

X線・極端紫外光における真の回折限界に向けて

籠島 靖^{1,†}・上杉健太郎²・亀島 敬²・高橋 幸生³・武市 泰男⁴・
竹内 晃久²・原田 哲男¹・松本 浩典⁵・三村 秀和⁶・矢代 航³

はじめに

世間では、よく縦軸と横軸などといった物事の視点を論じることがある。X線・EUV結像光学研究グループは、この論法がしばしば適用されてきた研究分野といえる。縦軸としてはエネルギー領域、光学系の種別など、横軸としては物質科学、生命科学、宇宙科学などが挙げられよう。本稿では、縦軸の視点でX線・EUV（極端紫外）結像光学の将来を展望してみる。

1. 研究分類ごとの現状認識と近未来

縦軸の例として、顕微鏡、望遠鏡、リソグラフィーなどが考えられる。顕微鏡には走査型、結像型、コヒーレント回折イメージング（CDI）などがある。また、汎用の立ち位置にあるトモグラフィー（CT）や基幹技術である検出器の存在感は大きい。本稿では、①反射鏡・ゾンプレート（ZP）、②結像型・走査型顕微鏡、③位相回復法（CDI・タイコグラフィー（ptychographic CDI; PCDI））、④CT、⑤望遠鏡・天文学、⑥EUVリソグラフィー（EUVL）、⑦画像検出器を挙げる。相互に往交するが、関係者には馴染みのある分類と考える。

1.1 反射鏡・ゾンプレート

Osaka mirror とよばれる高性能X線反射鏡が、大阪大学のグループによって開発された。顕微鏡において回折限界の集光・結像イメージングが可能な製造技術が確立され、民間企業に技術移転された。複数の独創的な技術の組み合わせで製造されており、他者が容易に追いつけない状況である。放射光（SR）施設で利用される反射鏡の世界的なシェアも圧倒的であり、今後も日本が反射鏡の研究をリードしていくであろう。現在、上記製造技術のX線望遠鏡用

反射鏡への応用が進んでいる。これまで望遠鏡用高精度ウォルターミラー（WM）は米国とヨーロッパのグループが主体となってきたが、日本も参入した。試作鏡の性能から、チャンドラ望遠鏡と同様の0.5秒角の角度分解能をもつWMの実現が期待できる。

ZPは、電子線リソグラフィーによる製作が主流である。高アスペクト比の製作が困難なため、硬X線（HX）では位相ZPの最適膜厚は難しい。最近、アポダイゼーションZPにより30 keVの結像も可能となっている。一方、多層膜積層法による製作技術が進み、10 nm以下の空間分解能での実用が視野に入ってきた。

1.2 結像型・走査型顕微鏡

ナノメートル～マイクロメートルの構造領域は、電子顕微鏡（電顕）と光学顕微鏡（光顕）がカバーする領域の間にあることから、多くの分野において未知の領域となっている。電顕が空間分解能ではるか先を行っている中で、特にSR顕微法の利点は分光や回折などとの組み合わせが可能など、他手法では困難な情報が得られることである。軟X線（SX）とHXに分けられるが、SXは走査型による有機材料などの分光的利用、HXは結像型CTによる三次元（3D）観察のニーズが高いように思う。

空間分解能は、SXでは30 nm、HXでは50 nmが日常的になっている。CTによる3D構造計測では実用レベルの空間分解能は100 nm前後であるが、これが数十nmに達すれば応用領域は格段に広がる。非破壊という利点は、高エネルギー化によりさらに高まる。PCDIは走査型顕微鏡の上位互換であるという考え方があるが、幅広い需要に応えるには実験・解析ともに簡便さが必要で、走査型顕微鏡の存在価値は今後も継続すると考える。

1.3 コヒーレント回折イメージング・タイコグラフィー

21世紀の幕開けとともにCDI、続いてPCDIが登場し、新しい時代に突入した。計算機アルゴリズムにより位相問題を解くため、光学素子の加工精度で決まる空間分解能を超えた。広視野・高空間分解能を実現する新原理の提案と実証に関する光学の基礎研究が進められている。現状で

¹兵庫県立大学

²高輝度光科学研究センター

³東北大学

⁴高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所

⁵大阪大学

⁶東京大学

[†] E-mail: kagosima@sci.u-hyogo.ac.jp

は、数 μm 立方の 3D 空間を 10 nm 程度の 3D 分解能で観察することが可能になっている。コヒーレントフラックスが像質を決めるため、画期的な進歩には超低エミッタンス SR 光源の開発が求められる。次世代 SR 施設における主戦力である。

1.4 C T

CTは多くの画像法に適用でき、3D 非破壊観察には不可欠の存在である。材料破壊過程のその場観察や希少試料の観察などに広く活用されている。物質に起こる現象は必ず 3D 的であるので、本質的な理解に 3D 観察は欠かせない。主要な SR 施設において、結像型顕微鏡により 100 nm 程度の空間分解能で利用されている。CT は試料の回転が不可避で、それが時間分解能の律速となる。およそ 10 ms が達成されている。位相コントラスト CT の登場で密度の分解能と定量性が一気に向上した。単純な系では mg/cm^3 以下を達成している。最近、試料を回転しない SR 白色マルチビーム CT が提案され、時間分解能 1 ms、空間分解能で 40 μm 弱が達成されている。

1.5 望遠鏡・天文学

米国チャンドラ衛星により角度分解能 0.5 秒角が達成され、欧州 XMM-ニュートン衛星により大面積による深宇宙の観測が可能になった。これら巨大衛星に対し、日本は現在比較的小型でありながら、精密な X 線分光を可能にする X 線マイクロカロリメーターを搭載する衛星 (XRISM: X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) 計画を推進している。一方で、10 keV 以上の HX での高角度分解能観測や、X 線偏光観測という分野は未開拓であり、そのための技術開発が世界的に行われている。XRISM は 2022 年度打ち上げ予定であり、2020 年代の世界の X 線天文学をリードしていく存在となるだろう。

1.6 EUV リソグラフィ

EUVLによる半導体量産が2019年より開始された。ペリクル開発など新たな素子開発では、水素環境での高強度 EUV 照射装置など新しい評価を求められることが多い一方で、フォトレジストの感度測定、多層膜の反射率測定など基本的な測定へのニーズは依然として高い。現在、ハーフピッチ 13 nm の微細回路が実用化され、スマートフォンなどに採用されている。6 年後にはハーフピッチ 7 nm のパターンが実用化される見込みである。10 年後には EUVL でのマルチパターンニングにより、究極の 5 nm 以下のパターンが実用化されるかもしれない。

1.7 画像検出器

X 線画像検出器の解像性能は、結像型顕微鏡や CT において空間分解能や視野を決める重要パラメーターである。

その解像力は X 線検出部であるシンチレーターで生じる光拡散によって制限されてきたが、光学ガラス級の光学品質を備えた薄膜シンチレーターの開発により、シンチレーター光の回折限界に近い 200 nm のラインアンドスペース (L & S) を可視化する性能に到達している。近年では、サブ 100 nm L & S 解像性能と X 線フォトンカウンティング感度を同時に具備するシンチレーター固浸光学系が提案されている。X 線光子ごとに検出位置を局在化する超解像処理が可能であり、画像検出器の空間分解能はサブ 10 nm まで向上する可能性がある。

2. 20 年後、30 年後の夢

高解像度 X 線フォトンカウンティング光学系・10 MHz オーダーの超高速フレームレートカメラで構築された超解像 X 線画像検出器で、SR 実験においてサブ 10 nm 空間分解能と時間分解能を兼ね備えた X 線画像検出が可能となる。CT では、究極的には「回す」という動作がなくなることが望ましく、シートビーム照射などのシングルショットで内部のスライス像を得る技術が可能となる。元素分布、結晶構造、化学組成、分子構造などのリアルタイム 3D マルチモードイメージングが可能となっている。一方、コンパクトな卓上 X 線レーザーも出現し、ピコ秒オーダーの X 線 CT の実現が期待できる。

SR により集光サイズが波長限界に達した走査型顕微鏡が実現し、オーバーサンプリング的計測法を組み合わせ、1 nm あるいはそれ以下の空間分解能が得られている。CDI により原子分解能が実現され、透過電子顕微鏡では観察が難しい厚い試料の結晶格子像が取得できている。

より遠くの宇宙をより鮮明に観測するには大面積の望遠鏡が必要である。一方で、衛星や飛行体を使った観測が必須であるので、観測装置のサイズ・重量には厳しい制限が伴う。軽量かつ大面積で 10 秒角を切る高角度分解能の望遠鏡が実現される。

イメージングの究極は真の回折限界、すなわち波長程度の空間分解能である。顕微鏡では、光学素子を用いた結像・集光で 1 nm が実現できそうである。CDI で、さらに一桁ほど高い数 Å が期待できるであろう。望遠鏡において角度分解能を上げるには、原理的に口径の増大が必須である。反射鏡が大きくなるほど形状精度を波長程度まで上げるとは困難を極める。0.1 秒角が数十年先の目標であろう。X 線・EUV 光学の重要度は、顕微鏡・リソグラフィ・天体観測などにおいて一層高くなっているはずである。