ERATO「十倉マルチフェロイックス」プロジェクト
追跡評価報告書

総合所見

プロジェクト終了後、現在までにマルチフェロイック物質およびスキルミオン物質の創製とその物性を解明する学理の構築によって多くの実証に基づく成果へと結実している。“時間、空間の対称性の破れ”といった物理学の基本的概念に立脚した本格的な研究が進められ、世界的にマルチフェロイックスという用語と概念を定着させた。さらに複数の発現機構を見出し、実用上重要な室温付近で発現するマルチフェロイックス材料を発見した。特筆すべき成果としてスキルミオンの分野においては、ローレンツ透過電子顕微鏡によるスキルミオンの可視化は衝撃的な成果であった。この画像取得の成功以来、その存在を疑う者はなく、むしろその存在をいかに役に立てるかという興味のもと、多くの研究者が研究に参画している。両分野において、その基礎概念の構築と検証実験を先導したことは大きな意義があり国際的に高い水準の研究を数多く行なったことは明らかである。

現在では、マルチフェロイックスは低電力、高密度 MRAM や高感度センサーへの応用やテラヘルツ領域の光学デバイスへの応用が期待され、その方向性の研究が盛んに行われている。また、スキルミオンは Race track memory への応用が期待され、それを意識した研究が進められている。実際、世界各国での磁気スキルミオンの研究が立ち上がりつつあり、特にヨーロッパでは基礎研究と並行して大きな共同研究プロジェクトとしてメモリへの応用を目指した応用研究も始まっている。近年のニューラルネットワークの発展に伴い、それらを意識した材料、デバイスの開発が重要となっており、スキルミオン研究がこの分野で大きな貢献をすることが期待される。ERATO の趣旨を考えると、このように新しい概念の応用デバイスの研究に展開した基礎を構築した点を高く評価すべきである。

成果指標として、プロジェクト終了後も関係者から 144 報の論文が発表され、そのうち Top1%以内の論文が 15 報ある。また、基礎研究から一歩踏み出した、デバイス化の提案もあり、応用面での展開も開始される流れが出来つつある。実際、当該分野は日本物理学会や国際的ワークショップや研究会で大きなセッションに発展しており、世界中の研究者の知恵が結集する分野となり、現在も発展を続けている。また欧州においてはスキルミオンのプロジェクトが創設されるなど、本プロジェクトが創出した成果が物性物理学の当該分野を牽引する流れが定着しており、物性物理学の新分野を切り拓いたことは、ERATO プロジェクトの趣旨に合致している。

人材輩出においては、本プロジェクトに関わった、20 名の研究者中 9 名が准教授あるいは、Assistant Professor へとキャリアアップしたことや学振の特別研究員で参加していた研究員は関係機関の研究員として採用されるなど、次世代の科学を推進する人材育成にも多大なる貢献をしている。学理の追及とそれを支える人材育成で成果を上げ、かつプログラム終了後も研究分野として発展し続けている現状を見るに、卓越したプロジェクトであったとの評価を与えられるべき取組と総括出来る。

1.　研究成果の発展状況や活用状況

前身の ERATO スピン超構造プロジェクトでの知見等を踏まえて、ERATO マルチフェロイックスプロジェクトは電気分極と磁化とが共存するマルチフェロイック物質や関連するスキルミオン物質の創製とそれらの物性を解明する学理の構築を目指すことを基本理念として掲げた。プロジェクト終了後、理化学研究所に十倉研究総括をセンター長とする創発物性科学研究センターが創設され、さらに研究の推進が図られた。国の大きな支援のもと、研究総括の創造した新しい物性物理学の分野が順調に展開され、大きく花を開きつつある。

材料設計的視点を盛り込んだ物質探索、動的な電気磁気効果の評価、理論的アプローチを有機的に融合させた研究体制を構築し、実証に基づく多くの成果へと結実している。さまざまな物質系での探索と電気磁気相関モデルの構築とを両立させ、世界的に注目される以下の成果①～④を次々と発信している。①巨大電気磁気効果の研究では、研究期間中に基礎研究の大きな課題についてはほぼ解決した結果、世界的にマルチフェロイックスという概念と用語が一般化し、その現象の根源である空間対称性、時間対称性の破れの概念をトポロジーへ適用する研究を発展させている。②マルチフェロイックスの動的電気磁気特性の研究では、エレクトロマグノンとマグノンの同時発現によりマグノンに本来ない筈の電気磁気効果を発見し、さらに狭義のマルチフェロイックスではない材料でもスクリュー型スピン構造を持てば外部磁場によって方向 2 色性を示すことを明らかにした。③実空間のトポロジーを示すスキルミオンの研究では、高い論文の被引用数を得るだけではなく、スキルミオンによる磁気メモリへの応用を考え、72℃でのスキルミオンの確認、スキルミオンの禍やサイズの制御、回路にしたときのスキルミオンの生成、移動、消去等の理論提案、パルス電流による生成、消去にも成功し、応用に向けて目的基礎研究を発展させている。④トポロジカル物質の量子物性研究では、トポロジカル絶縁体薄膜において、異常量子ホール効果や量子化磁気光学効果、光照射するときだけ生じるスピン偏極電流を観測している。

以上のように、多くの研究成果が生み出され世界中の研究者を惹き付け、物性物理学の分野に新たな潮流を作るまでに至っている。実際、本年の国内の物理学会年次大会では当該分野において数多くの発表がなされており、物性研究の柱として確立され発展を続けている。これらの成果は物性物理学の分野にも広く波及しており、熱電効果や電歪効果との交差相互作用の研究分野にも発展し始めている。また、基礎研究から一歩踏み出した、デバイス化の研究も開始されて応用面での展開も開始される流れが出来つつある。

2.　研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

(1)研究成果の科学技術の進歩への貢献

研究総括のグループが本プロジェクトの前に発見したスピン起源のマルチフェロイックスは本プロジェクトでの研究を一層牽引した結果、世界各国で幅広く研究されるようになった。中でもそれらの動的特性に関する研究が産業応用に関して特に注目される。何れの研究も国際的に超一流のレベルの物性研究であるが、それは研究者らが物理学の基本概念で

ある“時間と空間の対称性”に加え物性物理学において重要な“強相関電子系”に関する深い知識と理解を持っているためと考えられる。

マルチフェロイックス研究に関しては複数の発現機構を見出すとともに室温付近で発現するマルチフェロイック物質を発見した。電場による磁化の変化に関する成果も得られているがこれは応用上極めて重要である。また電場によって誘起されるエレクトロマグノンを発見し、その電気磁気効果を明らかにした。

スキルミオン研究に関しては、ローレンツ透過電子顕微鏡による画像によりその実在とスピン構造を世界に提示し、また室温付近でスキルミオン構造を示す材料を発見した。その後、スキルミオンの磁気メモリ応用を考えスキルミオンの渦やサイズの制御、生成、移動、消去などに関する理論、電流パルスによる生成、消去などの実証を行った。

これらの成果のほとんどが世界に先駆けて発表されている。期間中に発表された 196 報の論文被引用数は累計で、現在までに 8000 件を超え、また期間終了後に発表された 144 報の論文ではすでに 3000 件を超える。さらに被引用数が当該分野における Top1%以内の論文が、期間中は 12 報、また期間終了後では 15 報あり、国際的に高い水準にある。スキルミオンの研究では海外研究機関との共同研究が進められており、欧州ではプロジェクト組織が立ち上がるなど、国際的評価も高いことが裏付けられる。

上述のとおり、プロジェクトから生み出された成果がその後の物性物理学の大きな流れを形成している。実際、当該分野は、例えば日本物理学会で領域 3 と 8 の合同で「スキルミオン」や「マルチフェロイックス」のセッションが設けられており、1 つの領域にとどまらず複数の領域が合同で議論する新しい流れを作っている。また米国物理学会でも同様の流れが出来ていることに加えて、Workshop on Topological Magnet 2015 など、マルチフェロイックスやスキルミオンに関する国際的ワークショップや研究会が開催され、新たな領域として国際的に認知されるに至っている。

(2)研究成果の応用に向けての発展

本 ERATO はマルチフェロイックスとスキルミオンという新しい物性物理学の枠組みを構築し、それを展開する大きな役割を果たした。基礎的な概念の提案やメカニズムを理解するための理論構築を先導し、現在も多くの研究者がそれをベースに研究を進めている。マルチフェロイックスもスキルミオンもこれまでに無い新しいタイプのデバイス応用が考えられている。現在、その効果を示す材料は限定的であり、交差相互作用が実現する機能の検討がようやく始められた段階である。例えば、(1)マルチフェロイックス研究の中から見出された材料は現行の電流駆動 MRAM に替わる電場駆動 MRAM 用の材料として、あるいはテラヘルツ帯における信号処理デバイス材料として期待され、多値メモリの提案、電気と磁気の交差相互作用を活用したセンサデバイスなどへの発展が提案されている。一方、(2)スキルミオンの応用として、高密度、低消費電力のメモリデバイスの提案もなされている。現行の HDD に替わるメカニカル部分のない次世代磁気記録装置の主要材料として期待が大きく、一部

は知的財産権として登録されている。

近年、AI 技術の発展と関連してニューラルネットワークに関する関心が高まっている。そこでは CPU と外部記憶装置の間で激しく信号が行き交う従来のノイマン型コンピュータに替わり、小規模な演算装置と小規模な記憶装置から成るユニットをチップ上に多数配置して超並列演算を行う。このようなユニットはこれまで演算装置と記憶装置のいずれもが SRAM により作製されてきたが、人間の脳に匹敵する大規模なニューラルネットワークの作製は困難である。SRAM に比較してはるかに小さいスキルミオンを利用した記憶装置と SRAM 演算装置を組み合わせたユニットを用いることにより大規模なニューラルネットワークの創生が期待される。ERATO の趣旨を考えると、このように新しい概念の応用デバイスの研究に展開した基礎を構築した点は高く評価される。

本プロジェクトは、基礎研究であり、すぐに製品応用に至る動きは見られなかったが、日本における応用展開は、主に室温動作するマルチフェロイックスとスキルミオンを有する物質の開発に置かれている。マルチフェロイックスにおいては、室温動作を海外に比べて 2 年も早く実現しており、この分野における材料開発の展開が日本において積極的に行われたことを示している。一方、スキルミオンにおいては室温動作する材料開拓はほぼ同時期に行われた。世界では応用を意識して薄膜を用いた研究が開始され成果があがってきている。まだ、メモリとして動作させた例はないが、今後の発展が大いに期待される。

磁気（スピン）を応用した、MRAM（スピントロニクスデバイス）が社会実装されるかどうかは、まだまだ未知数であることからみても、発展の著しいスピントロニクス分野のデバイス応用に向けた目的基礎研究でさえも産業実装するには、多くのハードルがある。しかしながら、本プロジェクトで達成された成果は論文発表ばかりでなく、90 件を超える新聞記事として広く社会に公開され多くの企業技術者の知るところとなっており、今後、具体的な応用に向けた検討が開始されることが期待される。

(3)参加研究者の活動状況

プロジェクト参加研究者の活動状況としては、グループリーダー4 名（内 2 名が教授、2 名が准教授、講師）で准教授と講師であった 2 名はそれぞれ、現在、教授と准教授の職位にある。延べ 19 名の研究員（博士課程の学生 5 名と外国人 7 名を含む）の中の 16 名がキャリアアップしており、その中で、国内大学の准教授 6 名（内 3 名が博士課程の学生から）、海外の Assistant Professor 3 名が含まれており、高い割合である。また、これら若手研究者が代表研究者として 1000 万円以上の競争的研究資金を得たのは 12 件（34 件中）、8 名（日本人研究員 13 名中）であり、日本人研究員の半数を越えている。このように、本プロジェクトにより多数の優秀な研究者が育っていることは、我が国の研究力向上に貢献しており、今後の独創的な研究の創発を期待する。

3. その他

十倉研究総括の課題設定力、組織運営力、人材育成力、学界、産業界への影響力が統合され、ERATO の支援により物性物理学の未踏領域に踏み出した結果、大きな研究の流れに結びついた。国内のマルチフェロイックスとスキルミオンの先端に関わる若手研究者の多くはこの ERATO プロジェクト出身者であり、現在も多くが東京大学と理化学研究所・創発物性科学研究センターに在籍している。これは、スキルミオンのような先端的な研究を国がきちんと推進し、人材と資金の集中投資により世界的にレベルの高い研究が数多くなされ、大いに成功した事例となった。引き続き発展を続けて、新たな未踏領域を目指すと共に、日本の次代を担う研究者の輩出に貢献されることを期待する。一方で、さらなる発展を見極める意味において本プロジェクトより輩出した若手研究者も含めて、我が国の他グループの研究者も巻き込むようなプロジェクトを期待したい。

昨今、応用面の訴求が求められる状況のなか、十倉研究総括の組織運営力を発揮して物理の探究と深化、さらには積極的に企業研究者を巻き込んだプロジェクト運営を進め、基礎研究と応用展開の役割分担をしながらも密接に連携して進める「新しい研究推進共創体制」が実現することを期待するとともに、IoT や AI の基盤となる新たな材料やデバイスを用いたイノベーションを生み出す仕組みに発展することを熱望する。たとえば、近年のニューラルネットワークの発展に伴い、それらを意識した材料、デバイスの開発が重要となっており、スキルミオン研究がこの分野で大きな貢献をすることを期待する。