

CRDS-FY2007-IC-05

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTC GCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC T CTCAGACC

先端計測技術分野
科学技術・研究開発の国際比較
2008年版

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011

平成 20 年 2 月



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

**先端計測技術分野
科学技術・研究開発の国際比較
2008 年版**

Executive Summary

計測を制するものは、科学技術および先端産業を制するといっても過言ではない。かつては主要な計測・分析装置の世界市場に大きなシェアを占めていた日本の地位低下を回復するため、文部科学省では先端計測事業を開始し、(独)科学技術振興機構(JST)がその実施を推進している。米国でも、商務省国立標準技術研究所(NIST)が中心となってまとめたレポートでは、「21世紀のものづくりや生活の質を変えるカギは計測技術にあり、国の計測インフラの確保が世界的な競争力維持には不可欠である」との認識が表明され、産学官が連携して本気で取組むようよう求めている。¹

このような状況を背景に、JST 研究開発戦略センター(JST / CRDS) 計測・産業技術グループでは、先端計測技術分野に係る JST の新たな研究開発戦略の立案、および各界への情報提供を目的として、以下の調査を実施した。

- 「科学技術シーズを産業につなぐための先端計測」ワークショップ(2008年1月開催)
- 欧米中韓各国の研究開発・産業展開状況と我が国の当該状況とを比較するベンチマーク調査(本報告書)

上記調査の結果、先端計測技術分野全体について、欧米および我が国など、研究および技術水準と産業競争力の進んでいる国々が先行しているが、新興の中国、韓国、インド、台湾も急速に追いついてきていること、また、研究開発として以下のような大きな流れがあることが浮き彫りとなった。

- (1) 従前の各個別の計測機器の研究開発から、複数の機器の有機的組合せによる複合計測機器の開発
 - (2) 前処理技術や試薬、データ解析や利用のためのソフトウェアといった周辺技術の向上によるシステムとしての計測性能の向上
 - (3) 国家プロジェクトによる大型研究施設での計測限界への挑戦
 - (4) ナノ新物質、医薬など安全性の事前チェックを迅速に実行する検査・計測
 - (5) 科学技術上の新たな発見や理論的予言を検証する計測新技術とその応用
 - (6) 計測・測定グローバル化に伴う計測情報の高速処理、共通化、高度な活用に関する情報技術(インフォマティクス)と計測技術の国際標準化戦略
- (1) については、たとえば、低倍率像から観察場所を選んで原子・分子を

¹ NIST Special Publication 1048: <http://usms.nist.gov/usms07/index.html>

観察することを可能とする光学顕微鏡と SPM（走査プローブ顕微鏡）の組合せ、熱分析と X 線回折や赤外吸収などとの複合機などを挙げることが出来る。

(2) については、熟練技術が必要なため、TEM（透過型電子顕微鏡）の一般化を妨げていた試料薄膜化への集束イオンビーム技術の導入などがある。また、質量分析器などの多くの汎用機器で、一般の研究者などが装置を選ぶ基準は、装置性能よりも使い易さを決めるソフトウェアであるとの指摘がなされており、周辺技術と一体になった開発が重要である。我が国においては、個別の機器では欧米に比肩しているものの、機器製造メーカーとユーザーとの間に距離感があるため、ソフトなどを含んだ総合力で劣っているものが多く、市場シェアの弱体化が懸念される。

(3) については、我が国は、たとえば、全世界の 2 割強の数の放射光施設が稼働しており、中性子科学でも J-PARC の運用開始後には欧米と十分に肩を並べられるといった状況にある。また、放射光施設などは、欧米が蛋白質解析など製薬関連での利用に限られているのに対して、我が国ではエレクトロニクス等の広い産業分野で利用されている。ただし、このような施設で真に重要な成果を挙げるためには、人的資源の集積と共に欧米における類似施設のように関連研究施設を集合し総合研究拠点を形作るといった工夫が必要であろう。

つぎに、種々の分野で欧米各国が国策的に推進しているにも拘わらず、我が国の対応が弱いとされているものとして、

(i) 技術や装置の国際標準化

(ii) 開発された機器の初期需要を創出する政府調達などの仕組みが挙げられる。

いずれも、今後、先端計測機器分野における我が国の存在感を増大させるには重要な事項であり、長期的な戦略を持って取り組んでいく必要がある。

中韓は、未だ日米欧のキャッチアップを目指している段階であるが、特に中国では、海外で活躍している研究者の帰国などによって、今後研究開発水準が向上すると思われる。

目 次

1 目的及び構成	1
2 国際技術力比較	5
2.1 近接プローブ技術分野	7
2.1.1 概観	7
2.1.2 中綱目ごとの比較	9
(1) トンネル電流 (STM) (2) 磁気力 (MFM) (3) 近接場マイクロ波 (4) 近接場光学顕微鏡 (5) 原子間力 (AFM) (6) 熱プローブ (SThM) (7) イオン (FIM、AP) (8) 複合	
2.1.3 比較表	19
2.2 電磁波・励起ビーム技術分野	27
2.2.1 概観	27
2.2.2 中綱目ごとの比較	29
(1) SR (放射光) (2) テラヘルツ (THz) (3) 赤外・ラマン分光 (4) 紫外・可視分光 (5) X線 (6) レーザ (7) 電子 (8) 陽電子 (9) 中性子 (10) イオン (11) 音波・超音波	
2.2.3 比較表	47
2.3 分離分析技術分野	58
2.3.1 概観	58
2.3.2 中綱目ごとの比較	60
(1) 液体クロマトグラフィー (2) ガスクロマトグラフィー (GC) (3) その他クロマトグラフィー (4) 質量分析 (5) 電気泳動 (6) 熱分析	
2.3.3 比較表	68
2.4 力学測定技術分野	74
2.4.1 概観	74
2.4.2 中綱目ごとの比較	76
(1) 粘度 (2) 摩擦 (3) 距離・長さ (4) 速度・加速度	
2.4.3 比較表	82
2.5 前処理技術分野	86
2.5.1 概観	86
2.5.2 中綱目ごとの比較	88
(1) 薄膜化 (TEM 用観察試料) (2) 深さ方向分析用試料前処理 (表面分析) (3) 抽出・濃縮 (無機微量元素分析)	

2.5.3 比較表	93
3 注目すべき研究開発の動向	97
3.1 NMR	99
3.2 質量分析	102
3.3 HPLC	104
3.4 物理センサ	107
3.5 化学センサ	111
3.6 バイオセンサ	115
3.7 試薬	119
3.8 ナノ計測	121
3.9 多元複合計測システム	123
3.10 インフォマティクス	126
3.11 量子コンピュータ	129
3.12 政府調達	132
3.13 共用施設とネットワーク	134
3.14 国際標準	139
略語集.....	141
執筆者一覧.....	144

1 目的及び構成

1 目的及び構成

JST / CRDS では、国が行うべき研究開発の戦略立案を行い、科学技術政策立案者に提言を行っている。的確な戦略提言のためには、我が国の技術力の国際的なポジションを把握するとともに、新しい技術の芽にも注意を払う必要がある。

本調査は、上記二つの目的のため、先端計測技術分野に関して行ったものである。

JST / CRDS 計測・産業技術グループが作成した技術俯瞰マップ（計測対象×要素技術、図 1）を元に調査項目を設定し、「近接プローブ」「電磁波・励起ビーム」「分離分析」「力学測定」「前処理」の各技術分野について実施した。

本報告書の本文は、大きく分けて以下の二つの章で構成されている。

第 2 章「国際技術力比較」は、各国の技術力に関して、専門家の評価を技術カテゴリーごとに集めたもので、各国の技術力を比較する際のベンチマーク資料と位置づけられる。

きめ細かい比較のため、上記 5 分野を更に中綱目（分野の中を更に細かく分類したもの）に分けて調査した。また、技術力の比較は、「研究水準」「技術開発水準」「産業技術力」という 3 つの観点で行った。研究水準とは、学術的研究の水準をいう。技術開発水準とは、実用化に向けたプロトタイプ作成の水準をいう。産業技術力とは、設備、人材を含めた企業の技術力の水準をいう。

第 3 章「注目研究開発動向」は、国際技術力の現状比較とは別に、重要性が増してきそうな技術の芽や、新しい動向をとらえることを目的に、注目すべき内外の研究開発動向を調査した。国際学会等での最新の動向をふまえながら、上記 5 分野に関連した注目すべき研究開発動向についてとりまとめた。

2 國際技術力比較

2.1 近接プローブ技術分野

2.1.1 概観

近接プローブ技術分野の国際技術力比較をするにあたって、当該分野を 8 つの中綱目に分類した。すなわち、(1) トンネル電流 (STM)、(2) 磁気力 (MFM)、(3) 近接場マイクロ波、(4) 近接場光学顕微鏡、(5) 原子間力 (AFM)、(6) 熱プローブ、(7) イオン (FIM、AP)、(8) 複合、である。

詳細は、「中綱目ごとの比較」で述べるが、全般的にみると、研究水準、技術開発力、産業技術力ともに、日本は、欧米とほぼ拮抗し、高い水準を保っている。

近接プローブを用いた顕微鏡 (SPM) は、ナノテクノロジーやバイオ関連の研究の隆盛にあいまって、急速に発展しつつある。走査部を共通にし、検出部を入れ替えることにより種々の測定に対応できる簡易型装置が、国内外の大小のメーカーから市販され、しのぎを削っている。能力の面では、製品間でそれほど大きな差はないが、使いやすさやソフトウェアなどの面では外国製品にやや分がある。同装置を用いた研究では、バイオ関連の研究が活発であり、日欧米が拮抗している。

先端技術に関しては、個々のプローブにより国際的なリードの度合いが異なる。

STM についてみると、4 探針測定は日本が大きくリードしているものの、低温物性計測やスピン計測などは、欧米に遅れをとっている。これは、超高安定型装置の開発が立ち遅れているために他ならない。

一方、現在 SPM の主流となっている AFM 技術については、日本がリードしている。特に、ノンコンタクト AFM による原子識別や構造設計、高速 AFM によるダイナミック計測などは、国際的にも大きな注目を集めている。

磁気計測に関しては、スピンエレクトロニクスやバイオ関連への応用の期待から、様々なプローブが提案されており、それぞれの特徴にあわせた応用が試みられている。磁性探針を利用する MFM では、技術的な優劣はそれほどないが、対象が日本 (スピンエレクトロニクス、磁性材料) と欧米 (バイオ関連) で多少異なる。微小な超伝導素子 (SQUID) を用いる SQUID 顕微鏡は、空間分解能は μm レベルであるものの、磁場感度が高いという特徴を持ち、装置開発、応用ともに日本がリードしている。

マイクロ波を使った計測では、全般的には米国が強く、半導体応用はかなり進んでいる。一方、日本発の技術である SNDM は、より高いポテンシャルを持つことが実証されており、今後の進展が期待できる。

光を使った計測も、日本が優位に立っている。赤外領域やテラヘルツ領域で

の NSOM の進展は目覚しく、また現在頭打ちとなっている空間分解能を向上させる方法としてプラズモニクスが注目されている。NSOM は市販品も出回っているが、十分に利用されているとは必ずしも言いがたく、ユーザーのニーズに合わせた周辺技術の開発が今後の課題となろう。

以上の他、AFM をベースとした様々な SPM ファミリーが提案されている。なかでも、熱測定、近接場マイクロ波による誘電率測定、微小ホールセンサによる磁場計測などは、欧米のベンチャー企業で製品化されている。

2.1.2 中綱目ごとの比較

(1) トンネル電流 (STM)

走査型トンネル顕微鏡 (STM) は最初に開発されたプローブ顕微鏡 (SPM) であり、SPM 技術の進展を先導してきた。しかし、STM は導電性試料しか測れないという原理的な問題があり、また非常に表面敏感であるため必ずしも扱いやすくないなどの点から、現在では SPM の主流の座を原子間力顕微鏡 (AFM) に譲っている。

STM は大きく、大気中 (溶液中) 測定用の簡易型装置と超高真空用装置の 2 種類に分けられる。前者の簡易型装置では、STM 単独のものはほとんどなく、SPM のオプションとして位置づけられている。装置面でも成熟しており、ソフトウェアの使いやすさや実績などから Veeco 社製品 (旧 DI 社ナノスコープ) が、世界的には標準品となっている。一方、超高真空用装置では、オミクロン社の技術力が高く、多くのユーザーに支持されている。日本製では、高温での安定性に優れ、相転移などが観察できる装置 (日本電子株式会社 (JEOL) 製) が異彩を放っている。

現在、先端 STM 技術として、低温型装置が注目されている。低温では熱振動が抑えられるため、精密な原子・分子操作には不可欠の環境となる。同分野では IBM アルマーデンがパイオニアであるが、欧米の数箇所の研究機関やわが国では東大物性研などでも、同様の研究が可能となっている。さらに最近、低温物性への寄与も目覚ましい。対象とする物性の一つが超伝導であり、UC バークレーのグループ (現在コーネル大) により、不純物や渦糸周囲の電子状態や、電子相分離、準粒子の挙動などに関する非常にクオリティの高いデータが次々と発表され、大きな注目を集めている。また、磁性探針を用いたスピン計測も大きなトピックスであり、ハンブルグ大学のグループが中心的な役割を果たしている。これらの装置は、冷却技術、熱安定性に優れたヘッドのデザイン、表面処理、防振機構など長年の着実な技術開発に基づき独自に製作されたものである点を強調しておきたい。残念ながら、最先端装置の開発の点では、ユニソク社が健闘しているものの、我が国は遅れをとっており、むしろその差は開きつつあるように感じる。

STM 技術全般的には成熟しつつあり、市販の装置を購入すれば、あるレベルまでは比較的短期間に到達できるようになってきている。中国は現在、海外から装置を導入し急速に STM 関連研究の立ち上げを行っており、まだ独自の技術開発はみられないものの、今後大きな脅威になると考えられる。日本は、研究全般としてみると依然として水準は高いが、技術開発の面では動きが鈍くなっており、最先端研究が欧米の特定の機関に集中する傾向がやや見られる。

(2) 磁気力 (MFM)

磁気力顕微鏡 (MFM)¹ は AFM の構成で磁性探針を用いて磁気力を検出する SPM である。現在、汎用的に使われている磁区観察ツールの中で最も簡便で分解能が高い技術であり、次世代磁気応用デバイスや、高密度磁気記録媒体・光磁気ディスク等のストレージ製品の評価手法として研究開発の現場で使用されている。

MFM 技術の要は探針と高感度な検出法にある。MFM には、AFM 探針に磁性膜をコートした探針 (MFM 探針) を用いる。開発当初は検出感度が重要視され、磁性体の量を増やして感度を増大する目的で、Co 系や Fe 系合金磁性膜で厚くコートされた探針を用いていた。その結果、磁性探針と磁性体試料間の磁気相互作用が大きく、探針の漏洩磁界が試料の磁区構造に影響を及ぼす、或いは試料の漏洩磁界が探針の磁化状態に影響するという課題が生じた。また、探針先端径が大きくなる為、空間分解能も 50nm 程度に制限されていた。近年、実用レベルでこの課題を克服し、分解能 20nm 以下を実現した市販の MFM システムが SII ナノテクノロジーで開発された。即ち、極薄磁性膜をコートした低モーメント探針を用いる事によって空間分解能を高め、試料に与える漏洩磁界影響を低減し、Q 値制御技術 (検出感度や応答性を電気回路で制御) と真空中 MFM 技術開発により、感度低下を補う方法である。^{2,3,4} 近年、世界的にも多くの SPM メーカーで、市販機の 1 つの測定モードとして MFM を装備するようになっており、米国のメーカーからも、同様な真空中 Q 値制御法を使ったシステムや、周波数検出方式 MFM システムが市販機として登場している。⁵

最近の成果として、産業技術総合研究所 (AIST) はカーボンナノチューブを使用した MFM 探針 (CNT-MFM 探針) により分解能 10nm 以下を達成した。^{6,7} 後発のスタンフォード大も CNT-MFM 探針による高分解能観察に成功し、⁸ 今後の高分解能 MFM 観察の実用的なツールとして最有力な方法である事が実証された。

MFM における産業技術力は日本と米国が主導する形で進んでいる。日本で

1 Y. Martin and H.K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.* **50** (1987) 1455.

2 山岡武博、渡辺和俊、白川部喜春、茅根一夫、日本応用磁気学会誌 **27** (2003) 429.

3 T. Yamaoka, K. Watanabe, Y. Shirakawabe, K. Chinone, E. Saitoh, M. Tanaka, and H. Miyajima: *IEEE Trans. Magn.* **41** (2005) 3733.

4 http://www.siint.com/technology/probe_applications.html

5 <http://www.nanoscan.ch/products/hr-mfm.html>

6 H. Kuramochi, H. Akinaga, Y. Semba, M. Kijima, T. Uzumaki, M. Yasutake, A. Tanaka and H. Yokoyama, *Jpn J. of Appl. Phys.* **44** (2005) 2077.

7 H. Kuramochi, T. Uzumaki, M. Yasutake, A. Tanaka, H. Akinaga and H. Yokoyama, *Nanotechnology* **16** (2005) 24.

8 Z. Deng, E. Yenilmez, J. Leu, J. E. Hoffman, E. W. J. Straver, H. Dai and K. A. Moler, *Appl. Phys. Lett.* **85** (2004) 6263.

は、スピントロニクス分野におけるナノ磁性体の磁気構造の研究、磁化反転等の動的研究で他国より高水準の研究が集中している。同時に、MFM 技術をベースとした計測法の新たな展開が見られる。電子回路中の電流が作る磁場を磁性カンチレバーのねじれで定量的に検出する方法⁹、走査型ローレンツ力顕微鏡（磁性試料の漏洩磁束と非磁性探針に流す電流によって発生するローレンツ力をカンチレバーの変形として検出し磁区観察を行う手法）等が開発されている。¹⁰ また最近、測定環境を容易に制御できるという利点を活かした応用が進んでいる。温度制御 MFM（試料温度を制御しフェリ磁性の磁化反転を MFM で観察）¹¹ や、磁場印加型 MFM（試料面に水平或いは垂直に数千エルステッドの磁場を印加）^{12,13} 磁場スイープ MFM（印加磁場を掃引して MFM 応答信号を磁場の関数として特性曲線を描き、ナノ領域におけるダイナミックな磁化特性を捕らえる）¹⁴ 等、いずれも日本で研究または開発されている技術である。一方、米国・欧州で見られるようなナノ磁性のバイオテクノロジー応用はまだ発表されていない。

米国では高分解能 MFM 装置開発、高密度磁気記録に関する応用等のレベルは日本と同等であるが、近年、磁性微粒子とそのバイオテクノロジー応用に関する研究報告が多く発表され、その中で MFM も使用され始めている。一方、磁気デバイスに直接関係した研究は相対的に減少している。

欧州では産業より学術研究に重点がおかれている。米国同様、ナノ磁性体のバイオテクノロジー応用も始まっている。英国では、細胞内に磁性微粒子を取り込み、その切片を MFM 観測した論文が発表された。¹⁵ 垂直磁気記録媒体等を欧州内で供給できない為、分解能向上研究を欧州内で行うには限界があり、産業利用も少ない傾向にある。元々、スイス・ドイツを中心として SPM 装置開発のポテンシャルは高いので、開発の必然性さえ現れれば、技術開発水準、産業技術力共に急速に高くなると予想される。

中国・韓国では、研究のオリジナリティよりも、日本・米国に追いつく為の技術的研究が主として行われている。現時点で、装置開発の競争力は弱い。

9 才田大輔、江面知彦、筒井謙、和田恭雄、高橋琢二、日本応用磁気学会誌 **30** (2006) 233.

10 A. Okuda, J. Ichihara and Y. Majima, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, (2002) 2872.

11 山岡武博、荻本泰史、渡辺耕輔、小嶋邦男、片山博之、日本応用磁気学会誌 **30** (2006) 472.

12 高星英明、斉藤準、石尾俊二、山岡武博、岡本巖、日本応用磁気学会誌 **26** (2002) 284.

13 J. Bai, H. Saito and S. Ishio, *J. Appl. Phys.* **96** (2004) 5924.

14 Y. Endo, H. Fujimoto, Y. Kawamura, R. Nakatani and M. Yamamoto, *J. Magn. Magn. Mater.* **310** (2007) 2436.

15 J. M. Kinsella and A. Ivanisevic, *Langmuir*, **23** (2007) 3886.

(3) 近接場マイクロ波

マイクロ波を用いた走査型の近接場顕微鏡は、その静電容量検出機構の違いから大別して SCM, Near-field scanning microwave microscope, SNDM の 3 種がある。

AFM をベースとした SCM は米国の発明であり、米国では、セマティック (US 版半導体開発共同組合) のプログラムでスタンフォード大学のクエート (当時セマティックアドバイザー) が、容量顕微鏡の必要性をセマティックに知らしめ、デジタルインスツルメント社を中心とする SCM の開発を支援したことは有名である。最近では、トランジスタの PN 接合部評価技術としての半導体ドーパントプロファイルの最新の研究成果が、NIST から多く報告されている。Veeco 社が AFM のオプションとして SCM を製造販売しており、主に半導体企業でのドーパントプロファイル計測用に用いられている。市販 SCM の典型的感度は 10^{-18}F である。

これとは別に同軸共振器型の Near - field scanning microwave microscope がローレンスバークレー国立研究所及びメリーランド大学で開発され、主に誘電率の分布計測に用いられている。高感度で誘電率の定量計測ができる特長があるが、大きく重い同軸空洞共振器プローブがネックとなり空間分解能並びに高速走査性は今ひとつ良くない。

一方ヨーロッパでは上記米国産 SCM を用いた IMEC¹⁶ での極めてレベルの高い半導体ドーパントプロファイルの研究がされており、欧州の半導体素子の評価技術に大きく貢献しているものと思われる。

日本でも当初は米国産 SCM が大学、国立研究所及び企業の研究部門並びに製造現場で使用され、現在も主に半導体ドーパントプロファイルの分析に使用されている。しかし近年純国産の SNDM が開発された。研究室での試作機レベルでは 10^{-22}F という超高感度が報告されており、半導体、誘電体の高分解能な計測報告が多数ある。SII ナノテクノロジー社が SNDM を AFM オプションとして実用化し販売している。(実用化機の感度は 10^{-19}F 程度)

近年、その容量変化に対する高感度さを生かして、富士通研究所により SNDM を用いたフラッシュメモリの蓄積電荷の分布の可視化が初めて報告され、新しい半導体素子分析技術として世界的に注目を集めてきている。更に SNDM による誘電計測で初の原子の観測等も報告されるなど、研究段階ではあるが現在わが国でのマイクロ波顕微鏡技術の進展が世界的に見ても最も高度で早いと考えられ、 10^{-22}F の超感度技術を早い段階で実用化に持っていくことが、わが国の半導体産業の競争力維持及び学術の発展にとって重要なことと考えられる。

16 Interuniversity Microelectronics Center

(4) 近接場光学顕微鏡

近接場光学顕微鏡 (NSOM) の開発において日本の果たしてきた役割は大きい。散乱型 NSOM の発明や開口型プローブの高性能化など、日本発の技術は数多く、しかもそれらは現在の NSOM を支える基盤となっている。プローブ顕微鏡ファミリーにおける NSOM の一番の魅力は、既存のさまざまな分光計測技術と組み合わせることによって、豊富な情報を得ることができる点にある。日本の技術開発はこの点を重視し、空間分解能と同時に感度を徹底的に追求することにより、世界最高性能を有する NSOM の開発を実現した。

このように NSOM 開発は大きな成功を収めてきたが、必ずしもそのユーザー数は世界的に見ても増加の一途を辿っているとは言い難い。主な原因としては、プローブの個体差によるデータの再現性の問題や凹凸構造をもつ試料への適用の困難さなどが挙げられる。産業応用を積極的に進めるにあたっては特に前者は大きな障害であり、根本的な解決策が必要である。例えばプローブの機械的強度を向上させて、同一のプローブで可能な限り多くの試料に対して測定ができるようにする、あるいは標準試料を用いたデータ校正のアルゴリズムを確立するなどが考えられる。現時点でこれらに特に注力している国、地域は存在しないので、日本が長期的な資金サポート体制のもとで、地道な努力を続ける意義は大きいと考えられる。

従来の基本的な NSOM に対して、新しい研究の展開も継続的に進められており、特に欧州、日本で目立った成果が見られる。例えば、測定波長領域に関して、赤外領域における高分解能かつクオリティの高いイメージングが実現し、電子デバイス解析の分野で大いに貢献している。またテラヘルツ領域での NSOM の開発も活発化の傾向にある。高分解能化に関しては、NSOM の純光学的な分解能はほぼ限界に達しつつあり、ごく短距離でのみ働く化学的、物理的相互作用を援用したアイデアが提案、実証されている。アンテナ効果を利用した蛍光増強などいわゆるプラズモニクスをベースとした NSOM の高感度化は世界的に共通の興味を惹いており、活気のある分野である。また、低温、磁場、水中など特殊環境における動作も材料物性評価、生体イメージングには不可欠である。そのような性能を有する NSOM はすでに製品化に至っているが、計測分野でルーチン的に使用できるほどにはまだ成熟していない。フェムト秒パルス NSOM も時間・空間の極限的な分解能を追求するだけでなく、非線形性を活用した高分解能化など利用価値が高いため、長期にわたり世界的に研究が続けられている。

今後の NSOM 分野の研究の課題、特に産業分野への積極的な展開を進めるには、上記のようなプローブにまつわる問題を克服すると同時に、新しい研究対象の開拓が必要である。その際に純粋に「顕微鏡」というとらえ方に固執せず、プローブが試料に与える摂動を積極的に利用したり、NSOM を新しいセ

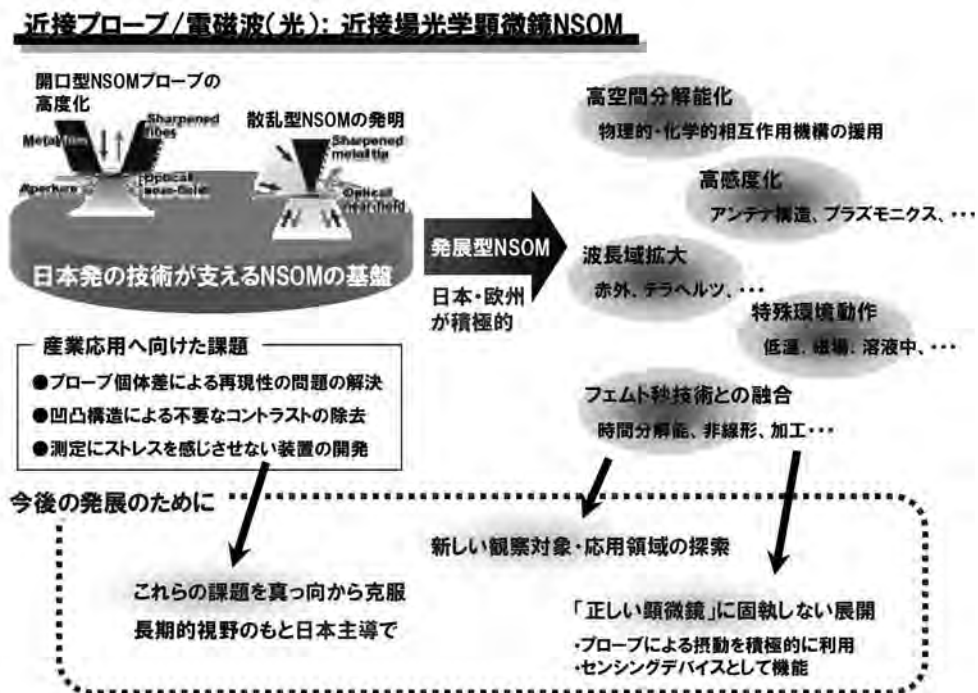


図2 近接場光学顕微鏡 (NSOM)

ンシングデバイスと捉えるなどの柔軟性も必要だと思われる。

(5) 原子間力 (AFM)

原子間力顕微鏡 (AFM) は、小さなテコで探針－試料間の相互作用力を測定する顕微鏡である。AFM は、①空気中で使う簡易型の市販 AFM 装置と、②超高真空中で使う高性能・高機能の AFM に大別される。両者の原理の差は走査型電子顕微鏡 (SEM) と透過型電子顕微鏡 (TEM) の原理の差と比較すると非常に小さいが、両者の性能の差は SEM と TEM の差に匹敵する。

Review of Science Instruments や Applied Physics Letters のような装置・応用関係の論文件数 / 年で見る限り、AFM は 1992 年から顕著な増加傾向が続いて今では SPM 全体のほぼ 7 割強を占めており、SPM の主流は AFM となっている。高分解能・高機能 AFM の技術は日本が欧米より全般として進んでいる。他方、超高真空 STM 装置とコンパクトな q-Plus センサー (水晶振動子) 方式の超高分解能 AFM などでは欧州が進んでいる。超高分解能 AFM で出遅れている米国は欧州からの技術を導入しつつある。

高分解能・高機能 AFM 関連のトピックスとしては、①バイオ高分子反応の AFM 液中観察がある。光を用いた観察から高速・高分解能液中 AFM を用いた観察に変わるものと思われる。光では波長による制限のためモーター蛋白等の形の変化の検出が出来ず、分子を点として点の動きを観察していた。他方、液中 AFM では、金沢大の安藤教授らによる高速化と京都大の山田准教授らに

よる原子・分子分解能達成により、生体分子反応やモーター蛋白等の液中での分子形状の変化や生体反応を実時間で精密観察できる可能性がでてきた。今後、高速化と高分解能化の平行・複合的推進とフォースペクトロスコーピーや散逸や接触電位差などの実時間高分解能測定の実現により、バイオ分野に画期的進歩が期待できる。つぎのトピックスとしては、② AFM 原子操作による複素ナノ構造体組立がある。適切な多元素の組み合わせにより高機能な材料が出現する。他方、ナノ構造体では量子効果が発現する。未来の高機能なナノ材料やナノデバイスは多元素による機能とナノ構造体による量子効果の融合による未知の画期的な複素ナノ構造体となる可能性がある。このような複素ナノ構造体をシミュレーションで理論設計しながら、実験的に、個々の原子を元素識別して選択した特定の元素を設計どおりの位置に原子操作して設計どおりの複素ナノ構造体を組み立てる技術を開発して、画期的な機能を有するナノ材料やナノデバイスを室温で探索するシステムを構築できる可能性が出てきた。三つ目のトピックスとしては、③原子・分子レベルのスピンの AFM 画像化がある。交換相互作用力 AFM により、絶縁体結晶のスピンの原子分解能観察可能となってきた。このような、原子分解能のスピン計測は、未来の原子レベルのスピン・デバイスや材料の構築に必須の新しい知見を与えてくれる可能性を有する。最後のトピックスとしては、④自己検出型 AFM センサの急速な進歩がある。水晶振動子をベースとしたチューニング・フォークや q-Plus センサーと呼ばれる自己検出型 AFM センサの高性能化・高分解能化が急速に進みつつあり、画期的な応用例も発表されており、さらに、超高真空 STM 装置とコンパクトなため、極低温 STM の先進グループなどで積極的な導入が進みつつある。

高分解能・高機能 AFM は技術的に非常に高度であるが、分解能や性能においては STM をしのぐまでになってきている。さらに、STM では不可能な絶縁体が扱える、物性の基本量である相互作用が個々の原子レベルで原子間力や相互作用ポテンシャルとして測定できるなど、他の追従を許さない利点があり、将来性を考えた場合、日本が欧米より全般として進んでいる高分解能・高機能 AFM を一般でも使えるようなユーザーフレンドリーな装置に仕上げることや、上記のトピックスを未来技術の目として育て上げ同時に応用を追求して行くことが戦略的にも非常に重要と思われる。

(6) 熱プローブ (SThM)

走査型熱顕微鏡 (SThM) は、走査型トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡をベースとし、試料に近接または接触させた針状のプローブにより試料表面の局所温度やプローブと試料間の熱輸送量を検出し、温度・熱伝導率等の分布を計測する技術である。赤外線などによる従来の熱計測法の限界を大幅に更新したことで、熱計測の新たな領域を切り開く装置として期待されている。温度検出

の手法により種々の方式が報告されており、STM を利用し接触部の電気化学ポテンシャルを計測する接触ポテンシャル型、AFM に微小な熱電対カンチレバーを装着した熱電対型、金属微細線を利用した測温抵抗体型、温度変化によるカンチレバーの歪みを利用した熱変形型、試料の熱膨張を利用する熱膨張型、走査型近接場光顕微鏡を利用した光学型などに分類される。空間分解能は温度検出手法に大きく依存し、接触ポテンシャル型では 1nm 程度の分解能が実現できているが、測温抵抗体型の場合には $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度となっている。多くの系に適用可能な汎用性の高い SThM については、AFM をベースとし、先端に微小な熱電対接点を設けたカンチレバー（熱電対型）や温度変化に伴って電気抵抗が変化する白金細線を設けたカンチレバー（測温抵抗体型）を使用し、それらのカンチレバーを試料に接触させながら走査し、形状と温度分布、熱流を同時に計測する方式が一般的である。

1986 年に米国の研究者によって SThM が最初に報告されて以来、欧米を中心に種々の方式にもとづいた計測システムの開発研究が行われてきている。日本でも明治大学の中別府らによって熱電対カンチレバーを用いた SThM の開発研究が精力的に行われてきており、この分野での日本の研究水準は高い。この方式は、計測対象が試料の電気的特性や光学的特性で制限を受けない、センサ部を微小化することで 10nm 程度以上の分解能が可能であること、計測系が単純であるなどの特徴を持っており、また通常の測定では熱の流れに起因した温度計測精度の低下の問題を零位法により克服するなど世界をリードする研究成果があがっている。しかし、研究人口の広がりには欧米と比較して高いとは言えない。

この技術分野での装置あるいはセンサの製品化についても、日本は欧米ベンチャー企業の後塵を拝している。測温抵抗体型 SThM については測定システムが複数の欧米企業から商品化されており、またセンサについても熱電対カンチレバーなどが欧米企業により商品化されている。一方、日本での商品化は遅れているが、日本の高い電子技術や半導体微細加工技術、MEMS 技術を利用すれば、現在の研究水準で欧米にも十分対抗できる商品化は可能と考えられる。ベンチャー化の支援体制も含めたこの分野の研究開発戦略の構築が必要である。

(7) イオン (FIM、AP)

イオンを検出する近接プローブ法として、本項では電界イオン顕微鏡 (FIM) とアトムプローブ (AP) を取り上げる。FIM - AP の基本的な特徴として、(1) イオン 1 個単位での質量分析による極めて高い分析感度、(2) ナノメートルスケールでの表面観察、原子位置検出能力などが挙げられる。AP は固体試料中に含まれる元素の 3 次元マッピングを原子レベルで可能にする唯一の手法

とみなされており、金属試料の分析では既に十分な実績を挙げてきた。その後、1980 年代から 90 年代にかけて、短パルスレーザーの照射（Tsong、台湾）、微小引出し電極（西川、日本）などの技術革新によって非金属試料・半導体試料への適用が可能となった。もう一つのブレイクスルーは、収束イオンビーム加工法（FIB）を用いることで試料形状の加工の自由度が格段に増したことである。しかし、現在半導体の実デバイスについて AP 分析を成功させた研究グループ・装置メーカーは無く、FIB 法を含む構成技術のすべてにわたる最適化と地道なノウハウの蓄積が必要な段階である。日本では 2006 年より、半導体実デバイスの分析を目標とするプロジェクトが国内で 2 件進行中である。さらに、ナノマテリアルや分子性の試料への拡張も試みられている。¹⁷

AP の装置開発については欧州への依存度が高く、要素部品と技術を輸入する状況が今でも続いている。要素技術ごとに強い影響力をもつ地域を整理すると、(i) フェムト秒のレーザー光源（欧州）、またはナノ秒オーダーの高電圧パルスの発生（欧州）、(ii) 単一イオンの電気信号への増幅素子（米国、日本）、(iii) イオン飛来位置の二次元検出と並行したサブナノ秒分解能での飛行時間計測（欧州、米国）、(iv) 毎秒 10,000 個以上のデータ処理を行う計算ハードウェアと可視化ソフトウェア（欧州、米国）となる。これまで、分析装置メーカーでは VG（英国）、Omicron（独）、CAMECA（フランス）¹⁸ などがそれぞれの国の研究グループと提携関係にあった。ところが、1998 年に米国で AP に特化した企業が設立され（Imago）¹⁹、関連する部門を先行メーカーから Imago 社が買収すると共に、現時点での技術を集約して高速化・自動化を進めた分析装置の製造を 2001 年に開始した。現在、フランスおよび日本以外の研究グループはほぼ Imago 社の影響下に入っている。この分野について中国・韓国は、研究レベルでは意欲的ではない。台湾については Tsong の後継者が出れば、活性化するであろう。

(8) 複合

SPM は原子分解能を持つ顕微鏡であるが、それだけでは観察対象物の狙った場所の観察を行うことは難しい。例えて言うなら、富士山を SPM で観察すると、富士山の全体像を見ることはできず、探針またはカンチレバーが偶然降

17 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

「レーザー補助広角 3 次元アトムプローブの開発とデバイス解析への応用」（CREST-JST）

宝野 和博（物質・材料研究機構） http://www.nims.go.jp/apfim/index_j.html

「レーザー補助広角 3 次元アトムプローブの開発と実デバイスの 3 次元原子レベル解析」

（科研費・学術創成）尾張 真則（東京大学） <http://www.esc.u-tokyo.ac.jp/~owari/>

関連する他の調査比較項目

2.2.2-(10) イオンビーム、2.3.2-(4) 質量分析、3.2 質量分析

18 <http://www.cameca.fr/>

19 www.imago.com/imago/

りた 5 合目の草にとまっているミツバチの眼がいきなり見える。そのミツバチが富士山のどこにいるのか、ミツバチが富士山とどのような関係にあるのか、全くわからない。全体像を観たり、あるいは大きな構造物の狙った場所での SPM 観察を行うには補助顕微鏡と複合化することが必要である。そのような理由で走査電子顕微鏡 (SEM) や光学顕微鏡 (OM) と SPM を結合し、ミリメートル・スケール程度の低倍率像から観察場所を選んで原子分解能像を SPM で得る必要がある。このような機能は例えば、大規模集積回路 (LSI) などのデバイス解析に SPM を応用するときには必須となる。

また、複数本の探針やカンチレバーを用いた多探針 SPM が最近開発され、世界中で利用されているが、複数本の配置を制御するにも補助顕微鏡は必須となる。複数本の探針を用いると観察対象物の拡大像を得るだけでなく、観察対象物に電流を注入しながら他の探針で電圧を測ったりすることができ、ナノメートルスケールでの電気計測に応用できる。このよう多探針 SPM は、LSI などのデバイス計測の他、細胞やたんぱく質などバイオ物質の計測にも応用可能であり、多様な用途が考えられる。用途に応じて特徴ある SEM - 多探針 SPM 装置や OM - 多探針 SPM 装置が複数のメーカーで開発されている。

多探針 SPM-SEM 複合装置の開発について、研究所・大学レベルでは日本のみが盛んである。米国や欧州、中国の大学・研究所では装置開発は行わず、装置を輸入したり購入したりして、単なるユーザーとして基礎研究に利用している。SPM メーカーとしては、日本のメーカーのほか、独国および米国のメーカーが特徴ある装置を開発しており、製品化している。産業応用としては、日本のメーカーが半導体デバイスの解析のためにプローバーとして利用する装置を製品化しているが、他国にはその例が無い。韓国、中国においては、ほとんどアクティビティが無い。ただし、中国・台湾では、装置を日本や独国のメーカーから輸入して基礎研究に利用している例がある。

2.1.3 比較表

◆近接プローブ技術分野

●トンネル電流 (STM)

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	超高真空 STM を用いた表面科学や固体物性研究ではトップレベルを維持している。また、分子の観察やバイオ応用でも健闘している。
	技術開発水準	◎	→	4 探針 STM などは、日本発の技術もあるが、全体としては技術は成熟しつつあり、市販の装置を使うユーザーが大半を占めている。最も安定性に優れた低温 STM では、欧米の後塵をはいしている。
	産業技術力	○	→	大気中用の装置では、AFM に主役の座を譲っており、技術的に大きな進展はみられない。超高真空用 STM は、依然として重要な研究ツールであり、JEOL 社の高温 STM やユニソク社の低温 STM などを中心に高い技術レベルを維持している。
米国	研究水準	◎	→	基礎研究、応用の両面で依然として高い研究アクティビティを誇っている。特に、低温 STM の安定性では群を抜いており、超伝導体を中心とした固体物性（コーネル大）や原子操作 IBM アルマーデン）などでは世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	→	低温 STM に関連した、防振技術、冷却技術、熱ドリフトに強いヘッドのデザイン、表面処理などの技術水準は非常に高い。
	産業技術力	○	→	Veeco 社の製品は大気中（溶液中）用 STM としては、世界標準になっている。
欧州	研究水準	◎	→	米国同様、基礎研究、応用の両面で依高い研究アクティビティを維持している。特に、STM を用いたスピン計測は群を抜いている。
	技術開発水準	◎	→	大学と装置メーカーが連携し、新技術を開発しようとする意欲が高い。その結果として、STM をベースとした ERS や磁気計測など、多数の新技術を生み出している。
	産業技術力	◎	→	オミクロン社製品は、超高真空 STM としては完成度が高く、標準的な装置になりつつある。
中国	研究水準	○	↗	全体的な研究レベルとしてはまだ低いが、近年、欧米や日本の装置を導入し、急速に発展を遂げており、近い将来には日本の脅威となると思われる。
	技術開発水準	×	→	現時点では、海外から装置を導入しており、独自の技術開発という面ではほとんど見られない。
	産業技術力	×	→	特筆すべきメーカーはみられない。
韓国	研究水準	○	→	研究者人口、研究水準ともに、欧米、日本に比べやや劣る。
	技術開発水準	○	→	ポテンシャルは持っていると考えられるが、STM 全般に成熟しつつあり、際立った技術開発は見られない。
	産業技術力	○	↘	Park Systems が老舗として高い技術を保持しているが、

全体コメント: STM 技術全般に成熟しつつあり、装置メーカーの統合、専有化が進んでいる。従って、市販の装置を導入すれば、ある程度研究水準にすばやく到達でき、今後中国の追い上げが脅威である。一方で、超伝導物性研究やスピン計測、原子操作など、最先端の技術を要する研究は、独自に開発した装置によっており、先端研究が特定の組織に集中しつつある。残念ながら、最先端研究では、欧米がリードしており、日本は遅れをとっていると言わざるを得ない。

(註 1) 現状について [◎: 非常に進んでいる、○: 進んでいる、△: 遅れている、×: 非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗: 上昇傾向、→: 現状維持、↘: 下降傾向]

●磁気力 (MFM)

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	垂直磁気記録やスピントロニクスなどナノ磁性体研究で世界を主導する水準にあり、ナノ磁性体の磁区構造評価に MFM が用いられている。CNT(carbon nanotube)-MFM など超高分解能 MFM 研究も日本で誕生している。
	技術開発水準	◎	↗	実用に即した高分解能 MFM 技術開発が進んでいる。また、上記の研究分野における大学や民間、SPM メーカーとの共同成果があり、技術開発も進んでいる。
	産業技術力	◎	↗	特に磁場印加型 MFM では、他国の追随を許さない大型電磁石による最大 0.5 テスラの垂直・水平磁場印加が可能である。他にも磁場スイープ MFM のようにナノ領域での磁化のダイナミクス直接観測できるツール開発や、温度制御 MFM による試料加熱あるいは冷却における MFM 装置開発など、ハード・ソフトともに最先端の研究を行いつつ MFM 装置の生産技術力は高い。
米国	研究水準	◎	↗	バイオ材料、ドラッグデリバリー等への応用研究が特長的であり、世界で最も進んでいる。磁性微粒子等のナノ磁性に関する研究論文は多く、材料研究の水準も高いが、デバイスに直接関連した論文は最近 2 年間に激減している。
	技術開発水準	◎	↗	高分解能 MFM 装置、磁性材料(次世代磁気記録媒体等)の開発ポテンシャルは日本と同等である。他分野との共同研究による技術共用と新技術の開発力は他国を引き離して優れている為、最近のバイオテクノロジーへの応用研究により、新たな展開が見込まれる。
	産業技術力	○	→	高分解能 MFM 装置がメーカーからも出されている。
欧州	研究水準	◎	→	独国を中心に学術論文は多く出版されている。磁性物理学現象、磁区構造の解明や材料物性に重きが置かれており、独創性と学術性は高い。英国では医療方面のバイオテクノロジーとの融合研究も見られる。
	技術開発水準	○	→	スイス、独国を中心に、新しい測定原理の開発ポテンシャルは高い。研究用装置開発を目的とした、規模の小さい装置メーカーが多く存在し、特化した装置を開発している。
	産業技術力	△	→	垂直磁気記録媒体の供給が難しいほど、産業としては遅れている。メーカーと大学・研究所との連携は非常に良い。産業的に日本・米国に追いつこうとする中国・韓国とはスタンスが異なる。
中国	研究水準	○	↗	近年 MFM を扱った論文数は増えたが、全体的に独創性に乏しく、国内の大学・研究所から出てくる論文について、質的向上はまだ見られない。日本や欧州の研究をベースとして改良しているケースが多く見られる。
	技術開発水準	△	↗	MFM 装置の自国開発という点では日本や米国に遅れをとっている。現状は米国や日本の装置を導入して研究していると考えられる。
	産業技術力	△	→	MFM 装置の産業技術力はまだ乏しいと推定。
韓国	研究水準	○	↗	近年 MFM を扱った論文は増えているが、独自の研究は少なく、外国との共同研究や追従した研究が大部分である。質的向上が見られるのはナノ磁性研究が定着した後になると予測される。
	技術開発水準	△	↗	MFM 装置の自国開発という点では日本や米国に遅れをとっている。現状は米国や日本の装置を導入して研究していると考えられる。
	産業技術力	△	→	MFM 装置の産業技術力はまだ乏しいと推定。
全体コメント：ここ 2 年ほど、日本における MFM 研究の進展、特に磁化反転等の動的研究は他国を大きく引き離すレベルにある。技術開発力、産業技術力も高い。米国も技術開発力、産業技術力は日本と同等であるが、磁性のバイオ関連の研究が多くなり、MFM も使われ出してきた。欧州は基礎的な分野の研究が多い。中国・韓国は日本・米国の研究・技術開発に追従する動きが見られるようだ。				

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●近接場マイクロ波

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	米国産 SCM と国産 SNDM の両方が大学並びに国立研究所で研究開発されている。特に SNDM では 10^{-22} F という超高感度が報告されている。半導体、誘電体の高分解能な計測報告が多数ある。SNDM では原子分解能を達成している。
	技術開発水準	◎	↗	富士通研究所により SNDM を用いたフラッシュメモリー中の蓄積電荷の分布の可視化が世界で初めて報告されそのレベルは非常に高い。また米国産 SCM を利用した半導体ドーパントプロファイルが企業で研究されておりそのレベルも高度である。
	産業技術力	◎	↗	S I I ナノテクノロジー社が SNDM を AFM オプションとして実用化し販売している。
米国	研究水準	◎	↗	AFM をベースとした SCM の発明国であり、半導体ドーパントプロファイルの最新の研究成果が N I S T から多く報告されている。これとは別に同軸共振器型の Near-field scanning microwave microscope がローレンスバークレー国立研究所及びメリーランド大学で開発されこちらは主に誘電率の分布計測に用いられている。
	技術開発水準	◎	→	各半導体企業で SCM を用いたドーパントプロファイルの評価に用いていると思われる。
	産業技術力	◎	→	Veeco 社が AFM のオプションとして SCM を製造販売しており、主に半導体企業でのドーパントプロファイル計測用に用いられている。典型的感度は 10^{-18} F
欧州	研究水準	◎	→	主に半導体のドーパントプロファイルの研究用に SCM が使用されている。
	技術開発水準	◎	↗	SCM を用いた I M E C の半導体ドーパントプロファイルの研究レベルは極めて高く、多くの優れた文献がある。誘電体の評価はほとんど見受けられない。
	産業技術力	○	→	欧州の半導体メーカーの現場で SCM をドーパントプロファイルに活用していると思われるが、詳細は不明である。
中国	研究水準	×	→	新しいマイクロ波顕微鏡の提案等は殆ど見られない。米国ローレンスバークレー研究所で開発された空洞共振器型 scanning evanescent microwave microscopy を用いた誘電材料等の機能性材料の評価の報告が見受けられる。
	技術開発水準	×	→	企業におけるマイクロ波顕微鏡の技術開発はほとんど見受けられない。
	産業技術力	×	→	生産現場での使用の報告もほとんど見受けられない。
韓国	研究水準	△	→	新しいマイクロ波顕微鏡の提案等は殆ど見られない。同軸共振器型 scanning microwave microscopy を用いた誘電材料等の機能性材料の評価の報告が見受けられる。
	技術開発水準	△	→	企業におけるマイクロ波顕微鏡の技術開発はほとんど見受けられない。
	産業技術力	△	→	生産現場での使用の報告もほとんど見受けられない。

全体コメント：AFM をベースとした scanning capacitance microscope を用いた半導体ドーパントプロファイルの可視化の分野が世界的に見てマイクロ波顕微鏡としてのもっとも成熟した市場を形成している。しかし近年純国産の SNDM を用いたフラッシュメモリーの蓄積電荷の可視化が報告され、新しい半導体素子分析技術として世界的に注目を集めてきており、更に SNDM による誘電計測で初の原子の観測等も報告されるなど、研究段階ではあるが現在わが国でのマイクロ波顕微鏡技術の進展が世界的に見ても最も高度で早いと考えられる。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●近接場光学顕微鏡

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	測定原理（散乱型 NSOM）やプローブ作製法、空間分解能・感度向上（開口型 NSOM）に関して日本発のアイデアが多数ある。分解能、感度の世界トップデータを有する。またこれを活かし、ナノ領域固有の物理現象を利用したイメージング分光に取り組んでいる。
	技術開発水準	◎	↗	性能と簡易な製造プロセスを両立した NSOM プローブを開発し、世界的に大きなシェアを獲得している。低温、磁場など特殊環境で動作する NSOM の開発に対しても意欲的である。
	産業技術力	○	→	優れている。通常の光学顕微鏡技術と融合させたユーザーフレンドリーな装置も製品化している。
米国	研究水準	○	→	ごく限られた研究グループで精力的な研究がなされている。
	技術開発水準	○	↘	新たな NSOM 技術開発に向けた研究には消極的である。
	産業技術力	△	↘	製品開発はほとんどおこなわれていない。
欧州	研究水準	◎	↗	赤外領域でのナノスケール分光イメージングなど、きわめて水準の高い研究グループが散見する。全体的に基礎研究が盛んであり、分野に活気がある。
	技術開発水準	◎	↗	プローブ顕微鏡全般にわたり研究が活発であることに後押しされ、プローブを含め、NSOM の開発に対しても積極的である。NSOM を製品化しているメーカーも多い。
	産業技術力	○	↗	技術力は優れており、今後画期的な製品が出現する可能性も感じられる。
中国	研究水準	△	→	日米欧と比較すると見劣りする。独創的な研究は少ない。
	技術開発水準	△	?	独自の開発力は低い。
	産業技術力	×	?	現段階では産業化までは届いていない。
韓国	研究水準	△	→	近接場光学分野の研究は活発になりつつあり、一部のグループからは水準の高い成果が見られ始めているが、NSOM に対する取り組みはまだ浅い。
	技術開発水準	△	→	NSOM に関する技術開発は徐々に進みつつあるが、プローブなどの心臓部となる要素開発はほとんどおこなわれていない。
	産業技術力	△	→	製品開発がスタートし、今後が期待される。

全体コメント：近接場光学顕微鏡の空間分解能、感度は周辺技術と相俟って、着実に進歩している。ただし、画像の再現性（プローブ依存性）、像の解釈の困難さがユーザー拡大の足枷となっている。今後の取り組みとしては、これらの課題を真っ向から解決する方向と、これらに大きく左右されない新たな計測対象・応用分野を開拓する方向がある。後者は突如として出現する可能性が高いので、それに備えて、弛まず性能向上の努力を続けることが必要である。また、基礎研究にあたっては産業側のニーズを常に注視することを怠らないことが肝要であろう。

(註1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●原子間力 (AFM)

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	超高真空 AFM や液中 AFM、ビデオレート AFM イメージングなどの研究水準が高く、半導体だけでなく分子やバイオなど応用範囲も広い。
	技術開発水準	◎	↗	超高真空 AFM による元素識別・原子操作・原子埋め込み文字創成、原子分解能の液中 AFM 開発、バイオ用高速 AFM 開発など、日本発の技術多数。
	産業技術力	○	→	簡易型 AFM の SII 社、超高真空 AFM の JEOL 社、高性能・高機能 AFM 試作のユニソク社、島津製作所、オリンパス光学など高い産業技術力あり。バイオ関連産業への浸透は未成熟である。
米国	研究水準	◎	→	従来のタッピングモード AFM が主だが、UCSB、Arizona 大学など、生物・医学用研究材料などに高い研究アクティビティをもっている。
	技術開発水準	○	→	超高真空 AFM の技術が少し日本や欧州より劣るが技術開発水準は高い
	産業技術力	○	→	Veeco 社、Agilent 社 (旧 Molecular Imaging)、Asylum Research 社など、世界的に有名な液中タッピングモード AFM の開発メーカーが非常に多い。
欧州	研究水準	◎	↗	AFM 全般の研究水準が高く、絶縁体や分子やバイオなど応用分野也多岐にわたる。1 分子イメージング、電気化学 SPM など、多様な生物学への応用が進展している。独創的研究が多い。
	技術開発水準	◎	↗	q-Plus センサー方式の超高分解能 AFM、原子分解能の交換相互作用力顕微鏡など世界のトップ技術が多数有り。体内へ挿入するプローブやカンチレバーセンサーなど新規なアイデアが多い。
	産業技術力	◎	→	超高真空 AFM のオミクロン社、コントローラーのナノテック社やナノサーフ社やナノニス社などがあり、産業技術力は高い。また、Nanoworld 社のカンチレバーは、世界的シェアをもっている。
中国	研究水準	△	↗	中国科学院 (CAS) のアクティビティは非常に高く、研究人口も増加しつつある。全般で比較すると、欧米や日本より劣る。いまのところは既存技術の習得段階的論文が多い。
	技術開発水準	×	→	使用している簡易型 AFM の大半は海外の市販装置が海外から輸入した技術を使用している
	産業技術力	△	→	特筆すべき AFM メーカーは存在しない
韓国	研究水準	△	→	AFM 全般で比較すると、欧米や日本より少し劣る。ソウル大など高いアクティビティを有するが、現状では液中 SPM 計測はあまり行なわれていない。MEMS を活用した実用向き研究が多い。
	技術開発水準	△	→	特筆すべき著名な発明や先行技術は見当たらないが、技術レベルはかなり高いと思われる
	産業技術力	△	→	簡易型 AFM を中心とした製品群を有する Park Systems 社があり、技術力はかなり高いが、それ以外の著名なメーカーは見当たらない。液中 SPM 計測の本格的開発は今後の段階である。

全体コメント：論文件数 / 年で見ると、AFM は 1992 年から顕著な増加傾向が続いて今では全体のほぼ 7 割強を占めており、SPM の主流は AFM となっている。高分解能・高機能 AFM の技術は日本が欧米より全般として進んでいる。他方、超高真空 STM 装置とコンパクトな q-Plus センサー方式の超高分解能 AFM などでは欧州が進んでいる。超高分解能 AFM で出遅れている米国は欧州からの技術を導入しつつある。バイオ SPM の分野は以前は米国が盛んであったが、現在は欧州がリードしている。中国・韓国は現状ではやや遅れ気味にあると考えられるが、着実に実力をつけてきている。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●熱プローブ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	明治大学の中別府教授など世界トップレベルの研究者は存在するが、個人的なレベルにとどまっている。
	技術開発水準	○	→	独創的な新規研究の成果を実用技術に展開する意気込みが弱い、製品開発力は高く、高い潜在能力を持っている。
	産業技術力	△	→	高い産業技術力を有しているが、この分野に適用されていない。
米国	研究水準	◎	→	世界のトップレベルの頭脳を集めており、高い研究水準を保っている。
	技術開発水準	◎	→	研究成果を応用して製品化へ結びつけるチャレンジ精神が豊富であり、ベンチャー企業が非常に高い技術開発力を有する。
	産業技術力	◎	→	世界トップの研究水準、技術開発力と先端的な市場に支えられ、高い産業技術力を有するベンチャー企業が商品化を行っている。
欧州	研究水準	◎	→	伝統的な基礎研究に加え、新規の技術研究においても高い水準を保っている。
	技術開発水準	◎	→	研究成果を実用化へ結びつける技術開発でも成果が多く、プローブ開発力が高い。
	産業技術力	○	→	高い産業技術力を有するが、測定システムとして製品化する力が米国より弱い。
中国	研究水準	×	→	研究成果はほとんどあらわれていない。
	技術開発水準	×	↗	独創的な新規研究の成果を実用技術に展開する力は依然として弱い。
	産業技術力	×	→	この分野への企業の参入は見られない。
韓国	研究水準	△	↗	大学や研究機関において研究成果もあるが限定的である。
	技術開発水準	×	↗	独創的な新規研究の成果を実用技術に展開する力は依然として弱い。
	産業技術力	×	→	この分野への企業の参入は見られない。
全体コメント：日本の研究水準のレベルは高く、欧米と肩を並べているものの、個人的な研究力に依存しており、全体的なレベルアップが必要と思われる。技術開発に関しては、米国を中心としたベンチャー企業が世界を牽引しており、日本は高い研究水準を産業に結びつける力が弱いために後塵を拝している。				

(註1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●イオン (FIM, AP)

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	少数の研究グループが活発に研究を進めているが、広く普及するには非金属試料への展開が鍵である
	技術開発水準	△	→	これまで金属分野でのユーザはあったが、半導体製造、磁性材料分野への認知はこれからである
	産業技術力	△	→	個別技術には競争力があるが、分析機器のマーケットとしては規模が不十分とみなされ、総合分析装置メーカーのメインプレーヤーが永らく不在 既存の複数企業からのエンジニアによる協同作業が有望か
米国	研究水準	◎	↗	基礎研究では依然として有力 装置メーカーとの連携も実績をあげつつある
	技術開発水準	○	→	磁性材料分野で研究が活発化している 半導体実デバイス分析への展開はこれから
	産業技術力	◎	↗	総合分析装置メーカーは永らく参入しなかったが、ベンチャー企業が急速に成長し欧州メーカーを圧倒しつつある 磁性体分野などのユーザ企業との連携も密である
欧州	研究水準	◎	→	基礎研究では依然として有力 装置メーカーとの連携も実績をあげつつある ただしフランスを除くと米国への依存度が高まっている
	技術開発水準	○	→	鉄鋼メーカーのユーザは多いが、半導体メーカーからの将来のユーザは未知数
	産業技術力	○	→	個別技術には十分な競争力があるが、フランス以外の分析装置メーカーが撤退しつつある
中国	研究水準	△	↗	台湾では米国から帰国した Tsong が後進を育成するとともに電界電子放射素子の研究を進めている 中国本土は消極的
	技術開発水準	×		
	産業技術力	×		
韓国	研究水準	×	↘	Y. Kuk (ソウル大学) が AP から手を引いたので、現在研究者が不在
	技術開発水準	△		
	産業技術力	△		

全体コメント:半導体実デバイス分析への展開が研究分野、装置開発の両面で今後の発展の鍵である。同時にナノテクノロジー、化学寄りの分野への展開も期待される。この表中では次のように区分した
「技術開発水準」 企業における AP を用いた分析研究・分析サービス、製品製造への応用など
「産業技術力」 企業による AP 分析装置の開発、ないしは、AP のための個別要素技術・部品の開発、製造

(註 1) 現状について [◎:非常に進んでいる、○:進んでいる、△:遅れている、×:非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗:上昇傾向、→:現状維持、↘:下降傾向]

●複合

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	研究成果としては世界のトップレベル。東大およびNIMSグループが研究論文を盛んに発表している。その他に、3つの大学（豊田工大、横浜市立大、筑波大）が特徴ある多探針SPM装置の開発を行っている。
	技術開発水準	◎	↗	㈱ユニソクが多探針SPM技術ではめきんでいる。中国、台湾、米国に複数の装置を輸出している。ただし、同社はSEMの技術が無いので、SEMは電顕メーカーから購入し、多探針SPMに結合している。SEM-（単一探針）SPM複合では、日本電子㈱が高度な技術を持っている。
	産業技術力	◎	→	㈱日立ハイテクノロジーズが、多探針STM-SEM装置をプローバーとして半導体産業応用をしている。㈱ユニソクが多探針STMの技術と日立のSEM-EBテスターの技術が結合されている。基礎研究だけでなく、産業界でも応用されている。
米国	研究水準	△	→	オークリッジ国立研究所に㈱ユニソク製の多探針STM-SEM装置が導入されているが、大学・研究所における装置・技術の開発研究はほとんど無い。単なるユーザーとして装置や計測技術を使って基礎的な研究を行っているだけである。
	技術開発水準	○	↗	SPMメーカーであるRHK社をはじめとして、Mutiprobe社、Zyvex社が多探針SPMを製品として開発・販売している。RHK社は㈱ユニソクから技術導入を行っている。Mutiprobe社やZyvex社の多探針SPMは主にバイオ計測への応用を目指したもので、原子分解能は必ずしも無い。
	産業技術力	○	→	上記のメーカーの技術は日本や独国のメーカーに比べればやや劣る。しかし、特徴ある装置・技術を持っているのは事実。
欧州	研究水準	○	→	独国Omicron社の多探針STM-SEM複合装置をいくつかの大学が導入し、基礎研究に用いている。ユーリッヒ研究所で2探針STMの独自開発を行っているが、他の大学や研究所で独自の装置開発や改良するという事例は見当たらない。
	技術開発水準	◎	↗	独国Omicron社が多探針SPM-SEM複合装置を開発しており、優れた性能を実現している。欧州だけでなく、中国など世界中に輸出している。
	産業技術力	◎	↗	独国Omicron社の技術が欧州では飛びぬけており定評がある。世界的にも大きな市場シェアを持つ。
中国	研究水準	△	↗	日本や独国から導入した装置を用い、それを改良しながら、基礎的研究を行っている。技術開発はほとんど行っていない。しかし、その研究投資熱は旺盛であり、㈱ユニソクおよび独国Omicronから多数の装置を輸入している。
	技術開発水準	×	→	全く無いに等しい。
	産業技術力	×	→	全く無いに等しい。
韓国	研究水準	×	→	複合化SPMへの研究熱はあまり感じられない。
	技術開発水準	×	→	全く無いに等しい。
	産業技術力	×	→	全く無いに等しい。
全体コメント：SPMとSEMの複合装置、あるいは多探針SPM装置およびそれらを使った計測技術の研究開発は、日本と米国、独国が断然進んでいる。企業での技術開発水準としては3国は同程度だが、大学・研究機関での研究水準は日本が一歩リードしている。また、これらの装置・技術をユーザーとして利用して、さまざまな応用展開を目指しているのは、上記の3国の他に中国、台湾であり、装置の導入熱は極めて旺盛である。韓国では大学・研究所・企業いずれでも、この分野でのアクティビティはほとんど見られない。				

（註1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（註2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.2 電磁波・励起ビーム技術分野

2.2.1 概観

電磁波・励起ビーム技術分野の国際技術力比較をするにあたって、当該分野を 11 の中網目に分類した。すなわち、(1) SR (放射光)、(2) テラヘルツ、(3) 赤外・ラマン分光、(4) 可視・紫外分光、(5) X 線、(6) レーザー、(7) 電子、(8) 陽電子、(9) 中性子、(10) イオン、(11) 音波・超音波である。

詳細は「中網目ごとの比較」で述べるが、研究水準、技術開発力、産業技術力いずれにおいても欧州が安定したレベルを維持しており、本分野における欧州の歴史と伝統を感じさせる。現在の技術レベルを総合的に述べると欧米はほぼ拮抗しており、中国、韓国は、一部は前者に肉薄して来ているとはいえ、いまだ相当の差がある。

電磁波を用いる分析機器は、分子やその集合状態に関して量子論に裏打ちされた情報を与えるため、物質分析や物性解析に応用面で着実な進展がみられる。近年ではナノテクをはじめ、医学、生物分野への展開が積極的で、ナノバイオ計測といわれ、世界的な激しい機器開発競争がみられる。機器開発への取り組みに関しては残念ながら、日本は欧米に較べかなり遅れをとったと云わざるをえない。最近、多方面から機器開発の重要性が指摘されるようになった。日本は過去、応用開発型研究が重視され、機器は欧米から購入すればよいとの風潮があった。それが遅れを生じた原因である。特にレーザー技術は日本は欧米から大きく水をあけられてきた分野で、最近まで高価なレーザーを欧米から購入してきた。そもそも開発経費が膨大なうえに、欧米のものまね技術では勝負はついたのも同然であった。最近、半導体レーザーや固体レーザー分野では、日本が先行する技術が生まれつつある。

電磁波応用機器の中でも X 線分野は、日本は多くの優れた研究や研究者を輩出した。しかし、新規な X 線分析技術は日本が原理提案しても、機器開発は欧米（露）に先行を許す結果となっている。X 線は、一般に強い強度が得られにくく、それを補う大型放射光施設が世界で 20 カ所以上稼動している。放射光は波長連続性、指向性、パルス特性、偏光性に優れるので、物質化学や生命科学に不可欠のツールとなりつつある。硬 X 線リングは日本を含め米、仏と計 3 カ所あるが、放射光利用研究は、ようやく日本も欧米に追いつき肩を並べるまでになった。

電磁波を除く各種ビームを利用する分析機器は、電磁波では容易ではない高空間分解能が得られるため、原子が見える顕微鏡とか固体表面を見る表層解析装置として機器開発が、特に欧で進展した。日本では電子ビームを用いる電子顕微鏡が欧米より先行していたが、近年は、市場も飽和状態にあり、日本の優

位性の維持を危惧する声もある。

さて、中項目ごとの比較であるが、概観で触れなかった機器開発分野について述べる。

電磁波応用に関して近年、超短パルスレーザーや非線形分光素子技術の進歩があり、日本は先行する技術を有している。またその応用としてこれまで良い光源や検出器のなかった中赤外、遠赤外領域の分光技術の開発が世界的に激化している。その応用性、市場性はいまだ不透明であるとされるが、テラヘルツ分光技術と称され、日本も欧米に引けをとらぬ立場にあるといえよう。分子振動は分子の構造を知る指紋領域とされ分子レベルでの学術研究や診断技術に不可欠な手段である。近年、振動分光のひとつであるラマン分光技術の開発競争が激しい。ラマン分光は赤外分光と異なり、水が共存する環境にも適用できるので特に医学・生物領域の有力な分析技術の一つとして注目される。いわゆるナノバイオ研究の将来の発展に不可欠な手法として高感度化され、その応用に関しては、日本も欧米に追いつき、追い越そうとするレベルに達している。

その他、ここで述べなかった分野についても日本は欧米に追随する力を発揮しつつあるが、世界に先駆けるような特質すべき成果はこれから期待したいところである。

2.2.2 中綱目ごとの比較

(1) SR (放射光)

円形加速器であるシンクロトロンから放出される電磁波である放射光 (SR) は波長 (エネルギー) 連続性、高い指向性、パルス性、偏光性などの優れた特徴を持っているため、生命科学や物質科学の研究に不可欠なツールとなっている。現在放射光施設は、大型の硬 X 線リングは SPring-8 (日)、APS (米)²⁰、ESRF (仏)²¹ の 3 カ所であるが、真空紫外線から X 線までをカバーする中型リングは日、米、欧、韓国、台湾など合計 20 カ所以上ある。特に数 10 の磁石列 (アンジュレータ) からの高輝度放射光を用いることによって、1) 1meV 以下のエネルギー分解能、2) ナノ領域の空間分解能、3) ピコ秒時間分解能、4) スピン分解測定、円偏光放射光利用磁気状態解析、などが可能になっている。

生命科学においては、蛋白質の構造解析から機能発現メカニズム解明に向けた研究が精力的に行われており、高スループット蛋白質構造解析が進められている。今後の課題はセレン置換なしで位相問題を解決する軟 X 線構造解析法の確立、およびマイクロビームによる微結晶構造解析であり、国内の放射光施設では世界トップクラスの成果が挙げられている。

一方物質科学においても、我が国で世界をリードする研究が行われている。電子状態解析の柱となる角度分解光電子分光では広島大学放射光科学研究センター (HiSOR) において、1meV 以下のエネルギー分解能で固体エネルギーバンド構造が解析されている。一方、SPring-8 において開発された硬 X 線光電子分光によるバルク敏感の電子状態解析 (エネルギー分解能約 50meV) は特筆すべき技術であり、デバイス開発と直結した有用な研究成果が得られている。一方、ナノ領域の空間分解測定については SPring-8 において数 10nm 空間分解能の結像型で分光型光電子顕微鏡測定 (エネルギー分解能 200meV) を行っているのに対して、ドイツ BESSY II²² において収差補正ミラーとΩ型エネルギーフィルターを採用した光電子顕微鏡 SMART (目標 2nm、100meV) が開発されつつある。また、ゾーンプレート (ZP) で数 10nm に集光させた軟 X 線を試料に照射してイメージングを行う走査型光電子顕微鏡は米国 ALS²³、NSLS²⁴、イタリア ELETTRA²⁵、韓国 PLS²⁶、台

20 Advanced Photon Source (APS), Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois USA

21 European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

22 Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung
<http://www.bessy.de/>

23 Advanced Light Source

24 National Synchrotron Light Source

25 Sincrotrone Trieste

26 Pohang Light Source

湾 NSRRC²⁷ において稼動しているが、実効的なエネルギー分解能 200meV、空間分解能 200nm に留まっている。しかし、ZP を用いた透過型軟 X 線顕微鏡では ALS などにおいて約 50nm の空間分解能で染色体、軟骨、細胞中 DNA などの解析が行われているが、国内では行われていない。

時間分解測定では、リングを走る電子バンチの幅（数 10psec）を利用してレーザーとタイミングを合わせたポンププローブ測定が試みられ、光誘起相転移、磁区ドメイン変化などダイナミックスの研究が行われている。ALS、SLS²⁸ などで磁区構造ダイナミックスに関する優れた研究が行われているが、国内ではこの分野は大きく遅れている。

一方、構造解析では粉末 X 線回折と最大エントロピー法を組み合わせ、フラーレン中金属の構造解析などが行われており、世界をリードした研究が SPring-8 で行われている。一方、触媒反応を高速 EXAFS で解析して時間分解 in situ 測定が行われており、PF においてはポリクロメータを使って 4msec 時間分解能が達成されている。

第 4 世代放射光とも言うべき自由電子レーザーについては、米国、ドイツに続いて我が国でも大型の XFEL プロジェクトが走り出しており、コヒーレンスを用いたホログラフィー、フェムト秒時間分解測定、などの研究展開に大きな期待が集まっている。²⁹

(2) テラヘルツ (THz)

ここでは、主に 100GHz - 10THz におけるテラヘルツ先端計測技術について述べる。テラヘルツ技術が注目されるに至ったのは、(i) テラヘルツ時間領域分光法 (THz - TDS)、(ii) 高出力光テラヘルツ波変換技術、(iii) テラヘルツ量子カスケードレーザー (THz - QCL)、(iv) イメージング応用などの著しい進展による。

(i) THz - TDS は 1980 年代中期に旧ベル研究所、IBM のグループによって開拓され、その後フェムト秒レーザーの普及により広まった。1995 年にイメージング応用の可能性が報告され多くの興味を引いた。研究室レベルにおいて、わが国は 90 年代前半から、現情報通信研究機構 (NICT) のグループを中心に追試が始まった。システム開発では、EU は、フレームワーク 4、5 で予算が投資され TeraView 社が THz - TDS を開発、2003 年ごろから販売

27 National Synchrotron Radiation Research Center

28 Swiss Light Source

29 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

「反応現象の X 線ピンポイント構造計測」(JST- CREST) 高田昌樹 (理研)

http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/organization/research_utilization/pinpoint/

「超高輝度放射光機能界面解析・制御ステーション」(JST- CREST) 尾嶋正治 (東京大学)

<http://www.chem.t.u-tokyo.ac.jp/appchem/labs/oshima/>

を開始した。米国はピコメトリックス社が、国内では栃木ニコン（深澤亮一による）も同時期に販売を始めた。³⁰ それらシステムでの技術力は拮抗しており、研究レベルでも、テーマごとにばらつきはあるものの概ね対等にあるといえる。ただ、最近の発表論文数や内容から判断して、研究活動に差が表れだしている。³¹

（ii）非線形効果による名古屋大学の川瀬晃道らが、1996 年に THz パラメトリック発振の高出力化に成功し、その後、Lehigh 大学の Ding、および（財）半導体研究振興会半導体研究所の須藤健らが、GaSe や GaP を用いた差周波混合でも高出力化を実現している。このタイプの光源とシステム開発は日本が優位にあると言える。ただ、応用の観点から、（i）とのバランスが必要である。

（iii）THz - QCL は 2002 年に初めて発振し、欧米では精力的に研究開発が進められている。現在では 800GHz 程度まで発振可能となっており、イメージング用などへの期待が高まっている。国内では、NICT 寶迫らが 2005 年ごろから追試を始め、世界水準に到達してきたところである。しかしながら、研究グループ・予算が少なく、対抗できる環境にない。EU ではフレームワーク 6 プログラムの TeraNova プロジェクトで開発を進めている。³²

（iv）（i） - （iii）のイメージング応用ではまだ光源開発が十分ではなく、また高速化など課題は大きく、幅広い実用化には時間を要するので、各国は横並びである。ただ、我が国のパッシブイメージング技術の開発が大きく遅れているため、今後、上記の光源を用いたアクティブ化には大きく出遅れる可能性がある。米国では遠赤外カメラのテラヘルツ帯対応に DARPA による集中投資が行われており、英国では、ミリ波カメラのサブミリ波用への改良が進んでいる。³³ これらは安全・安心技術へのキーテクノロジーであり、対応が急がれる。

その他我が国独自の研究開発課題として、大阪大学の斗内らによるレーザーテラヘルツ放射顕微鏡がある。新しい機能の顕微鏡として開発が期待される。また、具体的応用として、TeraView 社は製薬対応のシステム開発を進めており、我が国は、封書内の禁止薬物・危険物検出のプロトタイプを完成させる（理化学研究所の大谷知行）など、米国よりも日欧が進んでいる。また独国では、フランクフォर्ट研究所でのプロジェクト化、セキュリティプロジェクト、テラヘルツ波発生のためのレーザー開発など様々なアプローチがなされていると共に、EU では、テラヘルツに関する教育プログラムが提供されるなど、重要分野としての認識がある。一方わが国ではまだ、そのような取り組みは少

30 米国 www.picometrix.com, 英国 <http://www.teraview.com/>、<http://www.tochigi-nikon.co.jp/>

31 たとえば、CLEO2006 の THz セッションでは、明らかに論文数・内容に差がみられる

32 <http://www.teranova-ist.org/>

33 英国 ThruVision:<http://www.thruvision.com/>

なく、基盤整備が遅れている。^{34,35}

(3) 赤外・ラマン分光

赤外分光とラマン分光はこれまで相補的關係を保ちつつ、相携えてともに発展して来た。しかし、近年のレーザー、光検出器、顕微光学などの技術の発展、成熟とともに、ラマン分光の優位性が顕在化している。現在、FT-IR 分光計の普及率は、ラマン分光計のそれをはるかに上回っており、ルーチン計測に関してはこのような状況がしばらく続くものと予想される。しかし、先端計測、とくに時間と空間を分解した時空間分解計測に関しては、ラマン分光の潜在能力が赤外分光をはるかに上回る。光の回折限界による制限のために、顕微赤外分光の空間分解能が高々数ミクロンであるのに対し、顕微ラマン分光では数百ナノメートルの空間分解が容易である。また、非線形ラマン分光や表面増強効果（SERS）を用いたチップ増強ラマン分光により、さらに高い空間分解能での測定が可能となりつつある。とくに生命系試料（細胞、組織、器官）では、赤外分光に比べて水の妨害を受けにくいラマン分光が圧倒的に優位にある。ラマン分光の最大の弱点である蛍光の妨害は、最近わが国（浜松ホトニクス（株））で開発された近赤外光検出器を用いる近赤外励起法により、ほぼ完全に回避できることが示されている。

ICORS³⁶ の第 20 回大会が、世界のラマン分光学者を一同に集め、昨年 8 月に横浜で開催された。この会議には、約 600 人が世界 33 カ国（うち日本から約 300 名）から参加した。この会議は伝統的に物理、化学、生物の基礎科学者の参加が多いが、今回は応用に関心を持つ企業の関係者の姿が目立ち、ラマン分光の発展が実用展開のフェーズに入りつつあることを窺わせた。この会議で最も注目されたキーワードは、「3 次元分子イメージング」である。「分子の指紋」と呼ばれる振動ラマンスペクトルを用いて分子を特定し、数百ナノ

34 http://www.ipm.fraunhofer.de/fhg/ipm_en/technologies/terahertz/, <http://nanotime.lgep.supelec.fr/ntti2007/> など参照

35 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

東北大学（小川雄一、尾辻泰一、西澤潤一）筑波大学（服部利明）東京大学（小宮山進、長谷川哲也、島野亮、平川一彦、田畑仁）大阪大学（芦田昌明、栗津邦男、田島節子、斗内政吉、萩行正憲、安井武史）名古屋大学（川瀬晃道）、京都大学（田中耕一郎）広島大学（角屋豊）理化学研究所（伊藤弘昌、大谷知行）、NICT（寶迫巖）栃木ニコン、先端赤外、キヤノン、浜松ホトニクス、村田製作所、NTT、東レリサーチ、「新産業基盤「未踏光学（テラヘルツ光）」開発・創生プロジェクト」（リーディングプロジェクト）「ITC による安全安心を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」（総務省）小宮山進（東京大学）「半導体量子構造の探索とテラヘルツ波計測技術開拓」（CREST）小宮山進（東京大学）「THz 波高分解吸収スペクトラム測定による分子・格子の固有振動と分子構造の同定」（科研費・学術創成）富永圭介（神戸大学）

参考文献「テラヘルツ技術」、オーム社、2006 年 5 月

「テラヘルツ波技術の現状と展望」、応用物理、Vol. 75, No.2（2006）160.

「Cutting-edge terahertz technology」、Nature Photonics 1（2）、97 - 105（2007）.

36 International Conference on Raman Spectroscopy

メートルの空間分解能で 3 次元分布を測定できることは、他の計測法の追従を許さないラマン分光の長所である。しかも、ラマンイメージングでは、蛍光イメージングのように前処理を必要としないので、真に非侵襲、実時間、実空間で直接分子情報を取得することができる。ラマンイメージングの応用として最も注目されるのは、生きた細胞の時空間分解分子レベル解析である。第 20 回 ICORS では、日本（東大、濱口）、米国（Harvard、Xie）、ドイツ（Jena、Popp）など数グループが生細胞のラマン分光およびイメージングの研究結果を報告した。とくに東大のグループは、「生命のラマン分光指標」と名付けたラマンバンドの発見とその応用で世界をリードしている。このバンドが細胞の生命活性を定量化する指標として確立されれば、ラマン分光は、生細胞を扱うあらゆる科学・技術で必須の基盤計測技術となる。

赤外分光に関わる先端計測法として、2 次元 NMR の赤外バージョンである 2 次元赤外分光がある。米国（Pennsylvania、Hochstrasser）を中心に基礎研究が盛んに行われているが、実用的計測法として確立される見通しはまだ立っていない。³⁷

（4）紫外・可視分光

ルーチン計測法としての紫外・可視分光技術は、分光光度計や蛍光光度計としてすでに成熟している。また近赤外分光技術も、生体計測を中心にルーチン計測法として確立されている。以下では、これからの発展が期待される先端計測法として超高速時間分解分光、単一分子蛍光計測、3 次元蛍光イメージング、界面選択分光をとりあげ、その概要を述べる。

紫外・可視領域における超高速時間分解分光は、基礎研究レベルではすでに 5 フェムト秒以下の時間分解を達成している。日本（東大、小林）やイタリアのグループが世界をリードしている。10 フェムト秒からピコ秒の領域では、通常のポンプ・プローブ法に加え、アップコンバージョン、光カーゲートなどの手法が導入され、物理、化学、生物の広い分野での基礎研究が盛んに行われている。ピコ秒時間分解分光装置とそれを使いこなす人員を求める企業の研究所が増えている。単一光子相関計測法やストリークカメラを用いた 10 ピコ秒領域の時間分解蛍光分光装置が市販されており、半導体材料評価などに使われている。

強い蛍光を発する分子、あるいは蛍光ビーズなどの強い蛍光を発するプロ-

37 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

「時空間における分子振動計測の極限化：分子から細胞まで物質組織化機構の解明に向けて」

（科研費・学術創成研究）濱口宏夫（東京大学）

<http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/users/struct/index.html>

関連する他の調査比較項目 2.2.2-（6）レーザー、3.8 ナノ計測

ブを付加した分子 1 個を、光学顕微鏡あるいは近接場顕微鏡中の微小空間中に置き、レーザー誘起蛍光信号を検出することによって、その分子の動的挙動を観察する単一分子蛍光計測の手法が確立されている。単一分子操作と組み合わせた応用が多方面で議論されているが、まだ実用化には至っていない。

共焦点レーザー蛍光顕微鏡による 3 次元蛍光イメージング法は、生細胞中の分子の分布、動き、反応などを実時間、実空間で観測する手法として、生化学、医学の分野で多用されている。2 光子蛍光顕微鏡を含め多種の市販品がある。従来の色素によるオルガネラ染色に加え、緑色蛍光蛋白質などの発光性蛋白質を遺伝子操作によって観測対象蛋白質に導入する手法が開発され、さまざまなバージョンの発光性蛋白質が作り出されている。2 つの発色団の相互作用を利用して、それらの間の距離に関する情報を得る蛍光共鳴エネルギー移動 (FRET) 法によって、細胞内の各種情報伝達の仕組みが明らかにされつつある。蛋白質再構成の手法を FRET と組み合わせて、様々な生体反応を検出する方法が日本 (東大、梅澤、小澤) で開発された。

界面選択的分光は、2 次の非線形感受率に基づく赤外・可視表面和周波発生法がほぼルーチン化し、市販装置も登場している。従来の赤外反射吸収と比較して、金属表面だけではなく、あらゆる界面に応用できることが表面和周波発生法の長所である。日本 (KAST、石橋) で最初の実験が報告された 4 次の界面選択的分光は、実験的検証が進行中の新手法である。³⁸

(5) X 線

X 線を入射させて分析する方法は、原理ではなく技術によって分類すると、(A) シンクロトロン放射光、(B) X 線管、(C) 医学診断に分類できる。(A) は、科学的な水準は極めて高いが各国とも横並びの状態であり、国際交流や施設間技術交流が大きく、独創的な技術も数ヶ月で追隨する(される)状況にある。(C) は、従来の透過像に加えて、CT 像と位相像による空間分解能の向上が顕著である。以下では (B) について取り上げる。

(B) の X 線管を用いた技術は、(1) 大型専用装置、(2) 卓上型汎用装置、(3) ハンディー型装置の 3 極化が進行中である。特に (1) は製造プロセスラインに特化した装置となるため、鉄鋼プロセスの迅速蛍光 X 線分析や半導体プロセスの全反射蛍光 X 線分析などで日本が独走態勢にあり、欧州が追っている。(3) では米国 (ナイトン社、イノベックス社) と中国 (スカイレイ社)

38 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

「分子高次系機能解明のための分子科学 - 先端計測法の開拓による素過程的理解」

(科研費・特定領域研究) 代表藤井正明 (東工大) <http://www.res.titech.ac.jp/~kiso/koujikei.html>

関連する他の調査比較項目 2.2.2- (6) レーザー、3.8 ナノ計測

が先行しており、ハンディー装置を開発した日本装置メーカーはない。ただし将来 (3) の発展につながる要素技術として、小型 X 線管の開発では、浜松ホトニクス社、X 線技術研究所など日本の技術は高い。一方、カーボンナノチューブを用いる X 線管の提案があるが安定性などの点で問題がありアイデアの段階で製品化は未定。(3) のハンディー装置には小型 X 線検出器も必須であるが、SDD チップや Si-PIN チップは、欧米・中国で独自に製品化されているのに対し日本では製品化されていない。(2) の卓上型は (1) と (2) の中間であり、世界で横並びの状況である。

X 線分析技術のブレイクスルーは、(i) キャピラリーレンズ（露 村 1986 年、島津 副島 1988 年、堀場）、(ii) 鰐型 X 線レンズ（産総研 富江 1994 年）、(iii) 全反射蛍光 X 線（九大 米田・堀内 1971 年）、(iv) 3 次元配置蛍光 X 線、(v) マイクロカロリメータ X 線分光検出器（米国 NIST 2000 年前後）、(vi) SDD 型 X 線検出器（ドイツ、イタリア 1990 年代後半）、(vii) ポリキャピラリー共焦点顕微鏡（ベルリン工科大カニギサー、ロスアラモス研 ハブリラ 2000 年）、(viii) 帯電 X 線発生（寺沢 1968 年、Brownridge 1992 年、河合 1995 年）、(ix) ラマン分光や X 線回折と蛍光 X 線を一体型ポータブル装置とするもの（アントワープ大 Janssens、早稲田大 宇田、大阪電通大 谷口、東京理科大 中井）、(x) レーザープラズマ軟 X 線源（福岡大 脇田 2006 年）、(xi) X 線導波路、等が挙げられる。(i) を提案したのはロシアと日本であったが製品化は米中で、日本の高いものづくり技術が生かされていない。(ii) は最初アイデアは日本、そのアイデアの実験はフランス、その後の技術的發展はドイツ・イタリアである。実用化はまだ先である。(iii) は日本の提案後、製品化では欧州が先行したが、単色化 X 線を用いることで高感度化するという研究（東大 飯田・合志 1980 年代）によって再び日本が技術的に優位となり、複数の日本装置メーカー（テクノス、理学）が世界でトップとなり（1990 年代初め）現在に至っている（ISO 規格の主導権も日本が持つ）。(iv) は欧州の古い技術であるが、パナリティカル社（オランダ）が最近になって高感度装置を製品化し (iii) の感度に迫っている。(v) は米国がアイデアを出し、試作器は米（NIST）、欧（PTB）³⁹、日（SII）で成功したが、欧州は撤退した。実用化するためには新しいブレイクスルーが必要である。米国の技術は停滞中である。日本では複数の開発プロジェクトが走っているが、製品化には至っていない。(vi) の SDD は、欧州発の技術で、高電圧や液体窒素不要で高速測定できる X 線検出器として登場した。日本では一部の研究者（SPring-8）によって高速測定対応ではないという初期評価があった（誤り）。最近では大面積高感度化されたが、日本では独自の技術がなく、欧州（ケテック社など）からのチッ

39 Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ブ提供に依存している。米国も独自に製品化し 2008 年に参入する。中国では独自に欧州のものまねではないチップ開発が実現し製品化した（スカイレイ社 2007 年）。(vii)、(ix) はすでに製品化された。(x) は試作機が成功した。(viii) は米国の焦電結晶型 X 線源は製品化し核融合を用いた中性子源への開発が始まった。日本の帯電型はまだ製品化されていない。(xi) はロシアで 1990 年代に提案され、日米で製品化され、2005 年ごろから全反射蛍光 X 線装置に応用された。

これらの X 線機器開発は、RoHS 規制等、プラスチック、自動車、電気製品、食品・食器、土壌等の有害元素（鉛、砒素、水銀、クロム、カドミウム、臭素）規制強化が大きな駆動力となっている。今後フィンランド等でさらに厳しい有害元素規制強化の動きがあり、技術開発への要求が高くなると予想される。

(6) レーザー

1960 年にレーザーが発見されて以来、レーザー技術の進歩は目覚しく、今や現代社会に不可欠の要素技術となっている。科学計測の基礎的分野において、レーザーはすでに幅広く利用されており、蛍光分析、フォトサーマル分光分析などのための励起光源として長年の実績がある。とくに半導体レーザーは価格も安く信頼性も高いので、簡易計測用光源として広く使われている。今後、(1) 任意の波長で発振できる、(2) 極めて単色な波長を走引させ、かつ特定の波長に固定できる、(3) 高出力の超短パルスが発生できる、などさらに性能、価格面でレーザーの改善が進めば、科学計測の分野に飛躍的な進歩をもたらすと予測される。

現在、市販分析機器においては、窒素レーザーをイオン化部に用いるマトリクス支援レーザー脱離イオン化 (MALDI) 質量分析装置は DNA やたんぱく質の評価のための汎用分析機器として不可欠のものになっている。また、キャピラリー電気泳動装置による DNA シーケンス解析装置ではレーザー励起蛍光法が利用されており、バイオ計測の分野を飛躍的に加速した。最近では、高性能で比較的安価なフェムト秒レーザーが利用できるようになり、細胞の 2 光子蛍光寿命イメージング顕微鏡などが開発され、バイオ計測分野すなわち細胞評価技術が飛躍的に向上すると予測されている。

これらの技術の一部には、MALDI 質量分析計のように日本（島津）からノーベル賞受賞者が出るなど、わが国の寄与は少なくない。また、DNA シーケンス装置（日立）のように、日本の技術が世界をリードした例もある。しかし、市販されているレーザー計測科学装置のほとんどは、欧米の企業により生産、販売されており、わが国のシェアは大きくない。

現在進行中の技術開発としては、レーザーイオン化質量分析計などが挙げられる。今後、母乳に含まれる極微量ダイオキシンの測定などに応用が期待され

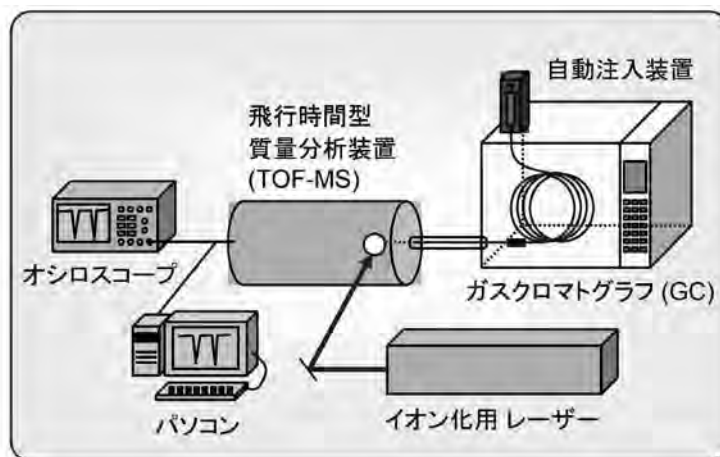


図3 レーザーイオン化質量分析装置



図4 分析中の写真

ている。一方、空港の手荷物検査場あるいはテロの現場で、環境中に含まれる極微量の爆発物を、迅速にかつ超高感度に分析するための計測技術が求められている。このような人類の生存、繁栄、並びに国家の安全、安心に繋がる研究課題は、今後のレーザー計測科学が挑戦すべき大きな課題であろう。⁴⁰

(7) 電子

1) 透過電子顕微鏡・走査電子顕微鏡

装置の空間分解能は、多極子レンズを用いた球面収差補正技術がドイツ・ア

40 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

「ダイオキシンの高精度・簡易迅速分析装置の開発」(大学発ベンチャー創出推進)

今坂 藤太郎(九州大学) <http://imasaka.cstf.kyushu-u.ac.jp/>

関連する他の調査比較項目

2.1.2- (4) 近接場光学顕微鏡、2.2.2- (3) 電磁波(赤外・ラマン)、2.2.2- (4) 電磁波(可視・紫外)、2.3.2- (1) 液体クロマトグラフィー、2.3.2- (2) ガスクロマトグラフィー、2.3.2- (4) 質量分析、2.3.2- (5) 電気泳動、3.2 質量分析

アメリカのベンチャー企業によって製品開発されたことにより、近年格段に向上した。収差補正器を搭載した高性能機をカタログ製品としていち早く投入した米社が、特にハイエンド機市場で急速に売上を伸ばしている。各メーカーが販売できる装置の性能が、ベンチャー企業とのライセンスに制限を受けているのが現状である。

空間分解能が原子レベルに到達した現在、時間分解能を向上させる試みが米独の大学・国立研究所にて行われていることにも注目したい。面電子源へのパルスレーザー照射による光電子放出を用い、時間分解能 30ns において空間分解能 20nm 程度が得られている。超高速電子顕微鏡は、高輝度電子源、試料ハンドリング環境、検出系など、電子顕微鏡に必要なあらゆる要素技術の進展が要求される分野であり、今後の推移に注目したい。この分野においても、日本の研究機関の参入は遅れている。

電子顕微鏡を応用した研究については、わが国では従来優位を保ってきた分野である。しかし新規の観察手法の原理の提案・具現化の多くは、米国・欧州における先駆的・独創的な研究をその源泉としている場合が多く、その潮流は現在も続いていると思われる。(例えば、ウィーン工科大による、電子線を用いた X 線磁気二色性類似現象の測定など)

例えば、上記の収差補正器の開発資金としては、合衆国が電子顕微鏡技術の遅れを回復するために立ち上げた大規模な国家プロジェクトが重要な役割を果たした。わが国は、ユーザーのニーズとメーカーの技術開発力、それぞれが高いレベルにあるが、双方の有機的な連携は効果的に機能していない。大学・国立研究機関における装置開発研究は、新規電子線源開発や高圧変調式収差補正技術など、ごく一部にとどまっている。また、国産メーカーの売上にたいする研究開発費比率も、欧米他社の約半分である。大きな目標設定の中で双方のニーズとシーズを統合し、具体的なロードマップの中で有効な資金投入を行う施策を早急に検討すべきである。

2) 分析顕微鏡

X 線分析・エネルギー損失分光双方につき、特に走査透過電子顕微鏡のプローブサイズが大幅に縮小化したことにより、数オングストローム領域に関する元素分析が可能になるに至っている。

最近、わが国のグループにより、結晶構造中の特定元素毎のイメージが得られたことは、特筆に価する。また、入射電子線の単色化装置の開発によりエネルギー分解能も向上しており、今後のさらなる向上により、元素分析にとどまらない、電子状態解析にエネルギー損失分光が使われるようになると期待されている。

X 線検出器分野では、新型検出器 (SDD) が製品投入されるようになり、

特にアメリカで小規模メーカーが乱立している。エネルギー損失分光の検出器は米・独社の寡占状態が継続しており、大きな技術革新は起こっていない。

(8) 陽電子

陽電子は 1950 年代には物質のフェルミ面の決定、1960 年代後半から空孔型欠陥の計測プローブとして 40 年以上物性研究に利用されてきた。特に物質中の陽電子寿命や消滅 γ 線スペクトルを計測することによる原子空孔（固体中原子の存在しない場所）の検出では唯一のプローブとして位置づけられる。単空孔から数十空孔クラスター、原子数比で 10^{-7} から 10^{-3} の定量範囲、かつ空孔と結合した元素種の同定といった情報が得られ、金属・半導体について実績を挙げてきた。最近では、Fe-Cu 系で空孔を保有しない数十原子の微小析出物の検出に成功（長谷川、東北大）⁴¹ し、欠陥プローブとしての新たな可能性を示した。また、高分子材料の自由体積やサブナノ孔サイズの多孔質材料の評価にも用いられている。

一方、陽電子を電子と同様にビーム化する表面科学のプローブ技術の研究は、1970 年代後半から 1990 年ごろまで米国を中心に行われてきた。放射性同位元素から発生する白色の陽電子を単色化するための減速材、電子銃と比較してその輝度が $1/10^{16}$ しかない単色陽電子を高効率で集束する輝度増強法が開発された（Canter、Mills、Jr. 米国）。その基盤技術をもとに、低速陽電子線回折などの新表面分析法が開発され、陽電子が電子よりも優れた情報を与えることを実証した。また、単色陽電子ビームにより表面層の原子空孔情報が得られ、半導体デバイス工程でのプロセス誘起欠陥の研究が日米欧で盛んに行われ、多くの成果を挙げてきた。1990 年ごろ開発されたパルスビーム化（Triftshäuser、独国；鈴木、産総研）により陽電子ビームでの寿命測定も可能となり、1997 年にはそのマイクロビーム化による走査型陽電子顕微鏡の開発（Triftshäuser、独国）がなされ、空孔二次元分布（像形成）計測への道が開拓された。一方で最大の問題点であった輝度の低さを克服する高強度陽電子ビームの発生が、日本では 2 機の線形加速器（鈴木、産総研；栗原、高エネ研）、独国では原子炉（Hugenschmidt、独国）で実現され、それらは共同利用陽電子発生源施設として運用されている。日本では最先端を狙ってこれらの高強度ビームを用いた透過型陽電子顕微鏡と陽電子プローブマイクロアナライザーを開発中である（藤浪、千葉大）。⁴¹

41 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

「透過型陽電子顕微鏡」H17-20（JST 先端計測・機器開発事業）藤浪真紀（千葉大学）

「先端ナノ材料学による原子炉鉄鋼材料の脆化・劣化機構の解明と制御・予測」H17-21（科研費・特別推進研究）長谷川雅幸（東北大学）など

関連する他の調査比較項目 2.2.2 (5) X 線, γ 線, 2.2.2 (7) 電子

陽電子研究の黎明期に大きな寄与をした米国がその後の人材育成に失敗し衰退しているのに対し、日欧は世代交代がうまく進み、引き続きオリジナリティーの高い研究が行われている。日本で特筆すべきは、企業の材料研究者が陽電子を物性手法として注目・活用していることであり、一部の企業では陽電子ビームの装置化と販売が行われている。今後の産業への寄与・展開が期待される。中国は日米に留学していた研究者を中心に今後の活性化が期待されるが、韓国は目立った研究者がいらない。

なお、ここでは陽電子を物質の励起源として利用した場合の方法論の発展のみを記載した。従って、 β^+ 崩壊核種を含んだ分子の初期がん細胞への集積を利用した陽電子断層撮影法 (PET) の開発は含んでいない。PET では位置分

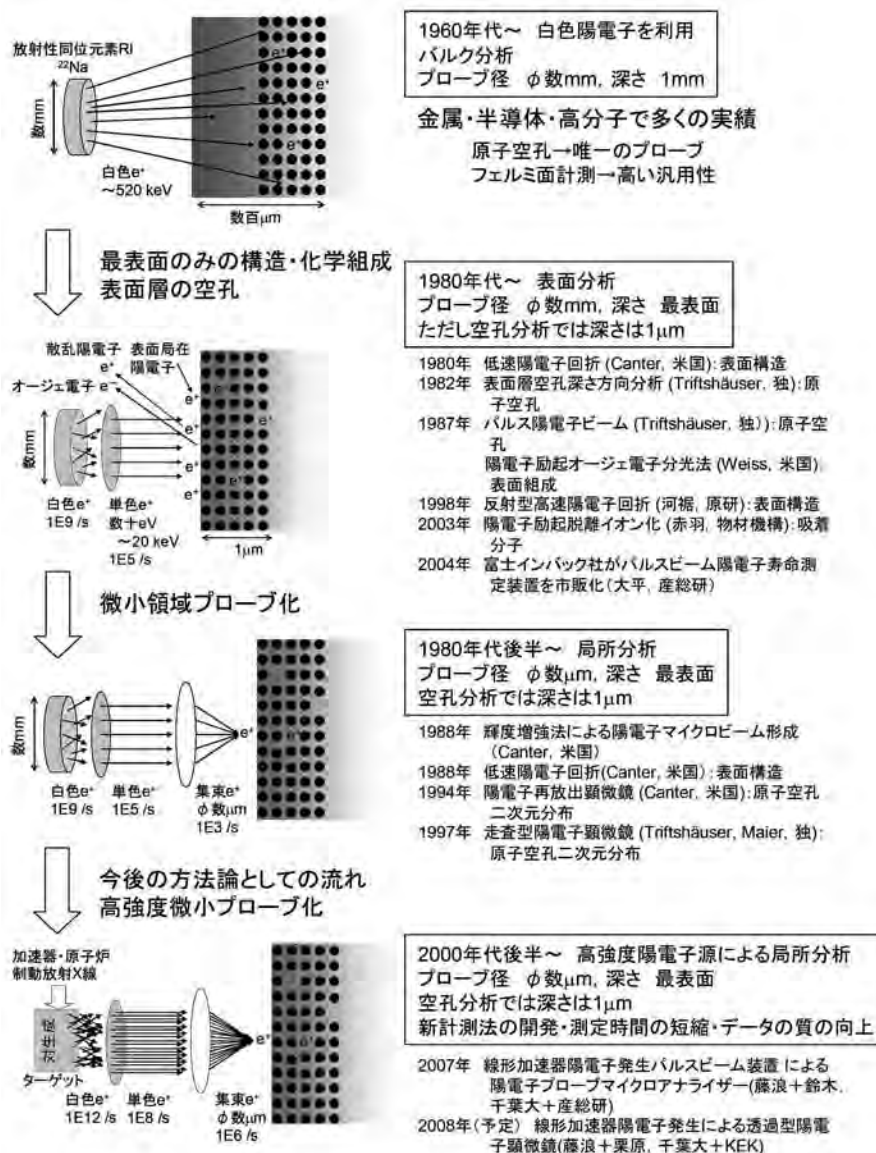


図5 陽電子プローブの物質科学への展開の歴史

解能向上が緊急の課題であり、日本では 1mm 以下の空間分解能を目指した検出器の開発が進められている（石井、東北大、科研費特別推進研究、H17 - 21）。⁴¹

(9) 中性子

中性子源には研究用原子炉と加速器型中性子源とがある。研究用原子炉は、1960 年代から 1970 年代に集中的に建設された。しかしながら、中性子束の強度は技術的な限界に至っており、現在においても世界最強の原子炉は欧州連合が 1972 年にフランス・ラウエ・ランジュバン研究所（58MW）に建設したものである。その後、わが国では、日本原子力研究開発機構の JRR3（20MW）が 1990 年、韓国原子力研究所の HANARO（24MW）が 1997 年、ドイツミュンヘン工科大学の FMR-II（20MW）が 2004 年、オーストラリア原子力研究機構の RRR（20MW）が 2006 年と、むしろ中規模の原子炉の建設が進められてきた。また、中国では現在 60MW の原子炉の建設が進められている。一方、加速器を利用した中性子源はわが国が世界のパイオニアとして 1970 年代に東北大学で開始された。その後、1980 年には現高エネルギー加速器研究機構の KENS 施設（5kW）、1982 年に米国アルゴンヌの国立研究所の IPNS 施設（12kW）、1985 年には英国ラザフォード・アップルトン研究所の ISIS 施設（160kW）⁴² が建設された。加速器型中性子源の性能に関しては、建設当時十分な理解がなされていなかったが、ISIS 施設を中心としてなされた研究成果がそれまで困難であった研究に飛躍的進展を与えることができたことから、現在、全世界の中性子源戦略は加速器型に大きく傾きつつある。実際、米国オークリッジ国立研究所の SNS 計画（1.4MW、\$1.4B、2006 年完成）⁴³、わが国の J-PARC（1MW）⁴⁴ が建設中であるとともに、欧州連合では、5MW（€1 B）規模の中性子源計画が数年のうちに稼動するものと期待されている（現在、スウェーデン、スペイン、ハンガリーがそれぞれ建設の名乗りを上げている。^{45,46} 更に、中国では、2007 年より、英国の ISIS 規模の中性子源建設が開始された。⁴⁷ また、インド、韓国からも計画が提案されていることは見逃せない。

加速器型中性子源は大強度陽子加速器技術（イオン源、線形加速器、シンクロトロン、加速器制御）、中性子源技術（ターゲット、減速材、大出力低温技術、遮蔽体、中性子工学計算）、中性子実験装置技術（中性子輸送、中性子光

42 <http://www.isis.rl.ac.uk/>

43 <http://neutrons.ornl.gov/>

44 <http://j-parc.jp/>

45 http://neutron.neutron-eu.net/n_ess

46 <http://www.essbilbao.com/html/iniciativa1.asp>

47 <http://english.cas.ac.cn/eng2003/news/detailnewsb.asp?InfoNo=26413>

学、中性子制御、中性子検出、データ集積、データ解析ソフト）からなる総合的技術によって支えられている。これらの技術のほとんどにおいて、わが国は世界のトップレベルにあるといつてよい。

中性子大型研究施設は、他分野（物性物理、高分子、化学、生命科学、地球物理、機械工学、原子力工学、産業界等）からの多数の利用者（J-PARC 中性子施設では 2000 名程度を予想）による利用によって初めて多数の秀でた研究成果を創出できることから、中性子源施設の技術的優秀さに加え、利用者が利用しやすい運用体制が整備される必要がある。その点においては、わが国の施設は一般に国際標準以下の状況にある。大きな投資を行なった施設が十分利用される制度設計を国（省庁を超えて）を挙げてなす必要がある。また、海外の大型中性子源において特筆すべきことは、中性子源と組み合わせ、ナノサイエンスセンター、バイオ研究センター、放射光施設等を併設することにより、中性子実験のための試料準備も含めた広範な研究の拠点を形成していることである。この点においてもわが国の科学戦略が学ぶべき点であると考ええる。大勢の研究者が集まる研究施設を集合して総合的な拠点を形作っている。このような動きは欧米で最近特に顕著である。一方、わが国の科学戦略でもある大



図6 世界における中性子強度の変遷と、世界を代表する中性子源施設（欧州
連合ラウエランジュバン研究所（ILL）、英国ラザフォードアップルトン研究所
ISIS 施設、米国オークリッジ国立研究所 SNS 施設、わが国の J-PARC。

型研究施設を産業界に開放することは、国際的には大変ユニークな動きであるといつてよい。その成否もやはり運用制度・体制の整備にかかっているといつてよい。

(10) イオン

ここではイオンを固体に照射して材料計測を行う手法のうち、実用的に重要な二次イオン質量分析法 (SIMS) と高分解能ラザフォード後方散乱法 (HR-RBS) を取り上げる。

SIMS の基本的な特徴としては、(1) 水素からウランまでの全元素に極めて高い分析感度を持つこと、(2) 深さ方向での不純物分布 (デプスプロファイル) を含む試料の三次元情報を与えること、(3) 表面有機物の化学構造情報が得られることなどが挙げられる。SIMS は 1970 年代から研究と実用化が平行して行われ、特に 1980 年代の半導体マイクロデバイスの開発・製造に関連する評価に際しては不可欠なツールとしてその地位を確立した。その際主として用いられたのは半導体中の極微量不純物の深さ方向分布の評価であり、ダイナミック SIMS と類別される測定モードでの利用が中心となった。素性のよい半導体単結晶を試料とした場合の定量法の確立に伴い、広い範囲での応用が行われた。一方 1990 年代以降、飛行時間型 (TOF) 質量分析装置の開発に伴って、従来限られた表面分析に用いられていたスタティックモードでの測定技術が飛躍的に進歩し、多くの有機系材料の評価にまで測定対象を広げ、新たな展開が始まった (Muenster 大、Bennighoven ら)。さらに 2000 年代に急速に開花したクラスター一次イオンを用いる新たな展開は、SIMS の第 3 期の繁栄時代を切り開きつつあるといえよう。すなわち、 SF_5^+ に始まり、その後 Au_3^+ 、 Bi_3^+ 、 C_{60}^+ などさまざまなクラスター一次イオン源が開発されるのに伴い、飛躍的な高感度分析、表層破壊の程度の抑制が実現され、ポリマーを始めさまざまな有機材料や、バイオ材料の評価への道筋が見出されて、現在、活発な基礎研究や応用研究が行われつつある (Muenster 大、Bennighoven ら、Manchester 大、Vickerman ら、Pennsylvania 州立大、Winograd ら)。特に従来は不可能とされていた有機物のデプスプロファイリング測定への応用が模索され、一定程度の成果を収める段階にまで到達している。一方、近年の分子動力学計算技術の進歩に伴い、直接には観察することの不可能な固体とイオンとの相互作用に関する理解が飛躍的に高まりつつある。これにより、スパッタリングの基礎過程に関する知見が増えるのと同時に、先に記したクラスター一次イオンの表面での動的な相互作用を詳細に予測することの可能性が議論され始めている (Pennsylvania 州立大、Garrison ら)。しかしながら、日本国内では従来半導体分析を中心としたダイナミック SIMS の研究活動に偏っていたこと、近年の半導体産業の低迷、分析評価の外部委託に依存している等

の影響を受け、SIMS 研究は大学、国公立の研究機関はもとより、民間での研究活動においても大きく立ち遅れているのが現状である。とはいえ、最近は従来の半導体産業以外の企業において TOF-SIMS を用いた応用研究が次第に活発に行われるようになり、今後の展開が期待される。現在の分析装置メーカーとしては、CAMECA⁴⁸、ION-TOF⁴⁹、アルバックファイ⁵⁰ が挙げられるが、CAMECA は主としてダイナミック SIMS 装置を、また、ION-TOF は TOF-SIMS に特化した製品を供給している。特に後者の Bi イオン銃は今後のクラスター一次イオン源のキーポイントになりうるために、TOF-SIMS を供給する他社の技術的なキャッチアップが大きな課題になると思われる。SIMS コミュニティーとしては 2 年に 1 度開催される SIMS 国際会議に加えて SIMS-Europe (欧州)、S-SIMS-Workshop (北米)、SIMS-新技術 WG (日本) がそれぞれ活発な活動を続けており、情報交換の場としての地位を確立している。

一方、高速のイオン（通常は MeV オーダーの He^+ イオンなど）を用いる RBS は、従来半導体などの表層数 μm 程度に存在する元素の組成分析に応用されてきた。しかしながら、加速器など大型装置を使用が不可欠であり、深さ方向分解能も十分でなかったため、近年の nm レベルの極薄膜や多層膜の評価には必ずしも十分に用いることができなかった。しかしながら、近年小型の加速器と磁場型の高分解能エネルギー分析器を用いた新たな装置展開が行われ（京都大 木村ら）、数 100eV 程度のエネルギーの He^+ イオンを用いてエネルギー分解能を従来よりも 2 桁程度改善し 0.2nm 程度の深さ分解能での測定が実現している。すでに商品化⁵¹ や委託分析サービス⁵² も行われておりこれにより、新たな半導体評価ツールとしての評価が高まり、応用する研究機関が増加する傾向が見られる。⁵³

(11) 音波・超音波

音波・超音波関連の計測技術としては、音波・超音波単独のみで機能させることができる技術分野はかなり成熟しており、技術の複合化あるいは統合化により高性能化、有用性の進化を図ることで、生産を含め真に社会に貢献できる技術位相にある。

48 フランス、<http://www.cameca.fr/>

49 独、<http://www.iontof.com>

50 日、<http://www.phi.com>

51 神戸製鋼所、<http://www.kobelco.co.jp/>

52 コベルコ科研、<http://www.kobelcokaken.co.jp/>

53 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト

「収束イオンビーム / レーザーイオン化法による単一微粒子履歴解析装置の開発」(JST 先端計測分析技術機器開発事業プロジェクト) 坂本哲夫 (工学院大学) <http://www.jst.go.jp/sentan.html>

関連する他の調査比較項目 2.1.2- (7) イオン (FIM, AP)、2.3.2- (4) 質量分析、3.2 質量分析

特に外貨の獲得で実績のある主な製品としては、超音波診断装置、弾性波フィルター、発振子など、弾性波利用電子部品があり、文字通り技術としては世界をリードしていた。ところが、電子部品、デバイス関係では依然としてリードを保っているが、およそ 15 年前、2、3 の企業を除いて、多くの企業で音波・超音波関係研究グループが解体された。それゆえ全体として今や欧米に追い抜かれ、中国に追いつかれようとしている。以下に物質・材料、ライフサイエンス、デバイス、環境、社会の各項目に分けて各分野の動向を簡単に紹介する。（物質・材料）生産支援計測技術として、音波による形状認識（製品の形状、寸法および配向）に基づく選別、搬送の方向指示など FA（Factory Automation）用技術は日本が優れている。食品工業に用いられる技術として熟成度、糖度測定、肉質の測定があり、日本も進んでいるが、欧州が盛んに研究している。生産工程での品質管理のための（寸法計測、超音波伝搬損失測定による品質、接合状態等の管理等の）非破壊試験法は日本の水準は高い。ただし、進んでいる超音波顕微鏡、光音響顕微鏡等はインライン計測法としては未使用である。

（デバイス）振動ジャイロ、加速度、速度 3 次元モーションセンサー等は日本が高水準、バイオ、医療関連の微小流量計測は欧米に遅れを取っている。臭いセンサを含む超音波官能検査は日本が進んでいるもののまだ研究段階にある。

（ライフサイエンス）トランスデューサーとヘッドアンプを結合することにより高性能化、短小化を図った超音波診断装置、および超音波映像処理ソフトウェアの開発では、欧米が先手を取っている。ガン治療の手法である超音波ハイパーサーミアを実施するための非侵襲的温度測定法の確立が必要であるが、まだ解決されていない。

（環境）温度分布、塩分分布などが経常的に測定できる海洋音響トモグラフィ分野では、日本のハードウェアは進んでいるものの、それらのデータを有効利用するソフトウェアが欧米に後れを取っている。中国もこの面では日本より進んでいる面がある。音波（例えばドップラーレーダ）による気流観測技術については日本と欧米は同一レベル。地中の音響的構造を調べる音響物理探査技術は、資源探査とも関連して米国、欧州が進んでいる。地雷探査に関して、日本は貢献しつつある。騒音計測技術に関して、日本は欧米と同レベルか進んでいる状況。ただしマイクロマシニングを利用した小型高性能なマイクロフォンの制作では遅れを取っている。

（社会）高齢化社会および老人性難聴増加に対応するため、音バリアフリー環境を実現しなければならないが、日本ではかかる視点での研究が進んでいない。欧米では権利意識が高いため日本よりそれなりに研究が進んでいるが、十分とは言えない。また老朽化した橋、建物、などの建築物、古い製品等の超音波診断に基づく寿命推定を確立する必要があるが、これは軍需があるため米国が先

端、欧州、日本の順である。

2.2.3 比較表

◆電磁波・励起ビーム技術分野

●SR

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	SPring-8 で着実に新しいサイエンスが生まれており、さらに XFEL プロジェクトが走り出したため、放射光研究分野に活気が戻っている。日米欧の三極が世界をリードする構造が続くものと思われる。
	技術開発水準	○	→	製薬関係ではタンパク構造解析のツールとしてルーチ的な利用を広く行っているが、企業における物質科学の研究レベルは 10 数年前に比べて高くない。放射光の産業利用の広がりがいまいちである。
	産業技術力	◎	→	放射光実験用真空装置、回折計、検出器などでは高い技術開発力を持っている。
米国	研究水準	◎	→	国内の放射光施設 Stanford、APS、ALS、NSLS などが常に厳しい評価にさらされ、熾烈な予算獲得競争を強いられているため、常に新しい放射光研究の芽が生まれており、世界をリードし続けている。
	技術開発水準	○	→	放射光研究の主力は大学・国研であり、産業界の研究所ではそれほど活発な研究活動は行われていない。
	産業技術力	○	→	ベンチャー企業における技術開発力は高いが、マーケット規模が小さいため大きな産業に発達するには至っていない。
欧州	研究水準	◎	↗	第 3 世代高輝度放射光源 (MAXII、ELETTRA、SOLEIL、DIAMOND、SLS など) でユニークな研究展開がなされ、また 2011 年完成予定の XFEL も含めて大きな発展が予想される。
	技術開発水準	◎	→	大学初のベンチャーが開発、あるいは大学と上手く共同開発した製品、例えば光電子アナライザ、光電子顕微鏡など独自の測定装置が開発されており、世界のマーケットを席巻している。
	産業技術力	◎	→	ベンチャー企業における技術開発力は極めて高い。新しい分析装置を開発する場合には、欧州の製品、部品抜きには成功しない、という状況になっている。
中国	研究水準	△	↗	第 3 世代高輝度放射光源である上海放射光施設 (3.5GeV)、台湾中型放射光 (3GeV) という 2 つの大型計画が走っており、今後急速に発展するものと思われる。
	技術開発水準	×	↗	企業の放射光研究はほとんど行われていない。
	産業技術力	×	↗	台湾 NSRRC では少しずつ産業利用 (MEMS 関連の Deep lithography や半導体分析) が行われているが、全般的に放射光の産業利用は極めて遅れており、企業の技術力も低い。
韓国	研究水準	○	→	第 3 世代高輝度放射光源 Pohang Light Source において強相関系や半導体表面研究で優れた成果を出しているものの、全般的には日米欧に比べると層が薄い。
	技術開発水準	△	→	企業における放射光研究は広がりを見せていない。
	産業技術力	△	→	PLS 運転開始から 12 年以上経過しているが、いまだに放射光の産業利用が浸透していない。
全体コメント：放射光利用研究が本格化して約 30 年経過するが、これを引っ張ってきた欧米諸国に対して今や日本の研究開発力は肩を並べたと言っても過言ではない。ただし、分析技術という観点では装置や key parts は依然欧米（特に欧州）製がほとんどである。これは欧州の職人かたぎを重視する風土と長期的視野に支えられたもので、一朝一夕では現状打破は難しい。				

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●テラヘルツ

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	研究経費が少なく、研究者人口が不足しているために進展が後れている。研究者の育成が急務。
	技術開発水準	○	→	ATR、レーザーテラヘルツ顕微鏡、パラメトリック光源、郵便物検査装置など優れた成果も上がっているが、QCL やカメラ開発が遅れている。国内の THz-TDS 開発は進展が遅い。
	産業技術力	△	→	マーケット重視の政策で、新規分野への投資は難しく、民間の技術開発が遅れている。研究者少なく、産学連携を増やせない状況にある。
米国	研究水準	○	→	基礎研究への投資が少なく、全般的に学術的な成果を出すことが容易ではない。QCL に関しては基礎研究で大きな進展がある。一部の研究者が研究レベルを支えている。
	技術開発水準	○	↗	大きな DARPA 予算の投資により、テラヘルツカメラの開発が進められている、Picometrix 社の THzTDS は着実に進化している。
	産業技術力	△	→	我が国と同じく研究者人口が不足しており、産業展開が難しい。ただし、論文数などから今後増大することが見込まれ、近い将来上昇に転じる。
欧州	研究水準	◎	→	初期投資の効果で、研究水準は極めて高い。PF6 では EU 予算は大幅に減少したため、他の研究費がなければ下降に転じる。独国は例外的に、国内予算が提供されているので、上昇するであろう。
	技術開発水準	○	↗	Teraview 社などは、製薬関連装置などに特化することにより装置開発の水準を上げている。独国の産業応用研究予算の成果が表れてくるだろう。
	産業技術力	△	→	まだ、キラーアプリケーションなど探索段階にあり、産業展開は容易ではない。
中国	研究水準	×	↗	まだ、始まったばかりで研究レベルは低い。国家プロジェクトがスタートし、研究者人口は急激に増加している。
	技術開発水準	×	↗	まだ、始まったばかりで研究レベルは低い。国家プロジェクトがスタートし、研究者人口は急激に増加している。
	産業技術力	×	↗	まだ、始まったばかりで研究レベルは低い。国家プロジェクトがスタートし、研究者人口は急激に増加している。
韓国	研究水準	△	↗	これまでにいくつかのプロジェクトが実施されたため、ある鄭の研究水準は出来上がってきている。研究者人口も増えており、今後上昇するであろう。
	技術開発水準	×	↗	まだまだレベルは低い。国家プロジェクトにより今後発展する。
	産業技術力	×	↗	まだまだレベルは低い。国家プロジェクトにより今後発展する。

全体コメント：世界的に新規分野開拓の難しさが表れている。現在のテラヘルツ研究はどの国においても 30、40 代の研究者が担っており、過去の遠赤外・ミリ波研究者との年齢・発想の開きがあり、世代間のギャップが分野の進展を妨げている。ヨーロッパでは、教育プログラムを立てることで、今後、研究者人口が増加する可能性がある。欧米での研究者の増大や活性化は、日本でも取りまとめた将来ビジョン“テラヘルツ技術”が一役買っている。国内でもその重要性が認識されることが望ましい。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●赤外・ラマン

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	わが国の振動分光の研究レベルは基礎、応用とも極めて高く、世界をリードしている。
	技術開発水準	○	↗	装置開発の面で、欧米に遅れをとっており、今後の開発が強く望まれる。
	産業技術力	○	↗	産業界への振動分光の応用は、欧米に比べ立ち遅れている。
米国	研究水準	◎	→	基礎レベルでの研究の活性が下がる傾向にある。
	技術開発水準	◎	↗	赤外、ラマンともに何社かのトップメーカーがある。
	産業技術力	◎	↗	産業界への振動分光の応用が活発に行われている。
欧州	研究水準	◎	→	基礎研究において日本と並んで最先端を走っている。
	技術開発水準	◎	↗	赤外、ラマンともに何社かのトップメーカーがある。
	産業技術力	○	↗	米国ほどは産業応用が進んでいない。
中国	研究水準	△	↗	基礎研究者が養成されつつある段階にある。
	技術開発水準	×	↗	赤外、ラマンともにメーカーはない。
	産業技術力	×	↗	産業応用をこれから模索する段階にある。
韓国	研究水準	△	↗	基礎研究者が養成されつつある段階にある。
	技術開発水準	×	↗	赤外、ラマンともにメーカーはない。
	産業技術力	×	↗	産業応用をこれから模索する段階にある。
全体コメント：				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●紫外・可視

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	基礎、応用研究ともに成熟しており、世界のトップレベルにある。
	技術開発水準	◎	→	いくつかの世界的トップメーカーがある。
	産業技術力	○	↗	産業界への応用は、欧米に比べ立ち遅れている。
米国	研究水準	◎	→	基礎、応用研究ともに成熟しており、世界のトップレベルにある。
	技術開発水準	◎	→	いくつかの世界的トップメーカーがある。
	産業技術力	◎	→	産業界への応用が活発に行われている。
欧州	研究水準	◎	→	基礎、応用研究ともに成熟しており、世界のトップレベルにある。
	技術開発水準	◎	→	いくつかの世界的トップメーカーがある。
	産業技術力	◎	→	産業界への応用が活発に行われている。
中国	研究水準	△	↗	基礎研究者が養成されつつある段階にある。
	技術開発水準	×	↗	世界レベルのメーカーはない。
	産業技術力	×	↗	産業応用をこれから模索する段階にある。
韓国	研究水準	△	↗	基礎研究者が養成されつつある段階にある。
	技術開発水準	×	↗	世界レベルのメーカーはない。
	産業技術力	×	↗	産業応用をこれから模索する段階にある。
全体コメント：				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

● X 線

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	多数の独創的要素技術が提案されている。欧米の物まねを避けた研究開発が多い。
	技術開発水準	◎	↗	先端機器開発等のプロジェクトが多数採用され活発な技術開発が行われている。
	産業技術力	◎	→	欧米に先を越された分野では、参入意欲が低い。
米国	研究水準	○	↘	IBM 等が基礎研究から撤退したため基礎研究では日欧に及ばない状況となった。
	技術開発水準	△	→	従来の高い水準を維持している。
	産業技術力	◎	→	小さなベンチャー企業（アンプテック等）が宇宙開発資金を得て体力をつけ、産業分野へ進出している。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究において多くの原理的研究がなされているが日本に多少遅れている。
	技術開発水準	◎	↗	従来の大企業から X 線分析部門が分社化したため、基盤技術が浅薄になった。
	産業技術力	○	→	旧フィリップスやジューメンスなどの研究開発体制が健在であるが、分社化し、基礎体力が落ちた。
中国	研究水準	×	↗	研究費が少なく、ナノチューブやシンクロトロン放射光など流行を追う研究に集中しがちで、工学の基礎研究を行う分野では弱い。
	技術開発水準	△	↗	大多数の要素技術において先進国の物まねの段階にある。
	産業技術力	◎	↗	日米欧の模倣では、先進国を抜いた。独自の技術も一部で育っている。
韓国	研究水準	×	→	基礎研究者数が少ない。
	技術開発水準	×	→	外国からの技術導入に限られている。
	産業技術力	×	→	独自の製品はない。

全体コメント：X 線は日本の技術が他国に比べて進んでいる分野である。日本は鉄鋼メーカーや半導体メーカー等のユーザー企業に独創的な基礎研究の伝統が昔からある。その基礎の上に X 線分析装置専門メーカーが傑出している。欧米では、大企業から分社化した X 線分析装置メーカーが企業買収を繰り返し、技術が拡散しており、中国の追隨を許している。日本は大学や産総研、物材機構、SPring-8、及びユーザー企業に基礎研究者が多数存在し、実用化へ直結した装置開発を中小の X 線メーカーと取り組んでいる。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●レーザ

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	最近、計測科学の重要性がわが国で認知されてきたことに伴い、基礎学術分野のレベルが上がっている。ただし、ニーズとマッチした計測技術の開発については、まだ不十分である。
	技術開発水準	△	↗	製品に繋がるような取り組みが遅れており、レーザ計測科学に関する大きなプロジェクトがまだ少ない。また、大学などの研究機関も製品化に繋がる研究開発が少ない。
	産業技術力	△	→	大学と分析機器企業の連携が取れておらず、欧米の技術の後追いになっている。今後、開発途上国によるローエンドの製品の低価格化に伴い、利益率の低下が懸念される。
米国	研究水準	◎	↗	高度なレーザ技術を用いた研究が進んでいる。今後、その傾向がさらに強まると予測される。
	技術開発水準	◎	↗	先端的なレーザ装置を用いる計測装置の開発が産官学の連携で進んでおり、今後の大型プロジェクトの推進により、よりその傾向は顕著になると予想される。
	産業技術力	◎	↗	的確な市場調査と優秀な技術者の投入により、タイムリーに将来を見据えた新製品が市場に投入されている。
欧州	研究水準	◎	↗	高度なレーザ技術を用いた研究が進んでいる。今後、その傾向がさらに強まると予測される。
	技術開発水準	◎	↗	先端的なレーザ装置を用いる計測装置の開発が産官学の連携で進んでおり、今後の大型プロジェクトの推進により、よりその傾向は顕著になると予想される。
	産業技術力	◎	↗	的確な市場調査と優秀な技術者の投入により、タイムリーに将来を見据えた新製品が市場に投入されている。
中国	研究水準	×	↗	最先端のレーザ技術がなく、基礎研究は遅れている。
	技術開発水準	×	→	レーザ計測装置のような、ハイエンドの製品開発に着手する必要性を認めておらず、当分はローエンド計測機器の開発を重視すると考えられる。
	産業技術力	×	→	ローエンドの低価格計測装置の開発が目覚しいが、レーザ計測装置のようなハイエンドの装置の開発に着手はされていない。
韓国	研究水準	△	↗	欧米に若手研究者を派遣し、最新の技術を積極的に獲得している。今後、わが国と同様のレベルに到達すると予測される。
	技術開発水準	×	→	有効性が証明されている製品（たとえば液晶表示素子など）の技術開発は積極的になされているが、今後の市場ニーズを見通した研究開発を手がけるまでには至っていない。
	産業技術力	×	→	欧米と競合するようなレーザ計測技術の開発に着手するには至っていない。
全体コメント：				

- (注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
- (注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●電子

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	装置開発に関する研究は低調（装置利用の研究は盛ん）
	技術開発水準	◎	↗	電子顕微鏡応用装置（特に半導体向け）が強い。
	産業技術力	◎	→	従来型顕微鏡の技術では圧倒的な強みがあるも、収差補正の遅れが問題。電子顕微鏡応用装置（特に半導体解析装置）に強み。
米国	研究水準	◎	→	大きな連邦政府予算が投入されたため、国立研究所（およびその提携大学）が急速にパワーアップ。国内格差は増大傾向。
	技術開発水準	○	↗	（米系企業であっても R&D の主力は欧州の部隊）
	産業技術力	◎	↗	大手電子顕微鏡メーカーを欧州から買収。また電子光学系を OEM 調達し半導体用検査装置として事業化
欧州	研究水準	◎	↗	独創的な研究が多いが、歩留まりも低い。欧州全体で施設・人を共有する動きが水準向上に貢献。
	技術開発水準	○	↗	大学からスピンアウトしたベンチャーが開発した収差補正器を大手メーカーがこぞって採用。
	産業技術力	○	→	大手電子顕微鏡メーカーが米企業に買収される一方、収差補正技術や CCD カメラで寡占状態を作るようなベンチャーが台頭。
中国	研究水準	×	→	（高性能電子顕微鏡が行き渡り、装置利用の研究は活発化）
	技術開発水準	×	→	詳細不明
	産業技術力	×	↗	米国企業からのスピンアウトメンバーが起業し一部で成功
韓国	研究水準	×	→	（高性能電子顕微鏡が行き渡り、装置利用の研究は活発化）
	技術開発水準	×	→	不明
	産業技術力	×	→	不明
全体コメント：				

（注 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（注 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●陽電子

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	陽電子消滅法やビーム法の方法論の開発においては 1990 年までは米国や欧州が開発したものを利用する時代が続いたが、1990 年半ば以降、研究者の質・数とも米国・欧州を圧倒し、技術力もトップレベルにある。
	技術開発水準	○	→	陽電子消滅法を利用した材料評価が分析委託会社や共同研究という形で産官学で実施されている。陽電子消滅装置を保有している企業もある。装置開発・販売もベンチャー企業、中小企業でなされているが、力強さが出るまでには研究側のあと一歩の努力が必要である。
	産業技術力	○	→	分析機器として企業生産現場での利用はないが、二社が陽電子ビーム装置を市販している。
米国	研究水準	○	↘	陽電子消滅法およびビーム法とも基礎研究、応用研究両面において黎明期を築きあげたが、世代交代に失敗し、研究水準は明らかに低下している。それを打破しようとするプロジェクトが一部の国研で計画されているが、力強さはない。一方で、原子散乱など物理学の基礎的分野では、研究水準は非常に高い。
	技術開発水準	○	→	材料評価手法として企業との共同研究が実施されている。企業単独での実施はないと推定される。
	産業技術力	×	→	企業生産現場での利用はない。
欧州	研究水準	◎	↗	陽電子消滅法およびビーム法とも基礎研究、応用研究両面において黄金期を築き、世代交替を迎えている。原子炉を使った高強度陽電子源の開発と EU 研究者の共同利用の開始や CERN での反水素形成（日本の研究者も参加）など基礎研究にも注力している。
	技術開発水準	△	→	材料評価手法として企業との共同研究が実施されている。企業単独での実施はないと推定される。
	産業技術力	×	→	企業生産現場での利用はない。
中国	研究水準	△	↗	陽電子消滅法およびビーム法とも日本や米国での留学経験者を中心にトップレベルの大学で世界水準に追いつくべく努力がみられるが、独自技術の開発力は弱い。
	技術開発水準	×	→	企業での利用はない。
	産業技術力	×	→	企業生産現場での利用はない。
韓国	研究水準	×	→	陽電子消滅法、ビーム法とも陽電子を用いた研究を実施し、論文・学会などで成果を発表している研究者はいない。
	技術開発水準	×	→	企業での利用はない。
	産業技術力	×	→	企業生産現場での利用はない。

全体コメント：分析機器として企業での生産現場での実績が乏しいのは、放射性同位元素の利用（放射線施設の整備と許可申請など）が壁になっていると考えられる。そのような環境の中で日本における産官学連携の取組は世界をリードしており、多くの企業研究者が関与しての物質中の空孔分析による材料・プロセス開発への展開は特筆すべきものがある。

注：陽電子断層撮影法（PET）は国内でも 300 台以上市販装置が病院等で稼動しており、初期がん検診に威力を発揮している。しかしながら調査者自身が PET に関しては専門家ではなく、陽電子の励起ビームとしての利用法ではないため、ここでは言及していないことを明記する。

（註 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（註 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●中性子

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	これまでなされて来た、原子炉利用、従来の加速器型中性子源の利用、更に海外の同種の施設の利用により、研究水準は世界的レベルにあると考えられる。J-PARC の建設により、将来ゆるぎないものとなる。
	技術開発水準	◎	↗	高エネルギー加速器技術により培われた技術力により、大強度中性子源用の加速器技術力は世界的レベルにある。また、中性子ターゲット、中性子実験装置の開発水準も世界的レベルにある。J-PARC の建設により、より高い水準に進むと思われる。
	産業技術力	◎	↗	中性子源施設に必要な加速器、ターゲット周り、中性子実験装置に必要な機材のほとんどを国内企業から調達がなされていることに見るように、産業界に十分な技術力があるといつてよい。J-PARC の建設によりより高度な技術力を持つものと考えられる。
米国	研究水準	◎	↗	欧州とともに世界トップレベルにあるといつてよい。SNS の建設により、更に高度化するものと考えられる。
	技術開発水準	◎	↗	SNS の建設に見るように、国内の 6 つの国立研究所が協力して進める体制がすでに出来ており、超伝導加速器技術も含め、今後より高度なレベルになると考えられる。
	産業技術力	◎	↗	SNS 計画で必要な機材のほとんどは、米国内で調達されており、相当なレベルの技術力があるものと考えてよい。
欧州	研究水準	◎	→	欧州が望んでいた加速器型中性子源計画は遅延しており、今後 10 年間程度は現在の研究水準を大きく上げる状況にはない。しかしながら、現状においても世界トップレベルの水準にある。
	技術開発水準	◎	→	各大型研究施設にはインハウスの技術開発組織、設備が完備しており、世界でもっとも開発能力があり、技術の蓄積がなされる体制を持っている。
	産業技術力	◎	→	欧州連合で実現してきた大型中性子施設の機材が域内で総て調達されていることからわかるとおり、十分に高い産業技術力があるといつてよい。
中国	研究水準	△	→	中国国内で稼動している大型中性子源施設が無いことから、中性子分野の研究のレベルは必ずしも高いものではない。しかしながら欧米に留学していた優秀な研究者の帰国が増加している点は注意する必要がある。
	技術開発水準	△	↗	現在の技術力は必ずしも高くはないが、国の戦略としての中性子源（原子炉と加速器型中性子源）の建設が進められており、おのずと技術力は向上するものと考えられる。
	産業技術力	△	↗	現在建設中の原子炉、加速器型中性子源の機器の調達を国内で行なう予定であり、おのずと産業界の技術力も向上するものと考えられる。
韓国	研究水準	○	↗	研究用原子炉や海外の中性子施設を利用しており、高いレベルの研究がなされている。また、海外に留学していた優秀な研究者の帰国が増加している点は注意する必要がある。
	技術開発水準	○	→	かなりのレベルの開発水準にあるといつてよい。ただし、加速器技術については、今後進むものと思われる。
	産業技術力	○	→	かなりのレベルの技術力があるといつてよい。ただし、陽子加速器技術については、今後進むものと思われる。
全体コメント：加速器型中性子源の建設が世界のトレンドとなりつつある。しかしながら、その実現には、加速器技術、中性子源技術、中性子実験装置技術その他の技術からなる総合的な技術力が必要であり、後発国がわが国のレベルになるには少なくとも 10 年以上はかかるものと推測される。わが国の中性子源についての技術力はすでに世界レベルにあるが、その運用制度が欧米の施設に比べかなり劣っている。利用者がより使いやすい制度設計を国を上げてすべるべきである。				

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●イオン

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	大学、旧国研等アカデミックな機関での研究者が激減したため研究レベルは低調。
	技術開発水準	○	→	半導体関連企業の研究所での活動が大幅に低下。材料評価を外部委託するために生じた悪影響が随所に見られる。
	産業技術力	◎	↗	従来はイオンビーム計測を用いなかった新しい産業分野での飛行時間型に次イオン質量分析法 (TOF-SIMS) の応用使用が盛んになってきている。
米国	研究水準	◎	↗	非常に高い水準を維持している大学研究機関が数多く存在する。理論的なシミュレーションを取り扱う大学が中心となり、世界を巻き込んだ活動を行っている。
	技術開発水準	◎	↗	民間企業の研究活動もおおむね活発。
	産業技術力	◎	↗	バイオ、有機材料、無機材料など、多くの分野で飛行時間型二次イオン質量分析法 (TOF-SIMS) の応用使用が盛んになってきている。
欧州	研究水準	◎	↗	非常に高い水準を維持している大学研究機関が数多く存在する。特に基礎研究を充実させている大学が多くある。
	技術開発水準	◎	↗	おおむね高い活動を行っている。特に装置開発等で独自のアイディア、コンセプトを提案し、世界的なシェアを持つ企業へと成長している。
	産業技術力	○	↗	産業界での応用は今後の課題であるが、今後の大きな伸びが予想される。
中国	研究水準	×	→	ほとんど研究されていない。
	技術開発水準	×	→	ほとんど研究されていない。
	産業技術力	×	→	ほとんど研究されていない。
韓国	研究水準	○	↗	まだ研究人口が少なく、大学での研究も少ないが、一部の機関ではかなり突出したレベルの高い研究も行われ始めている。
	技術開発水準	○	→	生産活動に直接関連する研究が中心であり、特に基礎的な研究はほとんど行われていない。
	産業技術力	△	→	現場での使用は少ないし、たとえ行われていても外部への情報公開はほとんどない。

全体コメント：SIMS に関しては、日本国内では従来半導体分析を中心としたダイナミック SIMS の研究活動に偏っていたこと、近年の半導体産業の低迷、分析評価の外部委託に依存している等の影響を受け、大学、国公立の研究機関はもとより、民間での研究活動においても大きく立ち遅れているのが現状。最近では従来の半導体産業以外の企業において TOF-SIMS を用いた応用研究が次第に活発に行われるようになり、今後の展開が期待される。HR-RBS に関しては認知度を上げることが重要。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●音波・超音波

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	技術の統合化・複合化により真に社会に役立つ研究を推進する姿勢が必要。論文のための研究が多すぎる。このためには研究費の配分方法に考慮が必要
	技術開発水準	○	↘	維持している研究グループを強化、再開できる企業は研究グループを再開、学会で研究発表できるレベルをめざす
	産業技術力	◎	↘	少なくとも現在の技術力を維持するため、性能の向上を目指すことが必要、技術の承継にも配慮が必要
米国	研究水準	◎	↗	基礎研究を含め研究経費のかかなりの部分は軍からの資金により支えられている。
	技術開発水準	○	→	全体としてハードウェアに関する企業の研究開発力は低迷している。ソフトウェアの開発は素晴らしい。
	産業技術力	○	→	目立った特徴は見あたらない
欧州	研究水準	○	↗	EU 内の大学連携により技術開発が財政的にも組織的にも容易に進められるようになっていく。
	技術開発水準	◎	→	依然として技術開発力に於いては注目に値する。研究発表にもそれなりに努力していることが分かる。
	産業技術力	◎	→	世界を市場にする製品を依然として出し続けて折り、その開発力は注目に値する。
中国	研究水準	△	↗	研究費の大幅な増額により研究の振興を図っている。
	技術開発水準	△	↗	大学との連携および合併、吸収合併により技術移入を図っている。
	産業技術力	△	↗	
韓国	研究水準	×	↗	KAIST、KIST を中心に技術開発が進められつつある
	技術開発水準	×	↗	公的機関における技術開発は必ず企業と連携を取ることが政府により義務付けられている。
	産業技術力	△	?	韓国独自の企業は研究者のヘッドハンティングにより技術獲得を図っている。
全体コメント：現状では日本が若干リードしているが、米国、欧州に座を渡しつつある。現状のままでは早晚中国に追い抜かれ、韓国にも追いつかれる。				

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.3 分離分析技術分野

2.3.1 概観

混合物を純物質に分けることは分析の基本技術であり、高速液体クロマトグラフィーは量的に世界で最も普及している機器である。この分離分析技術分野の国際技術力を 6 つの中網目 (1) 液体クロマトグラフィー、(2) ガスクロマトグラフィー、(3) その他クロマトグラフィー、(4) 質量分析、(5) 電気泳動、(6) 熱分析、に分類し比較した。(1)－(3) のクロマトグラフィーでは、混合物試料をキャリア媒体に乗せ、充填剤との物理的、化学的吸着・脱離による移動速度の違いで分離し、対象物質により検出器を選択する。(4) の質量分析は、電磁場中のイオンが質量により異なる軌跡をとることで分離を行う。電気泳動 (5) では、溶液中のイオン化物質について電界で移動を駆動する。(6) の熱分析は物質は固有の蒸発温度をもつ性質を利用して分離検出をする。外場による分離技術としては、他に磁性体の磁気分離等の技術がある。

分離分析分野を概観すると、米国、欧州、日本のいずれが全般的に優れているとは言えず、技術力の優劣は中網目毎に異なっている。また、少人数での研究開発が可能な技術から中規模の組織による研究開発が必要なものまで含まれ、市販される機器の価格も 10 倍以上の開きがある。

「中網目ごとの比較」から浮き彫りになった特徴的な流れを以下に記す。

- (1) 液体クロマトグラフィーについては、従来の充填型キャピラリーカラムと異なったモノリスカラムの開発による高性能化と米国が主導している超高压ポンプを用いる高速化が挙げられる。ガスクロマトグラフィーの高速化・高精度化は、米国や我が国が技術を主導している。
- (2) 質量分析のトレンドの一つは、どのような物質が試料上のどの位置に存在するかが分かるイメージング (マスパターンの 2 次元マッピング) である。
- (3) 電気泳動については、DNA シーケンサーの元となったキャピラリー電気泳動 (CE) およびマイクロチップ技術を応用した MCE に関連する研究開発が活発である。
- (4) 熱分析については、AFM (原子間力顕微鏡) や MEMS (微小電気機械システム) を利用した局所熱分析可能な DSC について米国が優位に立ち、2 次元熱分析や DSC と他の計測手法との複合装置については我が国が優位に立っている。

分離分析技術の基本は既に 50 年近く前に形成され、ラボ用の汎用分析技術として発展を遂げてきた。しかし、分析の対象が低分子物質から高分子物質の分析に拡大し、また分析対象物質が増加したことにより、測定の迅速化、定量

のための精度の向上等が要求されるようになり、これに対応した研究開発が活発化している。分離分析技術は、特に材料開発や商品化のための開発に不可欠のため、ニーズをもつ産業分野の競争力の強さが、技術開発力水準や研究水準を押し上げる効果がある。この効果を生かすためには、これまで以上に産学の連携の深化や機器メーカーの協力が必要不可欠である。

分析対象となる物質が多様化し、用途も多様となり、近年では分離分析機器の検出器として分光光度計や質量分析機器が使用されることが多くなっている。また汎用の装置では、すべてのニーズに答えられないことが多いので、2種以上の計測手法との複合装置や、これとは逆に用途を絞った装置が増加してきた。

これらの計測装置では、とくに今後は、測定データを用途に合った様式で表示したり、測定データを知識化したりするためのソフトウェアが重要な要素技術となりつつある。今後はソフトウェア技術の優劣が、ユーザーの研究開発の水準や産業技術力を左右するようになる。このため、ソフトウェア技術の良否が計測装置のシェアを決めていくことになる。この点で、日本は、若干遅れをとっている。

2.3.2 中綱目ごとの比較

(1) 液体クロマトグラフィー

液体クロマトグラフィー (LC)、あるいは高速液体クロマトグラフィー (HPLC) の最近のトピックスとしては、モノリスカラムを用いる高性能化と、特殊な装置を用いて超高压下で分離を行う超高速液体クロマトグラフィー (UPLC、UFLC など) が挙げられる。

モノリスカラムは、ゾルーゲル法により作製される一体型のカラムであり、我が国では京都工芸繊維大学の田中信男を中心とする研究グループにより開発されたもので、京都モノテックが製品化して販売する一方、Merck KGaA 社とジーエルサイエンス社との共同事業としても製品が販売されており、いわば我が国のお家芸とも言える新規分野であるが、海外における研究者の数も近年飛躍的に増加しており、競争の激しい分野でもある。モノリスカラムを用いる分析システムでは、キャピラリーなど内径の非常に細かいカラムを用いてもカラム背圧が低く抑えられる（圧力損失が少ない）特徴があり、ミクロ化ならびに高速化が容易であるところから広く注目を集めている。

UPLC (Waters 社の登録商標) は、従来の HPLC での圧力上限 (5,000psi 程度) をはるかに超える超高压 (15,000psi 程度) での分離を行うもので、高速分析を可能とし場合によっては分離の改善も図ることができる新しいシステムである。一般には専用のシステムを必要とするため、新たな投資が必要となる。Waters 社のオリジナル技術であるため、同社の主導で技術開発がなされているが、他社も追随して独自システムを開発している。島津では UFLC、日本分光では X-tremeLC などと称している。

(2) ガスクロマトグラフィー (GC)

現在 Agilent Technology⁵⁴、Perkin Elmer 社⁵⁵、Thermo Electron Corp⁵⁶、Varian⁵⁷、(株) 島津製作所⁵⁸ が主たる機器メーカーで、かつては日立製作所も島津と並ぶ国産メーカーであったが近年は撤退している。これらメーカーは世界的に装置を販売しており、国際的な比較は容易ではない。現在はその高い分離特性からキャピラリーカラムを用いた GC が主流で、環境分析、香料分析、石油化学、化学兵器分析などに使用されている。GC はその歴史が古いことから所謂汎用機としての位置づけが大きく、分析機器としては極めて

54 旧 Hewlett-Packard 社 : <http://www.chem-agilent.com/>

55 <http://www.perkinelmer.co.jp/>

56 旧 Carlo Erba Strumentazioni 社 : <http://www.thermofisher.co.jp/>

57 <http://www.varianjapan.com/>

58 <http://www.shimadzu.co.jp/>

基礎的なものである。

現在の GC のトレンドは 1) 2 次元の分離、2) 超高速分離、3) マイクロ化、4) 新規固定相などである。キャピラリーカラムを用いた GC の分離性能は極めて高く、石油成分の分離では 1 度に数百本のピークを得ることも可能である。しかし分離された成分の同定は容易ではない。また 1 つのピークに複数の成分を含むこともあり、複数のカラムを直列に配置した 2 次元 GC^{59,60,61,62,63} が研究されている。特に複雑な成分の分離のためのカラムスイッチング技術、モジュレーター、カラム技術などが報告されている。また 2 次元 GC のサプライヤーとして LECO Corp⁶⁴ (ミシガン)、Zoex Corp⁶⁵ (テキサス) の 2 つのメーカーがある。

マイクロチップを用いたカラムではミシガン大学のグループが 3.2cm 四方のシリコン基板に 150 × 240 μm の矩形で 3m のカラムを作製し、1,000 ~ 2,800 段 /m^{66,67} のものを作製、している。MEMS 技術で作製するカラムでは矩形のものが殆どであるが、アスペクト比の大きなカラムでの分離が良好であることを示唆して報告がある。^{68,69} 島津製作所ではこれらに比べ大型のカラムを作製し、数種類の炭化水素を 40,000 段以上の理論段数で良好に分離可能で、従前のキャピラリーカラムと比較しても遜色ない分離を実現している。

MEMS 技術を利用した超小型 GC の用途としては環境現場などオンサイトの使用⁷⁰ が想定される。分離カラムばかりでなく検出器の小型化のニーズも大きい。これにはマイクロ化された熱伝導度検出器⁷¹、フレイム発光検出器⁷²、フレイムイオン化検出器⁷³、容量結合型あるいはマイクロ波結合マイクロプラズマ検出⁷⁴ などが報告されている。

高速分離、高精度分離のためには微量の試料を再現性よく GC カラムに導入する必要がある。このため、超高流量下でも導入できるダイアフラム型バルブを用いた切り替え型微量試料導入⁷⁵ や同期型 2 重バルブによる超高速試料導入⁷⁶ が米国の研究者らにより報告されている。また内山らはインクジェッ

59 Bueno, P.A.; Seeley, J. V. J. Chromatogr., A 2004, 1027 (1), 3 ~ 10

60 Diehl, J. W.; Di Sanzo, F. P. J. Chromatogr. A 2005, 1080 (2), 157 ~ 165.

61 Pierce, K. M.; Wood, L. F.; Wright, B. W.; Synovec, R. E. Anal.Chem., 2005, 77 (23), 7735 ~ 7743.

62 Sinha, A. E.; Hoe, J. L.; Prazen, B. J.; Fraga, C. G.; Nilsson, E. J.; Synovec, R. E. J. Chromatogr., A 2004, 1056 (1-2), 145 ~ 154.

63 van Mispelaar, V. G.; Janssen, H.-G.; Tas, A. C.; Schoenmakers, P. J. J. Chromatogr., A 2005, 1071 (1-2), 229 ~ 237

64 <http://www.leco.com>

65 <http://www.zoex.com>

66 Lambertus, G.; Elstro, A.; Sensenig, K.; Potkay, J.; Agah, M.; Scheuering, S.; Wise, K.; Dorman, K.; Sacks, R. Des. Anal. Chem. 2004, 76, 2629 ~ 2637.

67 Lambertus, G. R.; Fix, C. S.; Reidy, S. M.; Miller, R. A.; Wheeler, D.; Nazarov, E.; Sacks, R. Anal. Chem., 2005, 77, 7563 ~ 7571.

68 Golay, M.J.E. J. Chromatogr., A 1981, 216, 1-8.

69 Spangler, G. E. J. Microcolumn Sep. 2001, 12, 285 ~ 292.

トによるナノリッターレベルの液体試料導入法を開発⁷⁷し、試料の直接導入法としては唯一の方法を提案している。

固定相液体として近年グリーンケミストリーなどで注目されているイオン性液体⁷⁸の利用、ケブラーやザイロン等の繊維を充填したカラム⁷⁹が報告されている。

我が国では GC はすでに成熟した技術として捉えられ、ルーチン分析以外の研究者の人口も多くはない。しかし成熟したと思われる技術にも上記のようにニーズに立脚した発展が見込めることもあり、引き続き動向を調査する必要がある。

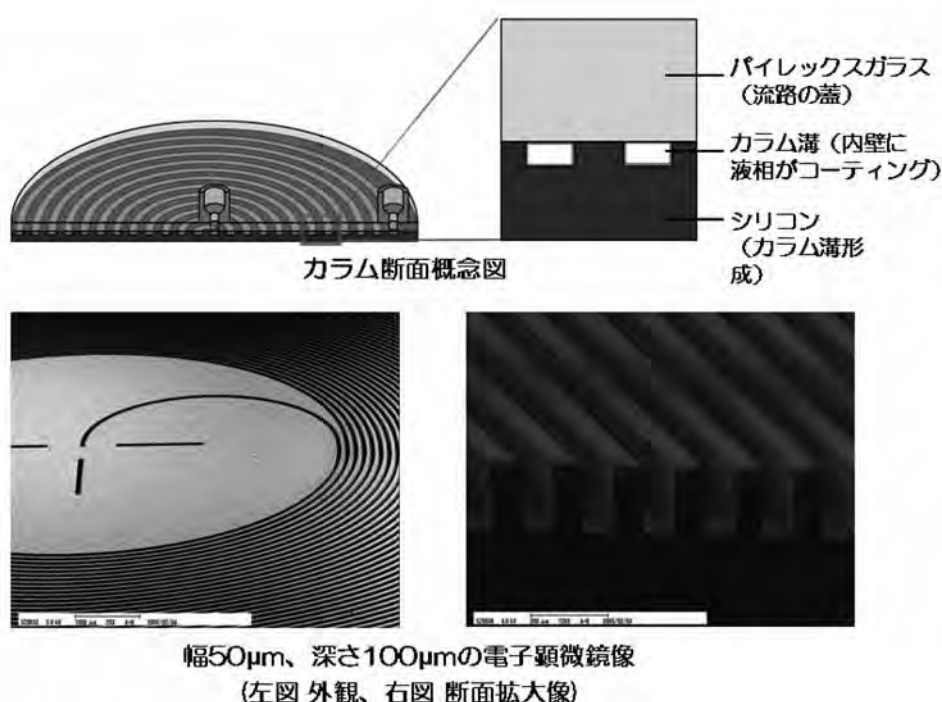


図7 島津製作所製 高性能チップカラムの一例

70 www.sls-micro-technology.de/65

71 Curves, J.; van Schaik, H. Am. Lab. 2004, 36, 18 ~ 23.

72 Thurbige, K. B.; Haywaqrd, T. C., Anal. Chim. Acta 2004, 519, 121 ~ 128

73 Deng, C.; Yang, X.; Li, N.; Huang, Y.; Zhang, X. J. Chromatogr. Sci. 2005, 43, 355 ~ 357.

74 Guchardi, R.; Hauser, P. C. Analyst 2004, 129, 347 ~ 351.

75 Hope, J. L.; Johnson, K. J.; Cavelti, M.A.; Prazen, B.J.; Grate, J. W.; Synovec, R. E. Anal. Chim. Acta 2003, 490, 223 ~ 230.

76 Gross, G. M.; Prazen, B.J.; Grate, J. W.; Synovec, R.E. Anal. Chem. 2004, 76, 3517 ~ 3524

77 T. Nishiyama, F. Endo, H. Eguchi, T. Nakagama, N. Seino, M. Shinoda, T. Shimosaka, T. Hobo, K. Uchiyama, Anal. Sci. 2007, 23, 389 ~ 393.

78 Belaidi, D.; Sebih, S.; Guermouche, M.H.; Bayle, J.P.; Boudah, S. Chromatographia 2003, 57 (3/4), 207 ~ 212.

79 Saito, Y.; Tahara, A.; Imaizumi, M.; Takeichi, T.; Wada, H.; Jinno, K. Anal. Chem. 2003, 75 (20), 5525 ~ 5531

(3) その他クロマトグラフィー

ガスクロマトグラフィー (GC)、液体クロマトグラフィー (LC) 以外のクロマトグラフィーでは超臨界クロマトグラフィー (SFC) があげられる。カウンタカレントクロマトグラフィー (CC、向流クロマトグラフィー) 及び薄層クロマトグラフィー (TLC) は液体クロマトグラフィーに属するが簡単に触れる。他にも磁気クロマトグラフィー、オプティカルクロマトグラフィーなどとクロマトグラフィーの名称をつけた分離分析法があるが、厳密には分離原理はクロマトグラフィーとはいえない。むしろ流動場分画法 (FFF) に属すると言える。我が国で比較的研究開発が盛んなのは CC である。

SFC はクロマトグラフィーにおける移動相として二酸化炭素、水などを超臨界状態で用いる方法で、GC と LC 双方の利点を持つとして 1980 年代頃に盛んに研究され、装置も市販されたが、SFC を用いなければならない分析例が少なく、次第に研究も装置開発も縮小され、現在では世界的に見ても市販装置はほとんどない。ただし、超臨界流体抽出は主として食品科学分野で有用な抽出法となっているので、抽出物への SFC の利用は可能である。この分野では日本分光 (株) が健闘している。

CC は液-液抽出に基づく分離法であり、LC に属するが、固定相担体を用いないので天然物成分の分離などに利用されている。装置化され高速 CC として数種市販されている。試料処理量 (g 程度) が比較的多いので調製目的にも利用できる。研究は米国、中国で比較的盛んである。我が国でも装置が製造市販されている。

TLC も LC の一種である。簡便で安価に利用できる所以で広く利用されている。とくに、有機合成研究、食品分析等、試料の前処理を少なくした分析に利用される。全試料成分を同時に観測できる利点がある。産業としては固定相を塗布した薄層板、展開装置、検出のためのデンストメーターなどがある。薄層板は世界規模のメーカー数社が世界中に供給している。装置に関しては我が国でも各種製造販売されている。

従来のクロマトグラフィーで分離が困難なのは微粒子であり、微粒子の大きさや、表面の化学的性質による分離は今後重要な課題であるが、現在はよい方法がない。大きさの測定には電子顕微鏡が利用されているが、分離法ではない。FFF は 1976 年に Giddings により提案され、後に彼により装置も市販された。nm から μ m サイズの粒子を大きさに基づいて分離できる。装置の運転も難しく一般的に利用されるには至っていない。粒子、ウィルス、細菌等の微生物の大きさによる分析法は実用的にも重要な分野であるが、原理的にクロマトグラフィーでは難しい。電場、誘電場、磁場、重力 (遠心力)、音波、光波の場などを用いた各種分離法の提案がなされている。いずれも研究段階の域を出ず、超遠心分離、電気泳動を除いては、装置の市販に至っているものはほとんど見

られない。とくに、細菌などを生物活性検査でなく、単に大きさまたは表面の特性で分離分析する方法は、毒性細菌などの迅速検出に有効と考えられ、成功すれば社会的影響も大きいので、今後の発展が期待される。

(4) 質量分析

質量分析は、約 100 年前に J.J. Thomson が放物線型質量分析器を発明して以来の歴史があり、今日では様々な分野で必要不可欠な分析機器のひとつとなっている。国内では、1930 年代後半に大阪大学の浅田・緒方らが国内初の質量分析装置を製作したのが始まりである。その後も磁場型の世界最高分解能を達成した大分散質量分析装置（松田ら）や、飛行時間型の世界最高分解能を達成したマルチターン飛行時間型質量分析計（豊田、石原、松尾）などが大阪大学で開発されるなど、高性能なユニークな装置開発が日本でなされている。

イオン化法は、様々な手法の開発が日・米・欧を中心に世界中でなされている。生体高分子の測定によく用いられるエレクトロスプレーイオン化（ESI）の開発では、2002 年に Fenn がノーベル化学賞を受賞したが、開発には JAXA の山下雅道が大きな貢献をしている。またレーザーを用いたソフトイオン化法は島津製作所の田中耕一が開発し、ノーベル賞を受賞している。その他にも EDI、コールドスプレー、微細構造基板や微粒子を用いた SALDI など、国内での開発も多数なされている。

質量分離部については、古くは欧米の大学などでも盛んに行われていたが、現在も質量分析装置開発を行っている大学・研究機関は、大阪大学とアメリカ、ロシアなどに数力所拠点があるのみで、メーカーによる開発が中心となっている。装置開発をしている大学がなくなりつつあるため、近年は世界的に人材難の状態である。メーカーの場合、すぐに市販につながるような開発が中心となり、将来目が出るようなユニークな装置開発はほとんどされていないのが現状である。一方で、質量分析メーカーと大学等が組んで既存装置の改造などを行ない、市販につなげているケースは多くある。特に国外のメーカーは、大学等に社員を派遣するなどして、イオン化法や解離手法、測定手法などを共同開発し、市販装置に反映させようとしているところがほとんどである。磁場型の頃は大阪大学がメーカー各社にイオン光学系を提供していたこともあるが、国内では産学の協力はあまり進んでいないといえる。

検出部については、大学等での開発はほとんどなく、検出器メーカーが開発を進めている。国内では浜松ホトニクスが二次電子増倍管や MCP を開発している。

なお、この数年間は、質量分析に関してはイメージング質量分析が世界的なトレンドになっている。国外の質量分析メーカーは、既存装置のソフトウェアを改良することで対応している。国内では、JST 先端計測分析技術・機器開

発事業や CREST、科研費学術創成研究による大型プロジェクトが 3 件並行して走っている。

十年以上前の磁場型が全盛の頃は、国内の質量分析メーカーも非常に強かったが、質量分析が爆発的に広まるようになった近年は、海外メーカーの製品を購入するケースが非常に多くなっている。その主な要因は、装置の性能よりはソフトウェアにあると言われている。近年は、質量分析の専門家以外の研究者が装置を購入するケースがほとんどで、国内メーカーの性能がよければ何にでも使えるはずだという考えが通用しなくなっている。一方で、海外メーカーは、ある程度用途を特化し、ソフトウェアもその用途に合わせて使いやすいものを開発してきている。背景には、日本人の装置開発者はソフトウェアの開発経験がなかったり、ソフトウェア開発者は装置のことは全く知らなかったりという「分業」がはっきりしていることにあると思われる。日本の教育のあり方もその一因と思われる。

(5) 電気泳動

従来広く利用されているゲル電気泳動には多種の分析技術が開発されており、タンパク質や DNA などの生体高分子分析の必須の手段として生化学研究、臨床検査分野で広く利用されている。最近でもプロテオーム解析において、多数のタンパク質の分離手段として二次元ゲル電気泳動が多用されている。非常に優れた分離能を持つが測定法の機器分析化が困難であり、測定に時間を要するので、プロテオーム解析における分離法は HPLC に移行しつつある。しかし、タンパク質の分離分析法としては優れており、生化学研究には必須の手法である点に変わりない。セルロース膜電気泳動は臨床検査における血清タンパク質の分析法として広く用いられている。どの電気泳動法も周辺技術の進歩に合わせて進展しており、性能は向上している。とくに分離結果（ゲル板上のスポット）の計測法は進歩している。国産品で問題はない。多種の材料や、試薬も市販されている。試薬には外国製も多い。従来の電気泳動は機器分析法としての位置づけにはなく、分析法の自動化、データの数値化等の面では問題点が多い。

1990 年代にキャピラリー電気泳動（CE）が開発され、装置も市販されるようになった。CE は開発当初にヒトゲノム解析計画が始まり、DNA 塩基配列決定法におけるオリゴヌクレオチドの分離法として有望とされ、非常に活発な研究が展開され、今日の DNA シークエンサーが開発された。この装置開発により、今日では DNA の塩基配列決定には CE に基づく分析法が一般的となっている。装置開発の中心的役割は米国の研究者及び企業により行われたが、検出器開発への（株）日立製作所・中央研究所の神原秀記らの功績も大きい。CE では生体高分子のみならず、医薬、農薬、化学薬品のような小分子の分析も可能であり、学術研究分野での研究は活発になった。CE には多くの優

れた性能があるが、応用で HPLC と競合する分野が多く、企業における日常分析に取り入れられている例は少ない。従って、企業の装置開発意欲も低くなり、世界でも数社が CE 装置を市販しているのみとなっている。日本では大塚電子（株）のみが、世界でも Beckman と Agilent が主な装置製造企業であり、他の製品の市場占有率は問題にならない。ただし、中国では国産装置が開発され利用され始めている。最近になり、メタボローム解析に質量分析法(MS)を検出手段とする CE - MS が有効なことが慶應大学先端生命研で実証され、この分野での発展が期待される。

1990 年代後半からマイクロチップ技術のはしりとしてマイクロチップ電気泳動 (MCE) が開発され活発な研究が始められた。マイクロチップ技術には大きな期待が寄せられ現在も盛んであるが、研究は減少傾向にある。我が国における研究開発は、基礎技術から応用技術に関しても世界の先端にある。MCE 装置についても DNA 分析用の装置が数社により開発され市販されたが、現在は島津製作所及び日立ハイテクノロジーを除いてはこの分野の研究開発意欲は低下したようである。しかし、大学、公的研究機関における研究開発は続けられており、研究水準は高い。マイクロチップ技術の応用としての MCE 装置開発は外国でも米国を中心に活発である。中国、韓国も同様であり、韓国の研究水準はかなり高い。

(6) 熱分析

熱分析として、示差走査熱量計 (DSC) と熱天秤 (TG) を取り上げる。

DSC は、製造時における材料・素材の加熱工程での変化を追跡し易いという特徴により、加熱工程を経る製品の研究・開発・生産現場で欠かせない手法となっている。装置・手法開発は欧米が主導。DSC には入力補償型と熱流束型があり、現在は後者が主流。後者の最有力装置メーカーは、米国 DuPont 社から独立した TA Instruments⁸⁰ であり、1992 年に温度変調 DSC、1998 年に原子間力顕微鏡を利用したマイクロ熱分析を開発。特にソフトウェア開発にも相当な経営資源を投入し、手堅く特許を取得。国内メーカーである SII、島津、リガク等の熱分析装置に比べて、ハード・ソフトとも圧倒している。さらに両装置の開発者である英国 Mike Reading が設立に関与した米国アナシスインスツルメント社が局所熱分析装置 (nano-TATM) を開発。エレクトロニクス関連のサブミクロンオーダーの分析が可能であることから、日本での販売量は急増し、日本が世界最大の市場となっている。さらに、2000 年頃に欧米で MEMS を利用した超微小カロリメーターが開発され、欧米の大学を中心に装置開発・手法確立が進められている。合成高分子や医薬分野での研究開発

80 DuPont 社が合成高分子の研究開発に利用するために装置を自社開発

に応用され始めている。国内では本格的に研究しているところは少なく、国内装置メーカーも未対応の状況である。一方、フーリエ変換温度波熱分析や高速顕微赤外線カメラを用いた 2 次元熱分析の装置開発については国内の大学を中心に日本が先行。また DSC との複合測定装置、例えば DSC-XRD、DSC-FTIR などの普及型商用装置についても、国内装置メーカーと大学を中心に精力的に開発され、日本が優位。ただし何れも企業への普及度は低い。概して DSC 関連の先進的な新規装置は、欧米で開発された後、日本国内に輸入され、企業にいち早く導入されて、ものづくりの研究開発に活用されているという状況が続いている。

TG については、1915 年に日本で最初に近代的な装置が開発されたこともあり、当初は欧米よりも研究・装置開発は先行していたが、その後、低調。最近、復興し活発化している。速度制御熱分析は欧州で考案され、市販されたが、国内の大学・装置メーカーにより 1990 年代前半に精力的な研究開発・装置開発が行われ、普及型では海外より優勢。また複合測定である TG と質量分析計 MS を結合した TG-MS (TG-EGA の一種) についても、初期研究は欧米が先行したが、普及型装置開発では日本がリードしている。現在は日本が世界最大の製造拠点・販売市場となっている。国内企業での研究・開発・製造時における加熱時の発生ガスに起因するトラブル解決に、かなり活用されている。⁸¹

81 国内の主な研究グループと進行中のプロジェクト：熱分析の新規手法開発に関する進行中のプロジェクトは意外に少ない。
関連する他の調査比較項目：2.1.2- (6) 熱プローブ

2.3.3 比較表

◆分離分析技術分野

●液体クロマトグラフィー

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	主要大学、大企業ともにモノリスカラムに関する研究を行っており、光学異性体分離用カラムやタンパク分離用など機能付加型のカラム開発ならびにキャピラリーあるいはマイクロチップなど微小化カラムの開発が現在の主流である。一方、超高速システムについては数社が取り組んでいるが米国の比ではない。
	技術開発水準	○	→	モノリスカラムについては世界最高水準を維持している。超高速システムは Waters 社への追随レベルである。
	産業技術力	○	→	新規装置開発に関しては実用化技術は最高水準であると言える。特殊な技術を要する装置開発が必要な場合には欧米に劣ることもあり得る。光学関係技術力は十分に高い。
米国	研究水準	○	↗	モノリスカラム開発分野での研究は数は多くないが活発であり、その技術水準は非常に高い。超高速 LC の開発者は米国の大学研究者であり、この分野では常に世界をリードしている。製品化についても同様であり、主要特許のほとんどはおさえられていると考えられる。特殊な手法開発に興味を持つ大学研究者が多いのは米国の特徴である。
	技術開発水準	○	→	短時間での実用化力は米国が最も高い位置にあると考えられる。
	産業技術力	○	→	モノリスカラムの製品化については大手企業が携わっていることはないと思われる。超高速 LC については Waters 社の独壇場である。モノリスカラムに関してはむしろベンチャー型の企業が特色のある製品を開発する可能性を秘めている。
欧州	研究水準	○	→	伝統的に LC 関連の基礎的研究を着実に進めている研究者が多く見られる。
	技術開発水準	○	↗	モノリスカラムをはじめカラム充填剤に関しては技術水準は高い。
	産業技術力	○	→	装置開発力に関しては米国にはおよばないが、独創的なシステムを開発する可能性はある。
中国	研究水準	△	↗	研究者の数が日本と比べると圧倒的に多く、漢方薬関連などが国では行われていないような研究も数多く進められている。これまでのところ研究水準は高くなく、独創的な研究は少ないが、今後の発展は脅威である。
	技術開発水準	△	↗	多数の企業が存在し、きわめてユニークな装置を開発する可能性はあるが、まだ完成度は低いため国外に進出することはない。
	産業技術力	△	↗	技術レベルは高くないが、今後急発展する可能性を秘めている。今のところ独創的な製品を開発する能力は低いと思われる。
韓国	研究水準	×	→	研究者の数、研究レベルともに比較材料がなく不明である。
	技術開発水準	×	→	情報が少なく不明である。
	産業技術力	△	→	マイクロ技術関係（micro-TAS など）の技術力はかなり高い。バイオ分析関連の技術開発力は日本に比べても遜色ないかもしれない。
全体コメント：液体クロマトグラフィー（HPLC）はすでに完成された分野であるという意見も数年前までは強かったが、近年のモノリスカラムならびに超高速 LC システムの開発により、まだまだ発展可能な研究分野であり、同時に新規製品開発の可能性も十分にあるという認識に変わってきているように思われる。				

（注 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（注 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●ガスクロマトグラフィー

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	マイクロチップカラムを用いた GC の研究。MS 等と組み合わせた例が多い。
	技術開発水準	○	→	電子式フローコントローラ等の要素技術においては、トップレベル。前処理の自動化に関しては欧米に比べて遅れている。
	産業技術力	○	→	品質に関しては優れているが、世界的なシェアが低く、スケールメリットを出しにくい。
米国	研究水準	◎	↗	研究論文数が最も多い。マイクロチップ GC の研究もある。
	技術開発水準	○	↘	要素技術の開発力は低下してきている。
	産業技術力	◎	↘	製造拠点の海外移転によって本国の産業技術力は低下傾向だが、米国の大手石油化学、化学との連携で一定の水準を保っている。
欧州	研究水準	◎	↗	研究論文数は 2004 年以降増加の傾向。
	技術開発水準	○	↗	カラムや前処理など特定の分野でユーザと連携した開発が行われており一定の成果をあげている。
	産業技術力	○	→	ガスクロマトグラフ本体に関する技術力は限定されている。
中国	研究水準	△	?	研究発表数が少ないので近年のトレンドについては不明。GC 利用が主体。
	技術開発水準	△	?	検出器やフローコントローラなど基本要素の独自技術による開発水準は低い。
	産業技術力	△	↗	日本、欧米をモデルとして、急速に中級機を製造する実力をつけつつある。
韓国	研究水準	×	?	研究発表数が極めて少ないので不明である。
	技術開発水準	×	→	海外製品への依存度が高い。
	産業技術力	×	→	海外製品への依存度が高い。

全体コメント： ガスクロマトグラフィーは技術的にはほぼ完成の域に達している。これを MEMS 技術を利用したマイクロチップガスクロマトグラフィーとする研究例が日本、米国ですすめられている。これ以外では、GC/MS や GC/GC などガスクロマトグラフィー自身あるいは他の技術と複合化し、高機能化したものが多い。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●その他クロマトグラフィー

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	主要大学、大企業などでは研究はほとんど行われていない。個人レベルで研究を熱心に行っている研究者はいくらか見られるが、分離分析全体に対するインパクトは低い。
	技術開発水準	○	→	主要機器開発企業ではほとんど何も行われていない。中小企業で特色を持った企業が熱心に機器開発を行っているが、市場は小さい。大学等アカデミアでもこの分野での技術開発意欲は低い。
	産業技術力	○	→	新しい装置開発が必要になれば、実用化技術は十分に備えていると言える。ガスクロマトグラフィーや液体クロマトグラフィーととくに異なる高度技術は必要としない。ただし、もし特殊な技術を要する装置開発が必要な場合には米国、欧州に劣る場合も考えられる。光学測定技術は高いので、この点は世界の先端にある。
米国	研究水準	○	→	日本や欧州に比べるとインパクトの大きくないこの分野での研究は活発ではない。しかし、特殊な分離法に興味を持ち装置開発を試みている大学の研究者がいるのも米国の特長である。全く独創的な方法が開発される可能性は米国が高い。
	技術開発水準	○	→	全く新規な技術が必要な場合、短時間で実用化できる力があるのは米国が一番と思われる。
	産業技術力	○	→	大手分析機器製造企業がこの分野で何か開発しているとは思えない。ベンチャー企業が市場は小さいが特色のある製品を開発する可能性は高い。
欧州	研究水準	○	↗	新規性が乏しくあまり注目されていない分野でも着実に研究を行っている研究者が多いのは東欧である。すなわち研究の守備範囲が広い。
	技術開発水準	○	→	日本でも、米国でも注目されていないような装置が開発される可能性がある。しかし、市場の大きな装置が開発される可能性は低い。
	産業技術力	○	→	市場は大きくないが世界中で販売できるような装置の開発する可能性が高い。特色のある企業が特色のある製品を開発するのは欧州の可能性が高い。
中国	研究水準	△	↗	研究者の数が我が国と比べると圧倒的に多いので、我が国行われていないような研究を行っている研究者も多い。現在は研究水準は高くなく、独創的な研究は少ないが、今後は成果が期待できる。
	技術開発水準	△	↗	研究と同様に企業も数が多く多様であり、我が国ではどの企業も開発しようとしないうような装置を開発する場合も多い。完成度は低いので、世界市場に現れることはほとんどないが、中国内ではビジネスとして成立する製品もある。
	産業技術力	△	↗	技術レベルは高くないが、急速に力をつけていると思われる。独創性の高い製品を開発する能力は高くないと思われる。
韓国	研究水準	×	→	研究者の数も少なく、研究レベルも高いとは思われない。比較材料がほとんどない。
	技術開発水準	×	→	装置の開発を行っている企業がどのくらいあるか不明であるが、我が国への影響はほとんどない。アカデミアでの研究開発も活発とは思えない。
	産業技術力	△	→	国として産業技術振興に熱心なマイクロ技術関係の技術力は高いと考えられ、生物関係の材料分析装置開発力は我が国に劣らないと考えられる。
全体コメント：その他クロマトグラフィーと言っても実用化されている方法は少なく、広く利用されている装置は見あたらないので、国際比較は難しい。したがって、この表では関連技術も含めた主観的なものであることを断っておく。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●質量分析

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	大阪大学を中心とした装置開発が70年以上にわたって行われている。近年ではマルチターン飛行時間型質量分析計が世界的に非常に高い評価を受けている。イオン化法においても日本の複数のグループが独創的なアイデアの開発を行っている。イメージング質量分析では大型プロジェクトを推進している。
	技術開発水準	△	↘	磁場型の頃は非常に高い開発能力を有していたが、現在はソフトウェアの面でかなり劣る。欧米の企業の後追いになっている。
	産業技術力	○	→	生産における技術力や質、サポート力は非常に高い。しかし、市場が欲する製品をタイムリーに市販する力が劣る。
米国	研究水準	◎	→	飛行時間型、イオントラップ、FT-ICRMS などの開発を行っている拠点がいくつかある。応用研究では世界をリードしている。メーカーとの共同開発態勢を築いている。テロ対策などの小型装置開発もトピックになっている。
	技術開発水準	◎	↗	大手メーカーはアプリケーションの開拓、使いやすいソフトウェアの開発に力を注いでユーザーが欲する装置開発を行っている。大学等と共同で技術開発も行っている。
	産業技術力	◎	↗	ユーザーが欲する装置をタイムリーに販売し、大きなシェアを確保している。装置の質やサポート力では日本に劣るが、使いやすさでは遥かに上回っている。
欧州	研究水準	○	→	イギリスは質量分析発祥の地であり、10～20年以上前までは欧州各国の大学で装置および分析手法の開発が活発に行われていたが、若手研究者があまり育っていない。スウェーデンのウプサラ大は解離手法の開発で中心的な役割を果たしている。ロシアでは飛行時間型や FT-ICRMS の装置開発が行われている。基礎的な研究が中心である。
	技術開発水準	◎	↗	大手メーカーはアプリケーションの開拓、使いやすいソフトウェアの開発に力を注いでユーザーが欲する装置開発を行っている。大学等と共同で技術開発も行っている。
	産業技術力	◎	↗	ユーザーが欲する装置をタイムリーに販売し、大きなシェアを確保している。装置の質やサポート力では日本に劣るが、使いやすさでは遥かに上回っている。
中国	研究水準	△	→	装置開発はほとんど行われていない。アプリケーションは欧米でポストドクをしていた研究者らが戻り活発に研究を開始しているが、質はそれほど高くない。
	技術開発水準	×	→	装置開発をおこなっている企業はない。
	産業技術力	×	→	装置開発をおこなっている企業はない。
韓国	研究水準	○	↗	装置開発はほとんど行われていない。アプリケーション面では、近年急激に研究者が増えている。現状では研究の質はそれほど高くないが、急激にレベルが上がってきている。
	技術開発水準	×	→	装置開発をおこなっている企業はない。
	産業技術力	×	→	装置開発をおこなっている企業はない。

全体コメント：装置開発にも、イオン化法、質量分離部、検出器があり、また解離手法や測定法、質量分析を用いた応用研究等があり、全てをまとめるのは困難であり、ここでは装置開発を中心に評価した。装置開発を行っている大学等の研究機関は、20年以上前と比べると世界的に大幅に減っており、開発の中心はメーカーになっている。欧米のメーカーは、アプリケーション/ソフトウェアの開発に力を注ぎ、この10年ほどの間に急激に増えた質量分析の専門家ではないユーザーの要望に応える装置を販売し、シェアを広げている。国内のメーカーは、技術力では劣らないものの、装置の使いやすさの面で欧米のメーカーに水をあけられ、完全に後追いになっている。

(註1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●電気泳動

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	キャピラリー電気泳動 (CE) 開発当初は高い水準にあったが、研究者の数が減少し研究水準も低下している。ただし、マイクロチップ電気泳動 (MCE) について、研究水準は高い。他の電気泳動は生体高分子分析に多用されているが方法論の研究は低調である。
	技術開発水準	○	→	臨床検査用セルロース膜電気泳動、生化学研究用のゲル電気泳動装置は新技術の展開は難しく技術開発に新規性は少ないが、需要は高いので常に新しい措置が開発されている。CE 装置は大塚電子 (株) のみが国内で装置を生産している。マイクロチップを用いる電気泳動装置も数社から発売されていたが、現在では (株) 島津製作所のみが生産している。
	産業技術力	○	→	従来の電気泳動装置には測定法としての新展開はあまり期待できないが、装置面での技術開発は周辺技術の進展とともに進んでいる。とくに光学測定装置に関しては日本の技術は高レベルにある。CE やマイクロチップ電気泳動のような新分野での必要技術水準は高いが、新装置開発への意欲は高くない。
米国	研究水準	◎	↗	生化学研究分野での研究が活発であるので、その手段としても電気泳動も多用されており、新技術開発も活発である。CE や MCE の特長をいかして試料量がきわめて限定されているシングルセル分析や神経科学分野への応用研究が活発である。
	技術開発水準	◎	↗	基礎研究で開発された方法論や装置が短時間で市販装置として開発される。開発当初は完成度の低い装置も多く、受け入れられずに消滅してしまうものもあるが、短時間に改良され普及される装置もある。アカデミア、企業どちらも装置開発意欲は高い。
	産業技術力	◎	→	装置開発に必要な産業技術はそろっているが、他の分析手段と比較すると電気泳動分野での新展開は少なく、大手分析装置製造企業のこの分野での開発意欲は高くない。
欧州	研究水準	◎	→	米国と異なり、新技術開発優先と言うより、従来法の見直し、改良法の開発等着実な研究が多い。北欧、東欧、スペイン等での研究が活発であり研究水準は必ずしも高くない。しかし、応用研究は非常に活発である。
	技術開発水準	◎	↗	CE、MCE 装置に関しては Agilent Technologies Inc. が熱心に装置開発を行っている。最近では質量分析法 (MS) との組み合わせによるメタボローム解析用の装置開発に熱心である。マイクロチップ研究の盛んな英国、ドイツ、スイス、オランダ、フランス、デンマーク、スウェーデン諸国で新装置開発意欲は高い。従来法の分野では北欧、東欧諸国での装置開発が活発である。
	産業技術力	○	↗	英国、ドイツ、スイス、オランダ、フランス、デンマーク、スウェーデン諸国では CE や MCE 装置開発のための産業技術は十分に備えている。従来法の改良、需要は少ないが分取用装置開発等の技術水準は高い。
中国	研究水準	△	↗	全体的に研究水準は高くないが、研究者の数が非常に多く、若手研究者の研究意欲は高い。中国からの独創的な研究成果はほとんど見られなく、最新技術の追試段階にあるが、研究水準は急速に進展していくと予想される。
	技術開発水準	△	↗	研究面と同様に、装置開発も盛んで、国内市場が大きいので、外国では商品価値の低い装置が各種製造販売されている。新技術開発面ではまだ世界水準には達していないが、品質が向上すると低価格装置が世界市場にも登場してくると予想される。
	産業技術力	○	↗	詳しいことはわからないが、ほとんど国産で装置を製造できることから判断すると、周辺技術水準の進展とともに電気泳動分野での装置開発技術も急速に発展すると予測される。
韓国	研究水準	×	→	他の学問分野も同様と思われるが、特定の分野に集中的に研究資源を投入しているらしく、マイクロチップ技術の必要な MCE 分野以外世界水準の研究は見られない。
	技術開発水準	×	→	マイクロチップ技術の応用である MCE 装置開発は可能であると思われるが、市販製品の開発例は知らない。
	産業技術力	×	↗	評価する情報が無い。マイクロチップ研究は盛んであり、その分野での産業技術力は高いと予想される。
全体コメント: 電気泳動装置には従来のゲル電気泳動、セルロース膜電気泳動、新しい技術であるキャピラリー電気泳動 (CE) 及びマイクロチップ電気泳動 (MCE) があるので、すべてをまとめて評価するのは難しい。従来法も含めて電気泳動装置は生化学研究の道具として多用されている。研究面で新規性が期待されるのは CE 及び MCE である。新しい技術である CE 及び MCE を中心に本表を記入する。				

(註 1) 現状について [◎: 非常に進んでいる、○: 進んでいる、△: 遅れている、×: 非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗: 上昇傾向、→: 現状維持、↘: 下降傾向]

●熱分析

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	速度制御熱分析や複合型素熱分析では日本は先行 SThM (AFM を利用した熱分析)・温度変調熱分析・MEMS カロリメータによる研究開発は訪米に比べて弱い
	技術開発水準	◎	↗	加熱工程を含む製品の研究開発に盛んに活用 研究支援産業でも装置導入が活発化 温度変調法や SThM の装置開発、ソフトウェア開発は欧米に比べて弱い
	産業技術力	○	↗	製造時の加熱工程におけるトラブル解析で盛んに活用
米国	研究水準	◎	↗	温度変調熱分析・SThM・タンパク用超高感度 DSC などで研究開発 (装置、アプリケーション) をリード
	技術開発水準	◎	↗	米国 TA Instruments (DuPont から独立) が強い 製品の研究開発への活用に積極的 温度変調法や SThM の装置開発、ソフトウェア開発に重点的に戦力投入
	産業技術力	○	↗	企業に相当数導入され、積極的に活用
欧州	研究水準	◎	↗	独 MEMS を用いたチップカロリメータが開発され、高分子と医薬の基礎研究に展開
	技術開発水準	◎	↗	瑞 Mettler 社が独自の温度変調法 (TOPEM) を開発し展開 仏 SETRAM 社など独自の分析技術を保有・開発
	産業技術力	○	→	日本、米国に比べると企業での活用度は遅れている
中国	研究水準	△	→	
	技術開発水準	△	→	外国からの研究開発拠点も動きだし、今後活用されるものと予想
	産業技術力	△	→	加熱工程での製造時のトラブル解決に今後活用されるものと予想
韓国	研究水準	△	→	
	技術開発水準	△	↗	一部先進企業にて TPD-MS が開発され、研究開発に活用されている
	産業技術力	△	→	加熱工程での製造時のトラブル解決に今後活用されるものと予想
全体コメント：(狭義の) 熱分析として DSC (示差走査熱量計、温度変調、その他 SThM なども含める) と TG (熱天秤、TG-MS 等の複合装置も含む) に大分類すると、DSC の研究開発 (装置、アプリケーション) は欧米先行で、日本は劣勢であるのに対して、TG の研究開発は日本が先行。一方、企業では、加熱工程を経る製品の研究開発、製造時のトラブル解析、品質管理には熱分析は必須であり、欧米装置を積極導入して活用している。 備考) MEMS: Micro Electro Mechanical Systems、SThM: Scanning Thermal Microscope 上記、技術開発水準には、研究支援産業および分析装置メーカーの研究開発を含む。				

(註 1) 現状について [◎:非常に進んでいる、○:進んでいる、△:遅れている、×:非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗:上昇傾向、→:現状維持、↘:下降傾向]

2.4 力学測定技術分野

2.4.1 概観

力学測定技術分野の国際技術力比較を行うにあたって、当該分野を4つの中綱目に分類した。すなわち、(1) 粘度、(2) 摩擦、(3) 距離・長さ、(4) 速度・加速度、である。

一口に力学測定分野と言っても広く、中綱目に分類した各物理量に絞ったとしても、非常に多岐に亘る計測対象が存在しており、全体を概観することは容易ではない。しかし、四つの中綱目テーマに共通する技術であり、新たな産業の創出や先端産業の育成と関連が深く、また各機関が先端計測機器として開発にしのぎを削っている技術は、やはりナノメートル (nm)、あるいはそれ以下の単位で表される微細領域計測技術である。微細領域計測に多く使われている計測手法は、原子間力顕微鏡 (AFM) や磁気力顕微鏡 (MFM) をはじめとする一群の走査プローブ顕微鏡 (SPM)、表面力装置 (SFA、表面から垂直な方向への分解能が高い)、ならびに SEM (走査電顕)、TEM (透過電顕) の電子顕微鏡である。これら SPM、SFA および電顕を利用した粘度、摩擦に関わる物性解明を目指した、大学等における装置利用研究と言った面では我が国も決して米国や欧州の後塵を拝している訳ではなく、トライボロジー計測などにおいては、世界をリードしている。また、我が国が伝統的に強い電顕、ならびにその応用である半導体製造のための測長 SEM 装置では、我が国が世界最高のシェアを維持している。

上記のように我が国が先頭を走っている分野もあるものの、四つの中綱目についての研究水準、技術開発水準、産業技術力の何れにおいても、おおむね「非常に進んでいる」と評価されるのは、やはり米国である。その原因は、個々の綱目によって異なるものの、軍事、航空宇宙などに関連した国の支援体制、および、その資金で行われる NIST、NASA、各大学での研究、さらにはその成果を企業化するベンチャービジネスの存在が大きい。

また欧州各国も、三次元測長機やプローブ顕微鏡などで世界をリードしている。また、米国と共通する事項として、装置や試験法の国際標準化を国が熱心に支援していることが挙げられる。この点については、我が国も見習うべきであろう。

韓国においては、半導体メモリや液晶パネルに関連する測長技術や MEMS 応用センサの開発など、相当に進んでいる分野がいくつか見られ始めている。それ以外の分野においては、我が国や欧米には及ばないものの研究レベルは確実に上がってきている。

中国については、留学経験者等が中心となって研究レベルを上げており、国

も国際会議開催を支援する等、キャッチアップは急速に進んでいる。

2.4.2 中綱目ごとの比較

(1) 粘度

粘度の計測法としては、溶液の粘度を測定する毛細管粘度計や回転粘度計があり、1970 年からは光学的手法として、蛍光偏光解消が取り入れられ、更に最近、蛍光相関分光法が展開されている（蛍光相関分光法についてはこの 10 年間で益々増加し、対象も界面など局所的場計測に広がっている）。1990 年前後より先端の機械的手法として、表面力測定装置（SFA）を用い、2 つの固体表面の間に液体を挟み一方の面を平行にする“すり測定”が開始され、その後、原子間力顕微鏡（AFM）を用いる固体表面の粘弾性計測、水晶発振子（QCM）による粘弾性の測定が開始され、年々研究が盛んになってきている。

本項は先端計測技術としての“力学測定技術分野”における“粘度”を対象とするので、従来法や光学的手法をのぞき、SFA、AFM、QCM を用いる方法を主にまとめた。ナノ、ミクロデバイスに代表される先端技術の展開のため、微細空間の液体の粘度、摩擦、潤滑などの特性の解明は必須であり、実際、ナノレオロジー、ナノトライボロジーで検索できる論文の数は、総数はまだ多くないものの近年増加し、多くの産業技術分野で重要と考えられ、より一層の研究の推進が望まれる。これら、粘度に関係する計測法の現状について述べる。

SFA を用いるすり測定にはいくつかの方法があり、Israelachvili（米）、Granick（米）、Klein（英）、栗原（日）がそれぞれ独自な方法を展開している。SFA を用いる場合、大きな表面（直径 $30\ \mu\text{m}$ ）の間隔を 0.1nm の精度で動かし、間隔を変えながら測定できることに特色がある。大きな表面の測定であることから、実際の材料開発・物性研究に応用しやすい。Israelachvili の方法（市販装置あり）は、主に stick-slip などの数分子層厚みの液体のナノトライボロジーを評価するのに用いられ、典型的な液体、液晶、溶融高分子などが対象の試料である。Granick の方法は 2 つの表面に閉じ込められた液体の粘度を、Klein の方法はすり応答の絶対値から液体の粘度や潤滑性を評価し、栗原の方法は共振法を用いる点に独自性があり、基板間に挟んだ液体の特性（粘度、構造化、潤滑、摩擦）の微小な変化を他法に比べ安定に感度良く検出することに特色がある。これらの手法による、固体表面の摩擦特性の評価も可能である。

AFM を用いる粘弾性測定は、主に柔らかい固体表面を対象にし、1980 年代後半に米国で開始され、Gaub（独）らのグループが研究に参画して大きく展開し、日本では梶山、高原（九大）らが 1990 年代半ばより高分子表面を活発に研究している。初期には、粘弾性の画像化に始まり、定量的評価に展開している。探針を用いるため、固体表面の評価が主である。VE (viscoelasticity) AFM は市販装置として米国・日本などで製造され各国で販売されている。

水晶発振子 (QCM) は、蒸着・吸着による重量変化を計測するために開発された装置である。最近 (1995 年)、エネルギー損失 (Dissipation) を計測する QCM が開発され、1998 年に Q-SENSED としてスウェーデン q-sense 社より販売され、日本も含め、世界的に販売されている。水晶発振子上に吸着した試料の粘弾性、界面近くの液体の粘度を測定できる。

AFM、QCM に基づく装置は手軽に利用できる点でメリットがあるが対象が限定され、一方 SFA に基づく装置は 2 つの基板の間の試料を測定でき、閉じ込めや空間の効果を見ることができ普及が望まれる。また、後者は X 線回折、蛍光や吸収などの同時測定法の開発に対しても優位性がある。これらの領域の国内での関心やポテンシャルは高い。⁸²

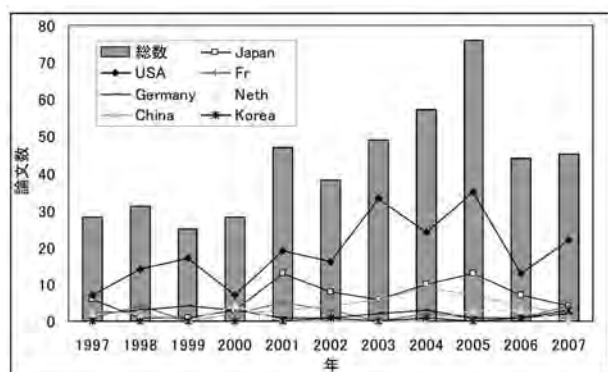


図 8 nanotribology、nanorheology で Sci Finder で検索される論文数の年次変化、総数ならびに主な国別に比べた。総数については、検索語の設定により漏れているものもあると考えられるが、傾向は反映している。2006、2007 年については、データベースに採録されていないデータがあると思われる。

- 82 (1) 主なデータ検索は SciFinder Scholar を用いた。主な検索キーワードは次のようである。
- ・ AFM, viscoelasticity, ・ AFM, Gaub ・ SFA, shear ・ Surface force, shear
 - ・ QCM-D ・ Nanorheology ・ Nanotribology ・ AFM (Patent) ・ AFM/shear (Patent)
- (各国別に文献の出現頻度ならびに年次変化を調べ、個別の文献調査結果を合わせて技術の各国比較を記述)
- (2) AFM (Atomic Force Microscope) - 以下は Viscoelasticity の異なる部分の画像化を中心とする初期の文献である。
- ・ Burnham, N. A.; Colton, R. J, J. Vac. Sci. Technology A, **7**, 2908-2913 (1989)
 - ・ Radmacher, M.; Tillmann, R. W.; Fritz, M.; Gaub, H. E., Science, **257**, 1900-1905 (1992)
 - ・ T. Kajiyama, K. Tanaka, I. Ohki, S.-F. Ge, J.-S. Yoon, A. Takahara, Macromolecules, **27**, 7932-7934 (1994)
- (3) SFA (Surface Force Apparatus) - SFA を用いる粘弾性測定も高分子ブラシを中心に行われているが範囲が広くなるので、Shear 測定の種々の方法に対する初期の主要論文に限る。
- ・ Dynamic Properties of Molecularly Thin Liquid Films, J. N. Israelachvili, P. M. McGuiggan, A.M. Honola : Science, **240**, 189 -191 (1988)
 - ・ Design of an apparatus to measure the shear response of ultrathin liquid films, Percey J.; Alsten J. V., Granick S., Rev. Sci. Instrum. **62**, 463-473 (1991)
 - ・ A resonance shear force rheometer modeled as simple oscillating circuit, C. D. Dushkin, K. Kurihara, Rev. Sci. Instrum. **69**, 2095-2104 (1998)
 - ・ Shear of Molecularly Confined Liquid Crystals. 2. Stress Anisotropy across a Model Nematogen Compressed between Sliding Solid Surfaces, J. Janik, R. Tadmor, J. Klein, Langmuir, **17**, 5476-5485 (2001)
 - ・ ナノ共振器測定による界面の液晶の研究, 栗原和枝、液晶、**6**、34-41 (2002)
- (4) QCM- ディシペーション法
- http://www.q-sense.com/qcm_d_technology--32.asp (q-sense 社のホームページ)
 - <http://www.meiwafosis.com/index-1.htm> (盟和商事のホームページ)

(2) 摩擦

摩擦・摩耗・潤滑の技術分野は、基礎と応用が結び付き易く、産業的にも重要な分野でありながら現象が複雑でモデル化しにくいいため、大学等での研究開発は日本ではそれほど盛んではない。一方、産業界では、多くの製造装置、加工、ハードディスクの摩擦、さらにはタイヤの摩擦・摩耗を含めて省エネルギー、エコロジーの立場から相当の研究開発が行われているが学会等での発表はそれほど多くない。さらに、米国などでは、軍事研究がらみで超高速での金属どうしの摩擦実験、スーパーコンピュータを使った大規模シミュレーションも行われているようであるが、あまり对外発表はされていない。しかし、発表が少ないから重要な分野ではないとはいえず、重要なので発表できないと言った方が良いのかもしれない。例えば、タイヤの摩擦・摩耗に関して言えば、多くの室内計測実験では全く信用されず、最終的には実際の車輛に装着して、ブルーピンググラウンド（自動車のテストコースと同程度の規模、世界各地（含む寒冷地、熱帯、砂漠）で数万 km 走行実験しデータを取らないと実用化はされない。

基礎面で見ると、最近世界各国で原子間力顕微鏡 AFM を利用した、ナノトライボロジーの研究が盛んであり、対象物質も均一系だけでなく、合金、ポリマーアロイ、コンポジットなど多岐にわたっている。しかし、摩擦の条件として、温度、荷重、走査速度、雰囲気等十分に考慮し、それとマクロに見たトライボロジーとどう対応するのかといった系統的な研究はまだ充分ではない。更に摩擦は表面だけでなく、原子・分子的スケールで見れば、内部摩擦とも関係しているはずであるがそこまでの研究はされていないようである。

最後に日本でのゲルの摩擦研究など今後のひとつの分野として、生体の摩擦・摩耗を含めた研究に注目したい。一方、米国などでは、摩擦による材料の傷付き（スクラッチ）に関する産学コンソーシアムによる研究がテキサス A & M 大学中心に行われている。彼らは、そのための試験機を開発し、ISO 化（世界標準化）を狙っている。

今後、日本での摩擦測定技術分野は、研究開発のみでなく、優れた技術が開発された場合は、論文・特許だけではなく、世界標準化し、ISO などで日本が議長国となり主導権を取って行くのが望ましい。また国としてもそのような働きを積極的に評価・支援すべきである。

(3) 距離・長さ

距離・長さ計測のツールとしては、距離計、マイクロメータ、ダイヤルゲージなど、工業的に重要であるが新たな産業の創出や先端産業の育成とは関連の薄いものから、レーザー測長器、リニアスケール、三次元測定器、走査型電子顕微鏡など、高精度化へのニーズが高いものもある。本項では、主に成長途上

にある先端産業において重要なレーザー測長器をはじめとした計測ツールによる長さ測定に限定して述べる。

超精密機械加工分野では日本がまだ優位であるが、より精密さを追求するならば測長センサやその利用技術の向上が求められるところである。超精密機械加工機に組み込む測長センサは、コンパクトなこととコスト面からの理由によりリニアスケールが主流である。リニアスケールの高精度な製品においては、ドイツのハイデンハインと日本のミットヨやソニーマニュファクチャリングシステムズが競合状態にあると言える。半導体露光機(ステッパー、スキャナー)など、さらに高精度が求められる加工機にはレーザー干渉型測長器が搭載される。この分野では米国2社(ザイゴ、アジレント・テクノロジー)の独壇場であったが、近年英国企業(レニショー)が元々あった価格競争力に加えて製品群を充実させることで存在感を増している。日本企業は、半導体レーザーを光源とした反射型のものをはじめ、静電容量、超音波、渦電流、磁歪などの方式を用いるライン検査用の変位センサや距離センサを幅広く供給し、中には0.1nmを切る分解能を持つ製品も現れるなど、技術開発が活発である。

一方、微小物体間の距離や、微細構造の周期など、微小領域の測定には、SEM、TEM、SPMが良く用いられる。さらにSPMには検出する物理量に応じて派生する様々な手法があり、例えば、原子間力を検出して、表面の三次元構造を観察するのに適する原子間力顕微鏡(AFM)の他、磁気記録メディアの磁気パターンをマッピングする磁気力顕微鏡(MFM)、電気容量分布を知ることによりトランジスタの不純物密度評価を可能とする走査容量顕微鏡(SCM)などが実用化されている。これらSEM、TEM、SPMは、それぞれ収束電子ビームと先鋭化探針などのプローブを2次元あるいは3次的に走査することで観察像を得るが、観察像上の距離・長さ測定には別の基準となるスケールにより校正をあらかじめ行うことで、変位信号と走査距離の変換係数を推定するのが一般的となっている。この基準となるスケールには回折格子のような、周期パターン構造が良く用いられるが、測定精度の維持のために、このスケールの多様性や信頼性が近年重要になっている。

半導体関連寸法計測で重要な項目は、線幅、ピッチ、高さ、エッジラフネス、ナノパーティクルの直径計測等であり、計測精度等の技術予測が半導体技術ロードマップに明記されている。ロードマップにおける精度の定義もここ数年変遷してきており、従来の計測は再現性(reproducibility)のみが重視されていたが、米国学会等では参照計測(Reference Metrology)値からの偏りを抑えたAccuracyが必須であることが多く議論されている。

半導体製造工場向けの測長SEMは日本(日立)が6割以上のシェアを有し、欧米のメーカーが競合相手となっている。半導体向けの測長型SPMについては、米国(ビーコ)が独壇場となっている一方、国内においては国内メーカ(日

立建機ファインテック)も近年シェアを伸ばしている。これらの分野で韓国、中国の台頭の兆しはまだない。

(4) 速度・加速度

速度、加速度はその計測単位(速度:m/s、加速度 m/s^2)に見られるとおり、距離と時間の組み立て量である。従って単位時間あたりの(移動)距離を測定することで自ずとそれぞれの量を計測することが可能であるが、ここでは非接触速度計測や地震などの計測に限って述べる。

非接触速度計測では、光学式測定器が多く用いられる。1980年代までは反射光の強度変化を用いた測定器が多かったが、90年代以降レーザー技術の進展により、光が移動体から反射する際のドップラーシフトの原理を用いたレーザドップラ速度計に移行し始めた。レーザドップラ速度計は、測定対象表面の光学的特性や対象までの距離に関する制約が比較的少ないことから、産業界で広く用いられるに至っている。日本では自動車(エンジン開発、振動制御、ボディパネル防振等)やIT機器(ハードディスクヘッド挙動評価等)産業で多くのレーザドップラ速度計を活用している。レーザドップラ速度計は安定化レーザー、音響光学変調素子、フォトディテクタなどのキーデバイスからなり、これらのデバイスを安定調達できる国々は限られる。その結果レーザドップラ速度計自体の製造業者は世界的に見て欧州、米国、および日本によって占められている。レーザドップラ速度計のダイナミックレンジ(最大測定速度)は音響光学変調素子の変調周波数に律せられるため、各社製品とも大きな差別化が図れない状況にあるが、近年変調周波数に併せたダイナミックレンジの拡大が図られている。今後は半導体レーザーなどを光源に用いた安価な普及型と精度やダイナミックレンジを追求した高価格品に分化していくことが予想される。日本はユーザー企業が多いため比較的価格競争力に富んだ製品が多いが、性能面での追求も期待される。

地震など、測定対象を慣性座標系の元で評価するためには、ばねとおもりからなるサイズモ式加速度計が唯一の測定手段となる。サイズモ式加速度計には主に低周波・高感度型のメカニカル式と、高周波・大加速度型の圧電式(起電および抵抗)に大別される。メカニカル式は地震計にも用いられる。わが国は地震国でもあることからメカニカル型の製造業者は多いが、世界的に見るとユーザーは地質探査・資源探査業界であり、米国製品のシェアが高い。圧電式では米国と欧州が起電型を、日本が抵抗型を多く製造している。基本的性能に差異は無いが、起電型の方が温度安定度や経年変化及び剛性などの点で優れるため、振動に関わる国際規格(自動車の衝突安全性など)では米国・欧州の発言力が強くなる傾向がある。反面抵抗型は安価という特性がある。これら従来型加速度計に加え、90年代以降MEMS技術を用いた微小な加速度計が製品

化されている。この分野では米国が先行し、日本が追従していたが、近年台湾、韓国の台頭が著しい。

2.4.3 比較表

◆力学測定技術分野

●粘度

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	AFM による固体表面の粘弾性評価は梶山、高原（九大）、西（東工大）、SFA によるナノ共振すり測定は栗原（東北大）、ディシペーション QCM については岡畑（東北大）の研究があり、いずれもレベルが高いが、研究グループの数が限られている。
	技術開発水準	○	↗	企業の研究は装置開発よりも AFM を中心とした利用研究に片寄っている。SFA については、栗原ら（東北大）がナノ共振すり測定装置をはじめいくつかの独自装置を開発し、材料の開発研究に用いられ、その有効性が示されている。
	産業技術力	○	↗	VE(viscoelasticity)AFM はセイコーインスツルメンツから市販されている。
米国	研究水準	◎	→	AFM による固体表面の粘弾性評価が 1980 年代末に提案され、また、SFA に基づく測定についても Israelachvili（カリフォルニア大学サンタバーバラ）、Granick（イリノイ）により装置開発も含め、活発に行われている。AFM の装置開発に対しての学から産への技術移転もスムーズなように思われる。
	技術開発水準	◎	→	装置開発については大学の技術が移転されている。また当分野において大学との共同研究が多いと聞く。
	産業技術力	◎	→	AFM は Veeco など数社で開発販売され、SFA も Israelachvili 教授が起業した会社より販売されている。
欧州	研究水準	◎	→	AFM による粘弾性測定は Gaub（独、ミュンヘン）、Butt（独、マインツ）などによりなされ、SFA に基づくすり測定については、Klein（英、オックスフォード）をはじめ、装置の製作改良を行える研究グループがフランスにもあり、研究者の層が厚い。ディシペーション QCM はスウェーデンの Chalmers 工科大学の QCM 研究グループで 1995 年に開発、特許取得されたものである。
	技術開発水準	○	→	状況は良くわからないが、測定の利用者が大部分か。
	産業技術力	○	→	QCM-D はスウェーデンの q-sense 社より 1998 年に販売開始され、世界中で販売されている。AFM は米国製が優勢であり、SFA については自作が多い。
中国	研究水準	△	↗	米国に留学した研究者を中心として関心はあるが、実際の研究は緒についたところである。AFM、SFA を用いた論文数は増加傾向にあり、トライボロジーに関する関心も高い。
	技術開発水準	△	↗	企業においても大学と同様な状況と考えられる。
	産業技術力	×	↗	論文や特許の状況からは、装置製作までは進んでいないと思われる。
韓国	研究水準	△	↗	米国に留学した研究者を中心として関心はあるが、実際の研究は緒についたところである。まだ論文数は少ないが、増加傾向にある。トライボロジーに関する関心は高い。
	技術開発水準	△	↗	企業においても大学と同様な状況と考えられる。
	産業技術力	×	↗	論文や特許の状況からは、装置製作までは進んでいないと思われる。

全体コメント：ここでの粘度計測は、先端計測として、AFM による粘弾性測定、SFA を用いるすり測定、ディシペーション QCM を対象とし、ナノレオロジー・ナノトライボロジーとそれに関連する技術分野について調査した。技術開発水準としては企業における同分野の研究開発のレベル、産業技術力としては市販製品の製造販売の有無を目安に判断した。米国は装置開発・研究レベルとも高く、また欧州には独自性の高い研究が見られる。我が国においては、研究はいくつかのグループが活発に行っているが研究者の層が薄く、今後の産業技術支援からは展開が課題である。中国・韓国においては、米欧の中心グループに留学している研究者がある程度おり、研究に関する関心・理解も高く、徐々に研究のレベルが上がっている。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●摩擦

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	MEMS デバイスを利用した摩擦計測や、AFM インデンテーション、超潤滑など、材料開発も含めてナノテクノロジーに資する分野のトライボロジー計測は世界をリード。
	技術開発水準	○	→	摩擦試験機の開発などでは、欧米の後塵を拝する。
	産業技術力	○	→	摩擦試験機の開発などでは、欧米の後塵を拝する。
米国	研究水準	◎	→	自己組織化膜の摩擦特性やナノ空間における液体分子の挙動解析など、ナノトライボロジー計測で強み。NIST を中心に標準試験法などにも強み。金属の高速摩擦など軍事研究がらみで高度なものがあるが余り発表はされていない
	技術開発水準	◎	→	IBM Zurich 等、企業の研究所は高い技術力を有する。標準試験法の開発から、スピニングベンチャーを興し、企業化が盛んに行われている。
	産業技術力	○	→	標準試験法に関しては、研究開発現場からのスピニングアウトにより、企業化が盛んに行われている。
欧州	研究水準	◎	→	先端計測分野、特にプローブ顕微鏡を利用した摩擦計測の技術力高い。さらに標準試験法など総合的な技術力も高い。
	技術開発水準	◎	→	IBM Zurich 等、企業の研究所は高い技術力を有する。標準試験法の開発から、スピニングベンチャーを興し、企業化が盛んに行われている。
	産業技術力	○	→	特に標準試験法に関しては、研究開発現場からのスピニングアウトにより、企業化が盛んに行われている。
中国	研究水準	×	↗	欧米で学位を取り、成果を挙げた研究者が帰国し、研究レベルを上げている。国内での純粋な研究に関しては、独自性に難あり。但し、近年論文数が急激に伸びてきており、技術動向には注意を払う必要あり。
	技術開発水準	△	→	企業レベルでの研究は、余り聞かない。
	産業技術力	△	→	欧米、日本の技術の模倣が多く、開発力、生産力は欧米、日本には及ばない
韓国	研究水準	△	↗	日本と共同で国際会議を開くなど、技術交流により、研究レベルが上がりつつある。
	技術開発水準	△	→	企業レベルでの研究は、余り聞かない。
	産業技術力	△	→	欧米、日本には及ばない

全体コメント：日本は摩擦測定に関しては、特にナノテクノロジー分野に強みを持っている。欧米では、ナノテク分野も強いが、加えて標準試験法の開発も盛んに行われている。中国は、欧米で成果を挙げた研究者が帰国し、技術レベルを上げつつある。しかしながら、国内では独自技術の開発までは至っていないと考える。但し、近年研究論文が増加しており、中国の技術開発動向には、注意を払う必要がある。韓国は、日本との連携により技術レベルが上がりつつある。企業レベルでは中国、韓国とも、日米欧には及ばない。

(註1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●距離・長さ

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	超精密加工分野における更なる高精度化へのニーズが、測長技術の研究開発水準を牽引。
	技術開発水準	◎	↗	レーザ干渉型の精密測長機器の開発では、半導体レーザ測長器の開発など、技術蓄積のある米国・欧州を追い上げているところであるが、作動距離が決まった測長器で高性能製品が複数出ている。
	産業技術力	◎	→	小型化、および普及品の品質管理を得意とする強みを生かし、組込み用途では世界トップを維持。超精密測長機器は米国、欧州に依存する傾向が顕著。電子ビーム測長器では高い世界シェアを維持。
米国	研究水準	◎	→	レーザ干渉計の発祥の地であり、現在も航空宇宙や軍事などのニーズが高度な研究水準を維持。NASA、JPL、NIST など存在感有り。半導体分野でもデバイス寸法に関する研究ではトップ。
	技術開発水準	◎	→	半導体デバイス寸法を計測する SPM ではデファクト・スタンダードとなる技術を有する。
	産業技術力	◎	→	レーザ干渉計ベースの測長器では、アジレント・テクノロジー社、ザイゴ社で圧倒的なシェアでスタンダードを確立し、強力な産業基盤に寄与。
欧州	研究水準	◎	↗	ドイツ、英国、スイスなどが欧州の研究水準を牽引する。三次元測定機の高精度化で日本と共に競合状態にある。
	技術開発水準	◎	→	技術開発力は最高レベルを維持している他、国際規格化において各国標準技術研究所のバックアップを受けつつ欧州諸国で結束し、大きな発言力を有する。
	産業技術力	◎	→	ドイツではリニアスケールや距離計で技術力の蓄積があり、三次元測定機などに強みを持つ。英国レニショー社ではレーザ測長器で最近力をつけてきており、先端加工機や計測機に搭載されつつある。
中国	研究水準	△	↗	研究レベルは欧米・日本には及ばないものの、清華大学をはじめとして応用光学分野のポテンシャルは高く、国際学会における発表は活発である。
	技術開発水準	△	↗	測量関係で技術力をつけてきており、いずれ日本メカによるシェアに影響が及んでくるものと予想される。
	産業技術力	○	↗	光学産業においてベンチャー企業が多く、また日本からの精密機械加工機をはじめとした技術流出により、産業技術力が高まる動きがある。
韓国	研究水準	○	→	半導体メモリや液晶パネルなどの生産技術基盤としての測長技術はニーズが高く、KAIST の先端計測技術の研究レベルは高い。
	技術開発水準	○	→	上記 KAIST と産業界の連携により技術移転が進めば、競争力をつけてくる可能性がある。
	産業技術力	○	↗	測長機器は欧米や日本に依存しているが、世界トップを維持する液晶パネル産業からのニーズに応え、測長技術が強化される動きもある。
全体コメント：レーザ干渉測長では米国の独壇場に英国が食い込みつつある。主にライン検査・組込み用途では日本が強みを発揮して多様な製品をリリース。高精度の寸法・形状測定装置への応用では欧州・米国が伝統を生かして高いレベルを維持する一方、日本も技術開発水準を向上してきている。電子ビーム測長機では、日本が高いシェアを維持。走査プローブ顕微鏡による測長では、米国が独走し、日本が追い上げを始めているところ。				

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●速度・加速度

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	光学式測定器、サイズモ式測定器などの総合力ではトップを維持。ユーザ企業が多いことも寄与
	技術開発水準	◎	→	普及品の開発では高い技術を持つが、参照標準器レベルの高精度型としては欧州に差をつけられている。但しこれは技術面だけでなく ISO などの規格活動における差も加味された結果である。
	産業技術力	◎	→	ユーザと一体となった開発体制として産業競争力は強固であるが、独立系半導体ファウンドリの不足などから MEMS センサなど大学の研究成果を産業化に結びつける面で弱さがある。
米国	研究水準	◎	→	航空宇宙、石油探査、および軍事などのニーズを踏まえた高度な研究水準をもつ。NASA、DARPA、NSF などのサポートも存在。
	技術開発水準	◎	→	MEMS 加速度センサでは、大学などの研究成果をいち早く産業化するメカニズムとダイナミズムが存在し、自動車用エアバッグセンサなどに巨大マーケットを築いた。
	産業技術力	◎	→	上記分野を中心にアナログデバイスなどでは先行者利益と競争力を確保。アジア圏からの追い上げに対し中国などへのファブ展開及び特殊用途の開発等で競争力を確保
欧州	研究水準	◎	→	サイズモ式測定器ではメカニカル型地震計、圧電式加速度計とも数十年以上の歴史を持つ企業が存在する。一方 MEMS センサや光学式振動計ではフ라운ホーファー研究所、ローザンヌ工科大学などが開発から企業化までの機能を果たしている。
	技術開発水準	◎	→	上記研究水準・伝統企業をベースに、さらに国際規格化などでの発言力を有し、高い開発水準を有している。
	産業技術力	◎	→	EU 圏におけるリソースの選択と集中、商圏拡大と世界企画戦略により高い産業競争力を有している。
中国	研究水準	△	→	ファウンドリの普及を背景に MEMS 加速度センサでは近年急激に成果が出つつあるが後追いの感は否めない。伝統的サイズモ式測定器では軍需関連に内製が多いが旧ソ連・米国製のデッドコピー
	技術開発水準	△	→	光学式測定器も開発段階にあり、ユーザニーズも高いことから潜在ポテンシャルは高い。
	産業技術力	○	↗	ファウンドリの普及を背景に、既存の工業国が歩んだステップを飛び越えて競争力を高める可能性は否定できない。
韓国	研究水準	○	→	MEMS センサについてはサムソンが突出し、KAIST 等との連携も強い。研究レベルは高い
	技術開発水準	○	→	ユーザと一体となった開発体制として産業競争力を高めつつある。独立系ファウンドリも多く生産技術に優れる
	産業技術力	◎	↗	ファウンドリの普及を背景に、既存の工業国が歩んだステップを飛び越えて競争力を高める可能性は否定できない。

全体コメント：レーザドップラ式速度計の製造は、米国・欧州・日本により占められ、近年の傾向としては周波数のダイナミックレンジの拡大が図られつつある。サイズモ式加速度計のうち、地震や地質探査・資源探査で使われるメカニカル式は米国製品のシェアが高い一方、高周波・大加速度型の圧電式では、米国・欧州・日本が多くを製造している。90 年代以降は MEMS 技術を用いた加速度計が製品化され、この分野では米国が先行、日本が追随していたが、近年台湾、韓国の台頭が著しい。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.5 前処理技術分野

2.5.1 概観

計測・分析試料の形態や大きさが多岐にわたっており、試料調製に対する作業の効率化および分析感度・精度の向上には分析目的に適した前処理技術の開発が欠かせない。また、分析機器の感度・精度が進化している昨今、前処理技術が計測・分析の感度・精度を左右するといっても過言ではない。しかしながら、トリミング、研磨、濃縮、試薬ラベリング等の高度な技術は、各国・各機関においてノウハウに属する内容が極めて多い。よって、今回、前処理技術分野の国際技術力比較を行うにあたって、昨今の技術進化のスピードが著しく速いナノテクノロジー・材料開発研究における前処理技術に特化して、当該分野を3つの中綱目に分類した。すなわち、(1) 薄膜化 (TEM [透過電顕] 用観察試料)、(2) 深さ方向分析用試料前処理 (表面分析)、(3) 抽出・濃縮 (無機微量元素分析) である。

我が国が得意とする TEM による極微小領域の観察・分析を支えるため、TEM 薄膜加工という用途に特化した装置開発技術が欧米企業と競合している状況ではあるが、セイコーインスツルメンツと Zeiss 社などのように、協同で装置開発することもある。また、表面分析における深さ方向試料前処理技術分野における、バックサイド分析 (SIMS、XPS、ラマン) のための前処理技術は、研究開発の現場の要求から開発されたものであり、我が国は世界トップレベルである。又、有機 EL のような有機物多層膜試料の精密斜め切削技術のレベルも高い。これらの技術開発は、我が国の分析受託機関 (東レリサーチセンター [TRC]、材料科学技術振興財団 [MST] 等) が牽引している。今後の課題は、前処理に自動化を取り入れるなど、コスト削減と歩留まり向上におけた取組が必要である。

米国については、TEM の前処理としてではなく、ナノファブリケーションツール (超微細化工→光学アパチャーその他に) としての用途応用する動きが高まってきている。ただし、研究水準としては、欧州に後れを取る。表面加工処理技術については、分析機関における生産性が向上していると考えられる。

欧州については、全体的に技術開発水準が高く、電子顕微鏡前処理技術分野に於いては、オランダの FEI 社、独の Zeiss 社など、FIB (集束イオンビーム) 装置メーカーが先進的な技術開発を行っている。また、これら FIB 装置をプラットフォームとしたアプリケーション (付属装置やソフトウェア) を供給するサードパーティも比較的充実している。

韓国については、優れた研究者は海外 (欧米) へ出るケースが多く、全体的な傾向は欧米に追随、あるいは似通ったものとなる。

中国については、特に薄膜加工技術の導入が遅れている印象がある。

2.5.2 中綱目ごとの比較

(1) 薄膜化 (TEM 用観察試料)

TEM (透過電顕) 観察や分析用の薄膜加工には、対象材料によって様々な方法がある。生物試料や高分子材料に対してはダイヤモンド等の専用ナイフで物理的に切削する超薄切片法 (Ultramicrotomy) が知られるが、これら加工を実施する装置はドイツ Leica 社が独占的に開発・販売しているために省略した。その他、一部金属材料を対象とする電解研磨法についても対象が限られているために割愛し、主要な工業材料に対して適用範囲が非常に広いイオン研磨法についての記述とした。

イオン研磨による薄膜加工にはそれに先立つバルク状態からの切削及び機械研磨工程が必要であり、厚さ 100 μ m 程度までの薄膜加工の後に従来数 keV に加速された Ar イオンを照射して約 100nm 程度まで追加薄膜化を実施して TEM での検鏡となる。これら TEM 用機械研磨装置や Ar イオンエッチング装置については、国内 (日立製作所や日本電子) での開発・販売も行われていたが、米国 Gatan 社が開発した装置群が圧倒的なシェアを誇ってきた (一部欧州発の装置もあるが普及していない)。この Ar イオンエッチングによる TEM 薄膜化工程については、上述の超薄切片法と同様に、イオン研磨までの前処理やイオン研磨条件にノウハウが多く、TEM 技術が一般化し得ない大きな理由の一つであったが、日本国内での試料作製技術は欧米に勝り、高分解能 TEM 観察において、世界をリードする存在といえる時代が 1990 年頃まで続いていたと言える。また、当時の中国・韓国における当該技術は極めて遅れていた。

Ar イオンエッチング法の属人的なイメージを払拭する装置として 1989 年に発表 (米国 IBM 社) されたのが、30keV 程度に加速させた Ga イオンの収束イオンビーム (FIB) 装置を用いた特定領域の薄膜化技術である。FIB を用いれば、「誰にでも失敗無く TEM 薄膜加工ができる」という触れ込みで、半導体デバイス評価や、受託研究会社などに普及した。装置については、米国 Micrion 社 (現在はオランダ FEI 社が買収) が発売していたマスクのリペア装置を転用する形で普及したが、セイコー電子が追従し、その後日立製作所が TEM や SEM 前処理に特化した操作性に優れた装置を発売し、Ar イオンエッチング装置を凌駕して普及する形となった。

特に日本の技術としては、バルクからの切り出しが不要となるマイクロサンプリング法が発表され (日立製作所)、特定部位サンプリングの歩止まり (精度) を向上させたほか、TEM 装置との共用ホルダーを開発して、従来の加工時間を大幅に短縮させる事に成功した。一方、FEI 社 (オランダ) では FIB 装置に電子銃を搭載して加工面の SEM 観察が可能となるデュアルビーム装置を製

品化し（2000 年頃）、加工部位確認精度向上で欧米市場のシェアを大きく広げた。日本のセイコー電子（現セイコーインスツルメンツ：SII）でも数年後にデュアルビーム装置を発表し、近年ではドイツ Zeiss 社（SEM / FIB デュアルビーム装置を発売していた）と協同で高性能 SEM（Zeiss の技術）＋高性能 FIB（SII；Ar イオンビームも併用可能）を組み合わせた、現状での最高水準の装置を発表している（2006 年）。

FIB による TEM 薄膜加工については、加工時のダメージを如何に低減させるかが最近の技術トレンドであり、上記の 3 ビーム（電子、Ga イオン、Ar イオン）や Ga イオンビームの低加速化の技術開発が進んでいる、特に欧米では、Ga イオンビームの先鋭化や、TEM 前処理ではなく、ナノファブリケーションへの応用技術が進展している。当該分野は日本も遅れているのが現状である。また、FIB 手法に関しての中国・韓国における展開については、装置導入が活発化してきているが、自国での開発については大きく遅れているといえる。

（2）深さ方向分析用試料前処理（表面分析）

近年の半導体デバイスはさらに構造の微細化、多層膜化、薄膜化が進展しつつあるが、これらを構成する基本となる膜の組成・構造の解析や、深さ方向の不純物拡散評価には、依然として SIMS、XPS、AES、RBS などの物理解析装置が有力な手法として多用される。しかしながら、構造の極浅化・薄膜化に伴い、これらの手法に対する深さ方向分解能向上の要求は極めて高く、従来のスパッタリング条件で得られるプロファイルはノックオンによる影響でその要求は満たせない。そのため、試料を裏面から薄膜化して注目元素の低濃度側からプロファイルを測定したり、界面付近の構造を調べる、いわゆるバックサイド分析がこれを補間する技術として最近急速に普及してきたが、これらの前処理技術開発では日本の分析機関（東レリサーチ、MST、住化分析センター）や^{83,84} 半導体メーカーの分析部門（東芝、NEC など）⁸⁵ が主導的地位にある。平坦でかつ表面に平行な研磨面を大面積で得ることが重要なポイントであり、これにより SIMS の高感度化に加え、XPS、RBS、ラマン分光などの適用も可能になりつつある⁸⁶。また、50 μm 以下のパターン領域でのバックサイド SIMS 分析も可能になっている。今後、さらに多様化する膜組成・構造への対応や、スループット向上が大きな課題であると考えられる。我が国以外では、シンガポール⁸⁷ や米国でも大学⁸⁸ や民間（EAG など）⁸⁹ の分析機関からバツ

83 T. Miyamoto et al., Hyoumenkagaku 28 (2007) 249

84 <http://www.mst.or.jp/010304.html>

85 C. Hongo et al., J. Vac. Sci. Technol. B 21 (2003) 1422

86 T. Yamamoto, et al., Extended abstract of IWDTF (2006) 113

87 K. L. Yeo et al., J. Appl. Phys. 96 (2004) 3692

88 F. A. Stevie et al., Appl. Surf. Sci. 252 (2006) 7179

89 http://www.eaglabs.com/techniques/analytical_techniques/sims.php

クサイド SIMS に関して同様の試みは報告されているものの、技術レベルとしては日本のそれを追従する域と考えられる。一方、デバイスの構造や組成、不純物の拡散を原子レベルで調べることを究極の目的とした 3 次元アトムプローブ (3D-AP) の装置開発は欧米を中心に急速に進展しており^{90,91}、その試料作成のための FIB 加工は、日本のユーザー (ルネサスによる MRAM 磁性薄膜評価、東芝による NiSi など) も精力的に技術開発を進めている。

イオンスパッタリングをベースとした深さ方向分析の適用が困難な材料として、レジストなどのポリマー、Low- κ 膜、有機半導体などに代表されるハイブリッド材料の多層膜や、バイオマテリアルなどが考えられる。近年のクラスターイオンビーム (C_{60}^{+} ⁹²、 Ar_n^{+} ⁹³、 $[(H_2O)_{90000} + 100H]^{100+}$ ⁹⁴ など) の応用により有機物のダメージが軽減され、その深さ方向分析の成功例が数多く報告されているが、ダメージの程度はイオン種のエネルギーや入射角、あるいは材料の種類にも大きく依存し、汎用的に活用できるレベルには至っていない。試料を斜め研磨加工した領域をマイクロプローブにより線分析あるいは面分析し、深さ方向の分布を得る考え方は古くからあるが、上記試料に対してはダイヤモンドナイフで精密に斜め切削し、その切削面を TOF-SIMS、FTIR、ラマン等で評価する技術を、日本ではやはり民間の分析機関が開発し分析メニューとして日常的に提供している⁹⁵。英国においても、超低角度のマイクロトーム切削により類似の試料を作成し、ポリマー多層膜やポリマー/金属の接着の問題など工業材料の評価に用いている⁹⁶。Si 半導体に関してもこの斜め研磨法のスキルは、拡がり抵抗測定によるキャリア濃度の深さ方向評価にルーチン的に適用されており、最近では極浅接合の評価のため非常に浅い角度で研磨する技術開発が積極的に行なわれている。クラスターイオンビームの応用の一つとして、生体試料 (組織、細胞) の TOF-SIMS イメージングにおいては C_{60}^{+} イオンスパッタを用いることで、試料を基板へ固定化した際に生じた表面汚染を効果的に除去でき、注目している分子イオンをダメージの影響なく観察する方法を欧米や韓国の研究機関が提案している^{97,98}。

(3) 抽出・濃縮 (無機微量元素分析)

無機微量元素分析における抽出・濃縮操作には、微量の着目成分を抽出・濃

90 A. Vella et al., Phys. Rev. B. 165416 (2006) 73

91 K. Thompson et al., Science 317 (2007) 1370

92 S. C. C. Wong et al., Appl. Surf. Sci. 203-204 (2003) 219

93 S. Ninomiya et al., Nucl. Instr. And Meth. B 256 (2007) 493

94 K. Hiraoka et al., J. Mass Spectrom. 41 (2006) 894

95 N. Nagai et al., Surf. Interface Anal. 34 (2002) 545

96 S. J. Hinder et al., Surf. Interface Anal. 36 (2004) 1575

97 D. W. Moon et al., presented at SIMS XIV (2007)

98 N. Winograd et al., presented at SIMS XIV (2007)

縮する操作と、測定時、着目成分に干渉する成分（共存成分）を除去するための操作がある。また、とくに抽出については、シリコンウェハなどの特定形状をもつ試料の特定部位（指定の部位あるいは指定の膜）から、着目元素を取り出すという意味の抽出操作がある。抽出・濃縮操作の場合、一般的には有機溶媒を用いる抽出、陽イオンあるいは陰イオン交換樹脂を用いる分離、キレート樹脂を用いる分離および水酸化鉄や水酸化ランタンなどを用いる共沈分離が行われる。

化学的な抽出・濃縮操作では、全ての着目元素に万能な方法は無く、抽出液の液性や着目元素ならびに共存元素の種類・性質ならびに濃度に応じて、各種方法を使い分けねばならない。よって、操作はかなりややこしいであって、大学・公的研究機関ではともかく、生産現場ではそのもの、あるいは類似の工程でバリデートされた方法が無ければフォローは難しい。これらの抽出・濃縮操作は、一般的な有機溶媒抽出やイオン交換分離共に、欧米を中心に進歩してきたことは云うまでもない。しかし、ここで考えている先端計測・無機微量元素分析と云う点からすると、対象は電子材料、ナノテク材料が中心となり、他の SIMS、ESCA あるいは AES といった物理的分析装置の併用も考慮すれば適用範囲もやや限られたものとなって、我が国の技術レベルの高さが浮き出ることになる。

シリコンウェハの上には、機能発現のために各種の金属膜や有機膜が製膜される。金属膜の場合、いったん酸で溶解した後、目的元素を ICP 質量分析法などで高感度に測定するために、イオン交換分離などによって主成分元素を除去することが行われる。一方、有機膜の場合、清浄な電気炉（プラズマアッシャー含む）などを用いて大気中で灰化し、表面に残った酸化膜をふっ化水素酸などで溶解して、目的元素を分解液中に濃縮させる。さらに、特定部位から着目元素を取り出すという意味の抽出操作では、人力によるバッチ処理のみならず、自動化を進めたオートマチック処理（ウェハ自動前処理装置使用処理）もある。シリコンウェハについては、ベベル部を含めて、かなり自由に特定部位から汚染元素を抽出することが可能である。

半導体のウェハ製造に限れば、我が国のシェアは 65 ～ 70% に到達している。しかし、実際の DRAM 製造などでは米国、台湾や韓国を必ずしも抑えているとは言い難い部分もある。これは、我が国の開発技術力は高いが、各工程で最新の技術を導入する結果、高いスペックが求められ、コストに反映されてしまうからであると云われる。実際に我が国の各要素技術及びその開発力は高いが、コスト競争力に優れた生産技術という点では弱い。このことは分析における前処理技術においても示されている。つまり、我が国では工程管理をきっちり行おうとする場合、精度・確度共に高く定量下限のよくなる化学的操作（抽出・濃縮前処理）を行うが、欧米やアジアの他国ではそのようなところに労力（高

いコスト) はかけず、SIMS などの物理的測定法で直接測定することに力点を置いている。更には、歩留まりがその必要性を支配している。我が国ではウェハベベル部分分析などに広く用いられているウェハ自動前処理装置も、欧米やアジアの他国ではあまり使われていないというのが現実である。

2.5.3 比較表

◆前処理技術分野

●薄膜化

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	△	→	装置開発という観点では FEI 社（オランダ）にやや遅れているが、日立は装置内でのピックアップ技術特許（マイクロサンプリング）を抑えている。電子ビームで近年トレンドの集束電磁レンズ補正機構を FIB に応用する研究などが少ないながら存在する。
	技術開発水準	○	↗	欧州（オランダ）FEI 社の後追いだが、SEM/FIB デュアルビーム装置が国内 3 社（日立、セイコー、日本電子）から発売された。セイコーは Zeiss 社と連携して高性能 SEM を具備した 3 ビーム装置も開発している。
	産業技術力	○	→	日本での FIB の活用は殆どが TEM 前処理に特化したものである。半導体デバイスのみならず有機 / 無機複合材料へのアプリケーション技術も広がっている。また、Ar イオンビームを用いた断面加工、薄膜加工については、作業性の良い装置が最近開発・広く普及している（日本電子）。
米国	研究水準	△	→	従来 FEI 社（オランダ）における FIB 開発の拠点は米国（FEI の前身のマイクリオン社）であったが、TEM 前処理装置としての開発拠点はオランダに移っている。ただし、FIB のナノプローブ化などの研究は行われている。
	技術開発水準	○	→	TEM の前処理としてではなく、ナノファブリケーションツールとしての FIB 加工技術水準は高いと考えられる。なお、従来からの Ar イオンビームを用いた加工装置については、Gatan 社の独壇場で装置開発が行われてきた。
	産業技術力	◎	↗	FIB を単なるマスクのリペア装置や、SEM/TEM 用前処理用途に用いるのではなく、ナノファブリケーション用途（超微細化工→光学アパチャーその他に）応用する動きが非常に高まってきている。
欧州	研究水準	○	↗	イオンビーム研究開発の母体としては米国が勝るが、装置開発まで含めた研究では、欧州（特にオランダ、ドイツ）が進んでいると考えられる。
	技術開発水準	◎	↗	オランダの FEI 社、独の Zeiss 社など、FIB 装置メーカーが先進的な技術開発を行っている。また、これら FIB 装置をプラットフォームとしたアプリケーション（付属装置やソフトウェア）を供給する 3rd パーティも比較的充実している。
	産業技術力	○	→	米国と同様に、FIB の多目的用途展開が進められている。ナノファブのみならず、冷却加工や同一チャンバー内での低真空 SEM 観察など、パイオ関連試料への展開も進んでいる。
中国	研究水準	×	↘	イオンビームによる研究水準は低いと見做される。
	技術開発水準	×	↘	市販の装置を活用し始めたレベルであり、技術開発レベルは低い。
	産業技術力	△	→	TEM の前処理として利用している機関も一部の大学・企業であり、装置保守も含めて産業界に利用しているレベルとはいえない状況である。ただし、FIB メーカー（FEI 社など）は、上海などにラボを設置して拡売の動きを見せている。
韓国	研究水準	×	↘	イオンビームによる研究水準は低いと見做される。
	技術開発水準	△	↘	FIB 活用については大手デバイスメーカーなどの生産ラインに入っているが、新規加工技術開発やナノファブ利用には至っていないと考えられる。ただし、多くの留学生が欧米に赴いて技術習得を図っている。
	産業技術力	△	→	TEM の前処理に限ってみると、従来の Ar イオンビームによる加工が依然主流であり、FIB の普及は一部の半導体デバイスメーカーに限定されているようである。
全体コメント：FIB に関しては、イオンビーム技術開発レベルの高い欧米の装置群に、TEM 薄膜加工という用途に特化した日本の装置開発技術が競合している状況であり、時に協同で装置開発を行ったりしている（セイコーインスツルメンツと Zeiss 社など）。一方、韓国や特に中国は技術導入が遅れている印象であるが、今後は前処理装置として普及が広がるものと思われる。				

（註 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（註 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●深さ方向

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	クラスターイオンビームの表面分析への応用研究が近年盛ん。SIMS による有機物の高感度検出や深さ分解能の向上が目的であるが、表面平坦化や汚染除去の前処理としても期待されている。
	技術開発水準	◎	↗	バックサイド分析 (SIMS、XPS、ラマン) のための前処理技術は世界トップレベル。有機物多層膜試料の斜め切削技術も進展。これらの技術開発は分析会社 (TRC、MST、SCAS など) が牽引。3DAP の試料の FIB 加工はユーザーも精力的。
	産業技術力	◎	↗	分析機関を生産現場と考えれば、前処理のスループットは徐々に向上。バックサイド分析や斜め切削がさらに普及するには、歩留まり向上とコスト削減が必要。
米国	研究水準	○	→	テキサス大学でバックサイド SIMS の報告事例あり。前処理ではないが、クラスターイオンビームによるソフトマテリアルの深さ方向分析への応用研究は盛ん。C60 ⁺ エッチングはバイオ試料の SIMS 観察前の表面汚染除去の目的に応用している。
	技術開発水準	◎	↗	Si のウルトラシャロー接合評価のための SR 研磨技術は、質・スループット共に高い。バックサイド SIMS の技術 (EAG、IBM、ADTF) は発展途上。3DAP の試料作成のための FIB 加工が進展。
	産業技術力	○	↗	日本と同じく、分析機関における前処理の生産性は向上していると考えられる。
欧州	研究水準	○	→	米国と同じく、分析装置の研究開発レベルは非常に高いが、前処理に特化した技術応用は少ない。3DAP に必要な試料加工は進展。
	技術開発水準	○	→	バックサイド分析に関する報告事例はない。有機物の斜め切削を超低角度ミクロトームで実施した報告例 (英国、Surrey 大学) がある。
	産業技術力	○	→	不明。
中国	研究水準	△	↗	SIMS では市販装置の使用が基本で、欧米や日本の技術に追従しようとしている。浅い領域のプロファイルを得るためにキャップ層を堆積させる前処理を試みている (シンガポールの研究機関と共同)。
	技術開発水準	△	→	不明。
	産業技術力	△	→	不明。
韓国	研究水準	○	→	研究機関としては KRISS などがあるが、バックサイド分析の報告事例はない。C60 ⁺ については、米国同様、バイオ試料観察の表面汚染除去に利用することを提案している。
	技術開発水準	○	↗	SAMSUNG 等 SIMS を保有している研究機関ではバックサイド分析の試料前処理について技術開発を進めていると思われるが、報告例はなく、オリジナルなものはない。
	産業技術力	△	→	バックサイド分析用試料の作成に関しては、自動化など効率化が進まない限り普及はしない。

全体コメント；バックサイド分析、斜め切削などは研究開発現場の強い要求から、分析機関や民間会社の分析部門が技術開発を行い普及したものであり、大学や国の研究機関からは産まれにくい。一方で生産現場では、前処理に自動化を取り入れるなど、歩留まり向上とコスト削減がない限り普及しないと考えられる。

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

●抽出・濃縮（無機微量元素分析）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↘	大学の分析研究室ではコンベンショナルな方法について研究することが少なく、対象となる分析試料も最先端のものは入手出来ない。個別機器分析手法の性能 up に走りがち。
	技術開発水準	○	→	分離・濃縮技術の基本力量が低いため、手法名は知っていても材料に応用できるまでなかなか到達出来ない。CE など、特定の機能で特殊な濃縮前処理を進歩させた例はある。
	産業技術力	◎	↘	生産現場ではコスト重視から、自動化を可能とする機器・装置の導入を図っている。よって、一定パターンの分析は in line で可能としているが、応用が利かない。
米国	研究水準	○	↗	大学での研究水準が特別高いわけではないが、基本を重視して教育を進めていることから、分離や濃縮技術の単独機能について新しいアイデアが生まれている。
	技術開発水準	△	→	もの作り企業の研究チームは、化学的前処理といった面倒なプロセスを組み込むことを好まない傾向にある。物理的測定法を多用している。
	産業技術力	○	→	歩留まりに影響がないかぎり、分析そのものも多用しない傾向にある。代表的には NIST などの標準試料を販売している機関・企業でない限り、やっかいな分析には踏み込まない。
欧州	研究水準	○	↘	もともと強い鉄鋼や環境分析などでは、各種抽出・濃縮を展開する場合もあるが、先端計測技術開発と云う意味からは、大学でも物理的測定手法を多用する傾向にある。
	技術開発水準	○	→	企業の研究チームで用いている装置は Phillips などの超大手でなければ、最新型のは少ない。小型の装置は島津など日本製が多く、前処理も突出していることはない。
	産業技術力	○	→	生産現場の品質保証部的なところでは公定法が主流であり、新規に抽出・濃縮手法を検討して自社製品に適用することは少ない。
中国	研究水準	○	→	大学では基本を重視する姿勢が強く、化学的前処理というよりも、要素技術としてのイオン交換や溶媒抽出ならびに共沈といった技術習得は熱心である。
	技術開発水準	△	↗	上海などでは半導体工場が続々と建設されているが、製造するデバイスは最先端ではない。しかも歩留まりが分析の必要性を支配しているため、その場対応が多い。今後は注目。
	産業技術力	△	→	工場の生産工程では、中国版 RoHS 規制がようやく動き出したところである。抽出・濃縮に取り組んではいるが、直接測定で装置限界まで測定しているのが現状である。
韓国	研究水準	○	→	優れた研究者は海外（欧米）へ出るケースが多い。従って、いきおい、全体的な傾向は欧米に似通ったものとなる。
	技術開発水準	○	↗	三星や LG など、大手電子デバイスメーカーでは最新の装置を導入しており、分析技術を高めることには熱心である。しかし、抽出・濃縮ではオリジナル技術は少ない。
	産業技術力	△	→	製造現場で抽出・濃縮する工程は環境問題ではあっても、歩留まり管理ではなかなか採用しない。より直接的かつ視覚的（SEM、TEM など）結果を望む傾向にある。
全体コメント；1990 年代まで、「新材料」と呼んでいた非鉄分野などの急伸長時代にあった分析レベルに到達していない。昨今の工業界全体を支配するのは手間とコストの削減であるが、必要な抽出・濃縮技術であれば、それを最新分析技術と組み合わせて公定法化できる位の力量が今後望まれる。				

(註 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

3 注目すべき研究開発の動向

3.1 NMR

(1) NMR 分析手法研究のトレンド

タンパク質構造解析研究が一段落し、機能解析へと進んでいく研究の流れを受け、膜タンパク等を想定した固体 NMR の手法・機器に関する研究が盛んである。例えば、NMR 計測の先端研究者の集まる実験 NMR 会議⁹⁹では、固体 NMR に関する発表が大半を占めていたとの印象である。

NMR 計測先端研究の動向を見ている限りトレンドは固体 NMR と感じられるが、これは溶液 NMR 分析技術が時代遅れになった、或いはその必要性が低下したことを意味するのではなく、分析技術として十分に確立したと判断すべきと思われる。タンパク質をはじめとする有機物の分析（構造解析や反応解析）のための溶液 NMR 分析技術については、所謂「成熟した」技術として十分に関係分野に浸透し、活躍していると判断される。

溶液、固体を問わず、微量分析を志向した研究も盛んである。環境問題に係わる研究等では、例えば極めて微量の環境ホルモンを分析・同定する必要があるなど、微量分析 NMR の必要性、重要性は大きい。微量分析 NMR は、今後、急速に発展する方向性と感じられる。

生化学や製薬関係分野の進歩につれ、現在は構造解析等の静的な解析が中心となっている NMR に対し、反応過程追跡や代謝機能解析のような動的解析への要望が高まるものと思われる。このためには、尚一層の感度向上が必要になる。

NMR と他の分析手法を組み合わせると同時（或いは同一試料をその場で交互）に計測し複合的なデータを得るような分析手法が現れてくると予想される。この場合、組み合わせる計測としては紫外分光等の分光学的手法が考えられる。

永久磁石による低磁場 NMR を用いた緩和時間の測定からタンパク質構造のダイナミクスを検討し、動的構造の知見を得る試みも活発化している。例えばローザンヌ工科大やバークレー研究所などをはじめとする欧米（特に欧州）の多くの機関で活発な研究が行われている。また、米国生化学・分子生物学会年会¹⁰⁰では、タンパク質の分野で低磁場 NMR – 高磁場 NMR のデータを駆使してダイナミクスを理解しようとする動きが顕著であったとのことである。

(2) 機器市場と開発

NMR 分析装置は、ブルカーバイオスピン社（スイス）、バリアン社（米国）、JEOL 社（日本）が世界の三大メーカーであるが、外国 2 社が水をあけて先

99 Experimental NMR Conference, ENC、2007 年 4 月

100 American Society of Biochemistry and Molecular Biology, ASBMB、2007 年 4 月

行している感がある。

現在の市場シェアは、NMR 装置が浸透した時期に我が国が経済政策上海外製品の導入を優先したことも一因であろう。ただ、海外 2 社は大学等の先端研究者の研究室に社員（研究スタッフ）を常駐させてノウハウを獲得したり、先端研究者の提案する新規開発に部品を提供したりと、機器先端化や次世代機開発に多くの投資を行っていると感じられる。この点は、NMR に限らず、我が国のメーカーの弱いところ（或いは、科学技術基盤振興に関する公的支援が不十分なところ）ではないかと痛感される。

(3) 高感度化

NMR は、分析手法として、元来、感度が低い。（検出すべき信号を発するのは、試料全体でなく、試料の限られた一部であるため。）このため、高感度化（S / N 比を高くすること）への要望は強く、種々の試みがなされている。また、タンパク質－タンパク質間やタンパク質－薬物間の相互作用においては、相互作用している複合体の寿命がその検出に大きく影響を与える。寿命の長い複合体は、明瞭な NMR 信号の変化を与えるが、寿命の短い複合体は、必然的にその濃度は低くなり、感度の向上無しでは検出が不可能である。このためにも、感度向上は、生体分子の NMR 計測において、ますます重要視されている。上述した微量分析や動的解析へのトレンドもあり、今後とも高感度化を目指した試みは連綿と続いていくものと確信される。

歴史的には、磁場を強くすることで高感度化が進められてきた。現在のところ商用機としては 950MHz（プロトン共鳴周波数）機まで報告されている。しかしながら、磁石に使用する超伝導材料の物性的限界から、高磁場化は 1.05GHz あたりが限界と考えられている。（強磁場常伝導マグネットを用いた 1GHz を超える測定例はあるが、実現可能性があるのは世界でも幾つかの強磁場施設に限られ、一般化することは考えにくい）

信号検出側の高効率化により高感度を実現しようという方法が一般的。典型的な例は低温プローブである。信号検出コイルを冷やすことでアンテナとしての性能が向上する。また、途中のアンプを冷却することで熱雑音を低減できる。商品化されている低温プローブは、ブルカーバイオスピン社、バリアン社によるものであり、残念ながら日本製のものはない。

NMR 信号検出アンテナに、一般的に用いられている鞍型コイルに比べて、信号捕捉効率が高いソレノイド型コイルを用いる溶液用 NMR 装置の開発が NIMS、日立製作所、茨城大、愛媛大、鹿児島大のグループにより進められている。（図 9）世界最高感度を目指しており、その実現が期待される。ただし、現状では試作機であり、今後一層の小型化を図る等、開発（改善）を進めていく必要があると感じられる。プローブやコンソールを含めたシステム全体とし

て開発を進めており、低温プローブに関する技術等を JEOL に供与する等して、我が国全体として NMR 計測機器の基盤技術が向上していくような方向に進めば興味深い。

試料そのものが発する NMR 信号量を飛躍的に増大させる手法として Hyper Polarization が注目されている。英国オックスフォード大学で開発された手法であり、核偏極を起こさせることで計測時に励起される核を増大させるもので、100 ～ 10,000 倍の感度向上が可能といわれている。しかしながら、低温・強磁場で試料の前処理を行わねばならないこと、前処理後数分間しか感度向上効果が得られないこと等の制約がある。試料の種類によっては極めて有効な場合もあるが、一般的な手法となりうるかどうかには疑問がある。

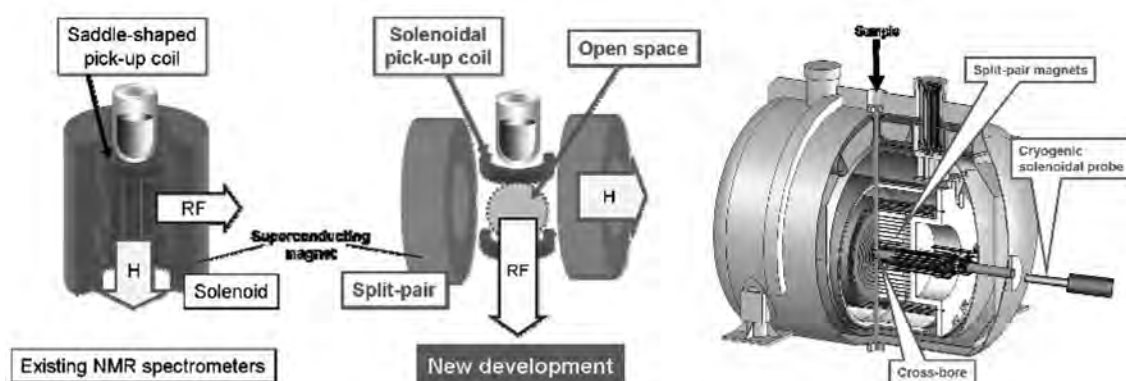


図9 ソレノイド型コイルを用いる溶液用 NMR 装置の開発¹⁰¹

101 H. Kitaguchi, et al, "Development of a New High-Resolution and Sensitivity NMR Spectrometer with Cross-Bore", 48th Experimental NMR Conference (ENC, Session TOB, April 24, 2007.

3.2 質量分析

(1) 質量イメージング

ここ数年欧米を中心として MALDI や SIMS を用いた生体組織片の生体分子の空間分布が測定可能な「質量イメージング」技術開発が活発化しており、日本においても装置開発が行われている。

MALDI では、パルスレーザー（紫外、赤外）試料表面に集光し、発生する生体分子イオンを TOF-MS（飛行時間型質量分析計）で測定する方式が一般的である。通常、空間分解能は $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度、発生するイオンの質量数は数十万 Da に達する。 $10 \mu\text{m}$ 以下の空間分解能を目指した研究も行われている。

SIMS では、パルスイオン（Ga、In、Au など）を試料表面に収束し、発生する生体分子イオンを TOF-MS（飛行時間型質量分析計）で測定する方式が一般的である。 $1 \mu\text{m}$ 以下の空間分解能が達成されている。発生するイオンの質量数は 1,000Da 程度であり、低分子の測定に向いている。

質量イメージングの測定対象は組織切片中のタンパク質、脂質、代謝物質であるが、最近は創薬への応用が増加しており、薬物（低分子化合物）の動態解析への応用が活発である。

(2) 大気圧イオン化技術

最近大気中で前処理なしで、試料表面から直接イオン化できる新しいイオン化技術が欧米で相次いで開発された。

大気中の試料表面に He の準安定原子を照射し、試料の直接イオン化が可能な DART が開発された。本法は既に実用化されており、荷物や指先の薬物痕跡検出に応用されている。

大気中の試料表面に ESI スプレーを噴霧し、試料表面の分子を溶媒スプレー中に溶け込ませて、イオン化を行う DESI が開発された。本法は薬物検出や生体分子の検出などに適用されている。

さらに、大気中でレーザーにより試料表面から中性分子の脱離を行い、続いて ESI スプレーによりイオン化を行う ELDI 法が開発された。本法は生体表面の質量イメージに適した方法であり、今後の発展が期待できる。

(3) 前分離技術

イオンモビリティ分析計（IMS）の研究が米国を中心に活発化している。質量分析計の前段に IMS や DMS、FAIMS を結合して、移動度でイオンを分離した上で質量分析を行う。従来のクロマトグラフィーによる分離よりもはるかに高速に（数 ms オーダー）イオンを分離できることが最大の特徴である。

(4) 質量分析機器

質量イメージの瞬時計測を目的として、結像機能を有する TOF-MS の開発が進められている。本法によれば、試料の広域をパルスレーザーやパルスイオンで照射し、発生したイオンを所定の飛行時間後、2次元検出器に結像させることが可能である。日欧で開発が進められている。

TOF-MS の質量分解能を向上させるため、多重反射や多重周回により飛行時間を伸長する技術開発が活発に行われている。通常の TOF-MS の分解能は 10,000 程度であるが、本法により 100,000 ～数 100,000 に向上させることができる。日米欧とも開発が行われている。下図は多重反射方式 TOF の例である。(図 10)

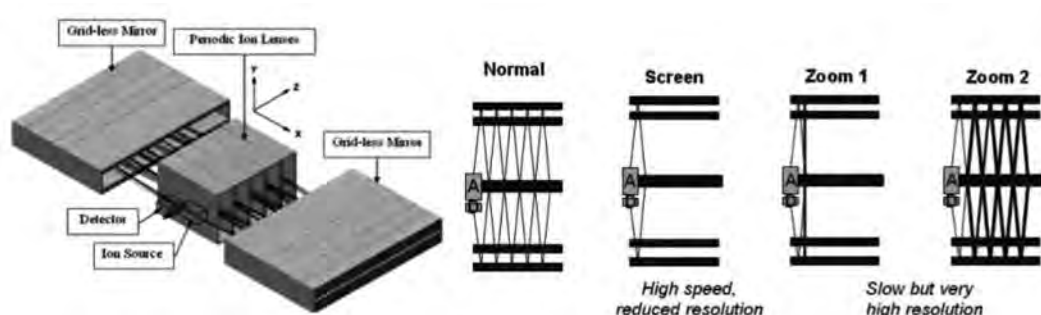


図 10 High resolution multireflecting time-of-flight mass spectrometer with electrospray ion source¹⁰²

102 Viatcheslav Artaev, LECO Corporation, St Joseph, MI, 55th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics June 3-7, 2007 TOF am 09:15

3.3 HPLC

(1) 分子インプリント固相抽出

生体由来の試料や環境試料など、複雑なマトリックス中の微量物質の分析のために、液体抽出、液-液抽出、ヘッドスペース抽出、固相抽出などに比較して、選択的に分析対象物質を抽出、濃縮し、マトリックスによる妨害を減らすために、分子インプリント法により調製された吸着剤を用いて、試料の前処理を行う技術が盛んに研究されている。¹⁰³

(2) 微粒子充填カラム

超高压 HPLC の開発により、2 μ m 以下の微粒子充填カラムが、従来のカラムより 10 倍近い分析の高速化を可能とすることが示され、いくつかのメーカーが同等の性能のカラムを発表しつつある。多様な分析対象に対応できるカラムの種類、絶対的な理論段数、カラムの寿命などに改良点が残されている。また、一層の高速化が、更なる微粒子化により可能か、開発の方向が注目される。¹⁰⁴

(3) モノリス型カラム

粒子充填カラムに代わる一体型カラムとして、透過率、安定性に優れ、粒子充填型カラムより低い圧力で同等以上の性能を示すことができる。キャピラリーカラムの調製が容易で、有機ポリマーモノリスカラムは、ペプチド分析などに適している。シリカモノリスカラムは、短い高速カラムとして使用され始めている。また、長いモノリスシリカキャピラリーカラムは 10 万段以上の超高理論段数を発生して、精密分離の手段となる可能性がある。¹⁰⁵

(4) 親水性相互作用 HPLC (HILIC)

親水性基修飾シリカ固定相とアセトニトリル-水移動相を用いて行う分離モード。汎用の逆相 HPLC で保持と分離が困難な多くの生体関連親水性化合物の分離に適することが理解され、高性能カラムの開発が進みつつある。¹⁰⁶

103 V. Pichon, J. Chromatogr. A, 1152, 41-53 (2007).

104 H. Liu, et al., J. Chromatogr. A, 1147, 30-36 (2007).

105 G. Guiochon, J. Chromatogr. A, 1168, 101-168 (2007).

106 P. Hemstrom, K. Irgum, J. Sep. Sci., 29, 1784-1821 (2006).

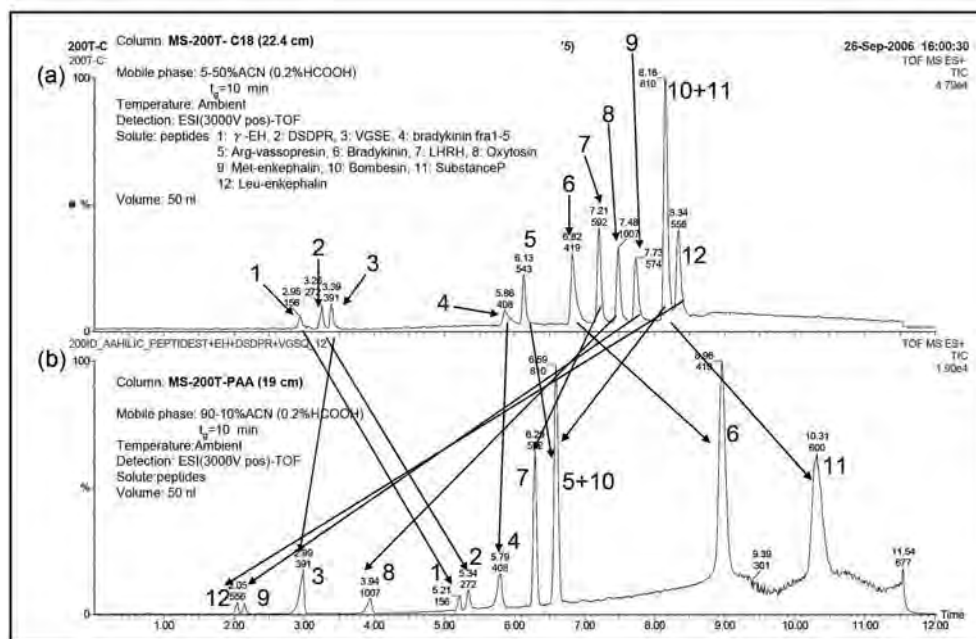


図 11 逆相 HPLC 用モノリス型シリカキャピラリー

ー C18 カラム (a, 0.2mmID, 22.4cm) と HILIC 用ポリアクリル酸修飾モノリス型シリカキャピラリーカラム (b, 0.2mmID, 19cm) によるペプチド分離比較。(試料 1: γ -EH, 2: DSDPR, 3: VGSE, 4: bradykinin fra1-5, 5: Arg-vassopresin, 6: Bradykinin, 7: LHRH, 8: Oxytosin, 9: Met-enkephalin, 10: Bombesin, 11: SubstanceP, 12: Leu-enkephalin. 移動相 (a) 5-50% acetonitrile (0.2% HCOOH) /10min, (b) 90-10% acetonitrile (0.2% HCOOH) /10min.)¹⁰⁷

(5) 高温 HPLC

100℃以上の高温で HPLC を行うことにより、溶質の拡散を加速し、カラム圧力を下げて、分離能力を非常に高くできる。とくに微粒子充填カラムの性能を極限まで発現させるのに有効である。¹⁰⁸

(6) 二次元 HPLC

1 回の HPLC 分離の後、溶出液を（細かく）分画して次々と第二次元目の HPLC に注入し、未分離の成分を分離することにより、非常に高い分離能力（ピークキャパシティ）を発生させる多段階分離法。プロテオーム解析において、この簡易型が多用されている。コンプリヘンシブ(完全型)二次元 HPLC は、現存するカラムにより数千以上のピークキャパシティを発生できることが示されている。第二次元目に使用される高速カラムの開発が急務である。¹⁰⁸

107 K. Horie, J. Chromatogr. A, 1164, 198-205 (2007).

108 D. R. Stoll, et al., J. Chromatogr. A, 1168, 3-43 (2007).

(7) LC-MS インターフェース

MS 分析のための LC 溶出成分のエレクトロスプレーイオン化において、分離能力とイオン化効率を高めるエミッターが開発されている。単なるエミッターに代わり、分離カラムを直接エミッターとして使用することにより、空隙体積によるバンド広がりを抑えて高性能を保つことが示されている。¹⁰⁹ また、電子イオン化法が、HPLC と MS を直接結合するインターフェースとともに新しいイオン化法として提案され、分子量 1,000 以下の領域で非常に高感度をもたらすことが報告されている。¹¹⁰

(8) ナノ HPLC 送液ポンプ

1nL / 分程度の微流量まで高精度、安定に送液でき、高速グラジエント操作が可能な送液ポンプの開発が、高理論段数分離 HPLC- 高分解能 MS の実現のために必要である。現在のポンプは、流量範囲、グラジエント速度等において不十分である。

109 Q. Luo, et al., Anal. Chem., 79, 540-545, 2007.

110 A. Cappiello, et al., Anal. Chem., 79, 5364-5372 (2007).

3.4 物理センサ

1. はじめに

センサとは、さまざまな種類の物理量や化学量を信号処理可能な量に変換するデバイスであり、一般的には、物理量を検知する物理センサ、化学量を検知する化学センサとに大別される。しかしながら、化学センサも最終的に信号として得る情報が物理量であるため、必ずしも、この分類は当を得たものとは言えない。例えば、水素を検知するのに、燃焼により上昇する温度を検知する手法があるが、これは、物理センサである温度センサを化学種検知に利用したものであるが、通常、化学センサに分類される。センサ群の中で、温度・圧力・電磁波・音波・磁場等をセンシングするほとんどのデバイスが物理センサとして分類されている。むしろ、これら物理センサのうち、化学種の検知に特化したものを化学センサと呼称し、DNA や抗原、蛋白・細菌等の検知を目的とした場合、バイオセンサと呼んでいる、とした方が実情に近い。

2. 欧米におけるセンサ開発状況

以上のように、物理センサは多岐にわたっており、この研究動向を一概に総括することは難しい。そこで、本稿では、特に欧米で盛んになっているセンサ、とりわけ欧米での安全・安心に関わるセンサを中心とした研究・開発状況を述べ、次の化学センサの項では、近年順に進歩が著しい SPR センサについて述べたい。もちろん、ここでの研究開発状況は化学センサとして分類されるべきものも含まれているが、上記の理由により、それらを区別することはしない。

米国のセンサ研究は、2001 年の同時多発テロ事件以降活発になってきており、とりわけ国防総省 (DoD) 高等研究計画局 (DARPA)¹¹¹ による国家プロジェクトを中心に進められている。この研究状況を表 1 に示した。特に特徴的な点は、テラヘルツ光ならびに深紫外光関連の技術開発に集中していることであり、両者とも、今までセンサのコア技術としてあまり利用されてこなかった物理現象を対象としている。また、別の見方をすれば、最先端シリコン集積回路技術と伝統的・歴史的な化学・物理センサ技術との融合によって、新たなイノベーションを生み出すことを意図していると見ることができる。テラヘルツでは、企業の参加も活発であり、例えば、Picometrix 社はスペースシャトルの外壁タイルの内部欠陥診断にテラヘルツ光の適用を狙った開発が行われている。また、ボーイング社やロッキードマーチン社といった航空会社も、テラヘルツ光を用いたセキュリティ技術の開発を積極的に行っている。

波長 280nm 以下の深紫外線領域の電磁波を利用した技術開発も盛んであ

111 DARPA ホームページ, <http://www.darpa.mil/>

り、深紫外領域で特徴的に現れる生物剤および化学剤の蛍光スペクトルパターンやその強度を利用したコンパクト・迅速・高感度モバイル型センサ開発もなされている。¹¹²

かような状況は、ヨーロッパにおいても同様である。仏国では、CEA を通じて原子力関連の施策がなされている。¹¹³ テラヘルツ関連では、欧州プロジェクトの NANO-TERA¹¹⁴ および WANTED¹¹⁵ に参加する中で進められている。英国では、英国貿易産業省 (DTI)¹¹⁶ のエレクトロニク&フォトリニク分野プロジェクトとして行われている。「センサ&センサーシステム」¹¹⁷ プロジェクトが主要な研究プロジェクトであるが、米国とは異なりセンシング手法・原理・材料に関わる基盤的な研究を進めている点に特徴がある。かような傾向は、独国等他の欧州の他の国にも見られる特徴である。

3. 我が国のセンサ技術動向

我が国におけるセンサ技術動向を表 2 にまとめた。現段階では、コア技術に関する基盤的研究段階にあり、この点では欧米に比して、プロジェクト等の施策・それに対する予算的処置において立ち遅れていると言わざるを得ない。

112 SUVOS プログラム (Semiconductor Ultraviolet Optical Sources), DUVAP プログラム, Deep Ultraviolet Avalanche Photodetectors

113 CEA ホームページ, <http://www.cea.fr/gb/>

114 Ballistic Nanodevices For Terahertz Data Processing

115 Wireless Area Networking of Terahertz Emitters and Detectors

116 DTI ホームページ, <http://www.dit.gov.uk/>

117 Sensor and Sensor Systems for Industrial and Environmental Applications

表 1 米国のセンサ関連研究の動向

	センシング対象	コア技術	研究機関（プロジェクト含）
1	危険物・爆発物・自爆テロリスト	テラヘルツ分光・イメージング（センシング）	DARPA (SWIFT プログラム、Submillimeter Wave Imaging Focal-plane-array Technology)、DARPA (TIFT プログラム、Terahertz Imaging Focal-plane-array Technology)、DARPA (TFAST プログラム、Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitter)、NASA、レンセラー工科大、MIT、テキサス大、パデュー大、ミシガン大、セントラルフロリダ大、Picometrix 社、Cherent-DEOS 社、PSI 社
2		テラヘルツ波光源	DARPA (SWIFT プログラム)、DARPA (TIFT プログラム)、フィジックスサイエンス社、ノースロップグラマン社、ロッキードマーチン社、ボーイング社
3	生物剤・化学剤／環境分析システム	テラヘルツ分光・イメージング（センシング）	DARPA (MACS プログラム、Mission Adaptable Chemical Sensor)、NIST、オハイオ州立大、カリフォルニア大ローレンスリバーモア研究所、アイオワ大、ジョンズホプキンス大、ルーセントテクノロジー社、サンディア国立研究所、ノースロップグラマン社、ロッキードマーチン社
4		テラヘルツ波光源	
5		レーザー誘起蛍光分光（Laser Induced Fluorescence Spectroscopy）	DARPA (SSBA プロジェクト、Spectral Sensing of Bio-Aerosols)、NASA / JPL（航空宇宙局ジェット推進研究所）
6		深紫外光源（非線形光学効果）	サンディア国立研究所、企業レベル内研究
7		深紫外光源（半導体）	DARPA (SUVOS プログラム、Semiconductor Ultraviolet Optical Sources)、カリフォルニア大サンタバーバラ校、ジョージア工科大、サウスカロライナ大、テキサス大オースチン校、MIT リンカーン研究所、ノースカロライナ州立大、エール大、ノースウェスタン大、カンザス州立大、イリノイ大アーバナキャンペン校、南カリフォルニア大、ボストン大、ブラウン大、クリー社、ルミレッズ社、ゼロックス社、ヒューレットパッカード社
8		深紫外線センサ（半導体）	DARPA (DUVAP プログラム、Deep Ultraviolet Avalanche Photodetectors)、カリフォルニア大サンタバーバラ校、ジョージア工科大、サウスカロライナ大、テキサス大オースチン校、ノースウェスタン大、GE 社、TPI 社
9		深紫外線センサ（真空管）	ハネウェル社
10		化学吸着（薄膜）	DARPA (HISSS プロジェクト、Handheld Isothermal Silver Standard Sensor)、DARPA (MGA プロジェクト、Micro Gas Analyzer)、オハイオ州立大、ワシントン大、ミシガン大、MIT、オークリッジ国立研究所、イリノイ大アーバナキャンペン校、ニューヨーク州立大、ノースウェスタン大
11		多機能型集積化センサ	DARPA (TDIS プログラム、Three Dimensional Imaging Sensors)、DARPA (UTIS プログラム、Uncooled Thermal Imaging Sensors)
12		トランジスタ／ダイオード	ウィスコンシン大マジソン校、アルゴンヌ国立研究所、海軍研究所
13	放射線	固体センサ	カリフォルニア大ローレンスリバーモア研究所
14	振動	圧力センサ	DARPA (SI プロジェクト、Immune Building)、DARPA (SIB プロジェクト、Sensor for Immune Buildings)、ノースロップグラマン社、ロッキードマーチン社、ボーイング社

表2 日本の安全・安心に関連するセンサ技術のまとめ

	センシング対象	コア技術	研究機関（プロジェクト含）
1	危険物・爆発物	テラヘルツ分光・イメージング（センシング）	京大理、東大総合文化、理研、名大、阪大電気電子情報
2		テラヘルツ波光源	情報通信機構、東北大、理化学研究所、NTT フォトニクス研
3	生物剤・化学剤／環境分析システム	レーザー誘起蛍光分光（Laser Induced Fluorescence Spectroscopy）	名大太陽地球研、堀場製作所
4		深紫外光源（非線形光学効果）	物材機構光材料センター、阪大電気電子情報、阪大レーザーエネルギー学研究センター
5		深紫外光源（半導体）	名城大フォトニクスセンター、名工大電気、大阪ガス、NTT 物性研、ソニー、日本電気、三菱電機、シャープ、松下電器、東芝、三洋電機、日亜化学、豊田合成、ローム、スタンレー電気、三菱電線、昭和電工
6		深紫外線センサ（半導体）	物材機構センサ材料センター、名城大フォトニクスセンター、名工大電気、三重大電気、阪大電気電子情報、京大国際融合センター、早大電気、浜松ホトニクス、神戸製鋼
7		深紫外線センサ（真空管）	浜松ホトニクス
8		化学吸着（薄膜）	東大合成化学、産総研、物材機構センサ材料センター、神戸製鋼
9		多機能型集積化センサ	豊技大電気、物材機構生体材料センター
10		トランジスタ／ダイオード	早大電気、奈良先端大、松下電器、産総研ダイヤモンド研究センター
11	放射線	固体センサ	原研、産総研、神戸製鋼、北大原子核、阪大電気電子情報
12	振動	圧力センサ	豊田中研、産総研、物材機構センサ材料センター

3.5 化学センサ

1. はじめに

身近なセンサとして、ガスセンサに代表される化学センサがある。これは、対象とする特定化学種に感応して顕れる現象を、電気信号等に変換して捉えるもので、半導体、固体電解質、誘電体、絶縁体、圧電体等様々なタイプのものが提案されている。¹¹⁸ 典型的なものに、酸化物半導体を利用したものがある。これは、静山らにより始めて提案されたもので¹¹⁹、以来、わが国はこの分野で世界をリードしていることは良く知られている。

図 12 に酸化物半導体化学センサの動作原理を示した。センサ機能は、一般的にはセンシング対象物質との相互作用により物性が変化するレセプター機能と、その物性変化を増幅・信号に変化させるトランスデューサー機能の二種の素機能に分離して理解されるが、酸化物半導体では、この両機能が一つの材料で実現しているところに特徴がある。図 12 から理解できるように、吸着物質による界面障壁の変化と、粒内の電気物性、界面準位の種類と量が、最適な材料を得るキーであるとされている。基本となるホスト材料の種類も重要なものとなるのは当然であるが、ある化学種を選択的に検知するには、共存する不純物や添加物が、上記の 3 つの特性と密接な関係があるため、重要な制御因子となっている。すなわち、高選択性を得るにあたっては、ホスト物質の選択と共に、添加物の種類・量の最適化が最も大事な開発要素となってくる。一方、新興の物質は毎年、次々に合成され、それらにも対応するセンサが必要になってくる。酸化物半導体ガスセンサでは、ホストとなる物質は、主には酸化スズ、酸化亜鉛、酸化タングステンと限られた物が用いられているが、それぞれの物質が添加物の種類によって異なった挙動を示すため、新興物質対応用の材料の探索には多大な時間を要することになる。例えば、酸化スズの場合、Pd のような酸化触媒活性の高い金属を添加すると、格段に感度が向上する。表面の酸・塩基点を変化させる元素を添加しても、特性が大きく変化する。また、酸化銅のような p 型酸化物と共存させることで、上記のショットキーバリアに加え、p-n 接合による効果が得られ、特に H_2S ガスに高い選択性が得られることは

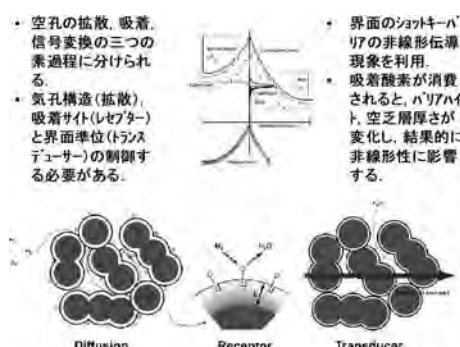


図 12 酸化物半導体化学センサの動作原理

118 山添昇, 軽部征夫監修 バイオセンサ・ケミカルセンサ事典, pp.476-84, テクノシステム, 2007

119 T. Seiyama, A. Kato, K. Fujiishi, M. Nagatani, Anal. Chem., 34, 1502 (1962)

広く知られている。¹²⁰ 図 13 に示すように、添加物の存在状態も添加量によって様々に変化する事が予想される。特定の化学種に対して、どの状態の添加物状態が、効果的であるか見極める必要がある。

また、これらのセンサ材料自身の特性の他、センサ材料の微細構造にも、敏感に影響されることはよく知られている。例えば、 H_2S センサでは、粒径の違いにより、作動温度に対する感度特性が異なり、ある特定温度で高効率になる山形の特徴を示す事が明らかになっている。これも、図 14 に示すように、微細構造中に存在する気相内の拡散による影響が有るものと思われる。¹²¹

以上のように、化学センサの特性は様々な特性に依存している。したがって、新興の物質に対応する新たな化学センサを迅速に開発するために、ドーピング条件の最適化を含めたようなコンビナトリアルケミストリ的なハイスループットなセンサ材料探索法が求められている。

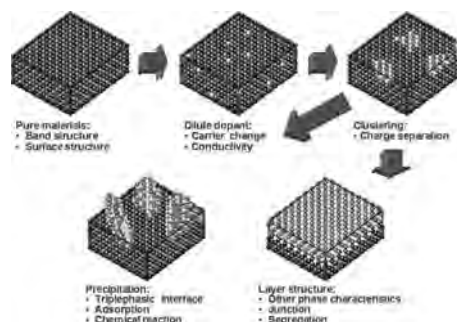


図 13 添加量による存在状態の変化

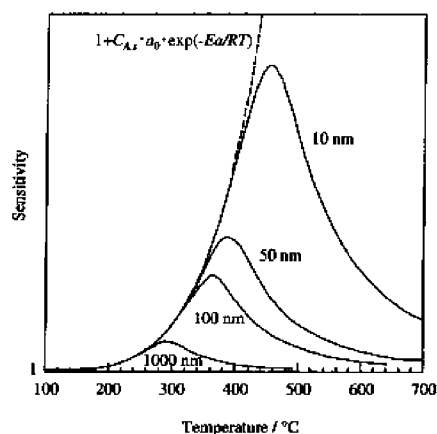


図 14 様々な膜厚をもつ多孔体のセンサ特性の温度依存性

2. 表面プラズモン共鳴 (SPR) 法によるセンサ特性の評価

ハイスループットなセンサ特性評価への適用には、位置応答型の計測法が求められる。その一つの方策として表面プラズモン共鳴 (SPR) 法が着目されている。

図 15 に示したように、光が金属表面で全反射する際、金属側に nm オーダーで光がにじみ出る (エバネッセント光)。一方、薄膜金属中の自由電子は、表面に表面プラズモンを発生させる。或る条件で (図 15 の場合入射角度) にじみ出たエバネッセント光は、この表面プラズモンを励起させ、自身はエネルギーを失う (共鳴)。その結果、このある条件にあるエバネッセント光は反射波を出すことができない。結果として、全反射率が低下することとなる (図 15 下

- 120 T. Maekawa, J. Tamaki, N. Miura, N. Yamazoe, Chem. Lett, 1991, 575 (1991)
 J. Tamaki, T. Maekawa, N. Miura, N. Yamazoe, Sensor and Actuators B, 9, 197 (1992).
 V.V. Malyshev, A. V. Pislyakov, ibid., 47, 181 (1995).
 Y. Wu, M. Tong, X. He, Y. Zhang, G. Dai, ibid., 79, 187 (2001).
 121 G. Sakai, N. Matsunaga, K. Shimano and N. Yamazoe, ibid., 80, 125 (2001)

図)。この共鳴は、金属薄膜上に存在する物質の誘電率と密接な関係を持っている。さらに、エバネッセント光が nm オーダーの空間に限定されるため、その金属表面からその範囲での誘電率変化を敏感に感じることができる。従って、金属表面に分子オーダーの変化があっても、それが共鳴条件の変化として顕れる。例えば、金属表面に何らかの物質が吸着した場合、それを検知できる。

SPR 法により特定の化学種を認識するには、金属表面を修飾することが必要となる。バイオセンサでは金表面に DNA やタンパク質を固定化させ、分子認識を持たせることで、分子認識を実現している¹²² (図 16 参照)。この DNA やタンパクの替わりに、酸化物半導体の薄膜を使用することで、酸化物薄膜のレセプター機能を評価することが可能である。現在、既に、二次元対応 SPR 装置は開発され

ており¹²³、今後は、かような方向の化学センサの発展が期待できる。ただし、SPR 法を化学センサに適用しようとした場合、克服すべき課題も多くある。例えば、実用の酸化物半導体化学センサは高温で用いられることが多く、評価も使用温度すべきところであるが、上記した SPR 光学系では難しい。ただ、透過型の SPR 法を用いれば、光学的な自由度が大きくなり、この困難も克服できると考えられる。実際に、ジルコニアを担体とした SPR 法による CO 検知が試みられている。¹²⁴ また、多種の対象ガスを含んだ系では、単機能のセンサでは、それぞれの化学種を区別して検出することは難しく、センサのアレイ化は必然である。

かような計測に関わるセンサ研究では、わが国は現在でもリードしているが、今後の展開に関しては安閑としていられる立場にはない。例えば、MEMS 技術のセンサへの適用という面からは、バイオセンサ分野では競争力を維持しているものの、一般的な化学センサにおいては、やや遅れをとっているように見

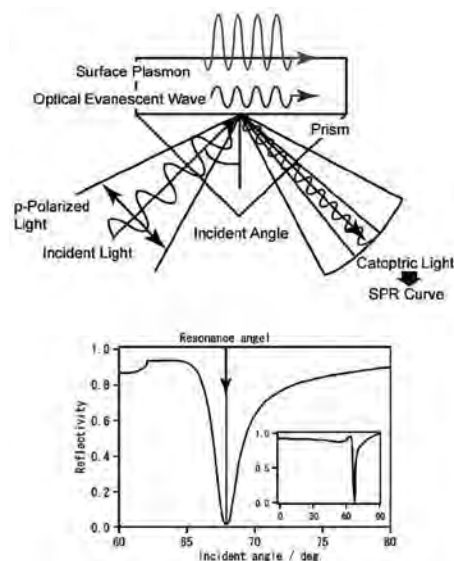


図 15 表面プラズモン共鳴法の概念図

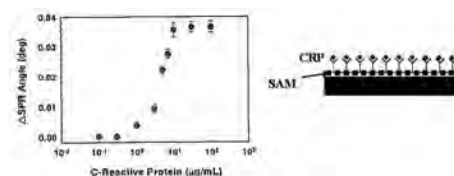


図 16 SPR を用いた C-Reactive Protein の検出

122 黒澤千佳子, Edmar P. Casa, 愛澤秀信, 黒澤 茂, 鈴木博章, Chemical Sensor, 21, 82 (2005)

123 入部康敬, 春日井 崇, 大島豊弘, 飛田達也, 鈴木正康, ibid., 21, 85 (2005)

124 G. Sirinakis, et. Al., J. Phys. Chem. B 2006, 110, 13508-13511.

受けられる。これは、一つにはこの方面に関する基礎研究を進展させる施策が欠けていることが一因である、と考えられる。

3.6 バイオセンサ

バイオセンサの分野においてセンサの感度は上がったものの、前処理の複雑・煩雑さが増している。そこで近年のバイオセンサの多くは、Lab-on-a-Chip 技術を利用した前処理も自動化した統合型である。そのため、今まで実験室レベルの前処理を求められたバイオセンサも、現場（オンサイト）での利用が可能になってきた。また、小型化・自動化がすすむにつれ、ハイスループット化にも貢献するようになってきた。そこで、本稿では、特にオンサイト及びハイスループットな検出が可能なバイオセンサについての調査を行うものとする。

(1) 環境保全監視用センサ

・微生物種監視型バイオセンサ

環境保全の観点から、環境中の微生物種の変動を監視する技術は重要である。しかしターゲットの遺伝子をリアルタイムでモニタリングすることは難しく、常時監視型のバイオセンサのほとんどは、細菌の直接検出が一般的である。近年、水質監視目的のために耐塩素性病原微生物である *Cryptosporidium parvum* を microfluidic device を用いて直接検出するバイオセンサが日本から報告された。¹²⁵ 1 時間以内に簡便に菌体数を直接検出できるため、現場でのリアルタイムモニタリングに適していると考えられる。

・微生物を用いた有害物監視型バイオセンサ

生物種がもつ毒に対する感受性を利用したバイオセンサの開発も盛んに行われている。韓国では cell-chip を利用した環境モニタリング可能なバイオセンサの開発が行われている。¹²⁶ しかし、細胞や細菌などをセンサとして用いると、高感度だが一般的なセンサに比べて耐久性が極端に悪いという問題点を抱えるため、実用化はまだ先だと考えられる。

(2) 環境汚染診断用センサ

・非常時及び緊急時環境汚染診断バイオセンサ

バイオテロなどの対応が早急に求められる中、環境中の微生物種またはウィルスの迅速検出可能なバイオセンサの開発が盛んに行われている。米国を例にするとフィルターを使った環境モニタリングシステムが怪しい兆候を検知した場合、最寄りの研究機関に運ばれて 24 時間以内に検出する仕組みになっている。そのため、研究機関で検査しなくとも、その場で迅速に検出可能なバイオセンサが求められている。ここでセンサに求められる点として、誰でも使える

125 Taguchi, T.; Arakaki, A.; Takeyama, H.; Haraguchi, S.; Yoshino, M.; Kaneko, M.; Ishimori, Y.; Matsunaga, T. *Biotechnol Bioeng* 2007, 96, 272-280.

126 Yoo, S. K. et. al., *Biosens Bioelectron* 2007, 22, 1586-1592.

簡易性、バイオセンサが他のセンサより比較的耐久性が弱いことよりその保存安定性等の向上、高感度化などが挙げられている。

候補とされるバイオセンサは抗体検出に基づいたバイオセンサである。米国は、リポソーム PCR と抗体検出を組み合わせることで 6 時間以内に sub-attomolar レベルのボツリヌスとコレラの検出を可能にした。¹²⁷ また、装置の小型化を念頭に置き、抗体が固定化されたナノサイズのバーコードを用いた識別などさまざまな方法が検討されつつある。¹²⁸ さらに、米国、シンガポール、チェコ共和国が共同で、Microfluidic device と磁気微粒子とを組み合わせることで迅速かつ簡便に鳥インフルエンザの検出¹²⁹を行うなど、各国でバイオセンサの開発が盛んに進んでいる。また、バイオセンサの耐久性をあげるために抗体や酵素を用いない系の構築も行われている。¹³⁰

(3) 食品検査用バイオセンサ

食品の安全管理の上で指標となる、農薬、内分泌かく乱物質及び細菌などの測定には高感度で特異性の高いバイオセンサが有効であると考えられる。日本では日立製作所が半導体バイオセンサチップを用いて、pg / ml オーダーのタンパク質検出用小型バイオセンサの開発に成功している。¹³¹ また、酵素反応を利用した食物中に含まれる残留農薬の迅速な検出が可能なバイオセンサも開発されてきている。¹³²

世界的には、マイクロアレイを用いた食品サンプルに対する細菌の特異的検出も数多くなされている。¹³³ しかし、マイクロアレイを用いた方法は、酵素反応や抗原抗体反応に比べて検出までに要する時間が長い。そのため、さらなる迅速化が求められている。

(4) オンサイト型個人識別用バイオセンサ

・医療分野における個人識別

個人識別が利用される分野として、一番大きなマーケットと考えられるのが医療分野である。盛んにいわれている Personalized medicine の実現のため

127 Mason, J. T. et. al., Nat Protoc 2006, 1, 2003-2011.

Mason, J. T. et. al., Nat Biotechnol 2006, 24, 555-557.

128 Tok, J. B. et. al., Angew Chem Int Ed Engl 2006, 45, 6900-6904.

129 Pipper, J. et. al., Nat Med 2007, 13, 1259-1263

130 Hil, H. D.; Vega, R. A.; Mirkin, C. A. Anal Chem 2007.

131 Kamahori, M.; Ishige, Y.; Shimoda, M. Biosensors & Bioelectronics 2007, 22, 3080-3085.

132 Nagatani, N., et. al., Food Control 2007, 18, 914-920.

133 Hong, B. X., et. al., Journal of Microbiological Methods 2004, 58, 403-411.

Wang, X. W., et. al., Applied Microbiology and Biotechnology 2007, 76, 225-233.

Myers, K. M.; Gaba, J.; Al-Khalidi, S. F. Molecular and Cellular Probes 2006, 20, 71-80.

めに有用なバイオセンサは、必ず各個人の遺伝子をターゲットとする必要がある。研究レベルでは Lab-on-a-Chip とバイオセンサの小型化と迅速化の検討が盛んに行われている。米国では FDA とバージニア大学が血液導入から 30 分以内で遺伝子検査を行えるバイオセンサシステムを開発している。¹³⁴ しかし、小型化に関しては、チップのみの小型化を行っているだけで制御システムの小型化までは至っていない。そのため、チップは小さいものの装置全体では非常に大きくなってしまい、現状ではオンサイトでの使用は困難である。日本においては、小型化するために電気化学検出ベースによるバイオセンサを用いた遺伝子診断の研究が盛んに行われている。しかし、感度や汎用性として蛍光検出には及ばないため、使い捨ての小型でかつ蛍光測定可能なバイオセンサ開発が行われている。¹³⁵ この手法は欧州でも行われており¹³⁶、今後の応用の広がりがあられると考えられる。また、新しい遺伝子増幅法を用いるアプローチもある。¹³⁷

・科学捜査における個人識別

個人識別の 1 つとして、科学捜査があげられる。科学捜査に用いられるバイオセンサは、基本的に個人識別のための遺伝子診断用バイオセンサである。ここで要求される技術として、現場での迅速な遺伝子診断である。そのため、多くは microfluidic device と PCR を組み合わせたシステムが一般的である。日本では、2007 年に日本電気（NEC）株式会社とアイダエンジニアリング株式会社が警察市場を主なターゲットとした個人識別用ポータブル型 DNA 解析装置を開発している。容疑者等の DNA 情報のデータベース化は、世界的に行われているために、この分野の需要はますます拡大すると考えられる。

(5) 多様性解析用バイオチップ（センサ）

・マイクロアレイを用いた多様性解析

多くの多様性解析はマイクロアレイを用いた遺伝子解析である。近年、急速にマイクロアレイの calibration や validation の最適化が進み、高い信頼性を得ることが可能になってきた。特に、医療・食品分野での FDA の影響が大きいと考えられる。¹³⁸ しかし、環境サンプルに対する多様性解析に関する論文の多くは、マイクロアレイ技術よりその前処理による多様性の維持や希少種のスクリーニングに注力している報告が多い。¹³⁹

134 Easley, C. J. et. al., Proc Natl Acad Sci U S A 2006, 103, 19272-19277.

135 Kamei, T., et. al., Biomed Microdevices 2005, 7, 147-152.

Tanaka, T., et. al., Biotechnol Bioeng 2006, 95, 22-28.

136 Marchand, G. et. al., Biomed Microdevices 2007.

137 Mitani, Y., et. Al., Nat Methods 2007, 4, 257-262.

138 Casciano, D. A.; Woodcock, J. Nat Biotechnol 2006, 24, 1103.

・ハイスループット化が可能なバイオセンサ（バイオチップ）を用いたメタゲノム解析

近年では、microfluidic device を用いたハイスループット解析の報告がされ始めた。米国において、微小空間中での PCR 可能な microfluidic device を用いたメタゲノム解析が報告された。¹⁴⁰ また、同様に米国からメタゲノム解析において有用と考えられる MDA 法も microfluidic device を用いてハイスループットに行う系も報告されている。¹⁴¹ また、米国は Gordon and Betty Moore Foundation が支援する CAMERA¹⁴² を 2006 年 1 月に発表するなど精力を注いでおり、今後さまざまなタイプのバイオチップと組み合わせたメタゲノム解析の報告が予想される。

139 Sebat, J. L. et. al., *Environ Microbiol* 2006, 8, 289-307.

DeSantis, T. Z. et. al., *Microb Ecol* 2007, 53, 371-383.

Palmer, C. et. al., *Nucleic Acids Res* 2006, 34, e5.

Wu, L. et. al., *Appl Environ Microbiol* 2006, 72, 4931-4941.

140 Ottesen, E. A.; Hong, J. W.; Quake, S. R.; Leadbetter, J. R. *Science* 2006, 314, 1464-1467.

141 Marcy, Y. et. al., *PLoS Genet* 2007, 3, e155.

142 Community Cyberinfrastructure for Advanced Marine Microbial Ecology Research and Analysis

3.7 試薬

(1) GFP 関連蛋白試薬

1994 年の GFP の生物応用報告以降、最も汎用性高いイメージング試薬となり、イメージングの生物学応用を盛んにした一因となった。特に、1997 年以降の FRET を応用した機能性 GFP 試薬は生物応用に幅広い可能性を開いた。今後は、GFP 関連蛋白質ではなく、生物発光性ルシフェラーゼ関連あるいは GFP 以外の蛍光蛋白質関連においても機能化が盛んに行われると予想される。特に *in vivo* イメージングにターゲットを絞った研究ツール開発が盛んに行われ、研究試薬としてのみではなく臨床診断薬としての応用が期待される。

(2) 蛋白質タグ剤

現在、実用化されているものに HaloTag がある。この試薬の他、FIAsH と呼ばれる砒素を利用した試薬も報告例があるが、バックグラウンド蛍光が高く特異性が低いためほとんど応用されていない。しかし、報告論文はいずれも注目度が高く、生理条件下での蛋白質修飾化の重要性がうかがい知れる。今後、マニュアル的に使うことが出来る試薬が大きく期待されている。この場合、細胞が生きた条件での標識化が必須であり、この点をどのようにクリアするか現在基礎研究が盛んに行われている。特に、分子生物学と化学の融合による新技術から革新的新技術が出ることが予想される。

(3) Q-Dot

1998 年の生物応用以降、Q-Dot の製造法あるいは生物応用報告例について着実に技術進歩が行われてきた。この結果、実用化されている例も多く、また研究室レベルで簡単に再現性高く作製することができる。しかし、当初からの問題点である、標識を行うときの反応点の制御、水中での安定性及び安定化に伴う粒径の大きさの制御など、生物応用に対して汎用性を求めた場合の問題点が解決されていない。今後の、技術革新によって大きく進展するツールとなると考えられる。

(4) *in vivo* イメージング用近赤外試薬

現在 ICG が内視鏡用血管造影試薬として実用化されている。ICG は人体投与について投与量についての安全性が確認された近赤外蛍光試薬である。基礎研究の分野では、現在、ターゲット集積性の近赤外蛍光試薬、あるいは生体内分子との反応によって蛍光特性が変化する試薬の開発が盛んに行われている。これらの試薬開発は、手術時のがん診断、遺伝子治療の効果評価等臨床応用を目指したものである。また、最も広く用いられている近赤外蛍光試薬は Cy5、

Cy3 等の Cy - dye 類であるが、これらについては来年特許が切れる。このため、これらの類縁体の合成研究が盛んになると予想される。

(5) 機能性 MRI 造影剤

機能性 MRI 造影剤は、PET に比べ国際的な開発が進んでいない。この理由は、機器開発がまだ進んでいないため、使用できるアプリケーションに限りがあることが大きな原因であると考えられる。また、集積性の化合物に直接放射性同位体を導入する PET 試薬に比べ、造影機能を集積性分子に組み込む必要がある機能性 MRI 造影剤は分子デザインが複雑である。しかし、MRI は装置が簡便である、造影剤が安定である、空間解像度が高い等、生物個体全体でのイメージングを目標とした場合利点が多い。今後は、機器開発と試薬開発が並行して研究進行することで技術革新が近未来に起こることが予想される。

可視化計測試薬の例

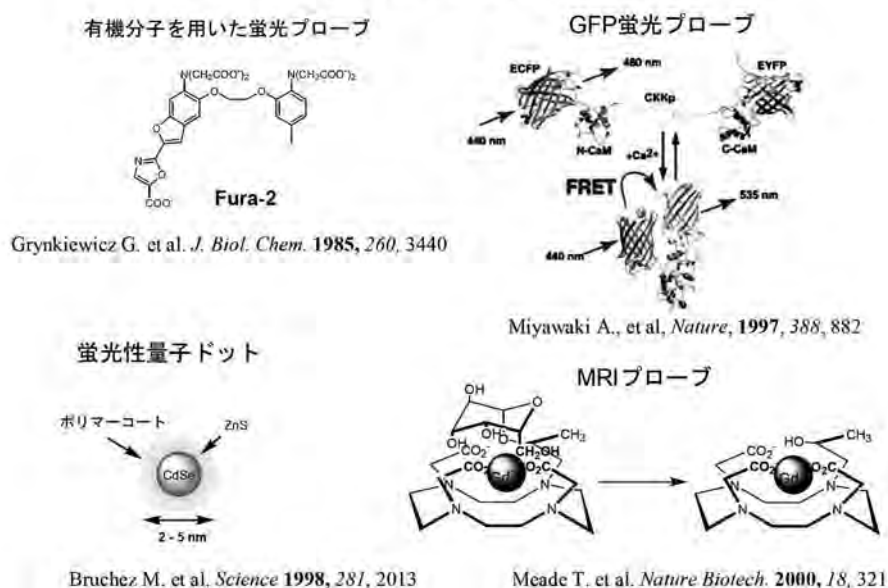


図 17 可視化計測試薬の例

3.8 ナノ計測

(ナノテクノロジー・材料分野の報告書(別冊)より一部転載)

ナノテクノロジーの進展に伴い、ナノレベルでの材料・物質の計測の重要性が増しつつある。具体的な構造・物性解析の手法としては、電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡、X線回折等がある。

(1) 単分子分光

増強メカニズム解明：単一分子感度ラマン分光の実現及びその利用のために必須である2つのメカニズムの解明が進められている。(a) 金属ナノ構造体間の狭いギャップに形成される巨大電場を利用した単一分子検出について、ナノ構造体内部の局所的なラマン散乱強度の空間分布を通して、直接解明されるものと期待される。(b) 化学的増強に関して、重要な役割を果たしていると考えられてきたハロゲン化物イオン等、特異的なアニオンの役割が日本のグループにより最近解明された。近い将来に増強メカニズムの完全な解明が期待できる。

SPMを利用した単一分子感度ラマン分光：STMや金属コートカンチレバーを有するAFMプローブと金属基板間のナノメータギャップに形成される局在プラズモンモードが、単一分子感度を与えうることが最近の近接場ラマン分光の進展により、報告されている。この方法では、近接場プローブサイズで決まるナノメータスケールの空間分解能が実現されうるとともに、単結晶金属基板も利用可能であり、規定された電極表面での単一分子の吸着特性・反応性を直接解明する技術として期待される。

(2) 3次元計測(リアルタイム含む)

Heイオン顕微鏡：半導体集積回路の微細化に伴い、表面感度がより高く、微細な構造を正確に測定する手法の開発に興味を持たれている。最近、走査電子顕微鏡と同じ原理であるが、Heイオン顕微鏡が半導体分野で注目されてきた。Heイオンビームの安定性が不足するため実用化に至らなかったが、SEMの分解能限界が近づいたためもあって急速に性能の向上が図られており、最近、分解能は1nmに至っているとされる。技術開発は欧州で行われている。

(3) ナノ粒子評価(形状・分布・表面活性・動態解析)

液体中のナノ粒子個々の動きとサイズを直接計測：英国NANOSIGHT社は、液体中の個々の粒子からの光散乱強度をCCDカメラで直接位置観測しながらビデオ記録することによって、それらのブラウン運動の解析からサイズ分布を導出するシステムを開発した。従来のシステムでは多くの粒子からの光散乱強

度（平均値）の情報のみを計測していたが、この新システムでは、個々の粒子をピックアップして動的観察（局所計測）を行うことを可能にした。異種粒子の混合溶液などの計測などに多大な威力を発揮する。

微小サイズの液中粒径計測：数 10nm 以下の微粒子を計測する新技術として誘電泳動現象を利用して形成した周期的な粒子密度変調が拡散によって消滅する仮定を回折光として計測し、その拡散係数から粒子径を求める方法が考案されている（島津製作所の発明）。

3.9 多元複合測定システム

多元複合測定システムとは一般にいろいろな定義ができ、その応用もさまざまであるが、ここではいくつかの違った測定装置あるいは測定手法を組み合わせることによってものづくり（新材料、デバイス等）ワークフローの迅速化を測るため構築したシステムとする。多元複合測定システムにはインフォマティクス、ロボティクスの要素が多分に含まれているが、インフォマティクスについては次のセクション（3.10）で報告する。多元複合測定システムの開発は現在のところポリマーの分野において盛んに進められており、欧米の企業を中心とした活動が目立つ。このようなシステムは、実験のハイスループット化を狙った上でその効果を最大に発揮させるものであり、ルーチン化されつつある材料開発プロセスを考えたらうで取り入れられる例が多い。ここでもハイスループット実験の観点から主に報告する。

(1) BASF と BOSCH の共同研究により開発された複合システム

BASF は早くからコンビ・ハイスループット手法を用いたポリマーの開発に力を入れている。最近、BOSCH のロボティクス技術を導入し、ポリマー自動合成、評価装置の開発を進めている。ロボットは合成、硬化そして各種特性の検査、測定など全てのプロセスにおいて実際応用にできり限り近いワークフローでの自動化を目標としている。コーティングの処方液体、固体両方を含めて粘度や pH などのパラメータを、組成をかえることによって振っている。作成方法にはスピンコートまたはスプレーコーティングが使われ、硬化には UV 照射と焼成のオプションがある。アプリケーションテストのハイスループット測定としては、膜厚、色、光沢、及びスクラッチ抵抗と親水性（接触角）が主である。また、欠陥探知のためには CCD カメラが用いられている。これらの測定モードは全てモジュール化されており、DOLPHIN ソフトウェアをベースにしたマネージメントシステムによってコントロールされている。各測定モードは連続的に行われ、データは連結されている。システムは一体化されているが、新しい測定モードの追加は比較的安易にできる。

(2) FLAMAC (Flanders Materials Centre)

FLAMAC は 2006 年に AGFA、ArcelorMittal 及び Umicore の 3 社が集まってフランドル地方政府の財政支援を基にベルギーに設立された非営利組織である。（体制はマイクロエレクトロニクスの共用施設の IMEC に類似）特殊化学品のハイスループット実験プラットフォームまたはハイスループットワークフロー用多元複合測定システムの開発を行っている。応用のテーマとして CVD によるサブミクロン膜厚の酸化物コーティング、ポリマー調合、そし

て無機・有機混合コーティングの三つが進められている。中でも調合に関しては、一日に約 1000 もの組成の違った試料の作成及び、基礎特性の測定が可能である。一体化されたワークフロー自動化のためのソフトウェアは hte 社によるもので、試料トランスファー用のロボットは上に述べた BOSCH のシステムと同じ装置が取り入れられている（STAUBLI 社製）。（図 18）現在のところワークフローシステムは合成への利用が中心であるが、新材料または新応用への展開に対応するための柔軟性と拡張性が強調されている。



図 18 FLAMAC のポリマー調製複合システム

(3) Symyx

米国 Symyx 社は主に触媒とポリマー材料開発を中心に、ハイスループット実験用の装置開発を早くから行ってきたため、今では Symyx の装置が何らかの形で使われている研究室（主に企業）は少なくない。最近ではハイスループットスクリーニングラボを一体化して市販している。2007 年の 6 月にはイタリアのナポリ大学で Symyx のパラレル加圧反応器（PPR）作業手順（ワークフロー）を元にして設立した研究室開設の報告があった。Symyx PPR はパラレル合成が自動化されているプラットフォームで、ワークフローには合成、加工、およびデータ解析が一度で可能なシステムである。ナポリ大ではポリオレフィンの研究に使われる予定である。

(4) 以上は全て一体化された複合システムの例であったが、これらのシステムの弱点として、いろいろな応用および材料を考えたときやはり柔軟性に欠けることがあげられる。一度確立したシステムに、全く種類の違った測定実験、装置を加えるのは、困難な場合が少なくない。しかし逆に、データマネジメントなどの面では複数の測定装置（合成装置も含んで）が一箇所に集中しているという点では、一体化したシステムはやはり便利である。多目的のシステムを構築する場合は柔軟性がもっとも重要な要素となるため、多数の場所に存在する測定装置を一度にコントロールしデータをいかに連結するかがチャレンジとなる。これは主にインターネット、ネットワークシステムを操って行わなければならないため、ソフトのコード開発がキーポイントとなる。DOW Chemical ではいろいろな材料またはテーマのハイスループット実験を行わなければならない状況にすばやく対応するため、4 人からなる、多

元複合測定システム開発 task force のようなチームを設けてある。チームは LABVIEW、MATLAB などのソフトを用いていろいろな装置の測定を自動化し、測ったデータの統合を行うマネジメントシステムを常の開発している。液体調合のハイスループット実験において、DSC（示差走査熱分析）と光学像の測定と解析を連続的行った例がある。

3.10 インフォマティクス

インフォマティクスとは、漠然とした名前ではいろいろな分野に適用できるが、ここではマテリアルインフォマティクスについて報告する。これはまだ比較的新しい分野で、材料データベースをいかに作るか、また現存するデータベースをいかに使うか、さらに第一原理計算による新材料の物性の予測なども含めていろいろなタスクがインフォマティクスのカテゴリーにあてはまる。ここでは、測定装置および測定技術の観点から見てみたい。特にコンビナトリアル実験における測定について議論する。図19にコンビナトリアル実験におけるインフォマティクスのサイクルを示す。サイクルのなかにはいろいろな作業が存在するが、全てのまとめ役をするのがデータマネジメントシステムである。

コンビナトリアル法またはハイスループットスクリーニングの特長は膨大な量のデータが常に生じることとあり、そういった事態に対処するデータマネジメント技術を「測定インフォマティクス」とする。例えば一つのコンビナトリアル薄膜ライブラリーに対してシンクロトロンで行うX線解析の実験のデータの量は数テラバイトにも及ぶ場合があり、データハンドリングがボトルネックになりやすい。

インフォマティクスの重要な要素にデータマイニングがある。これはいかにしてデータ解析を使って今までになかった情報あるいは知識を引き出すかということとあり、PCA、PLS などいろいろなクラスター分析手法が使われる。

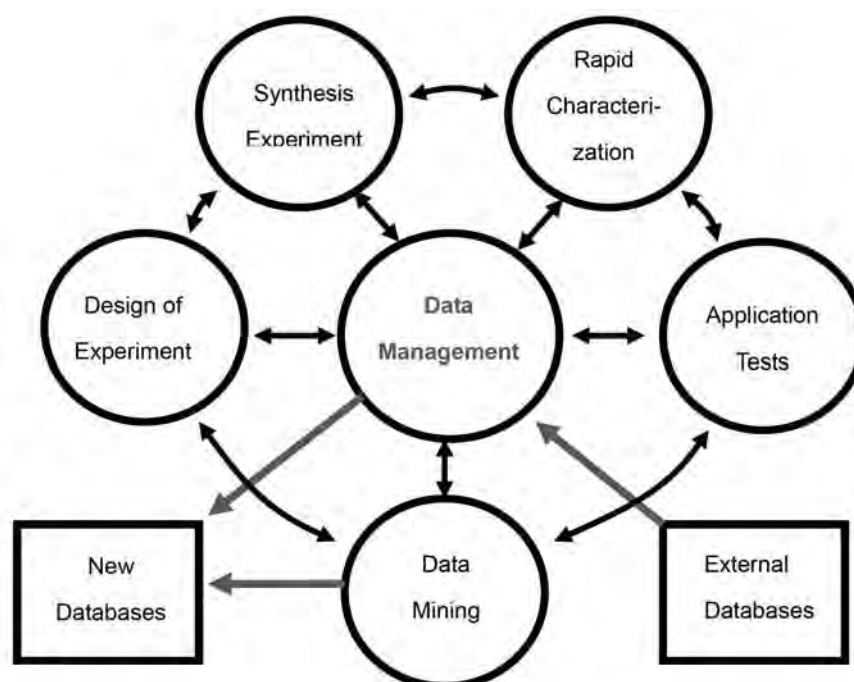


図 19 コンビナトリアル実験におけるインフォマティクスのサイクル

しかしコンビナトリアル実験上でこういった手法が威力を発揮でき、新材料の発見または新物性の発掘に直接結びついた例はまだ少ない。実際のところコンビナトリアル実験のデータ解析作業のうち約 90%はデータ可視化に限られている。逆に言うと効果的な可視化を行うだけで実験データ内の重要な傾向が捕まえられる可能性は高いということである。

欧米の化学企業の R & D ラボで行われているコンビナトリアル実験の主な目標は触媒とポリマーである。各種応用について、一般に使われている材料に取って代わる、より優れている新材料を見つけることがゴールである。大学などでは迅速相関マッピング手法などを用いて学術的なテーマを追求し、磁性あるいはエレクトロニクス材料などにも幅広く応用されている。どの分野においても大規模なデータセットの取り扱いが問題となりつつあり、効率的なデータマネジメントシステムの必然性が浮き彫りになっている。

ここで問題になるのはデータの収納と転送、そして研究者の間でのデータ交換の方法の確立である。一部は有機化学あるいは薬学の分野で開発されている手法が応用できると考えられる。例えば LIMS (laboratory information management system) などがある。しかしハイスループット実験の大きな量のデータを効率よく集め、それをすばやく分類分布するためのデータマネジメント用 LIMS はまだあまり普及していない。こういった状況に対応する手段を考える上でいろいろな課題がある。ひとつは任意の特性について材料のデータを比較するための標準をどう定義するかである。また迅速データ処理、交換、収納などのプロセスが可能なデータベースツールを築き上げていかなければいけない。XML でコード化されている材料特性評価のデータを使って、これらを進めようという提案があるが、これは今のところあまり普及していないのが現状である。これからの展開が期待される、興味深い分野である。

ソフトウェアツールとしては市販のものがかなりでまわっておりこれらを用いることによって、測定からデータマネジメントさらにマイニングまでこなせるものもある。例えば、Symyx の Renaissance がある。しかし市販の完成システムのソフトは柔軟性が欠けていて、融通があまりきかない場合が多い。またこういったソフトは値段が高いため大学や国研ではあまり使われていない。逆に Excel や MATLAB をベースにしたプログラムがよく使われている。企業の R & D ラボではいろいろなソフトを 組み合わせて使っている。

● DOW の R & D ラボにおけるインフォマティクス作業の例

DOW Chemical ではありとあらゆる触媒及び有機材料に関してコンビナトリアル実験に携わっている。インフォマティクスへのアプローチとしてまず IT 専門の研究者からなる R & D チームを設けている。このグループの中には、IT 以外に化学工学、電子工学、コンピュータサイエンス、及びソフトウェ

ア専門のエンジニアも含まれている。そして各分野の実験に関してはそれぞれの領域の専門家がデータの解析及び可視化のプロセスをリードする。またこのチームの他に一般のデータ解析及び可視化の課題について取り込むチームが設けられている。重要な作業の一つとして外部の文献をもとにしたデータベース、また現在までに内部で行われてきた実験をもとにデータベースを築き上げて行くことが挙げられる。実験のデータは例えばポリマーの DSC と光学像である。

●大学あるいは学術的な設定におけるインフォマティクス作業の例

メリーランド大学の研究室では composition spreads（組成を連続的に変化させた薄膜試料）を用いて相図作成の実験が進められている。磁性やマルテンサイト変態の特性を中心にハイスループット測定が行われている。データマネジメントには MATLAB を基にしたソフトが主に使われている。三元相図をマッピングした X 線データをもとにクラスター分析が行われた。ソフトには Bruker AXS 社の Polysnap という、そもそも薬学コンビのために作られたものが使われた。これを使って数百もの X 線分光のデータをまとめて解析することにより、三元相図内（Fe-Ga-Pd）の各種相とその構造の分布が明確にされた。また同じ解析は最近 MATLAB を使って遂行できることもデモンストレーションされた。

3.11 量子コンピュータ

量子コンピュータは現在さまざまな技術を使って研究が進んでいるが、この報告書では現在研究が目覚しく進展している超伝導量子コンピュータを中心に調査をする。この分野での計測に直接に関連した技術として、量子ビットの読み出し技術があり、量子計算で重要となる：単事象読み出し；量子非破壊読み出し；量子コヒーレンスを長く保つ最適バイアス点動作、などの技術の観点から以下に詳しく比較する。

(1) ジョセフソン準粒子電流を利用した読み出し

これは初期の超伝導電荷型量子ビットの読み出しに使われた技術であり、大変簡便に読み出しができる特徴を持っている。¹⁴³ 構造的にはプローブ電極を量子ビットに取り付けるのみで、計測はその電極に流れる電流を測るだけで達成できる。欠点としては、読み出しのタイミングが制御できなく定期的に破壊読み出しが行われることである。

日本以外ではあまり研究されていないが、この読み出し法は 2 量子ビット回路にも使われた。¹⁴⁴

(2) 単電子電荷計 (SET) を使った読み出し

電荷量子ビットの読み出しは電荷計で行うのが最も自然なやり方であろう。電荷分解能の点で優れている単電子電荷計は、超伝導量子ビットと同じ技術で作成できるが、周波数帯域が量子ビットの緩和レートに比べ小さいので、以下の工夫が必要である。

2.1 電荷トラップを使用し、量子ビットが緩和する前に電荷をトラップに移動させる方法。¹⁴⁵ 単事象の読み出しが約 90% の読み出し効率で実現した。日本以外では行われていない。

2.2 交流単電子電荷計 (RFSET) を利用して帯域を増やす方法。¹⁴⁶ 実験は EU で行われたこの例のみで、単事象の読み出しは実現していない。

(3) 超伝導量子干渉計 (SQUID) を使った読み出し

この読み出し法は電荷型量子ビット¹⁴⁷ と磁束型量子ビット¹⁴⁸ および位相型量子ビット¹⁴⁹ で実現している。いずれもスイッチ型の SQUID を使用し、

143 Nature, 398, 786 (1999)

144 Nature, 421, 823 (2003), Nature, 425, 941 (2003)

145 Physical Review B 69, 180507 (2004)

146 Phys. Rev., B 69, 140503 (2004)

147 Science, 296, 887 (2002)

148 Science 299, 1869 (2003)

149 Phys. Rev. Lett., 93, 077003 (2004)

読み出しは電圧状態への移行を伴う。場合によっては高い読み出し効率の単事象読み出しが実現している。

EU、日本、米国ではほぼ同程度の技術レベルで実現していて、中国でもこの技術の開発が行われている。米国では結合した 2 ビットの独立した読み出しもこの技術で実現している。¹⁵⁰

(4) 分散型の読み出し

読み出し時にエネルギーの散逸を伴わないこの読み出し法は、量子コヒーレンスを長く保つ最適バイアス点での動作や量子非破壊読み出しが可能となるので現在最も注目されている。図 20 のように、最適バイアス点では $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 二つの量子状態に対応した電流・電圧ともに零なのでこれらの量を使った読み出しは不可能である。しかし量子インダクタンスや量子キャパシタンスは異なった値をとるので読み出しに使える。一般的にはタンク回路中に量子ビットを入れ、周波数の変化を間接的に読むのがこの分散型読み出しである。

線形タンク回路を使う読み出し¹⁵¹と、非線形タンク回路（ジョセフソン・バイファークーションアンプ）を使った読み出しがある。¹⁵² 線形のものは信号が小さいので単事象読み出しは達成できていないが極めて大きな平均化された出力がえられる。非線形の場合は小さい Q のタンク回路を使えることから、より高速に動作しかつ大出力が得られ、単事象読み出しが実現する。しかし読み出し行為による量子ビットへのバックアクションが比較的大きく、量子ビットを早く緩和させてしまう。量子非破壊読み出しも磁束量子ビットにおいて実証されている。¹⁵³

米国と EU を中心に実験手法が開発させてきたが、最近日本でもこの種の読み出しができるようになった。

(5) 量子化磁束のダイナミクスを使った読み出し

磁束量子ビットの読み出しを、ジョセフソン伝送線中の量子化磁束（フラクソン）の運動（透過、反射、時間遅延など）を利用して、量子ビットを今までに例がない高速で読み出す提案が米国から出ている。¹⁵⁴ 日本で実験が進んでいるがまだ実現していない。

150 Science 307, 1299 (2005)

151 Phys. Rev. Lett. 95, 060501 (2005)

152 Phys. Rev. B, 73, 054510 (2006)

153 Nature Physics, 3, 119 (2007)

154 Phys. Rev. B, 73, 094504 (2006)

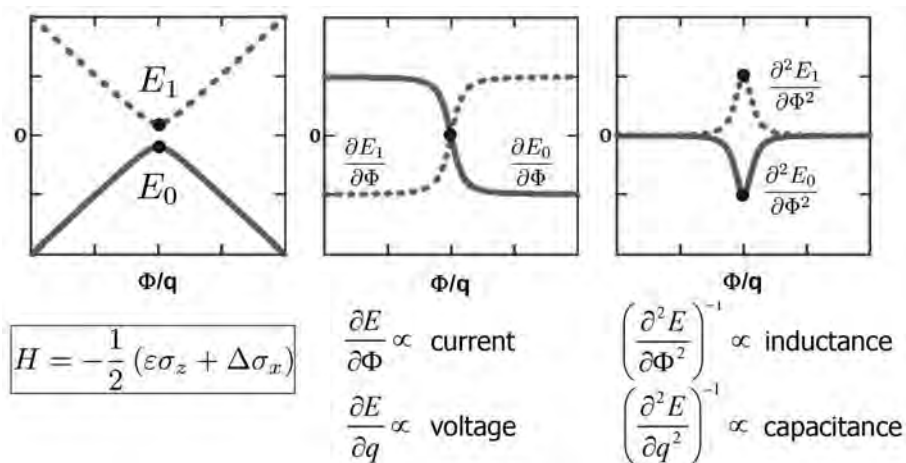


図 20 エネルギー、電流（電圧）、および量子インダクタンス（量子キャパシタンス）の印加磁束（または印加電荷）依存性。青色の点は量子ビットの寿命が最も長く保てる最適バイアス点を示す。

3.12 政府調達

第3期科学技術基本計画において政府調達は、主に研究成果の社会還元促進の観点から重要であると位置付けられている。近年、欧米諸国では、革新的技術の商業化を促進するための政府調達改革が盛んに行われている。特に、米国は、軍事関係の先端機器などのプロトタイプ技術を迅速に実証し初期需要を創出するしくみを取り入れている。以下に、米国、英国、オランダにおける注目すべき新たな政府調達に関する施策について紹介する。

(1) 米国

・中小企業革新技術制度 (SBIR)

連邦政府による研究開発成果の商業化を強化し中小企業能力を活用するために1983年に設けられた制度である。過去約20年間で、45,000以上の特許および数兆ドルの技術イノベーションの創出に成功している。SBIR制度の以下の3つの特徴が成功要因と考えられている。①市場価値重視の競争選抜 ②管轄省庁による調達を含む優遇措置 ③マッチング事業を通じた販路拡大支援。

・アザー・トランザクション (OT)

緊急を要する事態、安全保障に関連する分野で従来の政府調達の規定の枠外に特別にミッションにあわせて調達プロセスを調整できる特別な権限を設ける。調達側は、民間の調達実務経験者を多数起用するなどして、不確実性を伴うプロトタイプ技術を迅速に実証するシステムを導入している。

(2) 英国

・英国政府調達庁 (OGC)

OGCは、調達前の段階における供給者の参加の重要性を強調する。調達側の具体的アクションとして、民間調達専門家の起用、官民パートナーシップの強化、供給者との段階別目標設定スキルに必要な経営学的知識取得をあげている。

・英国産業連盟 (CBI)

商業化前の調達をうまく活用している米国DARPA型の調達方式を導入するために、英国科学技術戦略委員会を司令塔に、公的機関（政府機関、研究委員会、地域開発公社）の連携を強化する。

(3) オランダ

・オランダ版 SBIR

オランダ版SBIRは、日本版SBIRのような研究助成金のかたちではなく、

アメリカ型の SBIR 制度を目指し、最終的に管轄機関が調達できる契約システムを導入している。オランダ国内の中小企業に限定した支援を実現するために現在 EU 指令に定められた調達規定に関して EU 加盟国間と調整中である。

・ PIANOo 調達専門家ネットワーク組織

調達の高度なナレッジと経験を有識者間のネットワークを通じて、より革新性の高い技術を有する製品とサービスをいかに購入するか、について提案を行う組織を設立した。調達専門家育成のための教育、訓練について民間コンサルタント企業と協力し、調達実務家に対し経営学的視点から専門知識を学習するプログラムを提供している。

3.13 共用施設とネットワーク

共用施設には、世界の主要国が出資しフランスに建設中の ITER（国際熱核融合実験炉）のような超巨大国際共同研究施設から、大学や民間の共同利用施設に至る種々のサイズ、利用対象、運営形態がある。計測・分析に関連についても多岐にわたり、以下のような共用施設がある。

- 1) 科学基盤・国家戦略的大型共用研究施設
- 2) 大学共同利用機関法人や国研を中心とする大型研究施設
- 3) 産学官先端技術共同利用施設
- 4) 大学保有大型研究装置共同利用施設
- 5) 地域コンソーシアム型共用施設
- 6) 民間ベース計測・分析施設（会社：原則独立採算）

上記 4) に分類される施設の代表は大学附置の全国共同利用研究所である。1990 年に大学や国研の特定の研究室に占有される傾向が強かった大型分析・計測装置等の共用化を促進するモデルとして、国立大学附置研究所の一部を共同利用研に認定し、他大学、研究機関との共同研究経費（旅費中心）を手当てしたものである。20 国立大学の 58 研究所のうち 19 が認定され、共同利用のための旅費を中心とする経費が交付されていたが、法人化に伴って各大学法人の裁量事項になった。

最近の新しい動きは、高価な汎用計測・分析装置を公開し、ネットにより利用管理する共同利用プログラムである。H19 年度にスタートした文科省の「先端研究施設共用イノベーション創出事業」は、「ナノテクノロジー・ネットワーク」および「産業戦略利用」の 2 つのプログラムで構成されている。¹⁵⁵ また、化学系の研究室が連携し、NMR などの高価な装置の共用を目的にスタートしたユニークなプログラムもスタートし発展が期待される。¹⁵⁶

アメリカ・カナダでは大学をベースとする産学共用センターが各地に建設され、建設・運営経費の多くが企業や個人の寄付に依存している。欧州でもナノテク・材料、触媒、医薬関連のセンターが大学等に付置され、施設の共用のほか先端装置を使いこなす人材育成の場として利用されている。韓国、中国でも欧米を参考にした産学連携の共用、人材育成施設設置の動きが急である。

5) の例として神奈川サイエンスパークの計測センターや静岡県ファーマバレーが挙げられるが、ほかにも多くの計測分析センターを含む地方自治体の施設がある。運営経費の多くは自治体から供給されるが、自立への努力が求められている。

155 http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/19/03/070328_08.htm

156 <http://chem-eqnet.ims.ac.jp/index.html>

以下、1) - 3) の施設について補足し国際比較する。¹⁵⁷

1) 科学基盤・国家戦略的大型共用研究施設

国立（独法）研究所や大学共同利用機構を運営母体とし、一般に 100 億円、時には 1,000 億円以上の建設費をかけて作られ、運営費も基本的に国費でまかなわれる。代表的な施設として、放射光、中性子線、強磁場、天体・宇宙線観測、超高速計算機、バイオ系（脳、ゲノム、再生医療等）のほか、宇宙航空や原子力研究施設、博物館が挙げられる。放射光、中性子線、強磁場施設について比較する。

○ 放射光（SR）施設（2.2.2（1）も参照）

高エネルギー物理実験に付随していた放射光は、1970 年代になって新たな強力 X 線源として注目され、高エネ研（KEK）の施設（1982、3GeV）が第 2 世代放射光研究で世界のトップレベルの成果を挙げてきた。現在、日本には約 40 ヶ所に加速器があり、うち 11 ヶ所に SR 光発生施設がある。なかでも SPring-8（1997、8GeV）は 40 以上のビームラインを有し、アンジュレーターによる高輝度第 3 世代放射光源として世界最高性能を維持し続けている。同等の施設として、アメリカのアルゴンヌ国立研の APS（1996、7GeV）、EU の ESRF（1997、6GeV）があり、ナノテクやバイオ研究等の先端計測を担っている。高輝度第 3 世代放射光源としては、韓国では浦項（PLS）、台湾では新竹（NSRRC）の施設が稼動し、中国では合肥の施設（NSRL）に続き上海に建設中の施設（SSRF）は前倒しで動き始める予定である。日本が先行した産業界の利用も各国の急速な普及が拡大している。次の第 4 世代として X 線自由電子レーザー（XFEL）やエネルギー回収型リニアック（ERL）が日米欧で計画され、テスト中である。干渉性の向上や偏光性やフェムト秒イメージングを利用した X 線回折顕微鏡やホログラフィーなどの研究に注目が集まっている。課題として、外部利用者への課金、成果の公開、保守、運転、技術指導者の業績評価などが挙げられる。

○ 中性子ビーム（2.2.2（9）も参照）

中性子は、電荷を持たず、磁石や波としての性質を有する。物質への透過力、軽元素や磁性原子による散乱能が高いので、多種の物質の構造や磁性、原子振動の解析に有用で、物理から、材料、バイオに関わる基礎から応用までの広汎な計測情報を提供する。中性子ビームの発生源には大別して原子炉と加速器がある。原子炉による代表的な施設はフランスの HFR（グルノーブル、58MW）であるが、各国の原子炉の老朽化により加速器の大強度核破砕中性子源の建設にシフトしている。2008 年の建設を目指す日本の J-PARC（パルス、1MW）は、2006 年完成のアメリカの SNS（Oakridge NL、1.

157 2006 年度 - 物質材料研究アウトルック、付録、p.409（2007）

4MW)、英国 RAL の高度化 ISIS と肩を並べる世界を代表する施設と言えよう。欧米の施設はナノテクやマイクロエレクトロニクス開発施設に近接し、先端技術への国家戦略的な利用につながっている特徴が見える。

○ 強磁場施設

定常的な強磁場発生には大規模な直流電源と冷却水設備を必要とし、世界的にも施設は限定されている。日本は（独）物質・材料研究機構（NIMS；37.9T）と東北大・金研（31.1T）に、米はタラハッシー（45.2T）に、欧は仏のグルノーブル（30T）とオランダのメイメーヘン（33T）にあり、磁気物理、超伝導、磁気化学、NMR、バイオ磁気等の共同利用研究に供されている。スペック的にはほぼ同等であるが、国際的な利用度は欧米の施設の方が高い。

2) 大学共同利用機関法人や国研を中心とする大型研究施設とネットワーク

日本では、分子研、情報研、遺伝研など、13 の国立大学共同利用研究所があった。2005 年の独法化に伴い、これらの研究所は 4 共同利用機関法人に再編成された。従来の機能別に分類された研究所の性格が明確でなくなったことに加えて、基礎科学を支えてきた 10 ～ 100 億円レベルの大型共用施設建設の予算を確保するルートが消え、科学技術の進化に対応する新たな施設が出来にくい状況が生じている。日本学術会議でもこの問題を取り上げ、「基礎科学における国際競争力維持のための大型計画のあり方と推進方策」が検討されている。計測・分析ネットワークについても、旧計量研は産総研に組み込まれ、アメリカの NIST に相当する中核機関がない。長期展望に立ったネットワークの構築は、産官学の連携や国際標準化にむけた今後の戦略検討課題と言えよう。

米国では、国立研究所の企画、運営が大学や民間のシンクタンク（バッテル研等）に委ねられ、資金源も NSF、DOE、DOC、軍関係、など多岐にわたる。最近ではアメリカの競争力強化の政策により、物理や数学への基礎教育、NIST を通した計測技術開発の強化やネットワーク構築への予算が増額され、具体的施策が検討されている。2007 年 2 月に公表された NIST レポートは、基礎科学と産業の基盤としての計測の重要性を強調している。¹⁵⁸11 に分類した産業における具体的計測課題とその分析は未公開であるが、USMS（アメリカ計測システム）の構築を目指す NIST の動向をウオッチする必要がある。

欧州は ITER をフランスに誘致し、ナノテクに関する全国的共用施設ネットワークを仏英が保有する。また、触媒等のコンビナトリアル開発と材料情報ネットワーク構築のプログラムも始まっている。中国では北京に共用拠点、国家ナノ科学技術センターが開設され、韓国では国家ナノ・ハブセンターの整備が進んでいる。

158 <http://usms.nist.gov/usms07/index.html>

3) 産官学先端技術共同利用施設

マイクロエレクトロニクス、ナノテクノロジー、医工連携など、国際競争の激化している分野における先端技術開発を、分野融合とスピード、実用化を重視して遂行する産官学連携施設。ものづくりを中心とするが、先端計測と一体化した研究開発が必須であり多くの先端計測装置を共用している。

○ マイクロエレクトロニクス技術開発施設

Moore 則による熾烈な技術開発が長年にわたって継続してきたマイクロエレクトロニクス研究には、1 世代ごとに数千億円以上の開発費を要するようになった。もはや 1 企業で国際競争を生き抜くことは不可能になり、企業連合や産官学の研究組合（コンソーシアム）が国の支援も受けながら研究開発を進める体制が主流になりつつある。また、これらの設備は大学院生を中心とした人材育成の場としても使用され、次世代のナノテクを牽引する人材開発が進められている。こうした整備周辺にはベンチャー企業もあり、特に中国では 2 つのファンダリーには併せて 100 社以上のベンチャー企業が関係している。日本の施設として SCR（Selete MIRAI で使用：つくば）があるが、大学には開放されていない。他国では米の SEMATCH の ATDF Albany にある Albany Nanotech、EU の IMEC、LETI、MINATEC、韓国の KAIST のナノファンダリー、台湾の TSMC（一部、大学に開放）、中国の清華大学、上海交通大学のナノファンダリー等がある。¹⁵⁹ これら施設では大学院生の教育のミッションも併せ持っている。

関連産業の国際化に伴う国際共同利用が進む一方、more Moore、more than Moore、beyond Moore を目指した熾烈な国際競争は経済や国家保障にも関わる Competitive な性格も強く、先端技術の秘密保持の問題が存在する。

○ ナノテクノロジー・材料技術関連施設

ナノテクに関連する（計測を含む）施設の韓国、中国、台湾を含む国際的な状況と課題は CRDS ナノテクノロジー・材料グループの調査に詳しい。¹⁶⁰ ものづくりと関連する計測技術の新しい動きとして、マクロからナノに至るマルチスケール（複合）計測、リアルタイムプロセス計測、3 次元可視化等の具体的課題のほか、集積化（コンビナトリアル）合成と連動するハイスループット計測がある。¹⁶¹ 欧米は医薬、触媒、有機・高分子材料開発のハイスループットテクノロジーで先行し、日本は無機固体材料分野を抑えている。ものづくりの高速化に伴う計測の自動化、膨大なデータの高速処理、解析に対処する

159 「我が国の研究開発拠点に資する主要各国のナノテクインフラ投資戦略」CRDS-FY2006-GR-02

160 「自立指向型共同利用ナノテク融合センターの設置」：CRDS-FY2006-SP-10

161 「ものづくりにおけるハイスループット先端計測」：CRDS-FY2007-WR-03（2007）

情報技術（インフォマティクス）の重要性が高まり、NSF プログラム IMI-COSMIC (International material institute-Combinatorial science and material informatics) や EU プログラム Top-Combi が動いている。日本でのこの分野の取組みは遅れている。¹⁶²

○ バイオ、医学に関連する共用施設

CRDS ライフサイエンス分野の国際比較調査報告に譲るが、ゲノム、ポストゲノムの研究開発においても計測はキーテクノロジーであり、理化学研究所の大型プログラム「たんぱく 3000」では数十台の高分解能 NMR が主役となった。プログラムの終了に伴い、新たな NMR 共同利用プログラムがスタートする。最近、再生医療にイノベーションをもたらす iPS 細胞が京都大学・山中伸弥教授によって発見され、国際競争の最前線に躍り出てきた。計測・分析技術はこの研究開発競争のカギを握る可能性が高く、共同利用施設の構成要素として重視されるべき課題であろう。

162 「コンピナトリアルテクノロジー」7 章（丸善、2004 年）；知京「無機材料研究におけるマテリアルインフォマティクスの動向」、化学技術動向、No.58, p.20 (2006)

3.14 国際標準

計測に関連する国際標準は2種に大別できる。ひとつは100年以上の歴史を有する度量衡に関する計量標準で、もうひとつがほんの10年ほど前に始まった工業製品の規格に関する国際標準である。

前者はメートル法の制定とその原器などの問題に始まり、SI（国際単位系）による独立とみなされる7次元の量（長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物質質量、光度）を決め、その管理、校正等を国家計量機関と関連の事業者が行っている。¹⁶³ フランスを中心とするヨーロッパがこの分野の主導権を握っており、アメリカではNIST、日本では1903年に創設された中央度量器検定所を前身とする産総研の計量標準総合センターが役割を担い、¹⁶⁴ 韓国、中国、台湾等、世界の各国に担当国家機関が存在する。地味ではあるが、計量標準は科学技術、工業製品の製造の精度やトレーサビリティ保証の基本であり、科学の進歩に伴う精度の向上への不断の研究や工業製品の評価・校正などの重要な役割を果たしている。

後者は、“ものづくり日本”にとって急速に大きな問題になってきているが、それに対する認識の低さと対応の遅れが指摘されている。問題は次のような現象に現れている。最近、JIS（日本標準規格）マークをほとんど見かけることがなくなった。テレビを画期的に高画質化する日本オリジナルの技術として宣伝されたハイビジョン（アナログ）方式も、高品質・小型精密加工を誇る日本のものづくり技術を結集した高機能携帯電話も世界には普及していない。何故なのか？

この最大の理由が国際標準にある。“もの”や技術が良く低コストであれば世界に売れ、普及するという論理（常識）は通用しなくなってきている。国際的に流通する製品の規格を統一する動きは100年余の歴史を有するものの、種々の製品・分野に拡大する契機となったのは、1995年のG7である。世界市場を独占的に支配してきたデファクトスタンダード製品であっても、国際標準を取らなければ効力は発揮できないことになったのである。ナノテクノロジーなどの最先端研究分野でも、国際標準の主導権をめぐる動きが潜行している。研究開発の表の世界からは見えにくい国際的技術認証・交易の世界で、ルールを決める側に回らないと、とんでもない不利益をこうむることになりかねない状況が現実なのである。

1995年にWTO（世界貿易機関）のTBT（貿易に関する技術的障害を除く）協定の発効以来、国際標準を取った製品は、WTO加盟国において国内規格に

163 （独）産業技術総合研究所計量標準総合センター「計量標準要覧」<http://www.nmij.jp/>

164 （独）物質・材料研究機構（NIMS）：“VAMAS in NIMS”<http://www.nims.go.jp/vamas/>

優先し、侵入を妨げられない。国際標準は ISO（国際標準化機構）、IEC（国際電気標準会議）、ITU（国際電気通信連合）などが認証する。標準化戦略として、ISO や IEC などの委員として持続的に活動し、各種委員会の幹事国となることが重要である。以下、ISO や IEC で決められる、構造・物性の計測を含む製品や試験方法の標準化のスキームと国際的取組みについて概説する。

ISO への新規提案は、加盟国内の標準団体が発議し、審議の開始には該当する専門部会での過半数の賛成（その中に提案の内容を WG で審議する専門家を出す 5 カ国以上を含む）を得て、国際標準の成立にはさらにタフなネゴシエーションを継続する必要がある。先進材料やその評価については、標準化への予備的活動を行う VAMAS という組織があり、ISO 標準化の手続きを一部ショートカットできる（図 21）。VAMAS は、1982 年の G7 ベルサイユサミットの合意により、先進材料に関する新技術の発展、国際標準化の促進、製品の貿易と経済交流の活性化を目的に設置された。VAMAS 加盟国は G7（USA、カナダ、日本、イギリス、フランス、ドイツ、イタリア、（EU））である。

国際標準の趣旨は元来、「国際的な互換性や資産効率の向上」にあり、受益者は民間企業に想定されていた。このため国が表立って動けないという状況の中、日本では独法化した研究所によるわずかな資金援助によって活動している。一方で、民間企業が 2 つのグループに分かれて類似の製品のわずかな規格の違いをめぐる内輪もめするケースも見られ、その際に外国製品に標準を取られる事態にもなりかねない。上記の状況が示すように、標準化には各国委員との個人的、継続的交流が非常に重要で、日本はこの危機的状況を認識した少数のボランティア的貢献に頼っているのが現実である。一方、欧米諸国はもとより、中国も国際標準が今後の世界経済に大きな支配力を有する、という認識の下に戦略的に動き始めている。

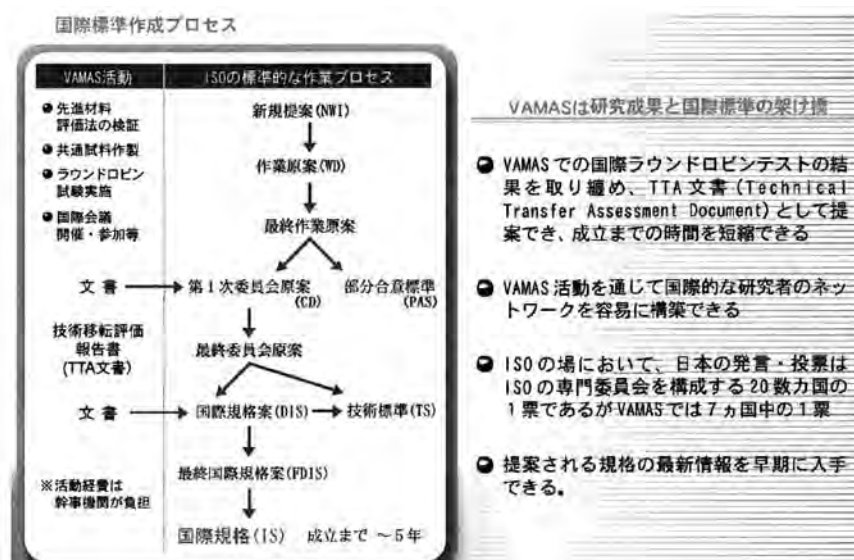


図 21 国際標準作成プロセス（NIMS パンフレットより転載）

略 語 集

A

- **AES** : Auger Electron Spectrometry 89, 91
- **AFM** : Atomic Force Microscopy 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 19, 21, 23, 58, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 82, 83, 121
- **AP** : Atom Probe 7, 16, 17, 25, 44, 90

C

- **CBI** : Confederation of British Industry 132
- **CC** : Countercurrent Chromatography 63
- **CCD** : Charge Coupled Device 53, 121, 123
- **CE** : Capillary Electrophoresis 58, 65, 66, 72, 95
- **CNT** : Carbon Nano-Tube 10, 200

D

- **DART** : Direct Analysis in Real Time 102
- **DESI** : Desorption Electrospray Ionization 102
- **DMS** : Differential Mobility Spectrometer 102
- **DSC** : Differential Scanning Calorimetry 58, 66, 67, 73, 125, 128

E

- **EDI** : Electrosprayed Droplet Impact 64
- **ELDI** : Electrospray Laser Desorption/Ionization 102
- **ERL** : Energy-Recovery Linac 135
- **ESCA** : Electron Spectroscopy for Chemical Analysis 91
- **ESI** : Electro Spray Ionization 64, 102
- **EXAFS** : Extended X-ray Absorption Fine Structure 30

F

- **FAIMS** : Field Asymmetric Ion Mobility Spectrometer 102
- **FFF** : Field Flow Fractionation 63
- **FIB** : Focused Ion Beam 16, 86, 88, 89, 90, 93, 94
- **FIM** : Field Ion Microscopy 7, 16, 25, 44
- **FRET** : Fluorescence Resonance Energy Transfer 34, 119

G

- **GC** : Gas Chromatography 60, 61, 62, 63, 69
- **GFP** : Green Fluorescent Protein 119

H

- **HILIC** : Hydrophilic Interaction

Chromatography 104, 105

- **HR-RBS** : High Resolution Rutherford Backscattering Spectrometry 56

I

- **ICG** : Indocyanine green 119
- **IMS** : Ion Mobility Spectrometer 102

L

- **LC** : Liquid Chromatography 60, 63, 68, 106
- **LC-MS** : Liquid Chromatograph-Mass Spectrometry 106
- **LIMS** : laboratory information management system 127
- **LSI** : Large Scale Integration 17

M

- **MALDI** : Matrix-asisted Laser Desorption / Ionization 36, 102
- **MCE** : Microchip Electrophoresis 58, 66, 72
- **MDA** : Multiple Displacement Amplification 118
- **MEMS** : Micro Electro Mechanical Systems 16, 23, 47, 58, 61, 66, 69, 73, 74, 80, 83, 85, 113
- **MFM** : Magnetic Force Microscopy 7, 10, 11, 20, 74, 79
- **MRAM** : Magnetoresistive Random Access Memory 90
- **MRI** : Magnetic Resonance Imaging 120
- **MS** : Mass Spectrometry 66, 67, 69,

72, 73, 102, 103, 106

N

- **NMR** : Nuclear Magnetic Resonance 33, 99, 100, 101, 134, 136, 138
- **NSOM** : Near-field Scanning Optical Microscopy 8, 13, 14, 22

O

- **OGC** : Office of Government Commerce 132
- **OM** : Optical Microscopy 17, 18
- **OT** : Other Transaction 132

P

- **PCR** : Polymerase Chain Reaction 116, 117, 118
- **PET** : Positron Emission Tomography 41, 54, 120
- **PIANOo** : Professioneel en Innovatief Aanbesteden, Netwerk voor Overheidsopdrachtgevers 133
- **PPR** : Parallel Pressure Reactor 124

Q

- **QCM** : Quartz Crystal Microbalance 76, 77, 82

R

- **RBS** : Rutherford Back-scattering Spectroscopy 44, 56, 89

S

- **SALDI** : Surface-Assisted Laser Desorption/Ionization 64
- **SBIR** : Small Business Innovation Research 132, 133
- **SCM** : Scanning Capacitance Microscope 12, 21, 79
- **SDD** : Silicon Disk Drive 35, 39
- **SEM** : Scanning Electron Microscope 17, 18, 26, 74, 79, 88, 89, 93, 95, 121
- **SERS** : Surface Enhanced Raman Scattering 32
- **SET** : Single Electron Transistor 129
- **SFA** : Surface Force Apparatus 74, 76, 77, 82
- **SFC** : Supercritical Fluid Chromatography 63
- **SIMS** : Secondary Ion Mass Spectrometry 43, 44, 56, 86, 89, 90, 91, 92, 94, 102
- **SNDM** : scanning nonlinear dielectric microscope 7, 12, 21
- **SPM** : Scanning Probe Microscope 7, 8, 9, 10, 11, 17, 18, 20, 23, 26, 74, 79, 84, 121
- **SPR** : Surface Plasmon Resonance 107, 112, 113
- **SR** : Synchrotron Radiation 27, 29, 47, 94, 135
- **SThM** : Scanning Thermal Microscope 15, 16, 73
- **STM** : Scanning Tunneling Microscopy 7, 9, 15, 19, 23, 121

T

- **TEM** : Transmission Electron Microscopy 74, 79, 86, 88, 89, 93, 95

- **TG** : Thermogravimetry 66, 67, 73
- **TLC** : Thin Layer Chromatography 63
- **TOF** : Time-of-Flight 43, 44, 56, 90, 102, 103
- **TOF-MS** : Time-of-Flight-Mass Spectrometry 102, 103
- **TOF-SIMS** : Time-of-Flight-Secondary Ion Mass Spectrometry 44, 56, 90

U

- **UFLC** : Ultra Fast Liquid Chromatography 60
- **UPLC** : Ultra Performance Liquid Chromatography 60
- **USMS** : US Measurement System 136

V

- **VAMAS** : Versailles Projects on Advanced Materials and Standards 139, 140
- **VE** : Viscoelasticity 76, 82

X

- **XFEL** : X-ray Free Electron Laser 30, 47, 135
- **XML** : Extensible Markup Language 127
- **XPS** : X-ray Photoelectron Spectrometry 86, 89, 94
- **XRD** : X-ray Diffractometry 67

執筆者一覧

■近接プローブ技術分野

長谷川哲也	(独) 科学技術振興機構／東京大学大学院理学系研究科【総括責任者】
茅根 一夫	エスアイアイ・ナノテクノロジー (株) 事業推進室
山岡 武博	エスアイアイ・ナノテクノロジー (株) 分析応用技術部
倉持 宏実	(独) 物質・材料研究機構 ナノシステム機能センター
長 康雄	東北大学電気通信研究所
斎木 敏治	慶応義塾大学理工学部電子工学科
森田 清三	大阪大学大学院工学研究科
川路 均	東京工業大学応用セラミックス研究所
谷口 昌宏	金沢工業大学大学院工学研究科
長谷川修司	東京大学大学院理学系研究科

■電磁波・励起ビーム技術分野

澤田 嗣郎	(独) 科学技術振興機構／東京大学名誉教授【総括責任者】
尾嶋 正治	東京大学大学院工学系研究科
斗内 政吉	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
濱口 宏夫	東京大学大学院理学系研究科
河合 潤	京都大学大学院工学研究科
今坂藤太郎	九州大学工学研究院応用化学部門
長我部信行	(株) 日立製作所基礎研究所
藤浪 眞紀	千葉大学大学院工学研究科
新井 正敏	日本原子力研究開発機構・J-PARC センター
工藤 正博	成蹊大学工学部物理情報工学科
上羽 貞行	東京工業大学精密工学研究所

■分離分析技術分野

小島 建治	(独) 科学技術振興機構／日本電子 (株) 経営戦略室【総括責任者】
大塚 浩二	京都大学工学研究科
内山 一美	首都大学東京都市環境科学研究科
寺部 茂	(独) 科学技術振興機構／兵庫県立大学名誉教授
豊田 岐聡	大阪大学大学院理学研究科
石切山一彦	(株) 東レリサーチセンター

■力学測定分野

大木 義路	(独) 科学技術振興機構／早稲田大学理工学術院【総括責任者】
栗原 和枝	東北大学大学院工学研究科
西 敏夫	東京工業大学大学院理工学研究科
権太 聡	(独) 産業技術総合研究所 企画本部
臼田 孝	(独) 産業技術総合研究所 計測標準研究部門音響振動科

■前処理技術分野

石田 英之	(株) 東レリサーチセンター【総括責任者】
大塚 祐二	(株) 東レリサーチセンター形態科学研究部
加連 明也	(株) 東レリサーチセンター表面科学研究部
須志田一義	(株) 東レリサーチセンター無機分析化学研究部

■注目すべき研究開発の動向

鯉沼 秀臣	(独) 科学技術振興機構／物質・材料研究機構／東京大学【総括責任者】
北口 仁	(独) 物質・材料研究機構 超伝導材料センター
吉田 佳一	(株) 島津製作所 基盤技術研究所
田中 信男	京都工芸繊維大学工芸科学研究科
羽田 肇	(独) 物質・材料研究機構 センサ材料センター
小出 康夫	(独) 物質・材料研究機構 センサ材料センター
竹山 春子	早稲田大学理工学術院先進理工学部生命医科学科
菊池 和也	大阪大学大学院理学研究科
小柳 正男	(独) 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター※
小島 勇夫	(独) 産業技術総合研究所 計測標準研究部門※
二又 政之	(独) 産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクトニクス研究センター※
古賀 健司	(独) 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門※
竹内 一郎	(独) 科学技術振興機構／メリーランド大学
蔡 兆申	(株) NEC 中央研究所ナノエレクトロニクス研究所
妙見由美子	英国大使館科学技術部

※ナノテクノロジー・材料分野 科学技術・研究開発の国際比較 2008 年度版より原稿転載

**先端計測技術分野
科学技術・研究開発の国際比較
2008 年版**

CRDS-FY2007-IC-05

平成 20 年 2 月

発行者 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
計測・産業技術グループ

〒 102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電話 03-5214-7485

ファックス 03-5214-7385

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

Copyright 2007 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
無断での転載、複写を禁じます。引用を行う際は、必ず出典を記述願います。