

ナノテクノロジー、物質・材料科学における利用研究の展望

東京工業大学 理工学研究科 物質科学専攻、ERATO, JST

腰原 伸也

フェムト秒のX線パルス発生技術の確立は、物質科学分野の研究者の永年の夢である。その利用研究には大きく分けて3つの方向性がある。一つは励起光源そのものとして利用する方法である。この場合には、パルスX線による高強度電場という特殊な環境下に置かれた原子や分子の超多価イオン化やクーロン爆発等の種々の新現象の発現が期待されている。とりわけ昨今では、フェムト秒レーザーによる超高励起場での実験から、原子周辺の電子の波動関数の立体像把握等へも、この種の超高エネルギー励起が活用できることが報告され、今後の展開が楽しみな分野となっている(Nature 432 (2004) 867)。また電子線そのものを超短パルス大電流として利用した、超高強度磁場の実験等も報告され(Nature 428 (2004) 831)このような利用法にも注目が集まりつつある。さらにフェムト秒X線パルス励起による放射線化学反応の初期過程研究への利用も注目を集めている。

二番目の利用方向は、超短パルスレーザー等の他の励起源と組み合わせて、FELから発生するX線を検索光として利用する、ポンププローブ法である。この種の実験では、まさに化学反応や電子格子相互作用に起因する物性変化の「動画」をとらえることが可能となるため、超高速光電子デバイス開発のための機構解明や生体物質も含めた動的構造科学、レーザーアブレーションといったプロセス科学 (Science 308 (2005) 392) 等々、広範な基礎、応用科学に利用できることが期待されている。特に近年発達の著しい電子相関系物質においては、その物性の鍵を握る種々の素励起が関与する電子的、磁氣的、誘電的素過程の時間領域がフェムト秒オーダーと推定されるため、その格子構造のみならず、電子密度解析等との組み合わせによる新しい動的特性解析技術の登場が待望されている。従来の半導体に変わる強相関物質デバイス科学を切り開くという視点でも、FELによるパルスX線技術の発達への期待は大である。さらに超短パルスX線を用いた各種X線吸収分光法との組み合わせによる、実用的な動的分析手段としての研究も進んでおり (Chem. Rev. 2004, 104, 1781-1812)、光触媒や表面化学反応の局所電子状態変化等も含んだ、一般的な超高速構造変化研究手法として幅広い利用が広がることが期待されている。さらに、X線強度が強大化すれば、衝撃圧縮下の構造変化のような不可逆現象における構造変化研究への応用も大きく広がるであろう。一方で、光源の低繰り返し、さらにはピーク強度の強大性等の問題も指摘されている。SLAC-LCLSでは、パルス長230フェムト秒 (FWHM)、ピーク輝度 10^{32} photons/sec/mm²/mrad²/0.1%BWが見込まれている。この輝度は、ナノスケールの物質構造解析を行うには十分であり、むしろダメージによる試料の損傷が問題となる。また、ポンププローブ実験を行う際には、X線とレーザーとの同期ジッター (1ピコ秒以下)、X線ビーム

の位置安定性（1ミクロン以下）が実現できるかどうか、技術的な課題である。この点に関しては、今後、もっと時間分解能が高い手法を用いての事前検討実験との組み合わせが鍵となると考えられる。

今一つの方方向性は、コヒーレンスを利用するものである。コヒーレントX線による物質のX線散乱から、結晶、非晶質を問わず実空間での物質構造を再構成することができる（いわゆるX線回折顕微鏡）。この方法により原子レベルの分解能で、ナノスケール材料の内部構造観察が可能。（Proc Natl Acad Sci U S A. 2003, 100 110-112; Phys. Rev. Lett. 2002, 89, 088303）たとえば物質内の微細構造や、結晶全体にわたるドメイン構造など、電子顕微鏡では得られない、物質の原子レベルでのバルク構造に関する知見が得られると期待される。このような、空間コヒーレンス応用が時間特性と組み合わせられれば、局所励起からナノスケール、マクロ相への発展過程が観測できることとなり、物質科学にとって極めてインパクトの大きな装置となるであろう。

講演では、従来の「静的構造」という枠組みをはずしさえすれば、「物性と構造」という古典的ともいえる用語の背後に膨大な未踏領域があることを、我々の研究を実例として紹介したい。そしてこの未踏領域を照らす光としての超高速X線パルスが、スピントロニクス、超高速光電スイッチデバイス等、基礎・応用両面でもたらすであろうインパクトについても時間が許す範囲で述べる予定である。また、この種の新装置利用がもたらす「未見の自己発見」を可能とするための利用体制に関しても、時間が許す範囲で私見を述べたいと考えている。