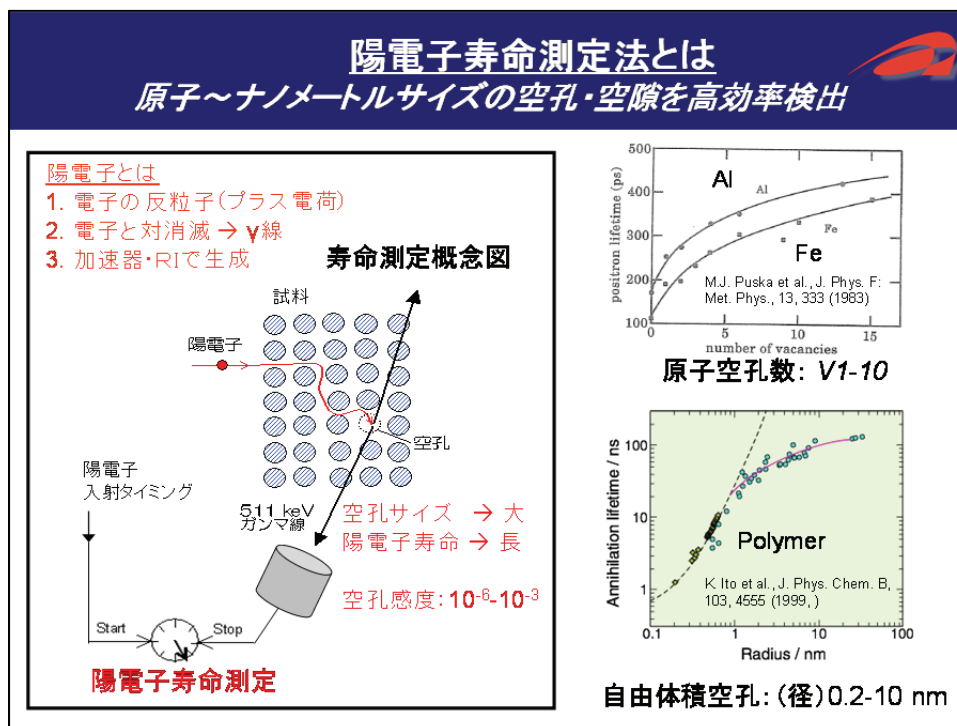


図 12-3

この陽電子を材料に打ち込むと電子と同様に材料内部で減速する。プラスの電荷を持っているので、結晶性材料中では、格子点に原子核のプラスの電荷があるので、古典的なイメージではあるが、図 12-3 の左図に示すように格子点を避けて格子間を縫うように拡散する。たまたま消滅前に空孔と出くわすと、空孔にはプラスの電荷がないので、陽電子にとっては非常に居心地のいい空間となって捕獲される。この空孔では、陽電子の消滅相手となる電子の密度が少なくなっている。材料中に入った陽電子は、必ず消滅してそのエネルギーがガンマ線に転化するが、空孔には消滅相手が少ないので陽電子が消滅するまでの時間が延びる。これを「陽電子の寿命が延びる」と言う。

材料に入射した陽電子は消滅したときにガンマ線を出す。陽電子入射からガンマ線放出までの時間を計測することにより、空孔で死んでいったかどうかを判定できるわけである。空孔サイズが大きくなればなるほど消滅相手の電子の密度が少なくなるので、陽電子はより一層長く生きる。その原理を使って空孔のサイズを評価することができるわけである。検出感度は大体 1ppm から 10^{-3} 程度。この間であると空孔密度による陽電子寿命信号強度の変化が見られる。

大体どの程度の時間を見るかという、材料の中が電子の海なので、陽電子は通常短時間で死んでいく。大体、数百ピコ秒のオーダーである。図 12-3 の右上のグラフは、鉄とアルミニウムに入射した陽電子の寿命を空孔の集積度を横軸にとってプロットしたものである。集積度 0 は欠陥のない単結晶、1 は単一空孔(シングルベカンシー)、2 は二空孔複合欠陥(ダイベカンシー)を表す。集積度 10 は、10 個空孔が集まった空孔クラスターである。このように集積度が 10～数十ぐらいまでは大きく寿命が変わる。それ以上になると、あまり変わらなくなって、陽電子にとってはもう無限大の孔と同様になるわけである。したがって、単

結晶から数十個ぐらいまでの空孔クラスターに対して非常に敏感に値が変わるというわけである。高分子中であると、陽電子と電子の結合状態であるポジトロニウムの寿命、大体数ナノ秒ぐらいの寿命を測るとサブナノメートルの孔を計測できる。

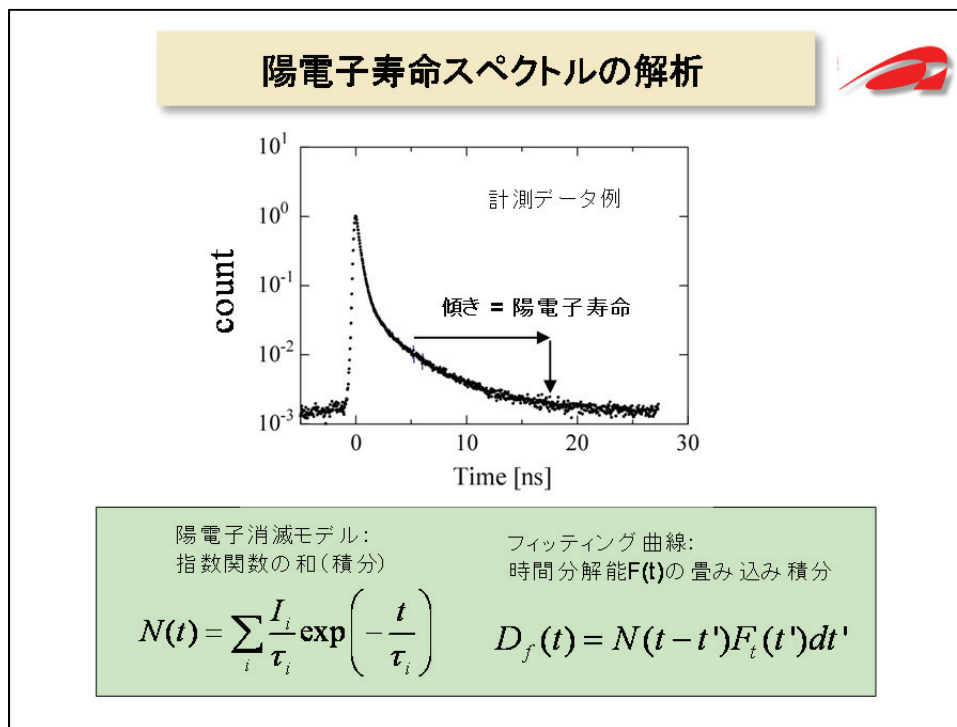


図 12-4

個々の陽電子は時間的にランダムに消滅するように見えるが、統計をためると、早く消滅する陽電子、比較的遅く消滅する陽電子が存在していることが、図 12-4 に示すような「寿命スペクトル」を得ることで判定できるわけである。寿命が短いのは結晶の部分で死んでいった部分。寿命が長いのは大きな孔に補足されて死んでいった部分。そういった解析で、サイズだけでなく、空孔の濃度なども評価できる場合がある。以上が、陽電子寿命法の概略である。

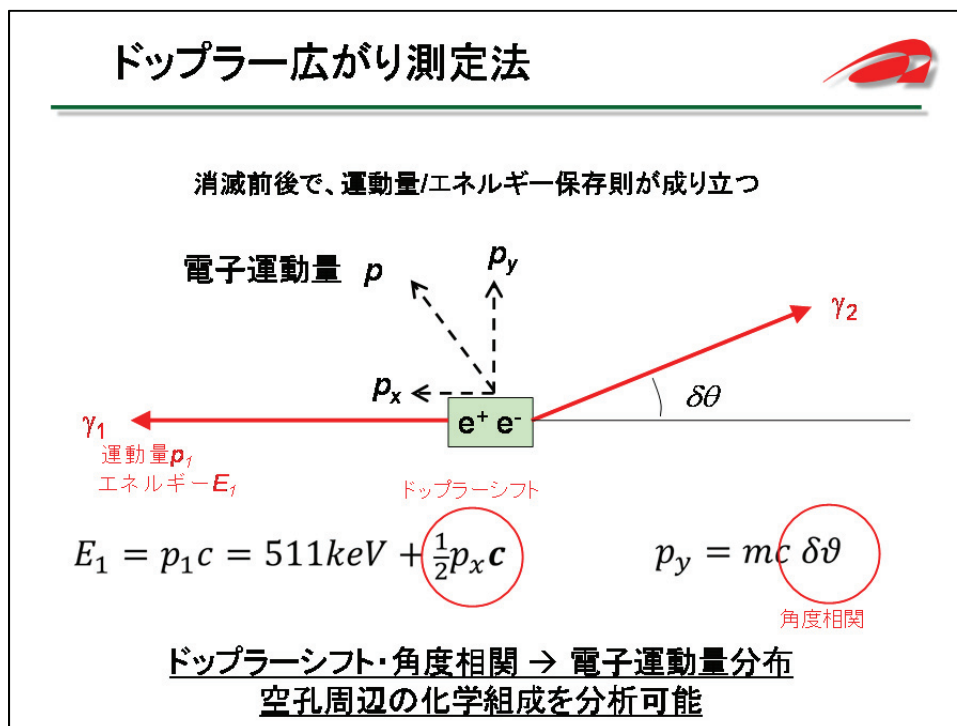


図 12-5

次に、ドップラー広がり測定法を紹介する。陽電子と電子は対消滅して、多くの場合ガンマ線を2本出す。図 12-5 には、 γ_1 と γ_2 という赤い線が2本描かれている。これはガンマ線である。陽電子は、材料の中に必ず一つしか存在しない。高強度で入れたとしても消滅時間内にはたかだか1個であるため、陽電子は電子と違い一番エネルギーの低いところにいて、止まっているのである。一方、材料中に数多く存在する電子は早く動いているものが多く存在している。また、この陽電子と電子の対消滅する過程では、運動量・エネルギーの保存則が成り立つ。したがって、ほとんど停止した陽電子ではなくて、速い速度をもつ電子の運動量を主に反映してガンマ線のエネルギーがブルーシフト（高エネルギー側への移行）、レッドシフト（低エネルギー側への移行）したり、あるいは γ 線の放出角度が広がったりするのである。

したがって、ガンマ線のエネルギーがどれくらいブルーシフト、レッドシフトしているかの分布によって、私たちは電子の運動量分布を知ることができる。電子の運動量分布は化学組成・電子構造を反映している。多くの場合陽電子は空孔で消滅するので、ドップラーシフト法を使うと、空孔の検出だけでなく、空孔の周りを取り巻いている化学組成の情報が得られることもできる。

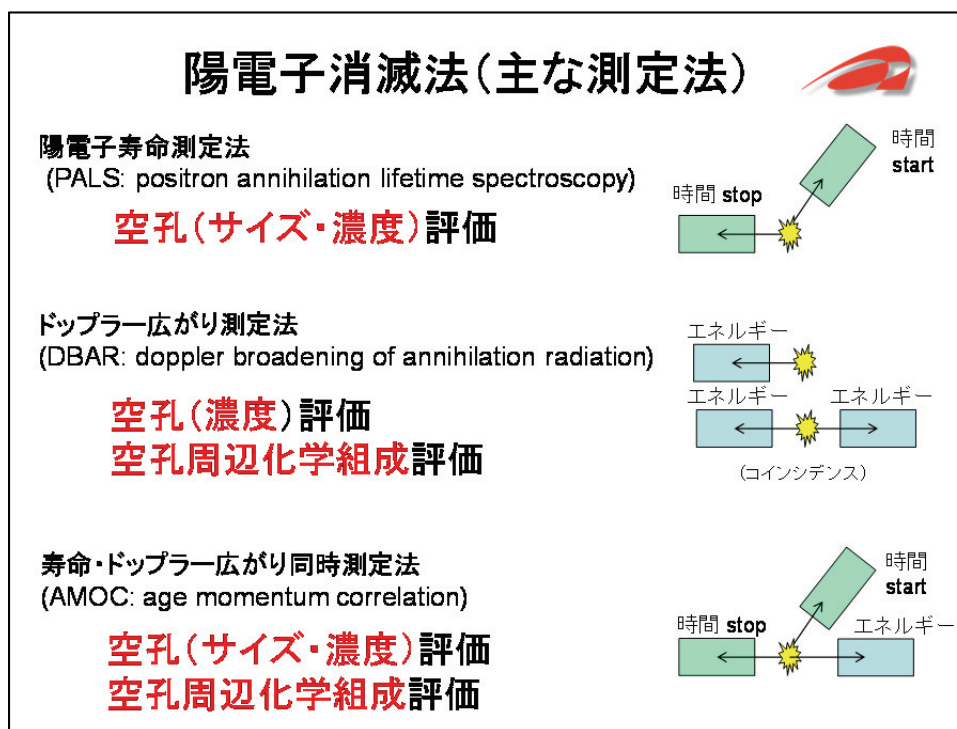


図 12-6

図 12-6 に、一般的によく用いられている陽電子消滅法を 3 つ掲げる。上段に示す「陽電子寿命測定法」では、これによって空孔のサイズと濃度が分かる。中段のドップラー広がり測定法を用いると、空孔の濃度のほか、周辺の化学組成などが分かる。下段は、それらを同時に取得する方法で、空孔のサイズも分かるし、それらを取り巻いている化学組成も分かる。こういったような測定法がよく用いられている。

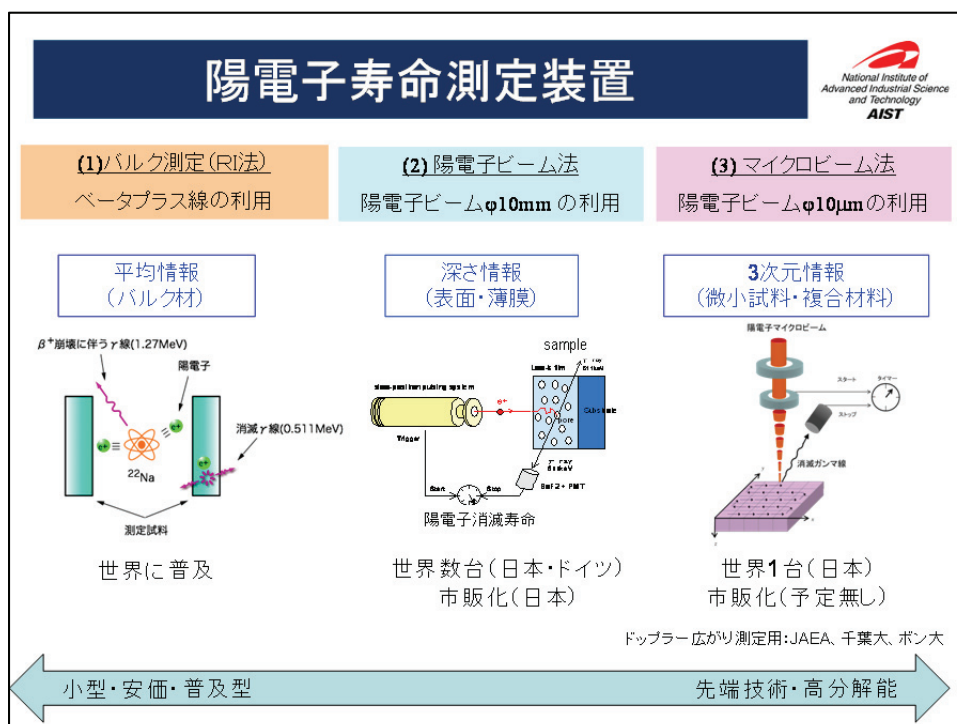


図 12-7

図 12-7 には、代表的な 3 つの陽電子寿命測定法を掲げる。

(1)はバルク測定法 (RI 法) である。この場合、 ^{22}Na (ナトリウム 22)という放射性同位元素の β^+ 崩壊によって得られる高速の陽電子をそのまま利用する。陽電子を発生したときに、ついでにガンマ線も放出するので、このガンマ線を検出すれば、陽電子が ^{22}Na からいつ飛び出てきたかが分かる。この陽電子は指向性が無く、四方八方、 4π 方向に数百 keV のエネルギーで出ていく。材料に必ず陽電子が入るように線源を二つのサンプルでサンドイッチする。試料は 1mm 程度の厚さがあれば十分である。陽電子は必ず材料の中に入り、行く末は、必ず材料中の電子と対消滅してガンマ線を出すので、この消滅ガンマ線を計測する。陽電子の放出された時間、それから陽電子の消滅した時間、この 2 つの検出時間の差から陽電子の寿命が計測できる。この手法を研究している研究機関は、このような装置を 1 機関あたり数台持っているもので、日本国内には大まかに言って 100 台ぐらいはあると思う。

(2)は陽電子ビーム法である。バルク法 (RI 法) では、陽電子の材料への入射の指向性あるいはエネルギーは制御できなかったが、これをビーム化してエネルギーを調整して材料に入れることで表面近傍から奥にまで入射位置を変えられるので、任意の深さにある空孔を評価できる。陽電子ビーム法はこのように、深さ依存性を分析することができる手法である。この装置は、陽電子ビームの発生技術、パルス化技術が必要となり製作が難しく高価になる。世界に常日頃動いている装置は数台しかないと思われる。今、代表的な装置は日本とドイツにあり、そのほとんどが日本にあると思われる。なお、この装置は日本では市販化されている。

(3)のマイクロビーム法であるが。スキャンしながら陽電子の寿命を測ることによって陽電子の寿命マップを得て、それから、原子空孔分マップを得る。これは世界に 1 台のみが動いており、産総研で公開している。ただし、日本の JAEA・千葉大学、ドイツのボン大学では、ドップラー広がり測定用の陽電子マイクロビームが動いている。マイクロビーム法は特に日本がリードしている測定技術だといえる。

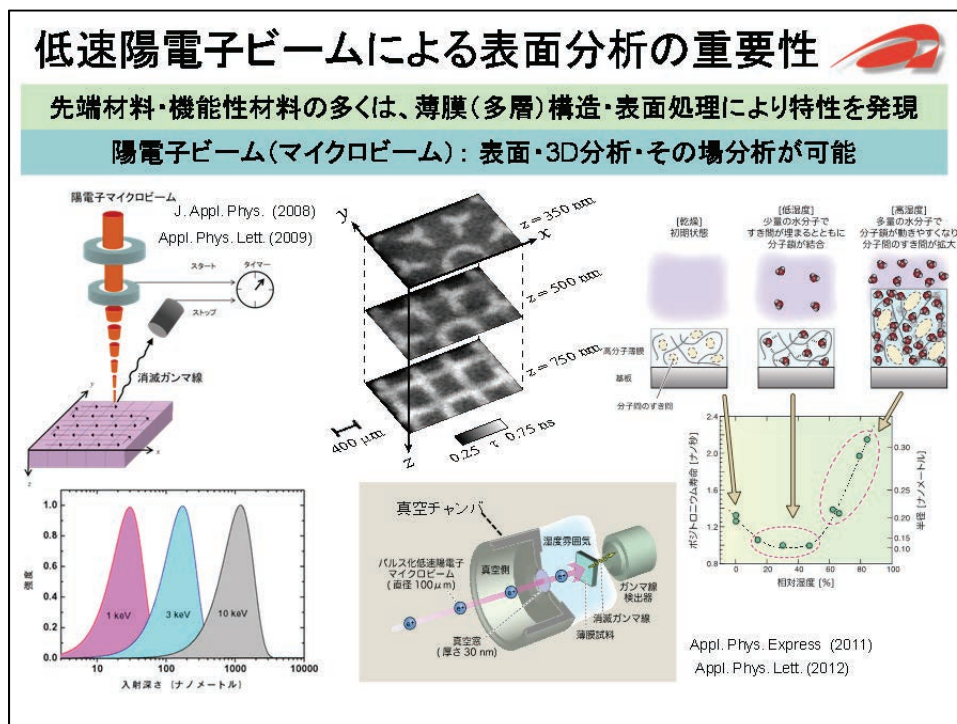


図 12-8

図 12-8 に説明するように、多くの先端材料、機能性材料は、薄膜（多層）構造、あるいは表面処理によって機能を発現しているため、表面近傍の微小領域において空孔を評価したいという要望がある。この要望に応えるため、マイクロビームで深さを変えながらスキャンすることによって陽電子の寿命をコントラストとして結果をイメージングする技術が開発されている。これを使うと、表面近くと奥深くを分離して検出できる。例えば、奥深くに隠れた欠陥（原子空孔）のパターンといったものを測定できる。図 12-9 にはこの装置の全体像を示す。電子顕微鏡とは、かなり異なる光学系なのであるが、時間の都合で説明は省略する。

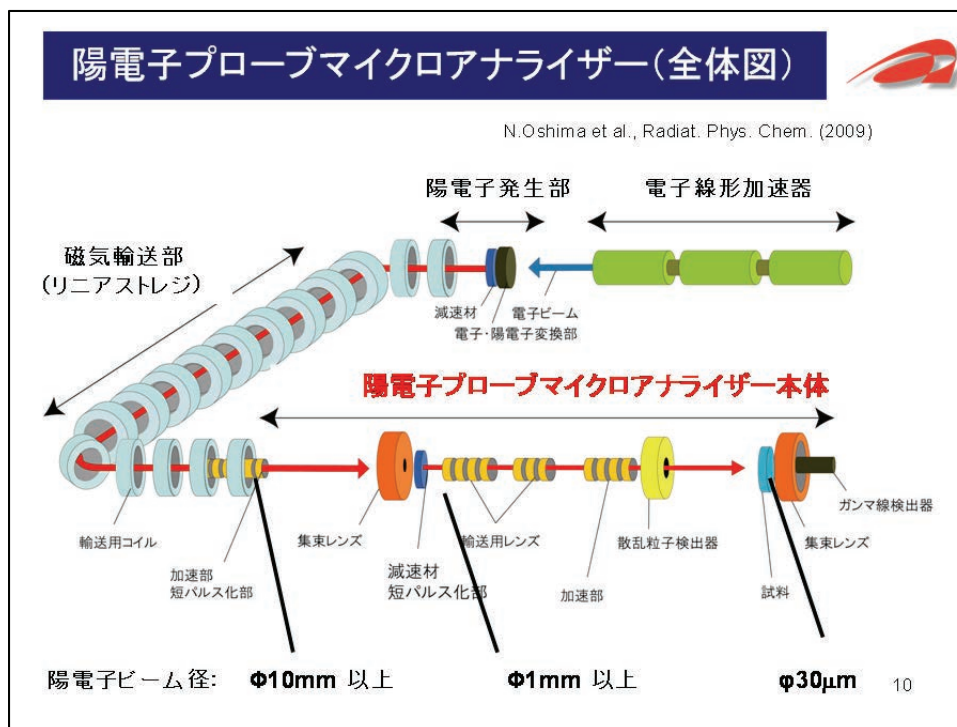


図 12-9

ビーム法のアプリケーション例

・ VLSI材料

- 【High-kゲート絶縁膜・歪みSi】: 空孔欠陥と電気特性の関係
- 【ポーラスLow-k膜】: ナノ～サブナノ空孔サイズ測定
- 【バリア膜】: サブナノメートル空隙とCu拡散の関係
- 【Cuメッキ配線】: 原子空孔挙動と配線信頼性の評価
- 【イオン注入】: イオン注入による空孔欠陥形成とそのアニール挙動
- 【SOIウェハ】: 各層における空孔欠陥(膜質)評価
- 【レジスト・反射防止膜】: ポリマー中のサブナノ空隙(自由体積)評価

・ 化合物半導体、光材料

- 【GaN, InN, ZnO, SiC等エピ膜、ディスプレイ材料、アモルファスSi、シリカガラス、多層膜ミラー、有機EL】

・ 高分子膜

- 【海水淡水化膜、バリア膜、食品膜】

図 12-10

図 12-10 は、陽電子消滅法のいろいろなアプリケーションを掲げてある。例えば、配線、LSI の材料であると、特性が原子空孔と密接に関連していると考えられているので、陽電子消滅法がしばしば利用される。

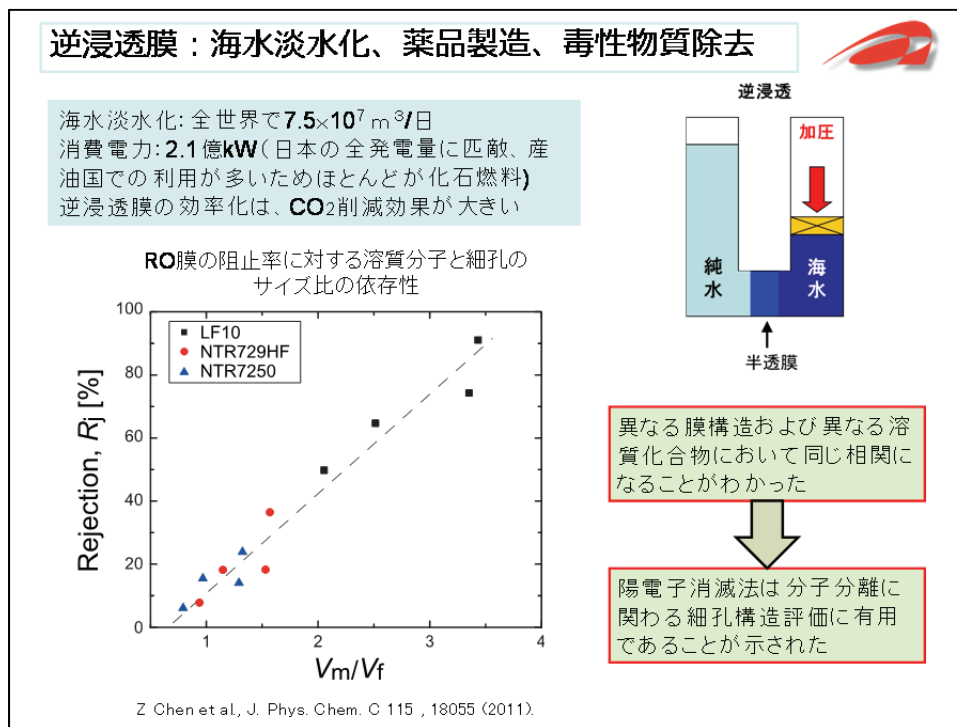


図 12-11

高分子膜材料への応用の一例として、逆浸透膜について述べる。海水淡水化においては、図に示すように全世界で日本の1日の電力の匹敵するぐらい毎日の電力が使われているので、逆浸透膜による海水淡水化は非常に重要である。海水で加圧して純水を得る際、フィルタリングの役目をするのは分子サイズの孔ではないかと考えられていたのであるが、実験的な証明がなされていなかった。陽電子ビームで膜の孔のサイズを測ると、溶質分子と孔のサイズとの比が、図 12-11 の左のグラフに示すように膜の除去性能とユニバーサルな関数にのること、やはり孔の大きさが非常に重要であるということが陽電子ビーム法によって実証された。

他の例として、純鉄のダンベル状の試験片を引っ張ると、最終的には破断してしまう。破断というマクロな現象であるが、原子空孔というミクロなところから始まっているはずである。ただ、そこをシームレスに見た人もまだいない。われわれは実際に、陽電子の寿命を測り、そのマッピングをとってみた。アニーリング直後には陽電子寿命が長かった試料が最後は破断するという事例があった。これは、もともと弱いところを検出したのかどうか1例しかないのではまだ証明はできないのであるが、多くの研究者から非常に興味を持っていただいている。

寿命を解析することで、試験片の一部には、塑性変形によってナノボイドが生成したということが分かる。最近では、陽電子の消滅法がこのようなイメージング法として利用するこ

とも可能になりつつあるので、ほかのイメージング法、EBSD（電子線後方散乱回折法）との比較なども併せて利用して、だれにでも分かりやすいデータとして提供することが可能になりつつある。



図 12-12

陽電子消滅法分野では、日本が世界を圧倒的にリードしている。論文リストを見ると、日本の大学・研究機関の多くがトップクラスに入っているのが分かる。図 7.12 に示すように、世界初の陽電子学会誌が 2013 年 9 月に刊行された。会員数は約 150 人。陽電子消滅法分野では、日本だけがこういうことをやっている。

課題は産総研の装置でいえば、外部公開しているもののユーザーフレンドリーではなく、全体的にスループットが低いことである。別の言い方をすると、非常にユーザーからの測定依頼が多いのだが、それに十分応えられていないという現状が今問題になっている。

本日の発表では触れられなかったが、陽電子ビーム利用技術の発展が著しくすすんでおり、例えば、陽電子ビームのた表面回折法や、陽電子スピン偏極ビームを用いた材料分析法の有用性が実証されつつある。

質疑応答

- ・陽電子消滅の方法は、ナノポアを定量的に解析する「森を見る技術」。非常に有望だと思っている。逆浸透膜について実際にマッピングして、ポアの分布、ラテラルな分布というのはあるのか。

→逆浸透膜については、面内方向は均一なものだと想定して、深さ方向のスキャンングだけを行っている。

- ・縦方向に見ると結構ポアサイズ分布があるようにみえるが。
 - やはり表面の 100nm 以下のところが緻密で、そこが、除去の役割を果たしているというのが分かる。
- ・日本は逆浸透膜にすごく強いので、たくさんのユーザーがこれからは見込まれるのではないか。
 - 実際に材料メーカー、特に化学メーカーからよく相談が来る。また、研究機関からも相談が来るが、十分な対応ができているとは言い難い。
 - ナノテクプラットフォームの利用をまず勧めるが、多くの企業は非公開利用を望む。しかしナノテクプラットで公開し宣伝している効果は非常に大きいと思われる。
- ・産総研は、市販する装置を出していなかったか。
 - 陽電子ビームを使った寿命測定装置というのは、産総研からの市販はできないので、共同開発・技術移転の形で企業が市販している。
- ・（コメント）産総研における活動を中心に紹介されたが、それに加えてまとめのところに示されている回折、RHEED の陽電子版はここ数年でもものすごく進展があり、実はこれまで陽電子をやっていない表面科学者が興味を持ち、今大きな展開を見せているところである。もともと強度が電子に比べてべらぼうに低いので回折スポットなんていうのはほとんど見えなかったのであるが、KEK（高エネルギー研究機構）のライナック(直線加速器)を使って陽電子をつくるとスポットが見えるようになってきている。
 - 例えば有名なシリコンの 7×7 のスポットがきれいに見えるようになった。なぜ陽電子かというと、ひとつは表面で全反射する。これは、電子に対しては物質中の屈折率が 1 割大きいので、どうしても少し中に入ってから出るので原子数層の情報の平均になるが、陽電子は電子と電荷が逆なので、表面で全反射してしまい、本当に表面に乗っている一層だけをものすごく高感度で見ることができる。シリコンの 7×7 再配列構造は STM や高柳モデルなどいろいろあり、何十年もかかって DAS モデルというのが最終的に決まったが、20 年前に陽電子のこの方法があれば、おそらくそれ単独でほぼ構造が決まったのだろうと思う。表面だけ見るから、逆問題が非常に簡単なのである。今、そういうようなことが分かるという状況になってきている。

世界で初めての陽電子学会は日本、ということだったが、日本にはどのような特徴があるのか。また、これから日本はどのようにやっていったらよいか。国際的な観点はどうか。

- いろいろな側面があると思うが、簡単にいうと、陽電子は今まで RI を使う実験が比較的簡単にできた。ナトリウム 22 という線源である。実験室レベルで数百万円で購入でき、あとはディテクターがあればプラス 1,000 万円くらいの資金でできる実験である。ところが、RI が今、南アフリカでしかつくられていなくてほとんど手に入らない状況になっている。それで、このような大型の産総研や KEK など陽電子をつくって、ミューオンの実験のような形で今後、陽電子のコミュニティが発

展していくのかなという状況になってきている。そのほうがクオリティーも高く、短時間でどんどんいろいろな人が来て次から次へと成果を挙げられるという状況に変わっていくのではないか。

その中で日本の陽電子研究がなぜこんなにいいのかというのは、黎明（れいめい）期から非常に有名な物理学者の方が多くおられたというのがある。こういう共通のファシリティを研究者が自分の研究にだけ使うのではなくて、いろいろな産業界の人の試料も受け入れてやっていくというアクティビティが重要で、それによってここまで発展している。もちろんそれは唯一の側面ではないが。

測定評価を求めるユーザーという観点での幅の広がりや今後の発展はどうか。

→いまは、ユーザーに対応できるだけの時間的制約で決まっている。例えばナノテクプラットフォームでは10件ぐらい対応している。それぞれ1件はそれなりの重みがあるので、いろいろ犠牲にはしながらやっているが、やはり限界にきている面もある。今、各装置の市販化の動きもあるので、陽電子消滅の専門家以外の者が対応できるようにすそ野を広げていくというのがひとつの重要な動きと考えている。

- ・材料開発をやるときはかなり系統的にデータを取りたいので、ある程度の時間を要する。たくさん実験をやるということに対してナノテクプラットフォームでは、先生方の時間でそれが決まってしまうのか、装置からビームが出ている絶対時間で決まっているのか。某社で陽電子の依頼分析を始めたということを知ったことがある。こうなれば、がぜん材料開発屋は使いやすくなってくると思う。測定評価に対応する先生方は忙しいが、やる人、実働部隊がいればできるというモードだと成り立つのか。

→計測自身は、陽電子の専門家でなくても少々訓練すればオペレーションできる。しかし解析データの解釈には、経験が必要な側面があるので、例えば1年間しっかり一緒に研究していく中で身に付けてもらうなど、育成の後に初めて可能になる。

話題提供 10 量子ビーム計測と物質設計

坂井 徹（日本原子力研究開発機構 量子ビーム物性制御解析技術研究ユニット）

量子ビーム応用研究部門に所属しているが私は SPring8 におり、元々物性理論をやっている。最近は大規模数値シミュレーションなど計算物性科学に取り組んでいるが、過去には銅酸化物、高温超伝導体の理論をやった。今日はこれらを具体例とし、物質設計に限って話す。

第一原理計算とモデルシミュレーションを融合した物質設計	
<背景・社会的意義> 量子ビームによる磁性材料・誘電性材料・超伝導材料・微小デバイスなどの構造物性や電子状態を詳細に観測する技術、及びそれを解析する数値シミュレーション技術が発達し、これらを生かした新物質設計が可能である。	
<想定される成果> これまでは、量子ビーム計測の実験結果を再現する現象論的モデルのシミュレーションにより、新機能の発現機構を解明するだけに留まっていた。しかし、第一原理計算から構築したモデルのシミュレーションにより、定量的に実験結果を再現できるようになれば、そのシステムを利用して、より高機能の具体的な新物質設計が可能となる。	
<研究課題> 高温超伝導材料 磁性材料 誘電材料 マルチフェロイクス(磁性・誘電性)材料 高機能微小デバイス 太陽電池 燃料貯蔵材料 高機能触媒 etc.	<国内外の注目すべき技術・研究開発・政策トレンド> 第一原理電子状態計算と大規模モデルシミュレーション(現象論)を融合したハイブリッド計算により、量子ビーム等の測定結果を定量的に再現し、これをもとに、より高機能材料の新物質設計を行う。
	<推進方策> 第一原理計算(電子状態計算・分子動力学計算)のコミュニティと、モデルシミュレーション(数値対角化・量子モンテカルロ法・密度行列繰り込み群法・動的平均場理論)のコミュニティを融合した研究領域を構築し、アイデアの交換と人材の交流を図る。

図 13-1

メッセージは、図 13-1 のタイトルに書いた通りである。コンピュータが非常に進んできたので、第一原理計算から始めて、モデルを作り、そのモデルのシミュレーションをやると、どんなことが起こるのかわかる、また、原子を混ぜるレベルから始めて、何ができて何が起こるかまでわかるような物質設計をやる、というのが計算科学の夢であり、そこまでやるべきだろう。

計算資源的には揃っており、たとえば文科省の新学術領域では始まっている。ただし、この業界にいとよくわかるのだが、第一原理計算の業界とモデルシミュレーションの業界とはかなり分離している。この融合が課題である。

図 13-1 を用いて、銅酸化物、高温超伝導体に限った課題を説明する。30 年位前に、ベドノルツ-ミュラーが物質合成の経験から、こんなことをやったら転移温度の高い超伝導ができるのではないかと、ある意味経験的にやったところ、すごい超伝導が出た。転移温度は今では最高 150K くらいまで上がっている。これにより、彼らはすぐにノーベル賞を受賞した。すごいブレークスルーだったが、この機構はそれまで知られていたいわゆる電子格子相互作用による超伝導とはメカニズムが違っていた。

磁性を起源とした超伝導のメカニズムということで、非常に新しいメカニズムだったが、それを理論的に解明したひとつの手段がモデルシミュレーションだった。銅酸化物を非常に簡単なモデルで説明できる。

たとえば銅原子を並べたとする。電気伝導に関与する軌道はひとつしか考えなくて良い。各銅のところにひとつの軌道だけ考えておいて、そこに価電子がいる。隣にホップする確率や、同じサイトに二つの電子が来たときにどんな強い相互作用が働くか、という程度のパラメータを入れてやると、モデルができる。実はそんな簡単なモデルで銅酸化物の高温超伝導が説明できるということがわかっている。ただし、同じサイトに電子が来たときに、強い相互作用が働く。相互作用する多体系というのは、実は簡単なモデルでもそう簡単には解けない。ちょうど 1980 年代から 90 年代にかけてスーパーコンピュータの技術が非常に進み、このモデルシミュレーションをやることによって、超伝導が出るということが解明できた。モデルシミュレーションを使った計算科学が理論的な解明をしたという、典型例でもある。最近では、量子ビーム（たとえば放射光、ニュートロン）やほかの物性測定などでも解析技術が進み、非常に分解能も上がっている。簡単なモデルであれば、実験のスペクトルとを比べて、非常に精度良くパラメータを決めることができるようになってきた。

パラメータを変えればもっと転移温度が上がる、あるいは新しい物質ができる、新しいことが起きる、ということを考え、設計したいというモチベーションにかられる。ところが、これはある意味現象論的なモデルなので、こんなモデルになる物質を作ってくれたら起こる、ということと言えるが、どうやって作ることができるのかというのは、出たところ勝負になる。したがって、最初に銅酸化物を合成したように、経験的に出たところ勝負でいくしかない。その意味で、モデルシミュレーションというのは絵に描いた餅であり、そのままでは食べられない。

ではどうやって作るのか。これをやるのが第一原理計算である。第一原理計算も、以前は簡単な物質に対してはできるけど、相互作用が強いものに対して、相互作用係数まで決めるところまでは行かなかった。しかし最近になり、地球シミュレーターや京コンピュータなど大規模なスパコンによって、少しずつできるようになってきた。このため、第一原理計算から、モデルの作成、そのモデルで起こることを予測して物質設計をする、そこまでつなげていくことが目標となる。

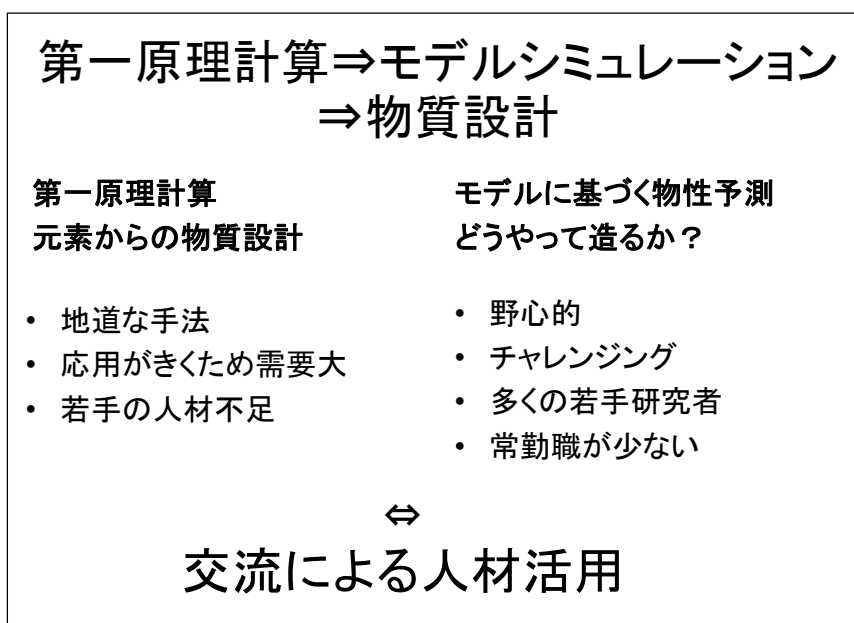


図 13-2

この二つのコミュニティはなかなか交流がないが、交流を深め、アイデアの交換、人材の交流をすべきである。要するに、第一原理計算とモデルシミュレーションを組み合わせ、物質設計をやったらすごい、ということである。

第一原理計算は、計算手法はよくわかっていて、あとは計算機の進展に従ってコードを組み替えていけば進歩していく、ある意味地道な手法である。一方で、応用は利くので需要がある。論文を書くという目的でなくとも、実社会で役に立つ話が様々にある。モデルシミュレーションは野心的でチャレンジングなものなので、若手のテーマとしては魅力がある。若手研究者はどんどん来て、ポスドクがたくさんいるが、常勤職が少なく教授や准教授の職はほとんどない。ポスドクの数に比べて常勤職が激減しているので、行き場がなくなっている人がたくさんいる。一方、第一原理計算の方は人手不足である。やることはたくさんあるが、必ずしも面白くない。研究とは言えないような仕事も多く、面白くないところもあって、ポスドクを公募してもなかなか人材が集まらない。コミュニティ同士で話し合い、大きな研究領域を作って人材交流を盛んにしたら、もっと能率的になるのではないか。

人材の有効活用

- ・ アイデアや柔軟性の必要なチャレンジングな研究に若手を起用
- ・ 研究領域内外の人材交流を活発にして、人材の有効活用をする
- ・ 産業界も含めた、人材の有効活用ができる社会的なシステムを作る
- ・ 国策の必要性

図 13-3

どんな分野でも若いアイデアは必ず必要なので、若手を育成し起用しなければならない。チャレンジングな分野は皆が成功するはずはないので、ほとんどの人はうまくいかず、良いポストに着けないということが起こる。そのときに、他の領域まで見据えて人材交流をやっていけば、そういう人たちを求める分野が出てくる。

第一原理計算に人材が流入すれば、より活用できるだろう。ヨーロッパでは Ph.D を取得した後にそれなりのポストで企業へ就職するという話はたくさんある。ところが、日本では博士まで行ってしまうと、会社の需要がなくなって就職できないというようなことが起こる。

今、非正規雇用の問題はあちこちで起こっているが、私の分野だと、ポスドク 1 万人計画が始まってからずっとポスドクをやっているという人もいる。辞めてしまった人もいるので、そういう人たちを活用する社会のシステムを作らなければならないだろう。若手のポスドクは使い捨てになっているパターンが多いが、人材を活用して人の流れを作らなければならない。若手がチャレンジングな仕事に挑戦しなくなってしまうということがこれから起きてしまうかもしれないので、人材の流れを作るシステムを、国と社会で作っていかなければならない。

質疑・コメント：

- ・ ナノテク・材料研究を新たに切り拓くためには、新物質材料の開発、すなわち新物質の設計が非常に重要になってくる。量子ビーム等の測定結果を第一原理計算とモデルシミュレーションを融合したハイブリッド計算で定量的に再現し、そこから新物質材料の設計を行うというサイクルが回ればよいが、なかなか異分野の融合はうまくいかない。また、計測結果をどう活用するかというところにも様々なハードルがある。という認識か。→その通りである。

- ・ 第一原理計算とモデルシミュレーションは大事だが、やはり実際の測定結果も重要で、これら 3 つの間でぐるぐる回していかないと、ちゃんとしたものにならないのではないかと。

→もちろんそうだが、野望は、何もないところからちゃんと設計・予測できること。
これを作ってと言われたら本当にできるというのが最終目標だと思っている。

- ・金属の構造材の劣化では、物理量でないものも扱わなければならない。破壊では実験できるものはモデル化できるが、実験ではどうしてもできないところで、シミュレーションは大きな役割を果たせると期待している。実際の材料の劣化はナノスケールで変化があるが、40年後に橋が落ちるかどうかはわからない。40年間待つわけにいかないので、何らかの加速試験をするが、その加速試験が本当に正しいかどうかというのは実験屋ではわからない。ぜひシミュレーションの専門家と一緒にやっていきたい。

- ・マテリアルズ・インフォマティクスという戦略提言をまとめてきたときも、同じようなことは議論になった。どう担保すればよいのか。

→実際、DFTシミュレーションとSTM、AFMのような計測結果をきちんとあわせて出さないと、いい雑誌に通らなくなっている。DFT、大規模なシミュレーション、第一原理計算と、原子レベルで解析できるようなTEM、STM、AFMは組み合わせとしてはよくある。

- ・第一原理計算もMDもモンテカルロも、あるいは機械での有限要素法、電気でのFDTDは全て順問題である。過去にはコンピュータがなかったから、非線形な方程式を解くのに数学的に近似する、逆問題を計算することが非常に重要であった。ところがコンピュータの進歩に伴って、皆が数式を一生懸命近似して解くことをやめて、前から順問題で攻めていくという計算機に頼ることが多くなってきた。すると、こういうものを作りたいと思ったときに、どういう形であるという逆問題をコンピュータ任せになって自分で考えなくなっているのではないか。もう少し数学をやり、数学者を増やしていくというのはどうか。

→ポストクが早い時期に別の分野に移っていくことも大事ではないか。

- ・第一原理計算で電子相関まで出せるという話があったが、実際に第一原理計算でメゾスコピックな系を本当に扱えるのか。

→ままだろう。その意味では、挑戦課題というのはまだまだある。メゾスコピックな系はフェーズフィールドによるシミュレーションでは結構合うが、そこに物理的な意味を持たせるために、やはり第一原理と合わさないといけない。

- ・まったく同感。たとえば、電極などに応用したときに、表面の流体的な運動を制御すると機能がアップすることや、そのようなナノからメゾスケールの形状効果などが取り込めると、材料開発においても重要である。また、水が凍ったり凍らないという相転移温度は結構難しい問題であり、実際は凍る条件でもシミュレーションだとなかなか凍らないということが起こるが、この辺りの取り組みは今後の課題としてどのように捉えられているのか。

→どちらかというと分子動力学である。課題は多いが、人材が少ない。それが今の問題であろう。

総合討論

コーディネーター： 河田 聡（大阪大学/CRDS 特任フェロー）

これまでの各プレゼンテーション・質疑を踏まえて、CRDS が事前に準備した俯瞰に関する資料等に基づき、(1) ナノ計測技術の俯瞰概念について（俯瞰図の構造・軸・捉え方、範囲、境界領域）、(2) 今後のナノ計測関連科学技術の研究開発の方向性と重要な柱・課題、(3) その他（異分野融合、産学官連携、国際連携、日本で不足している取組み等）の観点から議論をおこなった。

(1) ナノ計測技術の俯瞰概念について（俯瞰図の構造・軸・捉え方、範囲、境界領域）

- すべての計測技術を一枚に俯瞰図として表すことは難しく、それをしようとすると、事前提示された図 1-6 (p5) のように抽象的な表現になってしまう。「この対象物を測定したい」、というような具体的なターゲットとなるナノ・材料を据えることができれば、それに対応できる様々な計測技術の連携ということを考えることができるのではない。例えば、触媒の反応状態やナノレベルでの摩擦現象（トライボロジー）など、つまりこれまでは複雑すぎて扱えないとされてきたものが、計算機能力の向上や測定技術の組み合わせ・複合測定によって取組めるようになりつつあり、そのような流れや雰囲気はかなり出てきている。また、ラマン分光とは書かずに、表面増強ラマンや先端増強ラマンなど、ナノ計測の語を出す。CRDS ではこうした観点から今後俯瞰図を検討することが必要であろう。
- 科学と技術。科学を進めるときにはやはり、極限まで分解能をアップしてみたら新しいことが見えてくる、といった方向性は維持しなければならない。一方、技術といった場合、たとえば本当に低ノイズ化するであるとか、速度を出すなどである。科学と技術で分けて、最後にそれを統合的に考える、そういう軸の取り方はあるだろう。また、計測した後の情報の見せ方という部分も重要である。
- 測定・分析の対象として個別に化学物質を挙げていくのは、全体を俯瞰するということにおいては現実的でない。表面分析や材料表面といった、もう少し大きなカテゴリーで考えるべきである。
- ナノテクノロジーでは表面の役割が非常に大きい。界面とともに、「表面」というキーワードを入れるべきだろう。計測で重要なのはまずは表面、表層である。それから内部に存在する界面、いずれもスケールはナノオーダーだ。光電子顕微鏡（PEEM）、スピン偏極 SEM など最表面だけのスピン偏極を測る顕微鏡も開発されている。電子顕微鏡でもローレンツ電子顕微鏡を使ってスピン状態をきちんと測るといったことをキーワードとして入れるべき。
- 元素をどう定量的に、しかも微量でもどれだけ検出できるのか、元素戦略としても重要な観点。
- 計測ニーズと計測シーズのギャップをどう埋めるのかという視点を構造化することは重要である。埋める戦略が見えるような構造ができるとよい。
- ニーズに合わせたシーズ側の対応にも 2 種類ある。1 つは、現有の装置をちょっと工夫

すれば、あまり資金をかけずに、少しがんばれば対応できるもの、もう1つは、新しい解決策にチャレンジするもので多額の費用が必要になるもの。前者であれば、JSTがニーズとマッチングさせれば相応の課題が出てくるのではないかと。各機関では様々な取り組みをしているが大が、それを越えたシステムティックに取り組む方法を考えるべき。テスト的に開始して、うまくいくと次のステージで大きなプロポーザルを出して発展させるような、臨機応変なやり方を計測技術開発でもおこなうべき。

- ・ナノ計測が今後どのような方向に行こうかというのを、リードするような研究ニーズはこれだ、というのを明示できないだろうか。現有の個々の技術はここを目指すのだというものがないと、皆自分のやっていることを突き詰めていってしまい、場合によってはオーバースペックになる。たとえば10年後、20年後、30年後のあるべきものに対してナノ計測がどういうアプローチをするかというのを少しでも明示したい。

(2) 今後のナノ計測関連科学技術の研究開発の方向性と重要な柱・課題

○計測技術開発の人材・仕組み

- ・装置のメンテナンスや管理について、企業の人間を大学や国研で活用することはできないかというアイデアを、複数の先生がプレゼンテーションで挙げた。一年ほど前に、大学の遊休の設備を活用するために予算を投下して、その代わりあまり新しいものを購入するのがだんだん難しくなるということが、関東の七つの大学でモデルケースとしてスタートした。これは企業の立場とすれば、ビジネスモデルの変更が必要となるような、大きな流れの最初の表れかもしれないと認識している。つまり、装置を売って稼ぐというビジネスモデルから、最初の装置は少なくしか入らないところを、どう使っていくかについてサポートしていくということに、ビジネスを移していかなければいけないのかもしれない。実際にこの議論が企業内で出ている。優秀な技術者がシニアになって、再雇用制度で仕事するということに、彼らは高い技術を持っていて且つ働く場所を求めているので、もし装置サポートのためにある程度技術をもった人間が必要だとすると、こういう人々を活かしていくことが社会全体としても解決策の選択肢になるかもしれない。
- ・ナノ計測は、産学両体として国の戦略的取り組みが決め手になる。計測産業の業界全体の変化は、大きな企業へのM&Aによる事業の集中であって、また、消耗品事業へのシフトであるが、これに乗っていくことが本当に日本として正しい道なのかは必ずしも自明ではない。日本のように高齢化してきてしかも給料が高くなってしまった国にとって生きる道というのは、もっと高度化されたほかの国に真似できない産業へのシフトなのではないか。ドイツ、スイス、オーストリアなどをひとつのロールモデルと考えるのだとすると、大きい会社を作ったくさんのものを売っていくというモデルで、本当に新興国に勝っていくことができるのか。中小企業の力が中核にある日本、その視点を持つべき。
- ・新しい技術に基づいた新しい装置を開発し、今までよりも格段にいい成果が出るようになったとしても、そういう装置は最先端過ぎて、先端的な研究開発をした研究者自らオペレーションしなければならない。そうすると外部から来る人は使いにくい装置になってしまう場合が多い。先端的な装置をスピーディに共用化していくことで技術

の有効性を検証し、研究の新展開をもたらすべきである。それによって新たな研究課題が出てきて、さらに新たな研究開発につながっていくことになる。これはナノテクノロジープラットフォーム事業の中核を成している概念でもあり、共用化事業と先端計測のような開発事業をうまく組み合わせてやっていくことが今後重要になるだろう。

- ・例として電子顕微鏡を挙げると、収差補正技術でドイツやアメリカに日本が負けたという話があるが、それには二つの要因があった：ひとつはドイツの収差補正技術は60年かかっており、60年間そういう研究をずっと続けていけるような研究体制を、日本では組めるのだろうかということ。二つめは、収差補正技術はドイツからアメリカに移ってアメリカのTEAMプロジェクトという形で結実したということである。TEAMプロジェクトは、国研が主導したプロジェクトであり、三ないし四つの収差補正の新しい電子顕微鏡を作り、そのトップのバークレーにあるTEAM1という装置は、開発が終了したと同時に共用化している。それが出来たのは、装置共用のスキームがあったということと同時に、収差補正技術では電子レンズが1対1になっていて、電子顕微鏡の中にすぽっと入れるだけで専門家でなくても割と使いこなせるほどに技術の達成度・熟成度が高かったということがある。そういう研究開発を我々はこれから進めていかなければいけないし、それによってユーザーの幅も広がっていくうえ、技術のレベルも上がっていく。

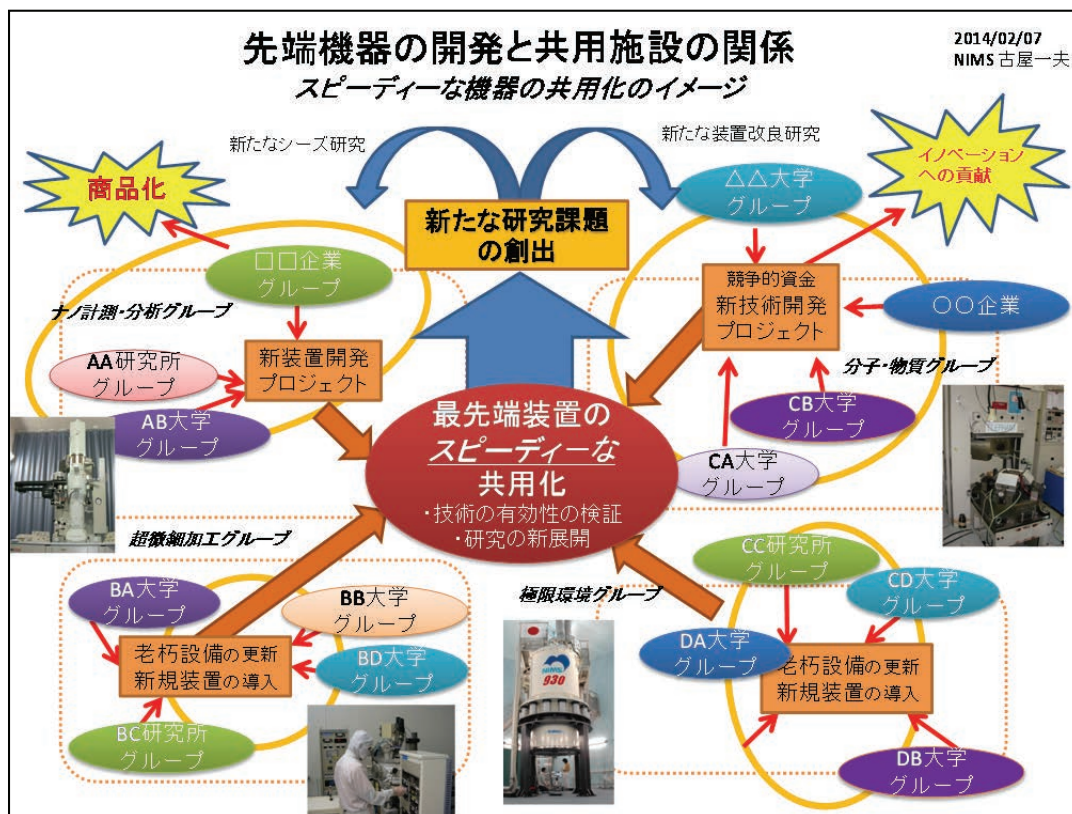


図 14-1

- ・実際にファンドの有効活用を考えたときに、電子顕微鏡にしても NMR にしても、企業でしか作れないようなものの開発を大学ではどうするのか、産学連携の仕方をどう

組んでいくのか。産業界は、大学の研究室でまったく新しい概念で技術を作っていくことを一番期待しているが、そのためにはやはりファンディングの仕方を変える必要がある。最初のところは、今までよりももっと産業界のほうに重みを置くという考えがある。現場シーズの組み合わせが基本的にナノテクプラットフォームだが、特にバイオ関係の場合は、病院と一緒にいないとどうにもならないようなことがある。日本では特に難しい枠組みであるが、欧米では病院のなかに MEMS の試作ができるクリーンルームがあるなど、連携がはるかに進んでいる。話の進み方が全く違ってくる。バイオだけではなくて材料でも、全体の連携の中にもものを作る・開発するところをもう少し明確に加えて、いくつかのポイントとなる材料開発と組んでやるという方法はあるのではないかな。

- ・計測と制御を生業としている企業から述べると、工業用の電気系の計測器は最近シュリンクしてきている。単なる計量ではなくて分析や診断、あるいは治療に結びつくようなセンサーや計測器を作れ、と最近はよく言われている。これはひとつのヒントになるだろう。もうひとつ、このワークショップで改めて認識したことが、測定対象がよくわかっているかわかっていないか、の違いである。よくわかっているならばシミュレーションが可能だが、バイオ系の多くは対象がわかっていない。すると計量がやっとなで、シミュレーションもできない。対象がわかっているならばシミュレーションできるので、分析や診断にフィードバックがかけられる。ナノ材料の特性や欠陥などは、対象がわかっているからフィードバックまでかけられる。したがって完成したエリアでも計測としてはフィードバックかけられる、ひとつの開発ができる。一方、まったくわかっていないバイオだと、計量のところでひとつの開発ができるということで、住み分け、あるいは機能の分け方がある。
- ・オールジャパンといったことはもう少し民間としてもちゃんと考えていかなければいけない場面があると認識した。ドイツ、アメリカの次に日本だという島津製作所からの話であったが、その範囲ではまだ技術で戦っている。これが今度コストの話に落ちてくると、途端に慌てることになる。半導体もそう、家電、今度はパソコンでも、コストになってきた途端に必ず慌てる。したがって、コスト競争になる前に技術で戦っているうちに国と産学とで戦略的に取組むことが大事になる。民間からはなかなかそういうことを言いにくい面があり、国の戦略的なトップダウンの話はやはり必要であろう。その意味で、今回のワークショップのような場は、極めて重要であるし今後一緒に考えたい。
- ・人材の流動性についてはさらに議論必要である。計測、シミュレーション、材料との融合というのは、企業においても小さいながらもやっているが、人を集めただけでは全く融合は進まない。本当の融合とは、やはり人が動いて流動して、初めて情報も真にシェアできるということがあり、産官学で流動性を上げなければいけない。企業から大学の連携講座のかたちで大学に行くことはあるが、その逆はほとんどない。産官学間の人材の流動性があると、本当はもっとイノベーションが起きる。真の融合という意味では、人も動かないとなかなか実現しない。
- ・仕事が細分化されているというのは大きな問題。計測器メーカーとしては分析全体を理解した上で自分の仕事をするというのが重要だが、今は大学でも分析化学などが減

ってきて、装置屋が増えてきている。サンプルを装置にもってくるまでの前処理や、計測した後の解析・解釈など、分析そのものをやはりもう少し体系化して、勉強しなければならない。また、丹念に高速化をおこなって画期的なことができたとか、そういうケースは見習う必要がある。アナログ回路やオプティクスなど、ある程度完成された学問領域に関してあまり積極的にトレーニングされておらず、エンジニアの足腰の弱さとして出ている。

○重要な方向性・柱・課題について

- ・時間が含まれている計測はまだ完全にはフォローできていない。以前の計測の俯瞰ワークショップでCRDS吉川センター長が、時間の概念を含んだ「4次元レンズ」という表現をした。環境などでは特に未来がどうなるかというのが重要であり、時間を含めて考えなくてはならない。ナノ計測もやはり時間を含めた系で、ダイナミックな計測を考えていくべき。少し拡張した表現をすると、タイムレゾルブド（時間分解）という話になる。たとえばTEMも複数の分析が同時にできるようになっているが、それぞれ足し算ではなく、その相関の測定をできるようにする。検出効率を考えると積でどんどん強度を強くしないといけないが、桁違いのことができるのなら、ひとつ足し算、二つ合わせたら二つじゃなくてもっと大きな、4でも10でも大きくなるような相関をとっていくという概念に広げてもいいのではないかな。
- ・もう一つの重要なキーワードは、複雑系だろう。複雑系の計測というのはこれからの課題で、これまでは皆逃げていた。できることしかやらなかった。たとえば摩擦などの複雑な系にチャレンジするというのがひとつの方向だろう。これまでの光学顕微鏡や電子顕微鏡は、試料が大きくて、プローブが小さかったが、プローブ顕微鏡となるとプローブと試料が同じ大きさで近接しており、非常に強い相互作用になって、測ることによって試料が変わる。それを含めた非線形の、複雑系の数理的な扱いをしなければならない。もっと数学を入れなければ、「測ったらなくなった」で終わってしまう。なくなってもそのプロセスをちゃんと追いかけられなくてはならない。ナノ計測は、普通の計測とは違う、やはり極限計測の世界なのだという意識が必要である。また、他の例では、応力腐食割れなどはまったく現象論的な理解しかされていない。電気化学の表面の話から腐食割れという材料の問題になってくるが、ナノスケールの材料のゆらぎ影響してくるという話になるのでフロンティアではあるが、どう捉えていいかわからない状況にある。その場計測から化学反応を直接見られるようなことができれば、ものすごく大きな、分析から材料へのつながりができる新しい計測になるだろう。
- ・大きな流れとしては、表面・界面をAFMで測定するというのはいわゆる見る技術だったが、最近になって2次元の表面から凹凸の3次元、特に表面の少し上のところ、固液界面の場合は水和層の3次元分布などもあり、今後さらに界面活性剤など様々な物質がそこに吸着していく、そのような3次元立体構造の可視化へ向かう流れがある。さらに、界面のわずかな上や下など、少しの厚みをもった部分が今後の計測課題とし

て出てくるだろう。埋没した界面など、そういったところでの立体的な三次元ナノ計測が大きな課題になる。

(3)その他（異分野融合、産学官連携、国際連携、日本で不足している取組み等）

- ・（コーディネーター）科学者は最先端を進まなければならない。しかし気になるのは、異分野融合も産学官連携も国際連携も、全て相手に頼る話になっていて、自分一人でやるという話になっていかない。ナノテク・材料分野では、自ら解決するのだということをまず考えることも、もっと必要である。頼る相手としてもまだ整理がついていない。このワークショップでは AFM も STM も NMR も質量分析も出てきたが、それに代わる新しいものをどうやったら生み出せるのか、あるいは今出てきつつあるものがあるのか。そういうものがなければ、技術革新はあったとしても、外から見たら結局、「AFM は売っているよ」、と言われてしまい、最先端のメッセージがなかなか見えにくいだろう。
- ・「ナノ計測」は計測と分析まで含んでいる。計測はエンジニアリングの範疇であり、たとえばどのようなセンサーを作るかというのはエンジニアリングだが、分析ができるというのは課題解決、ソリューションを提供するという意味でサイエンスが含まれる。議論の前提としてナノ計測が分析まで含む、エンジニアリングからサイエンスまで含んでいるのだということは明確にしたい。おそらく計測器業界も入れるし、サイエンスの人も入ることができる。
- ・1980 年代にアラン・コーマックとゴッドフリー・ハウズフィールドが X 線 CT でノーベル賞を受賞したが、その後日本の病院の至るところに X 線 CT が入ったのだけでも、誰も読影ができない。オペレーターがいらないというのはひとつあるが、もうひとつ、読影ができないのである。超音波エコーも、日本の病院にたくさん入ったが、超音波エコーの絵が読めない。最先端過ぎて、それをインタープリットすることはビジネスにもならないし、研究にもなりにくいのか、そのあたりは、ナノの世界は皆が知らない世界だから、もう少し支援をするか何らかの方策が必要ではないか。つまり、新しい装置が出てきて使いこなせない、読影できないというようなことは、常に起こることである。それは誰も見た経験がない画像であれば解釈できないわけで、本来はそこまでは計測であって、読影できるようになるように知識が蓄積されてはじめてソリューションが返せる。そこまでいくと分析だという定義を私はしている。そのためには通常非常に長い期間がかかる、たとえば 5 年、10 年、ことによると 20 年といった期間がかかる。その期間もちこたえられるかどうか。そこがもちこたえられれば広く普及する装置として市場が形成されるのであろう。したがって、それをもちこたえられるような制度・考えが日本にあると強くなるのではないか。欧米にはあるのだろう。
- ・一方で、国の施策を待っている姿勢ではだめだ。できることをそれぞれの立場で発信していった初めて政策として吸い上げることにつながる。EU の例を見てもわかるが、最先端の計測技術、極限計測、そういったものを国として進めていくという姿勢を大事にしている。また、その後普及させるためには、NMR の例をいえば、欧州には EU のプロジェクトとしてバイオ SNMR という、欧州の主要な機関に最先端の NMR を導入して、それを共同で使っていくというネットワークをセンターとして作っている。計測の技術を開発した後は、きちんとそういった普及まで含めて国として進めていく。日本の

ナノテクプラットフォームでは、北海道から九州まで、そうした拠点を作っていこうとしている。なかでも電子顕微鏡に関してはかなり進んできている。プラットフォームの現場には、様々な研究・計測法があるので、そういったものの共用を発展させるべきである。

- ・ 国際的な共同研究は非常に大事だが、国際連携といっても二つのことを考えなければいけない。ひとつは最先端のことをやるということと、もうひとつはアジア地域の新興国に対して、たとえば装置をこれから普及できるかもしれないという国は大事にしなければいけない。プラットフォームでも外国からの依頼測定を受け付けている。アジアの国から来た留学生が学位を取ると帰国して自国の大学で就職するが、彼らが今プラットフォームを使い始めている。国際連携は最先端をやることと、人材育成も絡んでくるが、国際的にみて全体を育てる、ということを考えてるべきだろう。
- ・ CRDS では、本ワークショップの各発表および議論を通じて得られた様々な意見・アイデアを改めて検討した上で、ナノ計測技術に関する俯瞰図を修正し、その概要とともに「研究開発の俯瞰報告書ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」に反映していく予定である。

付録1. プログラム

(敬称略)

開催日時：2014年2月7日（金）10:00～17:45

開催会場：科学技術振興機構 東京本部別館 2階セミナー室

	コーディネーター 司会・ファシリテーター	河田 聡 (JST-CRDS) 永野 智己 (JST-CRDS)
10:00～10:05	開会挨拶	佐藤 勝昭 (JST-CRDS)
10:05～10:25	ワークショップの趣旨説明	河田 聡 (JST-CRDS) 永野 智己 (JST-CRDS)
<u>10:25～11:15</u>	第一部 今後のナノ計測技術への期待	
10:25～10:50	「分析機器業界の現状と期待すること」	中川 利久 (島津製作所)
10:50～11:15	「ナノ計測分野における分析機器メーカーの役割と課題」	杉沢 寿志 (日本電子)
<u>11:15～12:05</u>	第二部 研究ニーズに対する意見	
11:15～11:40	話題提供1 木を見るナノ計測と森を見るナノ計測	大久保 雅隆 (産総研)
11:40～12:05	話題提供2 最先端計測技術の開発と共用によるシナジー効果と イノベーションの加速	藤田 大介 (NIMS)
<u>12:45～14:25</u>	第三部 ナノテク材料研究を拓く先端計測技術（前半）	
12:45～13:10	話題提供3 日本の透過型電子顕微鏡技術の現状と課題、将来展望	柴田 直哉 (東大)
13:10～13:35	話題提供4 有機機能性材料開発の現場で求められるイメージング 質量分析技術	豊田 岐聡 (阪大)
13:35～14:00	話題提供5 先端AFM技術を用いた学術・産業分野における 研究の重要性と課題	福岡 剛士 (金沢大)
14:00～14:25	話題提供6 NMR；装置、周辺技術、応用	大木 進野 (北陸先端)
<u>14:35～15:50</u>	第四部 ナノテク材料研究を拓く先端計測技術（後半）	
14:35～15:00	話題提供7 生体分析・フレイディクス	渡慶次 学 (北大)
15:00～15:25	話題提供8 ナノ材料表面における官能基レベルの化学状態分析と これらの水分子との相互作用計測の重要性	由井 宏治 (理科大)
15:25～15:50	話題提供9 陽電子消滅測定	大島 永康 (産総研)
15:50～16:15	話題提供10 量子ビーム計測と物質設計	坂井 徹 (原研)
<u>16:30～17:40</u>	総合討論（コーディネーター 河田 聡） 論点1. ナノ計測領域の俯瞰概念について （俯瞰図の構造・捉え方、範囲、境界領域） 2. 今後のナノ計測技術の研究開発の方向性と重要な柱・課題に関する 議論 3. 政策・制度上の課題	
17:40～17:45	閉 会	佐藤勝昭 (JST-CRDS)

付録2. 参加者一覧

招聘識者

(敬称略、五十音順)

※ 所属・役職はWS開催時点

(発表者)

- ・大木 進野 北陸先端科学技術大学院大学 ナノマテリアルテクノロジーセンター 教授
- ・大久保 雅隆 (独) 産業技術総合研究所つくばイノベーションアリーナ推進本部 上席イノベーションコーディネータ
- ・大島 永康 (独) 産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門 陽電子プローブグループ 主任研究員
- ・坂井 徹 (独) 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 ユニット長
- ・柴田 直哉 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構准教授
- ・杉沢 寿志 日本電子株式会社経営戦略室 戦略企画部長
- ・渡慶次 学 北海道大学大学院工学研究院生物機能高分子部門 教授
- ・豊田 岐聡 大阪大学大学院理学研究科附属基礎理学プロジェクト研究センター 教授
- ・中川 利久 島津製作所株式会社分析計測事業部事業企画部 戦略グループ長
- ・藤田 大介 (独) 物質・材料研究機構先端的の共通技術部門 部門長
- ・福間 剛士 金沢大学理工研究域バイオ AFM 先端研究センター 教授
- ・由井 宏治 東京理科大学理学部 教授

(コメンテータ)

- ・大堀 謙一 株式会社堀場製作所開発本部 理事
- ・高口 雅成 株式会社日立製作所中央研究所 基礎研究部 研究主幹
- ・田名網 健雄 横河電機株式会社イノベーション本部研究開発部 エキスパート・リサーチャ
- ・永井 康介 東北大学金属材料研究所 教授
- ・古屋 一夫 (独) 物質・材料研究機構 ナノテクノロジープラットフォームセンター 副センター長
- ・矢尾板 憲一 (株) リガク X線研究所 企画室 室長

JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット

- ・曾根 純一 上席フェロー・ユニットリーダー、(独) 物質・材料研究機構 理事
- ・河田 聡 特任フェロー (WS コーディネーター)、大阪大学フォトニクスセンター センター長
- ・河村 誠一郎 フェロー・エキスパート・CREST/さきがけナノエレクトロニクス領域マネージャー
- ・佐藤 勝昭 フェロー・JST 研究広報主監
- ・島津 博基 フェロー
- ・永野 智己 フェロー・JST 科学技術イノベーション企画推進室ナノテク・材料チームメンバー
- ・中山 智弘 フェロー・エキスパート・JST 科学技術イノベーション企画推進室参事役
- ・中本 信也 フェロー
- ・馬場 寿夫 フェロー
- ・松下 伸広 特任フェロー、東京工業大学応用セラミックス研究所 准教授

関係府省・機関

・河村 麻美	文部科学省 研究振興局参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付 係長
・宮嶋 克彰	文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子放射線研究推進室 行政調査員
・栃折 早敏	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI） 事務局長
・平田 一郎	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI） 事務局次長
・加藤 豊	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI） 事務局次長

JST

・私市 光生	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 政策ユニット	上席フェロー
・古川 雅士	科学技術振興機構 科学技術イノベーション企画推進室 重点分野推進チーム ナノテクノロジー・材料分野	研究監
・菅原 理絵	科学技術振興機構 産学基礎基盤推進部 先端計測室	主査
・櫛引 圭子	科学技術振興機構 産学基礎基盤推進部 先端計測室	主任調査員
・中村 敏治	科学技術振興機構 産学基礎基盤推進部 先端計測室	主任調査員
・竹内 里香	科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	主査
・前野 仁典	科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	主任調査員
・梅原 千慶	科学技術振興機構 戦略研究推進部 ライフイノベーショングループ	主査
・佐藤 久夫	科学技術振興機構 戦略研究推進部 ライフイノベーショングループ	主任調査員
・大島 敦子	科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 ライフイノベーショングループ	調査員

■ワークショップ企画・報告書編集メンバー■

曽根 純一	上席フェロー
河村 誠一郎	フェロー／エキスパート
佐藤 勝昭	フェロー／研究広報主監
島津 博基	フェロー
永野 智己	フェロー
中本 信也	フェロー
中山 智弘	フェロー／エキスパート
馬場 寿夫	フェロー
魚崎 浩平	特任フェロー
川合 知二	特任フェロー
河田 聡	特任フェロー
北澤 宏一	特任フェロー
田中 一宜	特任フェロー
田中 秀治	特任フェロー
松下 伸広	特任フェロー
村井 眞二	特任フェロー

CRDS-FY2014-WR-04

ナノテクノロジー・材料分野

ナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ 「ナノ計測分科会」報告書

平成 26 年 8 月 August 2014

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
ナノテクノロジー・材料ユニット
Nanotechnology/Materials Unit,
Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

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

©2014 JST/CRDS

許可無く複写／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。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

