

# 先端計測分析技術に関する俯瞰報告

平成27年11月

文部科学省科学技術・学術審議会

先端研究基盤部会

先端計測分析技術・システム開発委員会

## 目次

1. はじめに	・ ・ ・ 2
2. 計測分析技術・機器の俯瞰	
2. 1 俯瞰及び抽出方法	・ ・ ・ 3
2. 2 俯瞰の結果	・ ・ ・ 6
2. 3 個別機器の俯瞰	
2. 3. 1 表面・微小部分分析手法	・ ・ ・ 8
(1) 電子顕微鏡	・ ・ ・ 8
(2) 光学顕微鏡	・ ・ ・ 11
2. 3. 2 バルク分析手法	・ ・ ・ 14
(1) 核磁気共鳴	・ ・ ・ 14
(2) 質量分析	・ ・ ・ 17
3. 政策連携	
3. 1 背景	・ ・ ・ 19
3. 2 共用プラットフォーム	・ ・ ・ 19
3. 3 JST 事業	・ ・ ・ 20
3. 4 その他	・ ・ ・ 20
4. 今後の課題	・ ・ ・ 21

## 1. はじめに

科学の進歩の基本は観察にある。計測は、定量的観察であり、計測の進歩は科学の進歩をもたらしてきた。従って、計測は科学の母 (Mother of Science) と言え、また、その結果として社会に新たな価値をもたらすイノベーションの源泉とも言える。本年 (2015 年) ノーベル物理学賞を受賞した「ニュートリノの振動の発見」は、ミュオンの計測を可能とするユニークな光電子増倍管の開発や、極限まで厳密な計測を可能とする超純水の生成技術なくしては成し得なかった科学上の発見である。

2004 年 (平成 16 年) に国立研究開発法人科学技術振興機構 (以下、JST) を実施主体として開始された先端計測・機器開発プログラムは、2002 年に田中耕一氏がノーベル化学賞を受賞したことを契機として開始されたが、そのときの受賞課題は、「質量分析のための脱着イオン化法の開発及び NMR によるタンパク質の 3 次元構造解析手法の開発」であった。その後、2014 年の受賞課題である「超解像蛍光顕微鏡の開発」まで、計測技術自体を受賞対象としたものに限っても、自然科学分野で 6 つのノーベル賞を受賞している。<sup>1</sup>

このように、計測は、科学上の新たな発見や理論的予言を検証する計測技術や大型研究施設での計測限界への挑戦といった側面を持つが、同時に、半導体設計やタンパク質構造解析、ナノ材料を用いた製品、医薬品などの微量成分の検出等、科学研究の場のみならず、産業分野においても不可欠な存在である。さらに、近年では、計測対象の先端性とも相まって、従前の個別の計測機器の開発から、複数の機器の有機的組合せによる複合計測機器の開発、生命科学分野においては、個体レベルでの、非侵襲・低侵襲での観察を可能とする計測機器開発へのニーズも高まっている。

しかしながら、科学上の計測の役割の重要性が認識されること、産業的に計測産業が栄えることの両面が、多くの科学分野にとって重要であるにもかかわらず、かつては、主要な計測・分析装置の世界市場において大きなシェアを占めていた日本の計測産業の地位は低下し、外国製品にその座を明け渡し続けている。同時に、研究の現場では、種々の要因によりいち早く成果を求める圧力が増していることにも起因して、実績のある先行機器を用いて研究成果を導出することが優勢となっているなどの理由から、研究の場での計測技術発達の相乗作用が得られにくい状況が生じている。

---

<sup>1</sup>計測に関連する 2002 年以降のノーベル賞

2002 年 (化学賞) 質量分析のための脱着イオン化法の開発及び NMR によるタンパク質の 3 次元構造解析手法の開発

2003 年 (医学・生理学賞) 磁気共鳴断層画像化技術 (MRI 技術) の開発

2006 年 (物理学賞) 長短光パルスレーザーによる光周波数計測技術の開発

2008 年 (化学賞) 緑色蛍光タンパク質 (GFP) の発見

2012 年 (物理学賞) 単一量子系の計測及び制御手法

2014 年 (化学賞) 超高解像度の蛍光顕微鏡の開発

さらに、人材育成の側面からは、計測機器の研究開発人材は、計測研究発展の大きな役割を担っているが、計測産業の場を鑑みれば、最先端の科学における計測研究とは異なり、多様な計測対象について計測が可能な場を作り出さねばならず、狭義の研究者とは異なる、機器を作り、機器を使い、そして計測結果を生かす人材も必要である。現在この大宗は計測機器産業によって培われているが、主戦場が主に先端科学の場、いわゆるハイエンドユースという狭い市場の中で、人材育成に十分な環境を整えることは困難を極めている。

このような状況を一挙に改善することは困難であるものの、本報告書においては、まずは、日本が比較的優位とされている主要な分析手法（顕微鏡、核磁気共鳴（NMR）、質量分析）に関し、最先端の技術状況を俯瞰しつつ、取り組むべき課題を洗い出し、課題を整理することを試みた。最先端の科学のための計測と、計測産業の両方が、他の多くの分野の研究にとって重要であるという認識の下、今一度相互の関係を正のスパイラルに変換していくためのアプローチとして、分野を絞って具体的な技術課題に着目し、抽象的な議論でなく、より本質的な議論の一端とすることを目指した。

本報告書を議論の端緒とし、今後は、X線回析等今回扱わなかった分析手法に俯瞰作業を広げるとともに、これまでも課題とされてきた、技術や装置の国際標準化や開発された機器の初期需要を創出する仕組みなどの検討も行い、長期的な戦略の構築に取り組んでいく必要がある。

## 2. 計測技術・機器の俯瞰

### 2. 1 俯瞰及び抽出方法

計測技術の状況を俯瞰し、課題を洗い出すため、計測技術毎に「俯瞰図」を作成し、課題の抽出を行った。俯瞰という手法については、JST 研究開発戦略センターが研究開発の戦略策定にあたって作成した俯瞰報告書を参考にして検討した。また、計測分析技術においては、計測の対象が重要であり、何を計るか、どの方法で計るか、ということを経験するため、マルチスケールによる俯瞰も試みた。

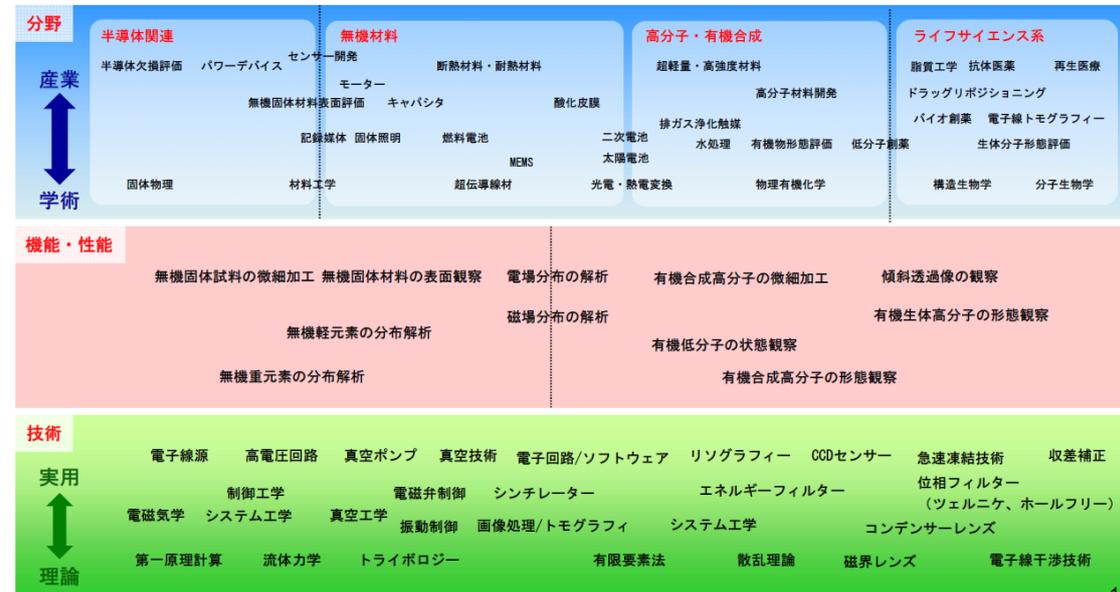
俯瞰作業は、大きく二段階で行っている。最初は手法毎の俯瞰であり、合計 20 個の俯瞰図を作成し、重要技術の抽出を行っている。俯瞰の目的、対象とした計測手法を表 1 にまとめた。

表1 俯瞰図一覧

タイトル	参考資料の スライド 番号	目的	計測手法
生体分子のスケールによる計測手法分類	3, 4,	スケール毎の計測手法の分類を行い、各機器の優位性を明らかにする	電顕、光顕、核磁気共鳴、質量分析
生体分子の構造解析手法の特徴	5	機器毎の生体試料の構造解析手法の特徴の比較	X線、核磁気共鳴、クライオ電顕
表面・微小部分析手法の比較	13, 14, (28), (29)	表面・微小部分析における各機器（手法）の限界を明らかにする	電顕、光顕ほか
電子顕微鏡分野技術俯瞰図	15	電顕に関わる応用分野と関連技術の俯瞰	電顕
電子顕微鏡分解能と技術変遷	16	電顕の技術開発の状況を整理	電顕
位相差電子顕微鏡ロードマップ	18	位相版による収差補正技術の変遷より技術課題を抽出	電顕（位相差技術）
光学顕微鏡の種類と機能	30	各種光顕の対象試料による分類マップ	光顕
光学顕微鏡分野技術俯瞰図	31	光顕に関わる応用分野と関連技術の俯瞰	光顕
モダリティと技術変遷	33	光学顕微鏡の技術（光学効果と結像方法）開発の変遷図	光顕（光学効果技術／結像方法技術）
機器分析手法の比較	39, 40, (51)	機器分析手法の分類マップ、核磁気共鳴の応用手法	核磁気共鳴、質量分析など
核磁気共鳴分野技術俯瞰図	41	核磁気共鳴に関わる応用分野と関連技術の俯瞰	核磁気共鳴
核磁気共鳴と技術変遷	42	核磁気共鳴の技術開発の状況を整理	核磁気共鳴
質量分析手法の分類	52, 53	各種質量分析手法の対象試料による分類マップ	質量分析
質量分析分野技術俯瞰図	54	質量分析に関わる応用分野と関連技術の俯瞰	質量分析
イオン化法・分析可能分子量と登場年代、質量分析方式と分解能の変遷（技術変遷図）	55, 56	質量分析の要素技術を技術変遷図上に抽出	質量分析



# 電子顕微鏡分野技術俯瞰図



15

次の段階として、これらの手法毎の俯瞰図より抽出された注目領域に従い、機器毎に、要素技術や研究領域などを俯瞰した機器毎の俯瞰図を作成している。個別機器・技術については、次々節（2. 3）で述べる。

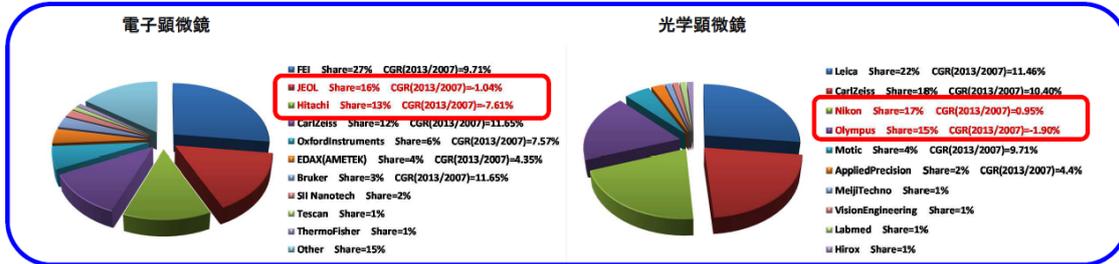
## 2. 2 俯瞰の結果

今回の俯瞰作業では、電子顕微鏡、光学顕微鏡、核磁気共鳴、質量分析の4手法から、それぞれ重要な要素技術を抽出し、研究領域等の動向も含め、開発課題をまとめた。

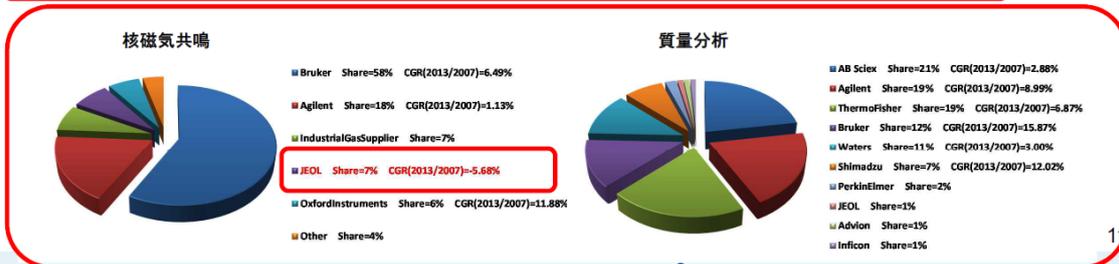
電子顕微鏡、光学顕微鏡、核磁気共鳴、質量分析の4手法は、いずれも先端的な研究現場で使われているだけでなく、産業界における検査利用なども含め、近年特に動向の変化の激しい分野でもある。

## 各計測機器のシェア 2013年のグローバルシェアと売上成長率（2013年/2007年）

### 表面・微小部分分析装置



### バルク試料分析装置



SDI Global Assessment Report(2014年版、2009年版)を基に作成。RE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

要素技術に注目すると、例えば、電子顕微鏡の分解能向上については、高電圧化などの従来のアプローチでは限界に近づいており、位相板のようなこれまでのアプローチと異なる新しい技術によって、限界を突破するような性能の向上と新しいサイエンスが生まれている。

また、これまで電子顕微鏡では、試料を真空下で扱うため液体試料を扱うことができなかったが、クライオ化技術の発展により、液中に存在する生体試料などの観察を可能としている。

さらに、これら要素技術の開発だけでなく、それらの要素技術をユーザーが扱いやすいトータルシステムとして組み込んで計測機器のユーザビリティを向上しているメーカーが売り上げを伸ばしているのが伺える。この中で、日本メーカーは、システム化、ユーザビリティの向上に大きく遅れを取っており、それが国際競争力の低下の一因となっている。

これらの動向等を踏まえると、計測機器の開発課題の一つとして、「自動化・高速化」が上げられる。特に、前処理等が不要になる新技術、前処理等を含め自動化する技術や高速にデータを取得する技術は、研究の効率性（ハイスループット）を上げることから、どの機器においてもニーズは高く、購入の決定要因ともなる。次に、「高性能デバイス開発」が上げられる。クライオ電顕における高感度カメラ、NMRにおける動的核偏極（DNP）装置、質量分析計における高感度化技術がこれに当たる。これらの技術については、クライオ電顕等カメラ技術の発達によるブレークスルーといったシーズ側のアプローチと、質量分析計のようにサイエンスの発展に伴うニーズ側のアプローチとの両方が見受けられる。手法毎の俯瞰より

抽出された要素技術については、日本企業は主要な技術をカバーしていると言えるが、計測機器の性能、購入を決定づける重要な技術・デバイスが内製化されていないと機器そのものの競争力も著しく低下することから、このような高性能なデバイスの開発は喫緊の課題と言える。これらの課題は機器毎の要素技術等によって違いがあるが、それらは次節（2. 3）においてまとめている。

## 2. 3 個別機器の俯瞰

### 2. 3. 1 表面・微小部分分析手法

表面や微小部を分析する手法は顕微鏡に代表されるような、透過性の小さい物理刺激を対象試料に印加<sup>2</sup>し、その物理刺激の影響が及ぶ範囲の応答を計測する手法である。

物理刺激としては、電子線や光（試料の光透過性が低い場合）、イオン、X線（試料の密度が高い場合）、音波などが用いられる。また、物理刺激の種類だけではなく、印加された物理刺激がどのような応答として表れるかによっても得られる情報が違うため、計測対象の試料と取得したい情報によって使われる計測機器が異なる。

#### （1）電子顕微鏡

##### （概観）

電子顕微鏡は、対象試料に照射した電子線の透過・反射・吸収・屈折・散乱・回折などの現象を観察することで、対象試料の形態観察や顕微分析などを行う装置である。特に加速電圧を上げることによる電子線の波長短縮、電子線の屈折や散乱を補正する技術の発達により、43pm（水素原子の約82%）<sup>3</sup>の分解能が達成されている。また、対象試料を瞬間凍結（アモルファス<sup>4</sup>氷により包埋）することによる生体試料の観察も頻繁に行われるようになった。

電子顕微鏡は研究用の形態観察装置として頻繁に利用される一方で、半導体製造における検査の用途でも用いられており、産業分野での市場規模も大きい。日本では大型電子顕微鏡を扱うメーカーが2社あり、日本の産業を牽引してきたエレクトロニクス産業やナノテクなどの部素材産業では、それら国産メーカーの製品を活用した研究開発により国際競争力を保

---

<sup>2</sup>光や高周波、圧力変化、温度変化などの刺激を対象試料に加えること

<sup>3</sup>世界最高記録は、日立製作所により43pmの解像度。これにより、タングステン結晶や窒化ガリウム結晶を原子分解能で撮像。

<sup>4</sup>結晶性を持たない状態

ってきた。しかしながら、試料の前処理等を含め自動化・システム化への対応が遅れていることにより近年シェアが低下している。

#### (研究分野と技術の俯瞰)

電子顕微鏡は真空中で放出した電子線が対象試料を透過、または対象試料で反射する現象などを利用して対象試料の形態情報を得る装置である。特に、電子線透過により高分解能な観察を実現することができる透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy : TEM) は、材料開発の分野における不可欠な形態観察装置である。電子顕微鏡はナノテクノロジーを支える基盤技術として、エレクトロニクス分野、部素材分野で主に利用され、これらの産業分野では、国産の電子顕微鏡の発展とともに日本企業が高い国際競争力を維持してきた。

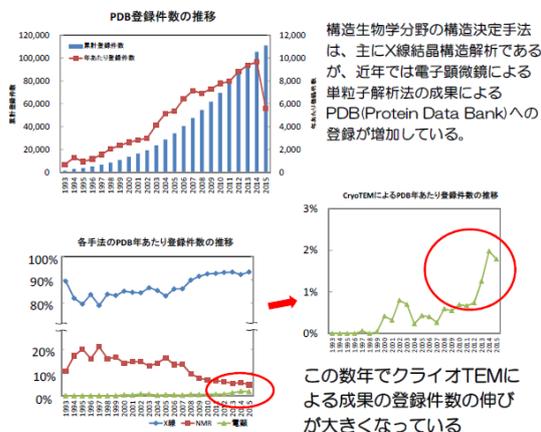
電子顕微鏡は電子線を利用した手法で、真空中に試料を保持する必要があるため、従来、固体材料が主な対象試料であったが、最近では、有機材料の研究にも使用されるようになり、含水試料や硬度の異なる複合材料などが計測可能なクライオ<sup>5</sup> TEM システムへの要求が高まっている。特に、含水試料を瞬間的に極低温下にすることで生体試料中の水を結晶化させずにアモルファスとして凍結する技術 (氷包埋技術) が開発され、生体試料の状態を維持したままクライオ TEM システムで観察することが可能となった。また、このような生体試料は固体試料に比べてコントラストが低いことや分解能が不足しているなどの課題があったが、これらの課題を解決する手法が次々と登場し、さらに多数の異なる角度からの傾斜像を扱う解析技術の開発により、生体試料の構造を電子顕微鏡で解析できるようになり、現在では、得られる生体試料の構造はナノメートルを超える分解能まで達している。この新しいタイプの電子顕微鏡 (クライオ電子顕微鏡 : cryo-electron microscopy) の普及にあたっては、1) 生体試料を瞬間的に極低温にすることで生体試料を常温と同じ状態で固定する技術と、その試料を溶解しないで装置へ導入する技術、2) 装置に導入されている間も振動を生じずに試料を凍結した状態で維持する技術、3) 有機物である生体試料の像を高感度で検出する技術、4) これらの生体試料を扱うプロセスの自動化・システム化技術が必要である。これら要素技術については、一部技術を除いて国内メーカーにおいても技術は獲得されているものの、システム化が進んでおらず、国際競争力は劣っている。また、キーデバイスである高感度直接検出カメラ<sup>6</sup>については、国内に技術がなく、その取得が喫緊の課題である。

<sup>5</sup>液体天然ガスの温度から液体ヘリウムの温度までの低温の範囲を意味する。クライオ TEM の場合には、対象試料を低温下で扱うことができる TEM を意味する。

<sup>6</sup>電子顕微鏡には電子線を直接検出するセンサーが求められるが、国内メーカーは電子線直接露光センサーの技術を保持していない。また、一般向けのセンサーは素子欠陥を補完する機構が組み込まれているため、素子欠陥なく全ての点の信号を精確に検出することが要求される理科学機器には適していない。

# クライオTEM

バイオ医薬品の研究が盛んになり、核酸やタンパク質の年あたりの登録件数は年々増加している。



※ RCSB PDB 統計データ (<http://www.rcsb.org/pdb/statistics/>) を元に文科省にて作成

## ○ 近年の登録件数の傾向について

2007年にIHRSR(Iterative Helical Real Space Reconstruction)が発表されるまでは、電子顕微鏡本体の性能が重要で電子顕微鏡による構造生物学は国産メーカーの電子顕微鏡を使った報告がほとんどだった。しかし、IHRSR発表後の2013-2015では、単粒子解析の成果Top90のうち、日本の装置が使われたものは分解能が88位の1件のみ。

## ○クライオTEMの分野の例

- (1) タンパクやDNA等の構造解析
    - ・X線結晶構造解析やNMRだけではなく、クライオTEMでもタンパクやDNAの構造解析が可能に  
(現在のクライオTEMで決定された構造の分解能の最高記録はFSC 2.2Å)
    - ・一週間程度で膨大な構造解析が可能になる可能性がある。
  - (2) クライオTEMの発表論文数とTEMメーカー
    - ・FEI-クライオTEM 89件/90件 (2013.5~2015.5)
    - ・日本電子-クライオTEM 1件/90件 (2013.5~2015.5)
- ☆研究開発現場に大きな感動を与える戦略  
→創業ユーザーに拡がりつつある。  
→創業開発の現場へ

23

# クライオTEM

## 基本原理

- ・含水試料の瞬間凍結により、アモルファス氷中で構造を保持した生体高分子試料の調製を行う。
- ・瞬間凍結した生体試料の透過電子顕微鏡により観察することで、生体高分子の構造の多角度からの透過像を取得する。
- ・取得した数千から数百万の透過像を投影角度ごとにクラスタリングし、バックプロジェクションにより3次元構造の再構成を行う。
- ・3次元構造再構成の反復により3次元構造の最適化を行う。

## 効果が期待できる研究分野

- ・生理活性タンパク質の構造解析 (脂質膜中タンパク質、糖タンパク質、抗体等)
- ・生理活性物質と作用物質の複合体解析 (イオンチャネル、分子チャネル、情報伝達などの機能解析)

## 産業応用が期待される分野

- ・バイオ医薬品開発  
バイオ医薬品生理活性発現の機構解析、バイオ医薬品副作用の活性部位解析、バイオ医薬品の修飾部位検討 (活性向上、副作用抑制)
- ・低分子医薬品開発  
低分子医薬品薬理活性発現の機構解析

## 必要となる要素技術

- ・凍結試料作成技術 (瞬間凍結、凍結試料切削) ・凍結試料搬送技術 (クライオトランスファー) ・凍結試料撮像技術 (クライオステージ) ・除振技術 ・制振技術 ・電子線位相差技術 ・高感度検出技術 (直接検出カメラ) ・画像抽出技術、画像分類技術
- ・3次元像再構成技術 ・3次元像最適化技術

## 今後開発が期待される技術・システム

- ・生体試料の前処理から撮像までを簡便に行う。(システム化)
- ・撮像した大量画像の自動解析ソフトウェア

## その他の波及効果

- ・再生組織等の3次元形態解析
- ・無機材料や高分子材料の撮像における試料ダメージの軽減

20

電子顕微鏡は研究分野での使用だけではなく、生産現場でも検査装置として使われているが、微小加工技術の発展に伴い、従来の理科学機器で求められていた機能とは異なる高度な自動化が必要となってきている。例えば、生産ラインから自動的に試料抽出を行い、検査後

に自動的に生産ラインへ戻すような、生産設備と一体となり連携して稼働する自動化された検査システムが求められるが、これに国内メーカーは対応できておらず、シェアの低下につながっている。また、品質検査用途の市場規模は基礎研究用途の市場規模と同程度だが、海外メーカーは検査用機器の利益をハイエンドの研究用機器の開発投資に循環させており、研究用の先端的な技術開発においても日本メーカーの国際競争力の低下が懸念される。

FIB-SEM/TEM

**基本原理**

- ・ 金属先端の液体金属（ガリウム等）に電界を印加することでイオンを引き出し、引き出したイオンを電圧により加速しビームとして放出する。
- ・ 放出されたイオンが対象試料の表面に衝突することで、表面の原子がはじきとばされるスパッタリング現象により試料を削る。
- ・ 放出するイオンビームはアパーチャーや集束レンズにより収束イオンビームとし、さらに偏光器により特定部位にイオンビームを収束させることができる。
- ・ イオンビームが衝突した際には、二次電子も放出され、同時に二次電子像を得ることができる。
- ・ イオンビーム照射部位近傍に吹き付けた化合物ガスが二次電子のエネルギーにより分解され、固体成分が試料表面に蒸着する。

**効果が期待できる研究分野**

- ・ 無機材料の超微細加工による界面構造解析
- ・ 無機材料の超微細加工による3次元構造解析
- ・ 有機材料の超微細加工による構造解析
- ・ 有機材料の超微細加工による3次元構造解析

**産業応用が期待される分野**

- ・ 半導体の欠陥検出
- ・ 固体材料の超微細加工
- ・ 固体材料の表面加工

**必要となる要素技術**

- ・ イオン銃 ・ 磁界レンズ ・ 静電レンズ ・ 高電圧回路 ・ 微小機械制御技術 ・ 半導体検出器

**今後開発が期待される技術・システム**

- ・ マルチスケール観察（FIB-SEM分解能の観察とTEM分解能観察のシームレス化）
- ・ 試料前処理の自動化

**その他の波及効果**

- ・

25



文部科学省 MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS,  
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

## （２）光学顕微鏡

### （概観）

光学顕微鏡は対象試料に照射した光の透過・反射・吸収・散乱・屈折・回折などの現象を観察することで、対象試料の形態観察や顕微分析などを行う装置である。可視光による観察では、アッペの回折限界<sup>7</sup>である光の半波長程度より小さいものは物理的に観測が不可能と考えられていたが、蛍光技術やレーザー光源の発達により回折限界を超えた解像度が実現（超解像蛍光顕微鏡）しており、昨年度のノーベル化学賞の受賞となったのは記憶の新しいところである。<sup>8</sup>また、近年ではコヒーレントレーザー技術が進歩することにより、非線形

<sup>7</sup> ドイツの物理学者であるアッペにより 1873 に報告された光による形態観察の分解能の限界

<sup>8</sup> 2014 年のノーベル化学賞は、超解像蛍光顕微鏡の開発が評価されエリック・ベッチグ氏、ステファン・ヘル氏、ウィリアム・モーナー氏の 3 氏が受賞している。

光学効果の観察が可能になり、主にライフサイエンス分野において不可欠な計測装置となっている。光学顕微鏡市場は、長らく光学レンズ技術を持つメーカー4社の寡占市場（うち下位2社が日本メーカー）となっているが、新興企業による新しい分析技術と組み合わせた機器開発が盛んとなり、日本メーカーも対応が求められている。

#### （研究分野と技術の俯瞰）

光学顕微鏡には明視野顕微鏡、位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡などの試料形態を観察する顕微鏡、蛍光顕微鏡などの化学的、生物学的に標識された物質の分布を可視化する顕微鏡、<sup>9</sup>赤外吸収やラマン散乱などの分子振動を可視化する顕微鏡などがあり、それぞれ、マテリアルサイエンス分野、ライフサイエンス分野、有機材料分野などで主に用いられている。近年ではレーザー光源に関する技術が進歩することにより、非線形光学効果の観察が可能になり、二光子顕微鏡、CARS/SRS 顕微鏡、光音響顕微鏡のように生体組織の観察を得意とする顕微鏡<sup>10</sup>が多く登場している。さらに、近接場顕微鏡、超解像蛍光顕微鏡のように、従来の光学顕微鏡の回折限界を超えた解像度で試料を観察できる顕微鏡も登場し、ライフサイエンス分野などで用いられている。特にレーザー光源と蛍光プローブ分子の発光との相関を利用した超解像蛍光顕微鏡はライフサイエンス分野において応用研究が活発であり、新たな光学効果（モダリティ）が日々開発されている。また、顕微ラマン分光や顕微赤外分光等、分子振動の分析能力を有する顕微鏡は、形態観察に加えて物質情報も取得可能であり、有機材料開発の分野で用いられている。このように光学顕微鏡は幅広い分野で活用されている。

これらの光学顕微鏡は数万円の学生実験で使われるものから数千万円の一分子計測を可能にするものまで多くのバリエーションがあり、これまで市場はほぼ4社（上位2社は海外メーカー、3位と4位は国内メーカー）で占められていたが、超解像蛍光顕微鏡などによるライフサイエンス分野での研究開発が活発化することに伴い、ライフサイエンスで使われる他の分析技術を保有していた海外メーカーが市場へ参入している。また、上位2社の海外メーカーも知財戦略やM&Aによりライフサイエンス市場での競争力を向上させており、新しい手法による光学顕微鏡の技術開発を先行させている。

---

<sup>9</sup>光学顕微鏡には、光の検出方法により多くの光学顕微鏡に分類される。最も古典的な透過光の強度により観察を行う明視野顕微鏡、透過した光と対象試料を透過しなかった光との位相の差を像のコントラストとして観察する位相差顕微鏡、透過した光の偏光干渉により干渉色のコントラストを像につけて観察する微分干渉顕微鏡、透過した際に発光する対象試料の蛍光を観察する蛍光顕微鏡、対象試料を透過する赤外線吸収により像のコントラストを観察する赤外顕微鏡、対象試料を透過する光のラマン散乱により像のコントラストを観察するラマン顕微鏡などがある。

<sup>10</sup>対象試料の観察部位に同時に2個の光子を吸収させることで半分の波長の光で観察するのに相当する分解能を得る二光子顕微鏡、二つの光源によるコヒーレント反ストークス散乱を像として観察するCARS、対象試料のラマン散乱光と同じエネルギーの光を照射することで起こる誘導放出を観察するSRS 顕微鏡、対象試料が吸収した光エネルギーが熱エネルギーとして放出される際に発生する音波を観察する光音響顕微鏡などがある。

光学顕微鏡は、超解像蛍光顕微鏡の登場で、空間分解能の理論限界は取り払われたことにより更なる発展が期待されている。一方で、試料や蛍光標識がもたらす制約があるため、今後も装置だけではなく、標識技術、画像処理技術の改善が求められる。

光学顕微鏡は分光技術との融合が容易であり、振動分光学や非線形分光学を取り入れ、物質分析を行いつつ画像計測が可能であるという利点がある。この分析能力をさらに高める方向性、たとえば超解像化（従来の超解像蛍光顕微鏡は蛍光観察のみ）による分析能力の向上がその発展として考えられる。このような分析顕微鏡は特に、有機材料やデバイス開発への活用が多く見込まれる。

また、光学顕微鏡は、試料への侵襲性が低く、生きた試料の時間変化を観察できるという、他の手法に無い利点を持っており、この利点を伸ばす方向で開発を進める必要がある。そのためには、侵襲性のさらなる低下（非侵襲標識技術の開発、無標識観察技術の開発）、および生体の立体構造を観察するための3次元観察技術（内部観察技術）が必要である。非侵襲、3次元、経時観察はそれぞれ実現されているが、これらを同時に可能とする技術は開発されていない。今後、iPS/ES細胞等を活用した再生医療工学では、細胞が材料として工学的に活用され、その材料の評価には、生きたままかつ非侵襲に観察・分析する必要があるが、それが可能な計測技術はまだ確立されておらず、今後の課題である。

## 光学顕微鏡

### 基本原理

- ・試料に光を照射した際に生じる光吸収、光散乱、発光、音波発生といった光学効果を利用して試料の形態情報を得る。（空間分解能や観察深さなどの特徴、物質分析能力などの機能は使用する光学効果により大きく異なる。）
- ・観察対象の生体分子を蛍光プローブなどのプローブ分子で標識し、そのプローブ分子の発光を捉えることで生体観察する。（生体観察を繰り返すことで、タンパク質等の3次元的な空間分布の経時変化を捉える。）
- ・照射する光や検出する光学効果に変調を加える、あるいは、分子のエネルギー遷移状態をコントロールすることで空間分解能を超解像化する。
- ・ラマン散乱や高調波発生などの光散乱効果から、材料中の分子の振動分光解析および界面構造／状態の情報を取得する。

### 効果が期待できる研究分野

- ・生物学、基礎医学 ・医学（診断、治療、再生医療） ・薬学 ・半導体工学 ・材料工学 ・畜産 ・植物学

### 産業応用が期待される分野

- ・医療、創薬、各種材料、デバイスの分析（太陽電池、二次電池、カーボン材料等）

### 必要となる要素技術

- ・高ダイナミックレンジ、より高速、低雑音な光検出器 ・高出力光源や多波長（短波長、長波長、可変波長など）光源
- ・マルチスケール観察技術、マルチモーダル観察に適した光学素子（レンズ、フィルター、高スループット分光素子等）
- ・生体試料の自動調整、撮像／画像処理技術 ・他の観察技術との協調／連携制御技術
- ・標識技術：強度の高い信号光を生じるプローブ分子開発。超解像や長波長発光、環境センシング、機能発現、生体刺激などの機能性をもつプローブ分子開発。

### 今後開発が期待される技術・システム

- ・超解像蛍光顕微鏡の発展：さらなる空間分解能の向上、蛍光プローブなどのプローブ分子を必要としない超解像技術、および、非侵襲性が向上した超解像技術。
- ・外部環境変化や薬剤等の各種刺激に対する細胞応答のスクリーニング等に適用可能な高スループット観察技術
- ・分析顕微鏡：生体分子や材料、デバイス等を対象とした形態情報取得と分析を同時に行う計測システム、より観察深さを深くした内部観察技術（可変波長光源や透明化技術など）
- ・マクロ（生体機能やデバイス特性等）の情報とマイクロ（生体分子／細胞や材料品質／特性等）の情報をシームレスに観察／取得可能なマルチスケール技術
- ・材料の経年劣化、病変等の長いタイムスパンで発生する現象を追跡しつつ発生頻度の少ない重要な現象を捉えるマルチタイムスケール観察技術

### その他の波及効果

- ・開発に伴い得られる微細な空間での光と物質の相互作用に関する知見は、微細加工や記録、材料の特性制御の技術開発へも波及効果があり、新しい機能や特性を持つ新規デバイスの開発に繋がる。
- ・顕微鏡技術がマイクロfluidics等の化学デバイスの研究開発へ利用されることで、バイオセンサー、環境センサー、診断を行う微小なデバイスの開発、高度化が促進される。

## 2. 3. 2 バルク<sup>11</sup>分析手法

表面や微小部だけではなく、計測対象の試料全体の物理特性を得るために使われる手法がバルク分析手法である。

バルク分析手法には、物理刺激として透過性の高い電磁波や光（試料の光透過性が高い場合）、X線（試料の密度が小さい場合）を印加する手法と、質量分析や燃焼分析などのように試料全体を均等に計測できる状態にする手法がある。また、透過性の高い物理刺激を用いる場合には非破壊の計測手法であることが多い。バルク分析手法についても、実際に観測する応答がどのようなものかによって得られる情報が違うため、計測対象の試料と取得したい情報によって使われる計測機器が異なる。

### （1）核磁気共鳴

#### （概観）

核磁気共鳴法とは、対象試料に含まれる原子核の核磁化を検出する手法である。原子核の核磁化と周辺の原子核の核磁化や周辺の電子の磁化は互いに相互作用するため、核磁気共鳴法により得られる情報には分子の化学情報が反映され、分子の原子核や電子の状態を分析する手法として普及した。現在では周辺技術との組み合わせにより試料の形態情報や物理的特性などの情報まで得ることができる、非常に適用分野が広い計測手法となっている。先端的な研究に利用される高分解能核磁気共鳴装置の市場は寡占が進んでおり、システム化された核磁気共鳴装置を扱うメーカーは世界で2社のみであるが、市場シェアの高い海外メーカーに対して、一方の国産メーカーは、国内の化学工業等の合成低分子を対象とした研究分野では競争力が高いものの、市場の大きいライフサイエンスを始めとするその他の分野では後塵を拝している。

#### （研究分野と技術の俯瞰）

核磁気共鳴法は従来から石油化学やファインケミカル、香料、化粧品、低分子医薬品などの化学工業分野で化学構造を含む分子構造を解析する必須の手段とされてきた。日本の化学企業は多くの分析装置を利用した研究開発により国際的な競争力を獲得し、高度経済成長期の石油化学を中心とする化学工業分野の発展には、核磁気共鳴装置の国産メーカーが貢献し

---

<sup>11</sup>バルクとは、試料全体を指し示す意味で使われる用語であり、試料の表面などの微小部に対する用語として使われる。バルク分析手法とは、計測対象の試料の表面ではなく、試料全体に対する物理量などを計測することで分析を行う手法である。

た。また、学術研究分野でも、多数の日本人の有機合成化学者がノーベル賞を受賞しているが、それらの受賞者のほとんどは国産の核磁気共鳴装置を研究に利用してきた。

現在では、周辺技術の開発により、核磁気共鳴法により計測できる対象試料の多様化が進み、特にタンパク質や核酸などのバイオ系と四極子核<sup>12</sup>を多く含む無機材料系の分野など、より広範な分野へ適用が広がっている。しかしながら、ライフサイエンスを始めとする新しい適用分野では新規参入した海外メーカーが市場を占有し、さらに、その分野の研究コミュニティの囲い込みが進んだ結果、国産メーカーは化学工業分野以外での競争力で大きく遅れをとっており、研究分野においても、海外メーカーと提携した海外ユーザーが先端的な成果をより早く達成するという状況が世界的に続いている。特に、欧州においては、EUの科学技術に関する中長期計画であるフレームワークプログラムに基づき核磁気共鳴施設のネットワーク構築が進められており、調達政策と連携した先端装置開発がメーカーの技術開発力の源泉となっている。

今後の技術動向として重要なのは、計測時間を短縮するための高感度化技術であるが、高感度化の達成には、いくつかの異なるアプローチがある。そのうち最も多くのユーザーに恩恵が期待出来るのは高温超電導材による超高磁場超電導磁石の実現で、有機・無機、および、溶液・固体のいずれの計測にも効果があるが、超伝導接合などの要素技術の確立が不十分で、装置コストも非常に高額になると予想される。その他の高感度化技術として注目を集めているのは超偏極した電子スピンを利用して核スピンの超偏極化を行う動的核偏極（DNP）技術で、既に通常の装置の500倍程度（理論的には10,000倍から40,000倍）の感度を達成したという報告もされており、試料ごとの複雑な操作が体系化されれば普及の可能性はある。また、検出部を極低温下におくことで熱雑音を低減する技術は、検出対象（周波数）ごとに異なる検出回路を用意する必要があるが、技術としては実用化の最終段階で、計測時間を短縮するための高感度技術として、より広範な計測対象への適用が望まれる。

また、高分解能の核磁気共鳴装置は試料を導入する超電導磁石内の空間が限られるが、一般的な超電導磁石と異なる磁石を用いることによる、より多様な計測対象試料のユーザビリティを向上させたシステムについても研究発表が増えている。

例えば、高磁場の磁石生産技術を応用した磁石内の空間が広いワイドボアタイプマグネット／スーパーワイドボアマグネットを使うことで、より大きな形状の試料を計測対象にしたり、広い空間を利用して試料周辺に光照射や応力印加、電場印加、勾配磁場印加などの機構を組み込むことで、より広い範囲の試料と物理刺激に対する応答を計測対象とするようなことも増えている。

---

<sup>12</sup>核スピンの1/2より大きい値を持つ核種。核磁気共鳴現象のエネルギー遷移過程が複数の過程があるため、検出される信号が複雑になる。

その他にも、従来の冷媒を使った超電導磁石とは異なる小型の磁石を利用することで、可搬型システムや周辺スペースを必要としないモニター型システムなどの開発が活発に行われている。

核磁気共鳴法では、新規の対象試料を計測するためのソフトウェア技術も重要であり、ハードウェアとあわせて適切なソフトウェア技術を実用化することが求められる。核磁気共鳴法のソフトウェア技術としては、従来から高周波や勾配磁場の制御をシーケンスとして処理するための技術開発が行われてきたが、近年では非等間隔でのサンプリング制御（圧縮センシング）や非等間隔離散データの解析技術、計測信号を同じ状態へ保つための装置制御や装置最適化、補正計算技術など、開発対象になる範囲がより広範になっており、非等間隔でのサンプリング制御は計測時間が限られた *in vivo*<sup>13</sup>計測（*in cell* 細胞内タンパク質計測や *in situ* 植物代謝計測）やMRI などへの展開も進んでいる。

## 核磁気共鳴

**基本原理**

- ・静磁場中に対象試料を置くことでゼーマン分裂現象を起こし、その分裂に相当する高周波エネルギーを照射する。
- ・ゼーマン分裂に相当するエネルギーが吸収され、そのエネルギーが高周波として放出される。
- ・放出された高周波を検出し、周波数変換することで対象の信号周波数を解析する。
- ・高周波吸収から検出までの過程で高周波や磁場へ変調を付与することで、化学状態や形態情報などを付加情報として取得する。

**効果が期待できる研究分野**

- ・有機化学（合成化学、天然物化学、錯体化学）、生化学（構造生物学、分子生物学、植物科学、食品化学、脂質工学、糖鎖工学）
- ・無機化学（材料化学、結晶学）、形態解析（建築、材料）、量子コンピューター
- ・医科学（抗体医薬、代謝、組織形態研究）

**産業応用が期待される分野**

- ・化学工業（ファインケミカル、化粧品、香料、洗剤、高分子、接着剤）
- ・各種機械（無機材料開発、高分子材料開発、電池開発、電子デバイス開発）
- ・バイオ/低分子医薬品開発（医薬品生理活性発現の機構解析、バイオ医薬品副作用の活性部位解析、バイオ/低分子医薬品の修飾部位検討）
- ・医科学（代謝、組織形態研究）

**必要となる要素技術**

- ・高速化に関連する要素技術（高温超伝導材料開発、高温超伝導材料生産技術、超伝導接合、高電圧制御、磁場補正技術、テラヘルツ照射/制御技術、自動試料搬送、微小試料高速回転技術、極低温検出技術、高周波高速制御技術、離散データ解析技術、自動調整/最適化）
- ・ユーザビリティに関連する要素技術（定量、自動試料搬送、自動調整/最適化、高安定性、ワイドボア超電導磁石、小型化、可搬性）
- ・高分解能化に関する要素技術（高温超伝導材料開発、高温超伝導材料生産技術、超伝導接合、高電圧制御、磁場補正技術、微小試料高速回転技術、高周波高速制御技術、離散データ解析技術）

**今後開発が期待される技術・システム**

- ・超高磁場による高感度化・高均一磁場補正技術による高感度化・DNP技術による高感度化・高速回転技術による高感度化・極低温検出による高感度化
- ・高周波高速制御による磁化遷移効率化・圧縮センシングおよび非線形解析による高効率サンプリング技術・自動計測/自動解析システム
- ・広範囲試料を対象としたワイドボアシステム・可搬型システム

**その他の波及効果**

- ・質量分析計等の他の分子スペクトル計測機器との連携システム

43

<sup>13</sup> *in vivo* : 生体内での状態、*in cell* : 細胞内の状態、*in situ* : 計測対象のものが本来の機能を発現している状態

## (2) 質量分析

### (概観)

質量分析は、対象試料に含まれる化合物、または開裂したフラグメント<sup>14</sup>をイオン化して、その分子量（質量）を計測する手法である。無機物および有機物をイオン化する技術は多様にあるため、広い対象の化合物の分子量や開裂したフラグメントの質量を計測することが可能で、化合物の分析には必須の技術である。質量分析計は従来から広い分野で使われていたが、特に近年では、メタボロミクスやプロテオミクスなどの生体の網羅的機能解析やリキッドバイオプシーの臨床検査などへの応用が行われており、データベースと連携した新しいビッグデータ解析技術についても頻繁に成果が発表されるようになった。学術研究分野での手法開発は国内でも盛んに行われており、形態情報を維持したまま質量分析を行う質量顕微鏡や一細胞での計測技術などの新しい国産技術が登場している。一方で、製品システム化については海外メーカーが先行している状況であり、日本発のソフトイオン化<sup>15</sup>などの技術があるにもかかわらず国産メーカーの国際競争力は高いと言えない状況である。

### (研究分野と技術の俯瞰)

質量分析計は主に試料前処理技術、イオン化技術、分析技術、検出技術などの組み合わせの違いにより多くの異なる質量分析計に分類されるが、その中でも特に試料前処理に液体クロマトグラフィ（LC）<sup>16</sup>を用いた LC-質量分析計（MS）は頻繁に利用されており、質量分析計の市場のうち最も大きい市場である。また、分析部については、LC-MS の分析部としてトリプル四重極型<sup>17</sup>のものが多く利用されているが、高分子量の定性分析などについては、より質量精度が高いオービトラップ型<sup>18</sup>や TOF 型<sup>19</sup>などが使われている。

この分野での国産メーカーの国際競争力は海外メーカーに遅れをとっている状況で、日本発のソフトイオン化法を製品に実装している MALDI-TOF の市場でもシェアが4分の1程度である。特に近年のライフサイエンスに関するニーズは大きくなっているが、質量分析計をライフサイエンスに適用する際には微量試料などの計測を可能にする高感度化が重要である。高感度化には多くのアプローチがあるが、その中でも複数の化合物が含まれる試料の中から

---

<sup>14</sup>分子が開裂し断片化したもの

<sup>15</sup>対象化合物のイオン化時に、分子の開裂をおさえてイオン化する方法。代表的なソフトイオン化法として、イオン化を補助するマトリックス材を対象試料と混合し、レーザー照射により印加した光エネルギーで試料をイオン化する MALDI 法などがある。

<sup>16</sup>充填剤を詰めた筒状の容器に溶液試料を流し、流れ出す時間が化合物と充填剤との親和性の違いにより異なる現象を利用して試料を精製する方法

<sup>17</sup>二つの四重極（イオンを4本の電極間を飛行させる方法）とその間のイオンを衝突させる部分とで構成される質量分析計のイオン分析部

<sup>18</sup>二つの異なる電位を持つ電極間でイオンを電子軌道のような軌道で運動した状態で捕獲する機構

<sup>19</sup>電場や磁場の中を飛行するイオンの飛行時間が質量に依存することを利用したイオン分析機構

ターゲットの化合物だけを抽出する試料前処理分離技術やターゲット化合物を高効率でイオン化する技術、さらに検出器自体の感度と分解能をあげることが望まれている。高感度化が達成されると、バイオマーカー探索や微量代謝物の検出など質量分析計を適用できる分野が大きく広がることが期待できる。また、ライフサイエンス分野への質量分析計の適用が進むと、質量分析計で処理しなければならない試料が膨大になる傾向が大きく、試料前処理やイオン分析技術、検出だけではなく、試料の準備から自動解析、結果判定までを含めたトータルスループット（一つの試料の準備から結果を得るまでの時間）を向上させる高速化技術が必要になる。その他に、技術開発が遅れているオービトラップを含む静電共鳴型やFT-MS（フーリエ変換（Fourier transform）質量分析計）などの静磁場共鳴型の質量分析計については、最高質量精度が必要な学術研究では海外メーカーの装置を使うしかない状況である。今後は、高速読みだしが可能な高感度センサーを実装した高質量精度の計測技術が求められる。一方で、形態情報を維持したまま計測を行う質量顕微鏡や一細胞から細胞質を抽出して計測する技術など、国内の研究成果として新しい要素技術が発表されている。特に質量顕微鏡はMALDI型のものがすでに製品化されており、生体組織を対象とした学術研究でも利用されているが、イオン化のビーム径の最適化などが必要である。

## 質量分析

### 基本原理

- ・計測対象分子をイオン化する。
- ・イオン化した粒子を電場または磁場により質量で分離する。
- ・分離したイオンを検出する。

### 効果が期待できる研究分野

- ・有機化学（合成化学、天然物化学、錯体化学）、生化学（構造生物学、分子生物学、植物科学、食品化学、脂質工学、糖鎖工学）
- ・無機化学（無機元素定量、同位体解析）、形態解析（合成高分子、生体試料）
- ・医科学（抗体医薬、代謝、組織形態研究）

### 産業応用が期待される分野

- ・環境（水、土壌、大気） ・食品（農薬、動物薬、アレルゲン ダイオキシン 機能性食品 産地偽装捜査） ・法医学（乱用薬物）
- ・化学工業（高分子、ナノ材料、ファインケミカル、高機能性材料、半導体、化粧品、香料、洗剤、接着剤、触媒）
- ・バイオ／低分子医薬品開発（医薬品生理活性発現の機構解析／速度論解析） ・医科学（代謝、組織形態研究、生体メカニズム）

### 必要となる要素技術

- MSとしての技術
- ・試料イオン化に関する要素技術（イオン源、高電圧制御技術、ネブライザー）
  - ・イオン分離技術（電磁場制御、高周波技術、精密加工、イオン検出器）
  - ・データ解析技術（データベースサーチ、フラグメント解析、同位体解析、統計解析）
- 分析する上で必要な技術
- ・試料誘導体化に関する要素技術（有機合成）
  - ・試料分離に関する要素技術（GC, CE, LC, SFC）

### 今後開発が期待される技術・システム

- ・より広範囲の対象試料を扱うことができるイオン化技術
- ・より広範囲の質量範囲を高精度で、高速に分析するイオン分離分析技術
- ・ユーザビリティ（簡便な試料および装置の操作、画一的な操作、計測自動化、解析自動化、データマイニング、ポータビリティ、保守性など）

### その他の波及効果

- ・対象試料が広範囲になり操作が自動化することによる他の分析機器との連携
- ・より高度なイオン化の制御によりイメージングの高精細化

57

### 3. 政策連携

#### 3. 1 背景

JST 先端計測分析技術・機器開発プログラムにおいて、政策効果を高め、限られた資金でより高い政策効果を上げるには、その目標を絞り込むとともに、他の政策との連携を深めることが有効である。10年にわたる本プログラムの成果として開発された機器が JST 基礎研究部門のプログラムに採択された例も多くあり、本プログラムの使命である、日本の研究基盤を支える基盤技術として先端計測分析技術を開発していくことが実現していると言える。この他、新たに開発された機器の試行に関しては、共用プラットフォームとの連携が、特に、研究ニーズの汲み取りやメーカーへのフィードバックの観点で有効である。その効果として、既設のプラットフォームの中核機関において、メーカーとの連携拠点が設置されたことから有効性が示されている。ただし、産学連携の観点からは、他の新技術育成事業との区別がつきにくいという側面もあり、単なる技術育成（製品化、企業化）だけでなく、基盤技術も育成するという観点をより強化していく必要がある。その際、民間にできることは民間に任せる点から、単なる試作機の開発費の肩代わりとならないよう、市場と研究動向の両方を見極める必要がある。関連する事業の多くは JST が実施主体となっていることから、JST の新たな中期目標期間に向けた議論とともに、他事業との連携を深め、戦略性を高めていく必要がある。

#### 3. 2 共用プラットフォーム政策

文部科学省では、平成 14 年度からのナノテクノロジープラットフォーム事業、平成 19 年度からの先端研究施設共用イノベーション創出事業（平成 25 年度より、先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業）を通じて、研究施設設備の共用促進、プラットフォーム化を図っている。本年度の JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム事業では、先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業と連携した公募を実施しているが、その採択状況等も踏まえて、今後とも、政策効果を高める連携を推進していくべきである。プラットフォームとの連携により、プラットフォーム側としては研究開発基盤の高度化の加速、開発者側としては技術の実用化の加速、というプログラム間の相乗効果が期待され、プラットフォームに多くのユーザーを惹きつけることにもつながる。中長期的には、プラットフォームにおける機器の新陳代謝と新たな機器開発が連携することにより、新たに開発された機器の初期需要の創出とともに、先端的な研究開発基盤を維持していく仕組みを構築していくことが重要である。

なお、プラットフォームは中核機関とメーカーとの連携拠点<sup>20</sup>による積極的な活用が進んでいるところである。

---

<sup>20</sup>例として、日本電子（株）はナノテクノロジープラットフォームに参加している東京大学大学院工学系研究科総合研究機構との東京大学－日本電子産学連携室を開発拠点として10年にわたる連携の中で様々

### 3. 3 JST 事業

JST 先端計測分析技術・機器開発プログラムにより開発された機器は、JST 戦略創造事業など先端的な研究現場で使われている事例は多くある。また、JST により支援される研究プログラムの中で、研究目標を達成するために開発され、その後、製品として市販化された例もある。このように、先端研究の現場では、高い研究目標の設定が機器開発自体を促す側面がある。先端的な計測機器が研究に不可欠な要素であるため、研究を進める中で機器の開発が行われることもあるが、JST では機器開発の産学連携プログラムも実施している。これらとの連携を深めることは政策効果を高めることにもなり、必須である。また、戦略目標に従って一定の研究領域が対象となる場合、その領域に共通する計測技術を、関連するプログラム全体を通じて支援することは、研究の効率的かつ効果的な支援に繋がる。さらに、それらの計測技術や機器がプラットフォームに繋がれば、研究振興と研究基盤の両方の支援に繋がる。

さらに、開発する機器が、大学発の技術シーズに基づく場合には、JST における研究成果展開事業などの活用も考えられる。特に、全く新しい技術について、市場の規模などから大企業では事業化がされない場合、事業の担い手としてベンチャー企業などが期待されるが、そのような場合に、JST の他の事業との連携により、機器開発と起業化を合わせて支援することも考えられる。

このように、機器開発プログラムとその他の JST 事業との連携は、政策効果を高める余地が十分にあると考えられ、次期中期目標に向けては、より政策効果を高めるよう、事業の壁を越えて、ゼロベースでの検討を行うことが期待される。

### 3. 4 その他（調達、標準化等）

計測技術・機器開発においては、出口戦略として、機器の調達政策との連携が期待される。欧州の PCP (Pre-commercial Procurement) 等、調達とイノベーションを結びつける政策があるが、機器開発においても調達政策を活用することにより、政策効果が高まることが期待される。前述の共用プラットフォームの活用も視野に入れる必要がある。また、計測機器が競争力を持つためには、計測と密接な関係にある標準化が重要である。計測技術について共用プラットフォームなどで実績をつくり、標準化へのアプローチとするため、今後は標準化について経済産業省や（国研）産業技術総合研究所などとの政策連携も期待される。

---

な成果を上げている。また、同じくナノテクノロジープラットフォームの中核機関である物質材料研究開発機構とは、NIMS-JEOL 計測技術研究センターを、NMR 共用プラットフォームの中核機関の一つである理化学研究所とは、理研 CLST-JEOL 連携センターを設置し、ユーザーからのフィードバックを機器開発に活用している。

#### 4. 今後の課題

このような先端計測分析技術の技術俯瞰については、審議会においても初めての試みである。今回は、電子顕微鏡を始めとする4手法を中心に検討を重ねたが、俯瞰の方法は完全なものではなく、特に、今回の調査対象ではなかったが、光（放射光、X線回折）に関する分野や全く未知の計測手法については検討を進め、引き続き、エビデンスベースの政策立案に資する先端計測分析技術の俯瞰、動向について、委員会において知見を蓄積していく必要がある。

また、俯瞰により抽出した課題に対し、どのように対応していくか、具体的な戦略策定が求められる。本報告書でも、日本の技術、メーカーの置かれた状況を分析しているが、国際的な競争環境の中で、重点化すべき課題は何か、また、どのような戦略を立てていくか、さらには、政策を連携させたより効率的効果的な支援は何か、具体的な戦略策定に向けて、委員会においても引き続き、議論を続ける。

さらに、戦略の実行に当たっては、委員会においても、適時にフォローアップを行うとともに、機器開発者、機器の利用者である研究者等の関係者が戦略を共有し、必要に応じて見直していけるよう情報発信等に努めていく。