

X線顕微鏡の将来 微小部分分析ツールとしての

籠島 靖

兵庫県立大学
大学院物質理学研究科工光学分野 教授
産学連携・研究推進機構放射光ナノテクセンター
センター長

半導体の集積率向上の長期傾向を表すムーアの法則は有名であるが、放射光X線源の光源輝度の向上にも類似の法則が成り立っていることが知られている。すなわち横軸に年、縦軸に光源輝度（単位：photons/sec/mm²/mrad²/0.1 % BW）の対数をプロットするとほぼ直線に乗る。C. Jacobsen氏の分析によると¹⁾、X線管（1960年）から放射光X線源（偏向電磁石光源）については1980年代中頃までは高輝度化の向上は概ね一本の直線に乗るが、1980年代初頭のアンジュレータ光源（挿入光源の一種）の登場は縦軸の切片が異なる新たな直線を生み出し不連続な増強をもたらした。謂わば、ムーアの法則がバージョンアップされた。その後電子蓄積リングの低エミッタンス化、真空封止アンジュレータの発明、アンジュレータの短周期長化などにより概ね一本の直線に乗る進歩を続けている。興味深いのは2本の直線の傾きがほぼ等しいことであり、まさにムーアの慧眼といえよう。さらに2009年にX線自由電子レーザーが実現し、アンジュレータ光源の登場時よりも遥かに大きい不連続な増強を導いており驚異的である。現在のX線自由電子レーザーはパルスレーザーであるが、仮にCWレーザー（連続波発振レーザー）が実現すれば、電磁波のサイエンスはまさに未踏の領域に達するであろう。可視光レーザーの登場が科学技術分野のみならず我々の一般社会にも大変革をもたらしたことは周知の事実であり、科学技術の進歩は必ず一般社会に大きな恩恵を与えてくれる。X線レーザーの実用化の一般社会への波及効果は今のところ全く未知数であるが、学術分野では革新的な成果が着実に生み出されている。

X線源の輝度がこのように指数関数的に発展してきているのであるから、当然ながら光源の輝度が性能を支配するX線分析技術も同様に発展してきている。私は卒業研究生時代から約30年にわたり放射光とX線顕微鏡をキーワードとする研究に携わってきた。放射光を用いたX線顕微鏡では、X線光学素子を用いて微小ビームを生成し、それをプローブとするタイプが分析に供される。このタイプは走査型X線顕微鏡と呼ばれており、P. HorowitzとJ. A. Howellがオリジナルと言われている²⁾。顕微鏡の最も重要な性能が空間分解能であるという主張に異論は少ないであろう。そうであるが故に、いかに微小なビームを作れるかということに、どうしても我々装置開発者は興味が偏ってしまいがちである。従って、X線顕微鏡研究者のコミュニティでは、謂わば、微小ビーム生成合戦が繰り広げられてきた。現在硬X線では斜入射多層膜鏡を用いて³⁾、軟X線ではフレネルゾーンプレート（X線の回折・干渉効果を利用してX線を集光する光学素子）を用いて⁴⁾、それぞれ10 nmを超える空間分解能が報告されている。驚くべきことにというかむしろ当然というべきか、X線集光ビームの微小サイズ（＝空間分解能）にもムーアの法則が概ね成り立っていることがJ. Kirz氏とC. Jacobsen氏により指摘されている⁵⁾。より高輝度の光源の開発がさらなる微小ビーム生成のドライビングフォースとなっている。科学技術の発展における相乗効果の一例である。

電子顕微鏡にしろ、光学顕微鏡にしろ、そしてX線顕微鏡にしろ、波動をプローブとする以上、空間分解能は回折限界に縛られる。すなわちプローブの波長程度より小さい構造は観察できない。これは量子力学における不確定性原理と同じ原理である。光学顕微鏡ではこの限界が打ち破られ、スーパーレゾリューション（超解像）の実現により2014年度のノーベル化学賞が授与されている。さてここで、果たしてX線顕微鏡では回折限界に達することができるのであろうか、できるとすればそれはいつ頃であろうかと夢想してみるのもあながち無駄なことではなかろう。前述したX線集光ビームの微小サイズの進歩を外挿すると2020年代後半頃には1 nmの微小ビームが実現しそうであるが、X線の波長が0.1 nm前後であることを考えると、真の回折限界の実現は随分と先になりそうである。超えなければならない高い壁がまだまだ多く待ち受けている。

X線顕微鏡の空間分解能は電子顕微鏡には現状とても及ばないが、X線の最大の強みはその透過性にあると私は考えている。軟X線であれば細胞など生体試料を、硬X線であれば半導体・無機材料・金属材料などを、水溶液中・大気中・特殊環境下で電子顕微鏡に比べれば簡便な前処理で構造を観察できる。特に生体試料では薄片化や染色をせずに「生きたまま」の状態すなわち「機能しているさま」を観察できる可能性があり、生命科学への寄与が期待されている。さらにコンピュータトモグラフィー（断層撮影）の技術を適用すれば非破壊で内部構造を3次元的に可視化できる。すなわち2020年代後半頃にはナノメートルの空間分解能で3次元内部構造の可視化が実現するかもしれない。顕微の世界への夢は広がるが、その時に備えて半導体・無機材料・金属材料などについても放射線損傷の影響を真剣に考えておく必要があると思われる。

以上の議論ではコヒーレントX線回折顕微法（X線の回折パターンから計算機により試料の拡大像を得る顕微法）に触れていない。これはアンフェアな態度と言われるかもしれない。X線回折顕微法は1999年に始まった新しい手法で⁶⁾、光学素子を用いずにナノメートルオーダーの構造の観察が可能となっている。現在、X線自由電子レーザーにおける顕微イメージングのメインプレーヤーとなっており、その存在感は非常に大きい。ここでは光学素子を使ったX線「顕微鏡」による微小部分分析に話を限定したこととしてご理解いただきたい。

X線顕微鏡は分析ツールとしては認知度がまだまだ低いのが実情である。拙文がその向上に繋がれば望外の喜びである。

文 献

- 1) <http://www.fsruo.fi/images/files/biomed115/Jacobsen.pdf>
- 2) P. Horowitz and J. A. Howell, *Science* **178**, 608-611 (1972).
- 3) H. Mimura *et al.*, *Nature Physics* **6**, 122-125 (2010).
- 4) I. Mohacsi *et al.*, *Scientific Reports* **7**, 43624 (2017).
- 5) J. Kirz & C. Jacobsen, *J. of Physics: Conf. Ser.* **186**, 012001 (2009).
- 6) J. Miao *et al.*, *Nature* **400**, 342-344 (1999).



略 歴

- 1990年 筑波大学大学院博士課程工学研究科物理学専攻修了、工学博士（筑波大学）
- 1990年 高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）放射光実験施設測定器研究系助手
- 1994年～1995年 ローレンスバークレー国立研究所（米）客員研究員
- 1996年 姫路工業大学理学部助教授
- 2004年 兵庫県立大学大学院物質理学研究科教授
- 2013年 兵庫県立大学産学連携機構放射光ナノテクセンター長(兼務)
- 2016年 兵庫県立大学産学連携・研究推進機構(組織名変更)放射光ナノテクセンター長(兼務)
- 現在に至る

主な受賞歴

- 1994年 応用物理学会賞論文賞