

SPring-8 における固体分光研究のこれからの 10 年

The Next Decade for Solid State Spectroscopy at SPring-8

固体分光研究会

Solid State Spectroscopy Research Group

曾田 一雄, 名古屋大学

今田 真, 立命館大学

Kazuo Soda, Nagoya University

Shin Imada, Ritsumeikan University

固体分光研究会では、SPring-8 としては比較的低エネルギー領域に属する赤外から真空紫外線・軟 X 線を経て硬 X 線までの高輝度光を利用した新しい固体スペクトロスコピーを開拓することを目的とする。特に、赤外から硬 X 線までの広い範囲の光子エネルギーを利用する研究、SPring-8 から発生する放射光の高輝度性を利用した時間分解分光・微小領域分光分析、および、自由電子レーザーのコヒーレンス利用につながる研究も積極的に推し進める。また、この最先端固体分光法を利用して物性評価・機能材料創製が推進されると考える。

具体的には、世界をリードしてきた現在のビームラインに装備されている、あるいは、装備されつつある装置を用いた研究の延長線上にある「時間分解光電子顕微鏡」、「時間分解光電子回折測定」、「原子層分解回折分光法」、「多重極限赤外顕微分光」、「赤外近接場光学イメージング」、「バルク敏感光電子分光の高効率化・高分解能化」、「温度可変バルク 3 次元フェルミオロジー」、「時間分解・微小領域光電子分光分析」などの課題について科学的・技術的検討を行い、これらの課題の実現と固体分光用のビームライン・実験ステーションの強化を行いたい。一方、これらの最先端測定と、従来から産業界を含めてニーズの高い「軟 X 線磁気円二色性」のような汎用型測定の両方を充実させるために、産業利用のための軟 X 線ビームラインの整備が急務である。さらに、「コヒーレント電子相関光電子回折」など、新しい光源である 30 m 軟 X 線挿入光源・自由電子レーザーの利用法について提言し、新しい固体分光手法の開発を目指す。

「バルク敏感光電子分光」では、SPring-8 が世界をリードしているとはいえ、電子エネルギー分析器の性能、光子数共に不足している軟 X 線角度分解光電子分光についてさらに充実した最先端研究を推進する。軟 X 線角度分解光電子分光は、励起エネルギーおよび試料温度を制御しながら行うことで、従来の量子振動測定では観測困難であった、開いた面も含む全てのフェルミ面を高温から低温までの温度領域で観測が可能になり、「温度可変バルク三次元フェルミオロジー」への質的発展が期待できる。さらに、高分解能化によって電子物性の基礎をなすバンドに依存した電子有効質量を観測でき、電子間相互作用・電子格子相互作用・不純物効果の解明とその応用が期待

される。このような軟X線光電子分光測定「高分解能化」に加え、さらに「高効率化」や「時間分解・微小領域」測定を可能とすることで基礎研究だけでなく応用研究にも利用が進むと考える。不純物効果の解明や物性・材料機能との比較のためにも強度・安定性を高め、10 meV 以下へと高分解能化を進めたい。また、磁性材料やスピントロニクス材料、スピン・軌道相互作用の絡んだ重元素を含む物質の電子構造の研究では、SPring-8 の一つの特徴である「高強度軟 X 線円偏光の利用」も重要である。30 m 挿入軟X線光源の建設など、世界をリードし続けられる研究環境を早急に整える必要がある。

「時間分解光電子顕微鏡」では、SPring-8 に設置されている光電子顕微鏡装置を用いて光電子顕微鏡像で時間変化を追う。この研究手法の開発は、ナノテクノロジー研究において急務と考える。施設内外の研究者が協力してビームラインに固定された最高性能装置で、試料温度も 10 K 程度までは冷却し、横方向の分解能も数 10 nm までの測定が随時行えるよう整備することが肝要である。

「時間分解光電子回折測定」は、ナノテクノロジーを発展させる上で重要な課題である。従来の光電子回折法は、サンプルを回しながら測定するため、測定に時間がかかる。二次元表示型分析器と高輝度光源を組み合わせれば、原子配列立体写真法を用いてリアルタイムで原子構造相転移を観察することが可能となる。さらに、高周波パルスレーザーと蓄積リングのバンチを同期させれば、ピコ秒オーダーで構造転移を観察できる。原子配列立体写真法の他にも、一つの回折像から立体的な原子配列を再構成する理論もできあがりつつあり、X 線回折法では測定が難しい表面構造や不純物まわりの原子構造の決定に威力を発揮すると考える。

「原子層分解回折分光法」は、二次元光電子分光から生まれた新しい解析法であり、前方散乱に情報が集中していることを利用して、表面から数層にわたって各層ごとの電子状態、磁気構造を解析することができる。ナノ磁性薄膜では表面二層程度が特異な磁気構造を持っているため、ナノ磁性薄膜の配向転移などが解明されると期待する。

「多重極限赤外顕微分光」では、SPring-8 の高輝度性を利用してこれまでも進められてきた種々の環境下での測定をさらに推し進める。具体的には、40 万気圧に及ぶ高圧下、14 T の強磁場下および 0.4 K の極低温下とそれらを複合的に組み合わせた赤外・遠赤外分光測定を可能とし、軟X線光電子分光では得られない複合環境下での電子状態の情報を得る。たとえば、高圧力下においてフェルミ準位近傍の電子構造をエネルギー分解測定できる手法は赤外分光にはほぼ限られるため、圧力誘起量子臨界現象に伴う電子状態の解明など、今後特に強相関電子系の研究で重要な成果が期待される。

「赤外近接場光学イメージング」では、SPring-8 の高輝度性を近接場光学技術と組み合わせ、波長限界によって 10 μm 程度に限られていた従来の顕微 FT-IR 分光の空間分解能を 100 nm 程度まで向上させる。これにより有機 FET などのデバイスやナノコンポジットなど材料評価への産業応用と、相転移近傍で起きる空間的に不均一な電子状態の研究など基礎研究の両面で、従来の顕微赤外分光では不可能だった、より魅力ある研究手法が提供できる。

「コヒーレント電子相関光電子回折」測定は、コヒーレント大強度放射光が実現して初めて可能になる実験である。従来の光電子回折は一電子波動関数の干渉で生じるものであった。コヒーレントな大強度放射光により、異なる原子の内殻から同時に出た電子同士の干渉が観測されると考えられる。電子がボゾンであれば、結晶面に垂直な方向にシャープな回折ピークが期待できるが、実際にはフェルミオンであるため、電子相関効果が働き、回折強度の落ち込みが期待される。測定には、二次元表示型分析器が最適である。このような測定は、量子力学の根本的問題の直接的検証となり、是非とも実現させる必要がある。

SPring-8 は、硬X線発生のみが特徴と考えがちであるが、干渉性・高輝度性・偏光制御性において強力な軟X線光源・赤外光源である。開発された先端固体分光の手法は、物性基礎研究から実用材料研究へと利用が広がるであろう。実際、先行軟X線ビームライン BL25SU の課題採択率は非常に低く、東京大学の軟X線ビームラインが建設されるとはいえ、世界をリードしてきた軟X線固体分光分野の衰退が危惧される。産業利用のための軟X線ビームラインの整備や高度な技術支援を行う支援スタッフの充実なども重要な課題である。