

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名:光技術が先導する臨界的非平衡物質開拓

2. 研究代表者:腰原 伸也 (国立大学法人東京工業大学大学院理工学研究科 教授)

3. 研究概要

本研究では、超高速光デバイス材料、新型高機能触媒、光機能性たんぱく質など、励起状態での相互作用を利用する最先端物質の開発を先導する為に、フェムト秒時間分解光電子顕微鏡(fs-PEEM)と動的X線観測の組み合わせ手法、並びにコンパクト短パルスレーザーを開発し、物質開発への有用性を実証する。具体的には、臨界的非平衡状態にある物質の新光機能開拓と、その発現機構の根源を探るために、(1)幅広い周波数可変域(1~500kHz)を持ったコンパクトなフェムト秒光源を利用した時間分解光電子顕微鏡開発(fs-PEEM)、(2)動的構造解析技術や超高速分光測定の結果を利用した新物質・構造物性開拓、(3)新物質開拓とその観測法を先導する理論研究、(4)動的X線測定技法の開拓、という4点に集中した研究を実施し現在の構造科学の枠を乗り越えた「光励起臨界的非平衡電子構造物性科学」と呼べる新分野を切り開くことを目標とした

これまでに、装置面での最重点課題であった fs-PEEM 装置(時間分解能 200fs、空間分解能 40nm、繰り返し周波数可変域 1-500kHz)を完成させ、性能評価も兼ねた半導体ナノ構造光機能観測(項目(1)(2))を開始することができた。また、理論と材料探索、超高速分光が密接に連携して、Co 酸化物における光誘起高スピンポーラロン凝集による金属-絶縁体相転移を室温で達成することにも成功した(項目(2)(3))。さらには動的 X 線構造観測用光源と新観測手法が、光エネルギー変換材料の機構解明に適用できることを示し、その成果を背景に固体以外の凝縮相における新材料開拓の共同研究にも着手した(項目(2)(4))。

今後は、物質科学の世界的な材料探索競争の激化の中で、①実際の材料開拓において、これまでに開発した新光源利用の測定法(fsPEEM、動的X線散乱・吸収)の有用性の実証と、②これまでに発見した臨界的非平衡物質系の知見を基盤に、理論のリードによる新超高速電子状態変化、構造変化の解析手法の提案、の2テーマに焦点を絞って研究を推進する。

4. 中間評価結果

4-1. 研究の進捗状況及び研究成果の現状

本 CREST の最重要装置であるフェムト秒時間分解光電子顕微鏡(fs-PEEM)の開発が順調に行われ、高繰り返し、低フォトン密度仕様装置の完成により、さまざまな試料の観測が可能になり、評価実験で興味ある結果が出始めている。理論と材料探索、超高速分光が密接に連携して Co 酸化物における光誘起高スピンポーラロン凝集による金属・絶縁体相転移の室温での達成等、目覚ましい成果を上げている。Mn 酸化物薄膜を対象に、光励起状態でしか生み出せない新しい電荷・スピン・軌道秩序状態を、動的 X 線技法を利用して初めて明らかにしている。これらは Nature Materials などのこの分野の権威ある雑誌に掲載されている。臨界的非平衡状態にある物質機能の開拓は、米エネルギー省の白書にも記載されているとおり、今後の世界の物質・材料開発の重要な方向性の1つである。非平衡状態にあつてこそ機能を発揮する物質・材料の特性評価に向けた動的構造解析手法の開発は、その原理提案を含めた極めて重要な課題である。さらに、本 CREST 研究で開発した fs-PEEM 装置は、フェムト秒の時間分解能とナノメートルの空間分解能を有しており、光誘起相転移ダイナミクスに関連する物性のみならず、半導体デバイス関係の量子閉じ込め構造の研究者、carrier dynamics の研究者の関心を引き、共同研究が進んでいることは、研究の発展に望ましい展開になっている。今後は、物性分野のみならず、デバイスや医療の分野への大きな貢献が期待される。また、光化学エネルギー変換材料に関する研究やフェムト秒電子線回折実験も加えられたことも望ましい展開である。米国の大型放射光施設の利用制限等、当初計画どおりの進捗が困難な部分も見受けられるが、大きな成果が得られつつある時間分解 PEEM を用いた研究の一層の発展に期待したい。

理論と実験の連携研究が着実に成果を挙げており、研究計画にない新たな共同研究がいくつも若手研究者

により実現されている事から、チームの体制、代表者のリーダーシップが発揮され、機能していると判断できる。

4-2. 今後の研究に向けて

フェムト秒時間分解光電子顕微鏡(fs-PEEM)の完成により、研究後半は収穫のフェイズと判断されるので、幅広く情報を収集し、fs-PEEM に適した興味ある物質系を探し出すことが肝要である。開発した新光源を使用した測定法の有用性の実証、理論がリードする新超高速電子状態変化、構造変化解析手法の提案の2つにしぼり、新しい材料開発を積極的に行っているグループ、あるいは薄膜製作などの特徴的な試料の構造を作製しているグループなどとの連携を強化して、新たな材料へのフェムト秒時間分解光電子顕微鏡、あるいはフェムト秒レーザー誘起電子線回折などの手法を適用される事を期待する。なお、動的測定技術開発においては、X線自由電子レーザー(SACLA)も視野に入れて、比較検討が望まれる。

非平衡状態において機能が出現・発揮される材料の挙動解明は、今後の新規材料開発分野、さらに相転移を利用したエネルギー消費量の少ない固体素子の開発分野にとって極めて意義が大きい。今後もインパクトある学術雑誌への成果発表を期待したい。また、世界的な研究成果を生み出す可能性が高い事から、基本技術に関する知財確保の努力も必要であろう。

4-3. 総合的評価

当初計画より大幅に進んでおり、総合的にみて、申し分のない成果を挙げている。当初計画になかった方面にも大きな進展がみられ、今後の研究でも更なる成果が期待できる。課題を発散させすぎると研究成果がぼやけるのでその点は留意しつつ、今後、実用化の可能性なども見据えた展開を期待する。

フェムト秒時間分解光電子顕微鏡の装置開発に伴い、直ちに幾つかのグループから試料提供の申し出があったように、本グループが開発した装置は高い技術的インパクトを持っていると考えられる。また、理論グループの研究に対応して、直ちに実験グループが理論的予測の検証を実験するなど、理論と実験グループの協力関係も良好である。ただし、装置開発は研究の第一歩であり、この装置を有効に活用して、いかに新しい科学的発見に結び付くかが最終的な評価になる。学術的に意義の高い成果を挙げている点は大いに評価できるので、今後より一層の進展を望む。