

X 線イメージング手法の最近の話題

(独) 理化学研究所播磨研究所・放射光科学総合研究センター

石川哲也

1. はじめに

X 線は、波長の短い電磁波であり、目に見える可視光同様「光学」の原理に従う。すると、一般的に電磁波を用いて観察を行う場合の解像度は波長の程度になるため、ナノ～サブナノメートルレベルでの、いわゆる原子分解能での構造観察には、サブナノメートルの波長をもつ X 線が利用されることになる。しかしながら、放射光出現以前の X 線源は非常に弱く、原子や分子を結晶化して X 線回折を起こさせることによってはじめて原子レベルでの構造解析が可能となった。放射光を使っても、その事情は殆ど変わらず、たとえばタンパク質分子の構造解析では、分子を結晶にするプロセスが非常に重要である。しかしながら、最近の高輝度放射光を利用すると、適切な品質をもつ結晶の作成に成功しさえすれば、かなりの確率で構造決定が可能になっている。

一方で、光子としての X 線は量子力学の原理にしたがい、物質と相互作用する。たとえば、原子に X 線をあてて内殻電子を励起し、そこに外側の電子軌道からの電子が落ち込む時に発生する蛍光 X 線は原子の種類によってユニークなスペクトルをもつため、これを利用して構成元素の分析を行う方法が発達してきた。X 線蛍光分析とよばれるこの手法は、和歌山ヒ素事件での亜ヒ酸分析にも使われたが、ナノ集光した X 線ビームで試料上を走査して、場所の関数として蛍光 X 線をマップすると、試料内の元素分布の高位置分解能でのイメージングが可能となる。

私たちが、眼でものを見る場合、対象物から散乱された光(=波長 0.数ミクロンの電磁波)を、眼の水晶体(=光学レンズ)で網膜上に結像し、そこで光シグナルを電気シグナルに変換して脳に送り、対象物の形状や色を認識している。波長の短い X 線でも、水晶体に匹敵するような高性能光学レンズが存在するのであれば、同様な結像系を構成することによって原子レベルの実像観察が行えるのであるが、残念ながら X 線領域にはそのようなレンズは存在しない。レンズの作用は数学的にはフーリエ変換で表わされるので、対象物から散乱された X 線波動場が位相を含めて解っていれば、それを数学的にフーリエ変換することによって実像を得ることが可能である。しかしながら、X 線検出器は位相の消えた X 線強度のみを記録するものであり、その強度データのみからでは実像の回復はできない。ところが、入射電磁波がコヒーレントである場合、対象物からの散乱強度をナイキスト周波数より細かい間隔でサンプリング(オーバーサンプリング)すると、強度情報から位相情報が回復され、従って散乱強度情報のみから実像を数学的操作によって求めることが可能になる。このイメージング手法は、コヒーレント散乱イメージング法として、最近各所で精力的に研究がすすめられている。高輝度放射光でコヒーレント成分を選択して実験を行う場合、現状で数ナノメートルの空間分解能に到達しているが、現在建設中の X 線自由電子レーザーからの超高強度 X 線を用いると、原子レベル分解能でのイメージングが可能になると期待されており、タンパク質分子からの散乱 X 線による構造解析の可能性が議論されている。

2. 結晶構造解析

理化学研究所放射光科学総合研究センター(以下 RSC)では、アンジュレータ1本、偏向電磁石3本のビームラインをタンパク構造解析用に運用してきたが、旧式化したアンジュレータビームラインと偏向電磁石ビームラインの1本を他目的に転用し、新たにターゲットタンパクプロジェクトでマイクロビーム利用が可能なアンジュレータビームラインの建設を進めている。ターゲットタンパクプロジェクトの期間内は、当該プロジェクトで占有的に利用されるが、プロジェクト終了後は理研ビームラインとしての運用ができるものと期待している。

3. 走査型蛍光 X 線顕微鏡

JASRI および大阪大学と協力して理研ビームライン BL29XU で走査型蛍光 X 線顕微鏡の開発を進めている。現状では100ナノメートル以下の X 線集光が可能であり、その分解能での二次元元素分布マッピングが可能になっている。生物試料測定用のクライオステージの開発も進められており、細胞内での元素分布計測やその時間変化追跡などが行われている。

4. SPring-8 でのコヒーレント散乱イメージング

UCLA のグループと協力し、西野吉則専任研究員を中心に SPring-8 でのコヒーレント散乱イメージング開発を進めてきたが、UCLA グループから Song 博士を独立主幹研究員として迎え、研究体制の強化を図っている。最近では、ヒト染色体の三次元電子密度分布計測、集光 X 線による高分解能コヒーレント散乱イメージング法開発などが進められている。

5. XFEL でのコヒーレント散乱イメージング

XFEL 利用研究開発は、文部科学省内局予算で進められており、コヒーレント散乱イメージングに関しては、ナノ分野では京都大学の松原英一郎教授が代表となり、またライフサイエンス分野では慶応大学の中迫雅由教授が代表となって、機器開発が進められている。またここで必要となる大規模計算については、日本原子力研究機構の河野秀俊博士が代表となって開発を進めている。

これらの研究開発には、RSC メンバーも多数参加する一方で、試験加速器での 50~60 ナノメートル極端紫外光を利用するコヒーレント散乱イメージング機器開発が進められている。

6. おわりに

XFEL の利用開始まで、残すところ 2 年となり、RSC 内での利用に関する議論の高まりが期待される。本研究会は、絶好の機会であるので、是非諸賢の積極的な参画をお願いしたい。また、SPring-8 でのイメージング手法に関しても、開発段階から利用段階への移行期を迎えているように思われるので、今後専用ビームラインの設置をも視野に入れた利用機会の拡大を図っていきたい。