

■会議報告

第10回 X線顕微鏡国際会議 (XRM2010) の会議報告

星野真人 (財団法人 高輝度光科学研究センター利用研究促進部門)

今回で十回目となる X 線顕微鏡の国際会議 (The 10th International Conference on X-ray Microscopy, 以下 XRM) がアメリカ合衆国イリノイ州シカゴで行われた。アメリカで行われるのは1987年のブルックヘブン, 1999年のパークレーに次いで三回目である。前回2008年のスイス・チューリッヒでの国際会議までは3年毎に行われていた XRM であるが, 今回からは2年毎に行われることが決定している。会場となったのは, Sheraton Chicago Hotel & Towers である。ホテルの上層部からは五大湖の一つであるミシガン湖を臨むことができる一方で, ホテルの周辺部には超高層ビルが立ち並び, 自然と近代社会が調和した場所であった。学会は2010年8月16日(月)から20日(金)までの全5日間の日程で, 8月17日と19日の夕刻には, それぞれポスターセッションが組まれた。オーラルでのプレゼンテーションは招待講演も含めて65件, ポスターセッションは2日間合わせて200件以上の発表が行われた。最終日の午前中には, XRM としては新たな試みであるパネルディスカッションが行われた。テーマは, 「Nanometer Resolution in X-ray Microscopy」ということで, 第一線で活躍する研究者をパネラーとして迎えて, ナノイメージングを実現させるための各種アプローチについての紹介と, それについて学会参加者との質疑応答が行われた。日本からは, 大阪大学の三村秀和氏がパネラーとして参加しており, X線ミラーを用いたナノ集光について活発なディスカッションがなされた。午後には, シカゴの郊外にあるアルゴンヌ国立研究所内の APS ツアーが行われ, 入構には事前登録が必要であったにも関わらず, 多くの XRM 参加者が APS ツアーにも参加していた。イメージングビームラインをはじめ, ピックアップされたビームラインの担当者の説明に耳を傾けていた。

さて, 今回の XRM についての会議報告ということであるが, XRM ではこれまで伝統的にオーラル発表の平行セッションは行われてこなかったが, 今回初めて平行セッションプログラムが組まれるなど, 開発や応用を含め X 線顕微鏡分野の研究内容の多様化がうかがい知れた。X 線顕微鏡といっても, 光学素子を用いた装置をはじめ, レンズレスイメージングや CT を用いた三次元イメージングなど, 内容は X 線イメージング分野の多岐に渡っているといってもよい。XRM 期間中のすべての話題について触れることはこの報告書では不可能であるが, 特に印象に残った話題や, 前回の XRM からの技術の進歩について特筆すべき話題について報告する。



ホテル4F部分に設営されたオーラル発表会場 (Chicago Ballrooms IX & X) の様子。

まず, X 線顕微鏡においてナノメートルオーダーの空間分解能を達成するための手法についてであるが, ゾーンプレートやミラーを用いる場合と, コヒーレント回折イメージングのようにいわゆるレンズレスイメージングによる手法に大きく分かれてきている印象を受けた。これまで, ゾーンプレートのようなレンズ系を用いた光学系がいわゆる X 線顕微鏡光学系としての主流であり, それらについての開発や評価法が会議における話題の中心でもあったが, 前回スイスでの XRM 以来, レンズレスイメージング法の開発や利用例が急激に増えてきている。国内からの参加者としては, 大阪大学の高橋幸生氏によって, コヒーレント回折イメージングに集光光学系を組み合わせることにより, 3 nm の空間分解能が達成されたことが報告された。ただし, コヒーレント回折イメージングやタイコグラフィについては, これまでのゾーンプレートのような光学素子を用いた X 線顕微鏡がそうであったように, 測定手法の開発や空間分解能の向上を目的とした発表が多く見られ, 応用についてはもう少し先の話になりそうである。

今や X 線顕微鏡を代表する光学素子となっているゾーンプレートについては, 今もなお加工性能に依存する空間分解能の限界を打破するための研究が精力的になされている。前々回の XRM (2005年姫路) で大きな話題となった軟 X 線領域における 15 nm の空間分解能を持つゾーンプレート以来劇的な分解能の向上は見られなかったが, 今回もまた2005年に前述の発表を行ったアメリカ・パークレー研究所の W. Chao 氏によって 12 nm の分解能を持つ

ゾーンプレートを用いた結像型顕微鏡と、高分解能測定を可能とする照明系を含めた光学系の最適化を目指した取り組みが報告された。また、スイスの Paul Scherrer Institut (PSI) の C. David 氏によって、ゾーンプレートによる集光ビームを用いた走査型顕微鏡で、9 nm L & S のパターンが解像できたことが報告された。しかしながら、両者ともに 1 keV 前後の低エネルギー領域での成果であり、高エネルギー領域ではまだその域には到達しておらず、それは今後の加工技術の進歩に依存しているといえる。ゾーンプレートを含めた光学素子の開発において、新しい素子形状などのアイデアと試作・評価結果は、海外の研究グループによって頻りに発表されているという印象を受ける。これについて考えてみると、海外の放射光施設の場合、光学素子をインハウスで製作もしくは製作者側と使用者側が密接に連携できており、アイデアを製作に直接反映できるというのが大きな強みなのかもしれない。また一昔までは、XRM の発表の中でもゾーンプレートを用いた結像光学系の開発が一つの大きな研究課題であったが、最近ではその結像光学系自体が汎用的な装置すなわち市販品となってしまっており、アメリカに拠点を置く Xradia Co. Ltd では、放射光施設への据え置きを目的とした装置一式として販売を開始している。数年前までトップデータを出していた性能を持つ X 線顕微鏡も、今や購入できるようになってしまっている。今回の XRM では、その装置を用いて測定を行って得られた結果も数多く報告されていた。X 線顕微鏡が開発の段階から、それを用いて何かを行おうとする応用の段階に移行しているという印象を受けた。その結果、オールラウンドセッションにおいても、生体試料や物質・材料に関する話題として個別にセッションが設けられ、パラレルセッションが組まれるなど、プログラムの後半は主に応用に関係した発表が大半を占めていた。

着実に性能が向上してきているのが X 線ミラーであり、特に全反射ミラーや多層膜ミラーを用いた集光では、日本の技術が世界をリードしている印象を受けた。このまま順調に性能が向上していけば、近い将来 1 nm サイズのビーム集光も夢ではなくなってくるかもしれない。ただし、サブ 10 nm の集光を実現させるためには、大阪大学の山内和人教授の発表でも示されたとおり、超精密加工をもってしてもミラー単体では形状誤差が回折限界集光に与える影響を無視することはできず、オンラインで形状誤差による波面のずれを精密に測定することと、それを元に波面位相を補正することが必要になってくるなど、加工技術だけではなく、測定技術の高度化も伴わなければならないことを痛感させられた。

新しい光学素子の開発に関する最近の話題としては、ゾーンプレートよりも高い空間分解能と回折効率が得られるマルチレイヤーラウエレンズ (MLL) の開発が活発化してきている。アメリカの APS で先駆的に開発されたのを皮切りに、国内でも兵庫県立大学のグループと NTT-

AT が共同研究で開発を行っている。兵庫県立大学の小山貴久氏 (現 SPring-8) のプレゼンテーションでは、MoSi₂/Si のレイヤー構造を持つ MLL の開発と性能評価が紹介され、一次元集光で 13 nm のビームサイズが報告された。また、これまで一次元の集光であったものを、テーパ形状の心線に多層膜構造を作成することにより、二次元での集光を可能とする二次元 MLL 素子の第一報が報告された。今回の XRM の発表のなかでも、前回の XRM では見られなかった新しい成果の一つであり、今後のさらなる性能向上や応用利用が期待される。また、次期光源としての XFEL を用いたイメージングや光学素子についても報告され始めており、今後 XFEL の普及とともに、パルスイメージング法として X 線顕微鏡への応用も増えていくのではないと思われる。ただし、強力な XFEL に曝されたときの、光学素子や試料の放射線損傷については深刻な問題であり、それを解決できるかどうか X 線顕微鏡適用への鍵となりそうである。

結像光学系やマイクロ・ナノビーム光学系以外の発表で特に目を引いたプレゼンテーションは、生体試料のような主に軽元素で構成された軟組織の高感度イメージング用に開発されている X 線 Talbot 干渉計を用いた位相イメージング法の普及についてである。X 線 Talbot 干渉計は、可視光における Talbot 効果を X 線領域で実現させたものであり、東京大学の百生敦准教授を中心に開発された手法である。Talbot 干渉計の場合、結晶干渉計に比べて光源の単色性やその他の測定条件に対してロバストであることと、結像光学系にも応用できることが、広く受け入れられている理由ではないかと思われる。放射光のような部分的にコヒーレントな光源であれば、二枚の透過型回折格子だけで実現できることにより、位相イメージング・位相 CT の手法として定着してきている。二次元格子を用いた場合の X 線 Talbot 干渉計についても百生准教授らによって実現されているが、従来の一次元によるものに比べて、位相回復という点で見た場合、位相回復エラーに伴うアーチファクトが低減できるという特徴があるようである。スイス・PSI の T. Weitkamp 氏による報告では、実際にアーチファクトが低減されることが示されていた。今後世界中で利用例が増えていくのではないと思われる。

検出器関係としては、オーストラリアシンクロトロン of D. Paterson 氏らによって紹介された Maia 検出器が興味深かった。Maia 検出器は、384 個ものシリコンダイオードを輪帯配置に並べることで、大きな取り込み立体角を実現し、カウントレートも非常に高いこと (10⁷/s) が特徴のようである。これまでの蛍光 X 線顕微鏡の概念では、走査型光学系では高精細になるほど測定時間が増えてしまい、特に蛍光 X 線 CT では三次元ボリュームデータを高い空間分解能ですべて測定するには莫大な測定時間を要していた。Paterson 氏の発表では、蛍光 X 線 CT における三次元データ高速測定に対する取り組みや、実際の測定例

として30 M ピクセルに及ぶ高精細二次元元素マッピング像や珪藻の高分解能三次元元素マッピング等が紹介された。顕微鏡光学系として見た場合、光学素子の開発やその改良に重点が置かれがちであるが、検出器も光学系の重要なファクターであり、蛍光 X 線に限らず、今日様々な場所や状況で使われている画像検出器の改良についても重点を置くべきだと思う。

学会の総括としては、開催が二年おきになったことで、測定手法や技術の劇的な進歩は見られなかったが、空間分解能や時間分解能など X 線顕微鏡としての装置の性能は着実に底上げされてきていることが実感できた。また、X

線顕微鏡が、光学顕微鏡や電子顕微鏡のように分析ツールとして会議に参加しているコミュニティー以外の研究者から注目されるようになるためには、アプリケーションの発掘もないがしろにはいけないと思う。

今回の XRM は、2 年後の2012年に中国・上海で開催されることが決定した。アジアで行われるのは、2005年姫路で行われた XRM 以来二回目である。また、開催間隔が2年ごとになったことにより、次次回2014年の XRM の開催場所についても決定され、2014年の XRM はオーストラリアのメルボルンで行われる。