

X線イメージングの現状と将来展望

兵庫県立大学大学院物質理学研究科 籠島 靖

X線をイメージングのプロブとしてとらえた場合、その特長の一つに非破壊性がある。X線による非破壊イメージングは、他のプロブでは困難な種々の分析評価法を可能にし得る。様々な材料（半導体、金属・無機、有機・高分子、先端複合材料等）について、状態（密度、元素組成、電子状態、結晶構造等）を位置の情報として分析する技術、すなわちイメージング、の高度化への要求は増す一方である。先端材料の開発の進歩は目覚ましく、評価技術が追いついていないのが現状である。半導体素子の微細化技術の発展を例にすると、2004年では素子サイズが90ナノメートルの製品が出荷され、2005年には65ナノメートルの製品の量産化が始まるという。X線では、単一素子をプロブすることが難しい状況になってきている。半導体素子にかかわらず、多くの材料の高度化には微細化が伴う。従って、先端材料を分析するために、マイクロビームX線顕微鏡の実用化とその普及が待たれるのは必然と言えよう。

X線顕微鏡の特長を論ずるとき、非破壊性に加えてX線の短波長性が挙げられる。X線の波長は1オングストローム前後なので、原理的には原子オーダーの高空間分解能を可能とする。X線顕微鏡に電子顕微鏡との相補的な役割が期待されている所以である。現状のX線顕微鏡の空間分解能は、軟X線顕微鏡で15 nm前後（約10波長）、硬X線で50 nm前後（約500波長）である。これらは光学素子の加工精度で制限されており、波長で決まる真の意味での回折限界にはまだかなりの距離がある。高い空間分解能と実用的な強度を得るには放射光を光源とする必要があるが、このことがX線顕微鏡の普及の律速要因の一つになっている。逆に言うと、そこにSPring-8や次世代放射光源に課される役割があり、また託される夢があると言えよう。

X線顕微鏡の高度化には、放射光源自体の高度化も必須である。例えばSPring-8のアンジュレータ光は世界最高輝度を誇っているが、10 keVのX線におけるコヒーレントフラックスの全光束に対する割合は、わずか0.04%に過ぎない（マイクロビーム実験では実際に0.04%だけしか使っていない。それ以上使うとビームサイズが大きくなってしまう）。つまり、イメージング研究の進歩はSPring-8にとどまらず、ERLやFELなど放射光源の将来計画とも密接にリンクしている。

X線顕微鏡は「構造と機能・性質の関係」の解明に大きく寄与する。試料に結晶性を求めないので、回折・散乱法を適用できない系には唯一の分析手段である。例えば、物質・材料科学分野においては、半導体量子ドット・磁性ドット等の新規ナノ構造体の電子状態の解明、生命・医学分野においては、細胞内の物質・情報伝達、遺伝情報の発現、がん細胞の発生等の機構の解明に重要な役割を果たすことが期待される。IT、

環境、地球科学から、考古学、犯罪捜査・鑑定に及ぶ広範な分野でその威力を発揮し得る。一方、実用的な性能を有するには放射光が不可欠なので、特に軟 X 線の高輝度光源の早期実現が望まれる。

X 線顕微鏡の電子顕微鏡との相補的な機能をより強化するには、空間分解能の一層の向上が求められる。現状の光学素子の製法の高高度化で 10 nm の空間分解能は近い将来達成されるであろうが、光学素子を用いない広義の X 線顕微鏡、すなわち回折顕微法やホログラフィー顕微鏡によってブレイクスルーがなされる可能性がある。X 線顕微鏡は、電子顕微鏡では困難なサブナノメートルレベルの三次元観察を実現し得る次世代の基盤技術である。究極の X 線光源、すなわち X 線レーザが登場した場合に備えてその準備を現在の高輝度光源を利用して進めておく必要がある。

講演では、放射光イメージング研究の現状を紹介し、“サイエンスのビジョン (夢)”を語るきっかけを提供したい。