

ERATO 十倉マルチフェロイックスプロジェクト事後評価（最終評価）報告書

【研究総括】 十倉 好紀 （東京大学大学院工学系研究科／教授）

【評価委員】（五十音順）

飯島 賢二 （パナソニック株式会社 中尾研究所／技監）

北岡 良雄 （大阪大学大学院基礎工学研究科／教授）

田中 耕一郎 （京都大学物質－細胞統合システム拠点／教授）

前川 禎通 （委員長；東北大学名誉教授

日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター／センター長）

評価の概要

外部電場によって磁化（磁気構造）を、外部磁場によって電気分極を誘起する効果を電気磁気効果とよぶ。そして、このような電気磁気効果、すなわち自発的に生成した電気分極と磁化を併せ持つ物質相を、「マルチフェロイックス」とよぶ。

十倉好紀 東京大学大学院工学系研究科 教授を研究総括とする ERATO 十倉マルチフェロイックスプロジェクト（2006年10月発足）では、磁化と電気分極の強い相関を持つマルチフェロイックスの創製と、その物性を説明する学理の構築を基本理念として掲げ、材料設計の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ている。

その結果として、プロジェクト発足当初の主要な目標であった、多彩なマルチフェロイック物質群の探索に成功するとともに、それを理解する理論モデルを構築し、特異な電気磁気効果の光学応答を観測するなどの成果を次々と上げている。フェライトやガーネット、ペロブスカイトマンガン酸化物など電子材料として普遍的に用いられている物質が、マルチフェロイック材料として大きなポテンシャルを秘めていることを実験事実として示したことは、長期的視点において、今後の応用展開への波及にも期待することができる。

さらに特筆すべきこととして、プロジェクトの研究展開の中から新たなテーマ設定を柔軟に行い、「スキルミオン結晶の可視化」などの成果を上げ、プロジェクト研究の大きな柱の一つにまで進展させたことを挙げるができる。

これら一連の成果は、学術論文や学会などを通じて極めて適切に外部発表されている。発表論文数や論文被引用回数は年を経るごとに増加の一途をたどっており、十倉研究総括ならびに本プロジェクトが世界中で中核的な役割を果たしている様子が客観的に評価できる。

以上を総合し、ERATO 十倉マルチフェロイックスプロジェクトは、卓越した研究水準に達していると認められ、戦略目標「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・デバイスの創製」に資する成果が十分に得られたと判断する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

十倉好紀 東京大学大学院工学系研究科 教授を研究総括とする ERATO 十倉マルチフェロイックプロジェクトの全体構想には、電気分極（強誘電性：Ferroelectricity）と磁化（強磁性：Ferromagnetism）とが共存する物質相（マルチフェロイックス：Multiferroics）の創製とその物性を解明する学理の構築を目指すことが基本理念としてある。固体中での電気分極 P と磁化 M が不可分的に強く相関（交差相関）する物質系を設計・開発することで、例えば電場による磁化制御、または磁場による電気分極制御を可能にしようという着想や試みは、電場で電気分極を、磁場で磁化をそれぞれ制御することが一般的であった、これまでの関連分野での通念からすると、非常に挑戦的なものであるといえる。

この着想は、十倉好紀教授自身が総括責任者を務めていた ERATO 十倉スピン超構造プロジェクト（2001 年度から 2006 年度）で得られた研究成果等に端を発する。東京大学の木村剛—十倉グループによる $TbMnO_3$ の強誘電性の磁場による制御をはじめとする実験や、同じく東京大学の桂—永長—Balatzky による理論（スピントレントモデル）を経て、ERATO スピン超構造プロジェクトでは、フェリ磁性体 $CoCr_2O_4$ およびその類縁系がマルチフェロイック物質であることを発見し、磁場によって電気分極を制御することに成功していた。その当時は、電場による磁化制御を実現するまでは至っていなかったものの、微小な電場での制御が可能となれば、従来にはない特性を有するデバイスの開発、具体的には、大幅な省電力化に資する記録演算素子の実現へと道が拓けることから、「マルチフェロイックス」は学術面のみならず、応用面からも大きなインパクトをもたらすことが期待されたプロジェクトとして、戦略目標「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・デバイスの創製」のもとで発足した¹。

1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

本プロジェクトは4つの研究グループからなり、それぞれマルチフェロイックス創製グループ（十倉研究総括がグループリーダーを兼務）、電気磁気相関物性グループ（グループリーダー：小野瀬佳文博士）、電気磁気散乱分光グループ（グループリーダー：島野亮博士）、電気磁気相関理論グループ（グループリーダー：古川信夫博士）と名称づけられている。研究実施場所は、マルチフェロイックス創製グループが理化学研究所、残る3研究グループは東京大学工学部6号館であり、いずれもプロジェクトのためのスペースを確保している。

ただし、プロジェクト運営に際しての特徴として、十倉研究総括は、各グループで個別の研究項目に取り組むのではなく、グループ間で緊密に連携しながら、以下に示す3つの大きな研究テーマに取り組むスタイルを採っている。これはスピン超構造プロジェクトでも採られたスタイルであり、十倉研究総括のリーダーとしての十分な経験に裏打ちされた適切なものであると認められる。このことは、現在までに得られている研究成果からも明らかである。

¹ <http://www.jst.go.jp/pr/info/info346/shiryoku4.html>

- I 巨大電気磁気マルチフェロイックス：マルチフェロイック物質創製の基本戦略を理論設計、バルク単結晶育成、界面物質相作製の各研究課題へとブレークダウンするとともに、探索された物質系での電気磁気効果の巨大化・機能化を図る。
- II マルチフェロイックス動的電気磁気物性：マルチフェロイックス（あるいはトロイダルモーメント）において、電気磁気光学効果（方向2色性）やトロイダルモーメント誘起非線形光学効果を開拓する。また、交流電場（光電場）に応答する動的電気磁気効果として、光電場誘起の磁気共鳴（エレクトロマグノン）およびマルチフェロイックドメイン壁のダイナミクスなどの動的電気磁気物性を開拓する。
- III スピントクスチャーのトポロジカル量子物性：この研究テーマは、プロジェクトの発足後に新たに設けられたものである。トポロジカル絶縁体における巨大な電気磁気効果の理論予測がなされたことや、本プロジェクトでの螺旋磁性の追究の過程において、「スキルミオン結晶」と呼ばれる、ボルテックス状のスピントクスチャーの可視化に成功したことを受けて、新たに設定された。

なお、プロジェクトの予算は、十倉研究総括が、2009年度に最先端研究開発支援プログラム（FIRST）の30人の中心研究者の一人として採択されたことを受けて（採択課題名「強相関量子科学」）、JSTプログラム調整室の見解等を踏まえ、2010年度および2011年度研究費予算は、発足当初に計画されたものから減額調整が行われ、段階的なERATOからFIRSTへの移行がなされたとのことである。

以上、1-1. および1-2. を踏まえて、研究プロジェクトの設定や運営、研究活動の概況について、評価委員としての所見を改めて整理する。

前身となるERATO スピン超構造プロジェクトでの研究成果等を手がかりとして、十倉研究総括は、固体中の電気分極と磁化の強い相関を持つ「マルチフェロイックス」実現のために、物質設計指針の探索および確立や、動的な電気磁気物性評価、理論的アプローチを有機的に連携させる体制を、ERATOの枠組みを活用して構築した。「固体の新しい電磁気学」開拓に資するような学術面でのインパクトのみならず、将来の省エネルギーエレクトロニクスに資するような応用面でのインパクトも期待されうる内容をカバーしたものであり、これらを総合すると、独特の切り口を盛り込んだ挑戦的・創造的・融合的なプロジェクト設定であると高く評価することができる。

一方プロジェクト運営に目を向けると、十倉研究総括の強いリーダーシップのもと、気鋭の中堅研究者であるグループリーダーおよび若手研究者をバランス良く結集した組織編成がなされている。優れた研究推進委員とも協力し、毎週の研究ミーティングでアイデアを共有するなど、効果的なプロジェクト運営に努められている。プロジェクトの中で経験を積んだ若手研究者の多数が、既に大学等のアカデミックポストへ転出するなど、人材育成拠点としての役割も十分に果たしていると認めることができる。

現在までの研究活動は、これまでに得られている研究成果を反映するものであり、その詳細は次節以降で述べるものとする。概略すると、上記IおよびIIで述べたような、プロジェクト発足当初に掲げられた研究テーマにおいて、設計指針まで踏み込んだ物質探索および合成、さらにそこで観測される興味深い電気磁気応答現象の発見などを成し遂げている。加えて注目すべきは、プロジェクトを展開していく中で新たなテーマ設定を柔軟に行っていることであり、「スキルミオン結晶」や「磁気励起（マグノン）が示すホール効果」などは、既に関連分野におけるホットトピックスとして認識されている。以上の点などを考慮すると、本プロジェクトの及ぼしている有形無形の効果は、極めて大きいと認めるこ

とができる。

〔研究プロジェクトの設定および運営〕 a+（特に優れて的確かつ効果的であった）

〔研究活動の状況〕 a+（特筆して望ましい研究展開を示した）

2. 研究成果

2-1. 研究テーマ I 巨大電気磁気マルチフェロイックス

- 1) プロジェクトの初期は、スピントラントモデル（桂－永長－Balatzky モデル）を指導原理として、マンガン系やハライド系などにおいて電気磁気応答を示す物質を多数発見した。中でも、ベクトルスピントラント（ヘリシティ）と分極方向との関係を実験的に確定したことは、その後の世界的なマルチフェロイック物質探索研究に、大きな指針を与えた。
- 2) ペロブスカイトマンガン系において電気磁気秩序の相図を明らかにした。これにより、同じマンガン系でも、スピントラントモデルでは説明できない相があることが判明した。これに対して、スピン交換歪に基づくマルチフェロイックスのモデルを提案し、理論化に成功した。
- 3) 強磁性成分と電気分極成分が直交して存在するコニカル磁性体が電気磁気相関を最大化する候補であることを、前身のスピン超構造プロジェクトにおいて、スピネル型クロマイト CoCr_2O_4 で示していた。本プロジェクトでは、スピネル型カルコゲナイドやヘキサフェライトにも転換し、分極ベクトルをフレキシブルに制御しうることを実証した。
- 4) スピン方向に依存した p 軌道と d 軌道との混成による強誘電性発現機構を多くの物質群で実証し、スピントラントモデル、スピン交換歪モデルとともに、第 3 のマルチフェロイックス発現モデルを明らかにし、遷移金属－リガンド結合変調モデルと理論計算との整合性を確認した。
- 5) 既知の代表的な強誘電物質と同程度の大きさの電気分極を持つ強誘電物質を新たに発見し、反強磁性磁気秩序とのこれまでにない強い結合を確認した。

上記のように、物質探索をモデルの構築と平行して遂行し、現存する磁性誘起強誘電性のほとんどが、この 3 つのモデルのいずれかで記述できることを示したことは、オリジナリティが高く、優れた成果であると高く評価することができる。プロジェクト発足当初は一部の系でしか見出されていなかったマルチフェロイックスを多くの物質系で見出したことは、今後実用的な見地から室温機能を備えたマルチフェロイックスを探索するにあたって、大きな指針を与えたことになるであろう。

またフェライトやガーネット、ペロブスカイトといった普遍的な材料において、マルチフェロイックスの視点から検討を加えることで、新奇物性の大きなポテンシャルを秘めていることを実験的に示したことは、この分野の材料開発に多大な貢献をしたといえる。

2-2. 研究テーマⅡ マルチフェロイック動的電気磁気物性

- 1) ペロブスカイトマンガン系において螺旋磁性の磁気ドメイン壁と強誘電性ドメイン壁が同一であることを明らかにした。また、磁場下/電場下での分極緩和を詳細に調べることにより、マルチフェロイックドメインは低温でも顕著な運動をすることを明らかにした。これは、磁氣的性質に起源をおく強誘電性特有の性質であり、重要な知見である。
- 2) 振動光電場で励起可能な磁気励起（エレクトロマグノン）が存在することを、単結晶に対するテラヘルツ時間領域分光の電場/磁場方位依存性から明らかにした。様々な物質における実験的研究と理論研究との統合により、エレクトロマグノンは基底状態がマルチフェロイックスを示さなくてもスピンの平行でなければ起こりうること、結晶の対称性によっては、基底状態でスピンの平行であっても生じることが明らかになった。これらを通じて「エレクトロマグノン」という新しい低エネルギー磁気励起の概念が確立した。
- 3) 時間および空間反転対称性の破れを外部磁場によって誘起することで、エレクトロマグノンの共鳴において光の波数ベクトルの方向に依存して吸収強度が大きく変化する巨大な方向2色性を見いだした。これは、動的な電気磁気効果にエレクトロマグノンが本質的な役割を果たしていることを示した重要な結果である。

エレクトロマグノンの存在を明らかにしたことについては、類似の研究が諸外国でも見られるものの、ここまで精密かつ説得力ある形で示したのは、本プロジェクトが初めてである。理論的に予言されていたスピントレントモデルのエレクトロマグノンを発見し、その巨大な非相反型の磁気光学効果を観測した。また低エネルギーテラヘルツ領域における高い実験技術と精密測定は特筆される。エレクトロマグノンに関する知見に基づき、光学的電気磁気効果を巨大化することを可能としたことで、テラヘルツ電磁波域における電気磁気光学の基本的な枠組みを与えたことは高く評価できる。巨大な方向2色性が観測されたことは、動的な電気磁気効果にエレクトロマグノンが本質的な役割を果たしていることを示した重要な結果であり、これにより、本研究項目の目的は達成された。

また、電気磁氣的性質の動的な応答および制御は、将来のデバイス応用に対して重要な基盤となる成果と期待することができる。本プロジェクトで得られた知見や提案された概念の、さらなる展開に期待したい。

2-2. 研究テーマⅢ スピントクスチャーのトポロジカル量子物性

- 1) B20型合金である(Fe, Co)SiやFeGeなど、螺旋磁性を示すほぼ全ての系において、「スキルミオン結晶（渦状のスピン回転体が三角格子上に規則正しく並んだスピン超構造体）」が生成されることを、ローレンツ電子顕微鏡を用いて可視化することに成功した。
- 2) また、このスキルミオン結晶の巨大スピンのカイラリティによると考えられる、トポロジカルホール効果の観測にも成功した。
- 3) スピナー軌道相互作用やスピンのカイラリティが引き起こすユニークな電気磁気効果

として、パイロクロア格子強磁性絶縁体・ $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ で磁気励起（マグノン）が示すホール効果を実験的に観測することに成功した。

- 4) トポロジカル絶縁体に磁性不純物を少量ドーピングした系で、通常のキャリア誘起強磁性とは異なるディラック電子が誘起する強磁性を確認した。巨大な異常ホール効果や磁気ドメインにそったエッジ状態伝導など、この分野を先導する結果を得ており、高く評価される。

これらの成果は、まだ現在進行中のものが数多くある。ひとつにはスピントロニクスへの応用を見据えた MBE 法によるスキルミオン結晶の薄膜単結晶化を実施している。さらにトポロジカル絶縁体の表面状態で期待される非散逸伝導などの現象を観測するため、MBE 法による良質単結晶薄膜の作製の試みがなされている。トポロジカルスピントロニクスチャーを用いた新しい電気磁気効果を探る研究領域が新たに切り拓かれる可能性があり、マルチフェロイックプロジェクトが先導してきた「固体中の創発的な電気磁気力学」という新しい学術や技術学理の領域をさらに押し広げていくことが期待される。

以上、各研究テーマでの成果の状況を踏まえて、評価委員としての所見を改めて整理する。

まず、本プロジェクトが ERATO として採択された際の公開資料によると、「本研究領域（評価委員註：マルチフェロイックプロジェクト）は、固体電子物理学に、『マルチフェロイックス』という新たな概念を導入し、これを精密に制御することで新規な物性を発現させる方法論の確立に繋がると期待される」との採択理由が述べられている。ここで指す、「マルチフェロイックス」という新たな概念とは、「磁性絶縁体において、電気分極と磁気構造（磁化）の相関を増強して、これによって、電気-磁気の相互制御を巨大化して実証する」というものであるが、このように一言で言い表したとしても、その実は、物質の多様性や支配メカニズムの多様性、創発的な電気磁気効果特性の探究など、多くの取り組むべき課題が山積していたのが、プロジェクト発足当初の状況であったといえる。

その後5年あまりの間に、磁性体がつくる固体中の電気分極についての物理概念は、本プロジェクトからもたらされた成果を中心として、完全に一新されたといって過言ではないだろう。すなわち上記の採択理由、言い換えればプロジェクトの達成目標を十分に上回る成果が得られていると認めることができる。多くの物質群、取り分けフェライトなどのありふれた物質ですらもマルチフェロイック物質であることを突き止め、それと平行して、メカニズムの理解（複数のモデル構築）も随分と深まった。また、「エレクトロマグノン」という新しい低エネルギー磁気励起の概念ももたらされるなど、ERATO の趣旨であるところの「新しい科学技術の源流」としての「マルチフェロイックス」という領域の開拓がなされたものといえる。

加えて、この領域が新たな広がりを見せつつあることが、本プロジェクト自らの取組の中から明らかになっており、それが「トポロジカルホール効果」や「スキルミオン結晶」、「マグノンホール効果」であるといえる。

上記のように、本プロジェクトの成果は、科学技術の側面において質的に秀でてだけでなく、極めて適切に学術論文や学会等で外部発表されており、量的な面でも特筆して評価されるべきである。例えば学術論文は、本評価を行った時点（2012年3月末）において182報あり（掲載可も含む）、その中には、Science 誌（3報）や Nature 誌（2報）およびその姉妹誌に掲載されたものも多く含まれる。またこうした学術論文が、年次を経

るごとに被引用回数を増やしており（総被引用数は 2321）、世界の関連する研究分野および研究グループを先導する立場として認識されていることを如実に物語っているといえよう。

一方現在の成果が、早急かつ直接的に産業応用に結びつくわけではないが、今後更に発展すると考えられる情報通信分野において、省電力化、高速化、高機能化を実現するポテンシャルを秘めた材料として、長く注目されてきたマルチフェロイック材料に関して新たな知見をもたらしたといえる。すなわち、室温でのマルチフェロイックな物性を発現する物質の発見、普遍的に電子材料として用いられているフェライトに広く可能性があることが示されたこと、動的な物性の観測によりマルチフェロイック物質の物性の実用的理解が深まったこと等が挙げられる。十倉研究総括自らが指摘しているように、室温のマルチフェロイックスの可能性、界面制御による相互作用の顕在化などが実現すれば、情報通信分野の革新的材料となる可能性が大きい。

〔研究成果（科学技術的側面）〕 a+（成果として秀逸である）

〔研究成果（産業社会的側面）〕 a+（成果として秀逸である）

3. 総合評価

ERATO マルチフェロイックプロジェクトは、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、電気分極と磁化とが共存するマルチフェロイック物質の創製とそ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、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ている。

そのもとで現在までに、多くの実証に基づく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独自の成果を次々と上げている。また、特異な光学応答現象を説明できる新しい電気磁気光学の分野を創出し、磁性体が作る電気分極についての物理に新しい 1 ページが出来上がりつつあると評価できる。加えて、スキルミオン結晶の可視化によりスピントクスチャーのトポロジカル量子物性に新たな展開の可能性を示したことなど、この分野が引き続き研究されるべきポテンシャルを含んでいることを示していることも高く評価したい。

産業面の視点でいえば、これまで闇雲に開発が行われてきたマルチフェロイック材料開発に、ある種の設計指針をもたらさうる成果を上げているといえる。また、フェライトやガーネット、ペロブスカイトマンガン酸化物など電子材料として普遍的に用いられている物質が、マルチフェロイック材料として大きなポテンシャルを秘めていることを実験事実として示したことは、産業界にとって設計指針の提示と合わせて、大きな励みとなる成果である。また今回取り組んだ手法が、結果として新奇な物性探索を目指す材料開発にアプローチの一つの方法を示したことも合わせて特筆すべき成果といえる。

さらに、物質探索、物性評価解析、理論構築それぞれに気鋭の研究者をグループリーダーとして招聘し、そのもとで若手研究者がアクティブな活動を行った結果、発表論文数ばかりでなく、被引用回数においても増加の一途をたどっており、十倉研究総括ならびに本プロジェクトが世界で中核的な役割を果たしている様子が客観的に評価できる。十倉

研究総括という優れた指導者が多くの若手研究者を指導して成果に結びつけたことで、固体物理分野の人的な強化につながったことは、目に見えない成果ではあるが、研究成果の側面ばかりでなく、次世代を担う人材育成の面からも高い評価が与えられるべきである。

以上を総合し、ERATO マルチフェロイックスプロジェクトは、卓越した研究水準にあると認められ、戦略目標「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・デバイスの創製」に資する成果が十分に得られたと判断する。

〔総合評価〕 A+（戦略目標の達成に資する十分な成果が得られた）