

ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト
事後評価（最終評価）報告書

【研究総括】 齊藤 英治（東京大学 大学院工学系研究科／教授、
東北大学 材料科学高等研究所／客員教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

河野 浩（名古屋大学 理学研究科／教授）

中村 志保（キオクシア株式会社 メモリ技術研究所／参事）

的場 正憲（慶應義塾大学 理工学部／教授）

湯浅 新治（委員長；産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター
／研究センター長）

評価の概要

ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト（2014年11月発足）は、物理学におけるスピンの回転方向が一方に偏っているために熱などの物質中のランダムな運動を一定の方向にそろえることができる機能（整流性）に注目し、物質に内在する微視的で永続的な角運動量（スピン）を原理とした「量子整流」の学理を構築することを目指している。現在、社会や産業界はエレクトロニクス分野の発展の恩恵を受けている。さらに電子スピンを用いたスピントロニクス分野は、磁気センサや不揮発性磁気メモリへの応用に見られるように、研究開発が応用段階へと進みつつある。本プロジェクトはこのスピンの基礎物理を、電子スピンだけではなく、音（フォノン）、核スピン、光、力学運動などに拡大して、ナノレベルの波動的かつ粒子的描像において新たな工学原理や科学理論を再構築し、さらなる科学の深化と社会・経済への波及に繋がる基盤を構築することを目標としている。

齊藤研究総括は 2007 年開始のさきがけ「誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能」、2010 年開始の CREST「スピン流による熱・電気・動力ナノインテグレーションの創出」において、スピンゼーベック効果と呼ばれる、スピン流を介して熱流を発電へとつなげる原理を発見し、さらにスピンと力学との関係を研究してきた。本プロジェクトは、それら成果を土台に、上記の目標を目指す挑戦的なプロジェクトである。

現在までに、3つの大きな科学的成果が生まれてきている。第一の成果はスピン流体発電である。流体の流れが作る渦や速度差等の力学的角運動量の一部が、微視的な電子のスピン角運動量に変換され、逆スピンホール効果により直流電圧として取り出せることを実証した。また、この現象を理論的には流体力学におけるナビエ・ストークス方程式への角運動量の項の追加により説明した。これは、スピンも流体渦の回転運動も同じ角運動量で示すことができることを意味する。その論文が後に素粒子物理学の研究者から引用されたことは、齊藤研究総括が練り上げてきた物性物理学の本質を表現したものとなった。第二の成果は、スピン波トモグラフィ法というスピン波のイメージング手法を開拓し、これを用いて固体中のスピンとフォノンの間のラビ振動現象を、両者の伝搬特性が一致する点において見出したことである。これは、今後スピン波デバイスを電子回路並みの位置づけに発展させていく上で大きな一歩になると考える。第三の成果は、研究総括が開拓したスピンゼーベック発電技術の性能の大幅な向上である。コンビナトリアルスパッタと機械学習を活用した材料開発手法により研究スタート時と比較して6桁の性能向上を達成した工夫は注目に値する。従来型の熱電材料との比較ではまだ劣点があるが、今後の伸びしろを見極めてさらなる挑戦をお願いしたい内容である。この他、核スピンポンピングや超伝導ボルテックスによる整流など、今後が期待される実験結果が多数見られる。

また本プロジェクトは、若手育成においても若手の活躍、成長を促すようなリーダーシップが十分発揮された。学生から助教へ、助教や研究員が准教授へ、助教や准教授が教授もしくは相当職へというように、12名の若手のアカデミアでのキャリアアップがあり、また、3名が企業へ就職した。

スピン流といった学問領域を広める観点から将来を見据えた運営がなされた点は特筆すべきである。アウトリーチにおいては、TDK みらい館展示ブース、サイエンスカフェ、スクールの開催、企業との交流会議など、専門家のみならず中高生や一般の人に向けても広く行った。

本プロジェクトの一連の成果は、2020年11月現在までに論文137報、書籍・総説7編、学会発表176件を通じて積極的に外部に発表されつつある。また、1000を超える被引用回数は、平均レベルの高いERATOプロジェクトの中でも優れた成果エビデンスといえる。さらに、プレス発表、アウトリーチ活動など適切な手段で専門家以外の一般の人に対してもその成果がアピールされている。研究成果の実用化を目指した特許出願は既に38件あり、その多くは国際出願を行っている。

以上を総合すると、本プロジェクトは全体的に順調な進捗にあり、戦略目標「情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成」の達成に資する十分な成果が得られていると評価する。

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

ERATO開始以前に齊藤研究総括らが発見したスピン流関連の物理現象を起点にして、スピン量子整流現象の視点で系統的に多方面に展開させる構想となっており、従来からのスピントロニクス単なる延長ではない独自の着眼点に基づいたものである。

具体的には、スピンが持つ時間反転対称性の破れに基づくダイナミクスを原理として、熱揺らぎや各種素励起などの様々な現象に現れる整流作用を探索し、その学理を構築するとともに、応用に繋げるという着想に基づいた研究プロジェクトを展開した。

また、スピンの力学効果、スピンゼーベック効果の実用化に向けた効率の向上といった実験面のみならず、回転運動を取り入れた物質理論を構築する必要があるとの認識のもと、一般相対性理論を組み込んだ理論の構築を目指した。

以上を総合すると、プロジェクトの全体構想は十分に独創的かつ挑戦的である。

1-2. プロジェクトの目標・計画

本プロジェクトは、物質に内在する微視的で永続的な角運動量（スピン）の基礎物理に着目し、時間反転対称性と空間反転対称性を破る非相反な量子整流現象を共通項として、この性質を有する物質の相互作用を電子スピンだけから音（フォノン）、核スピン、光、力学運動などに拡大し、ナノレベルの波動的かつ粒子的描像において新たな工学原理や科学理論を再構築し、さらなる科学の発展と社会的経済的波及効果も有する基盤を構築することを目標としている。

この独創的かつ挑戦的な目標設定の下に、齊藤研究総括はERATOの規模と予算に合致した体制と研究計画を設定し、適切な研究機関との連携体制を構築し適切な設備導入を進めた。これにより目標としていた実験的成果が得られるだけでなく、予想外の興味深い実験結果も得られている。

1-3. プロジェクトの運営

齊藤研究総括の明確な運営ポリシーと強力なリーダーシップに基づき、極めて効果的な運営がなされたと判断できる。

若手育成としては、若手の活躍、成長を促すようなリーダーシップが十分発揮されたと考えられる。学生から助教へ、助教や研究員が准教授へ、助教や准教授が教授もしくは相当職へ、12名の若手のアカデミアでのキャリアアップがあり、また、3名が企業へ就職した。一般に、プロジェクト推進中に優秀な若手を手放すことはプロジェクトの遂行に響くと思われるが、スピン流といった学問領域を広める観点から将来を見据えた運営がなされた点は特筆すべきである。

研究の運営としては、実験と理論のバランスが良いのが特徴である。実験は既存の流れで試料作製・測定するだけでなく、オリジナルな設計に基づき製作された評価装置（特にスピン波トモグラ

フィー法やバーネット効果・核バーネット効果の測定装置)や現象を発現させる装置(スピン流体発電)などで、新規な現象を見出した。また、理論的な解析も十分進み、理論物理学としても高度な観点から現象解明などが行われた。さらに、企業の研究グループが参画したのも、応用展開を真剣に目指した体制といえる。また、研究者に関して極めて融合的な運営がなされている。優秀な若手を積極的に起用し、彼らに裁量権を持たせることで若手が活躍できる運営がなされている。一方で、シニアの経験豊かな研究者にも参画いただき、広く英知を結集した。研究参画者の研究分野においては、スピントロニクスのみならず遠心分離やMEMSの専門家と連携するなど、異なる分野の研究者を集結させている。

研究費の使い方に関しても、全体的に問題ない。既存のカタログ装置の購入に終始せず、種々のオリジナル装置を作製して成果を出したことは、研究費の使い方としてとても有意義であった。

産学連携に関しては、用途展開のアイデアが産業界でのシーズになるよう産業界との連携の枠組みを企画運営するなど、産学融合が積極的に試みられた。企業(NEC)が、プロジェクトの主要な一つのグループを担っている点で、連携がプロジェクトに組み込まれている。ただし、スピン流体発電に関する知見など、他のグループで創出された知見の活用がもう少し望まれる。国内外の研究者や産業界との一般的な連携の場としては、スクールや企業との交流会議を開催しており、効果的な施策が打たれている。

ヘッドクォーターは、その活動の指針を「研究者の生産性を最大化する」と定め、研究者が研究に専念できる環境を実現した。

[研究プロジェクトの全体構想][研究プロジェクトの目標・計画][研究プロジェクトの運営] a+
(十分に的確かつ効果的である)

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. 先端スピン流科学グループ

本グループは、スピン量子整流の普遍的な基礎学理・学問体系を構築することを目的としており、スピン流を制御する新たな事象を発見するなど目標に対する達成度は高い。特に、スピン波と格子振動(フォノン)の混成波によると考えられるスピン流およびスピンゼーベック効果の増大や、スピン流に由来すると考えられる機械的振動の観測は興味深く、研究成果のさらなる発展が大いに期待できる。スピン流の諸現象が普遍的な物理原理のレベルで理解・展開されており、他分野との融合や連携など大きな波及効果が期待できると考えられる。今後、フォノンなどを介したスピン流・スピン由来発電の制御方法に関して、方法論などをさらに発展させて頂きたい。スピン流の新規な評価技術の開発においてもスピン波のイメージングシステムの構築に成功している。この手法によってなされた、スピン波分散関係の測定、マグノン-フォノン間のラビ振動の観測は目覚ましい成果と考えられる。今後のスピン流現象のさらなる理解・展開・開発に強力なツールとなることが期待される。

・スピン波トモグラフィ法の開発

スピン波は、それが運ぶスピン流を逆スピンホール効果により電圧として観測できるが、伝搬特性を観測する技術はこれまで十分には開拓されていなかった。特に、波長の長いスピン波の分散関係を評価する手法は、従来は原子炉からの中性子線や、極めて高度な光学技術のみであり、またマイクロメートルスケールのスピン波の分散関係を直接測定することは、これらの技術を用いても困難であった。この状況に対して本プロジェクトは、磁気光学効果(ファラデー効果)の原理を用いたポンププローブ法と画像処理により、スピン波の分散関係を可視化することに成功した。また、その副産物としてフォノンの分散関係も観測されている。本手法をもちいることにより、マグノン-フォノン・カップリングにより伝搬する横波スピン波は、マグノン主要モードとフォノン主要モードが干渉しつつ伝搬していることが示され、現象の詳細が明らかにされた。また、その干渉から

磁気弾性結合を決定できることが示され、スピン波トモグラフィ法の有用性がさらに増したといえる。派手さはないが量子整流効果を研究するための基盤的な観測技術についても地道な研究を進めた成果である。本手法は、今後のスピン波の観察手法として広く普及することが期待される。

・マグノン-フォノン・カップリングの発見

スピン波トモグラフィ法による測定からマグノン-フォノン・カップリングを発見した。このマグノン（スピン波）は固体中でフォノンとカップリングし、磁気弾性波を発生する。現在、磁気センサやMRAM等で活用されているスピントロニクス技術は、将来的にはスピン演算素子や量子演算へと展開する可能性を秘めており、この観点からフォノンとマグノンのカップリング特性を研究することは重要と考えられる。本プロジェクトでは、フォノンとマグノンの分散関係が交差する点においてスピンゼーベック効果が増強されること、マグノン-フォノン間でラビ振動が発生することを見出した。特に後者は、結晶中で一般にフォノンの長距離伝搬が優れることから、マグノンの寿命がラビ振動により増大する可能性がある。この長寿命化は、量子情報処理において、スピン波が長時間のコヒーレンス時間を獲得するための新たな手法となる期待がある。

・核スピンポンピング

本プロジェクトは、電子スピン以外で量子整流に係わる自由度として核スピンも対象としている。従来、核スピンは核磁気共鳴の原理からMRI等で社会的に活用されているが、核スピンの流れによるスピン流や、核スピンと電子スピンの間の角運動量の交換については、核スピン間あるいは核スピンと電子スピン間の結合が弱いことから研究されてきていない。本プロジェクトでは、この「常識」を打ち破り、核スピンも角運動量の源として働き電子のスピン流物性に影響を与える（角運動量交換の枠組みに取り入れられる）ことを実証した。具体的には、5/2と比較的大きな核スピンを持ち、電子スピンとの結合が非常に大きいことで知られる材料であるMnCO₃を用いて、電子スピンとの相互作用の助けを借りた核スピンの集団運動である核スピン波を核磁気共鳴によって励起し、これをさらに隣の核スピンに伝搬させるプロセスにより、核スピン起源のスピン流を発生させることに成功した。また低温下での非局所スピン流測定では、特定の磁場で非局所電圧のピーク構造を観測した。これは新しい共鳴現象に起因する可能性が探られており、新しい準粒子の発見に期待したい。これらの結果は、核スピン系にも電子スピン系同様の豊かな物理が潜んでいることを期待させるものである。

・超伝導ボルテックスによる新しい整流作用の発見

スピン量子整流は電子のスピン軌道相互作用が介在した現象であるが、スピン軌道相互作用に頼らなくても非相反性があれば整流効果が得られると齊藤研究総括は考えた。これを実現する方法として、超伝導体中のボルテックスを利用し、環境の非対称性を反映したボルテックス生成の非対称性から微弱な電磁環境のゆらぎを整流する効果を見出した。微弱なノイズを除去していった結果、1日を経ても減衰しない直流電圧成分が観測された。この現象は、超伝導ボルテックスによる量子整流効果と位置づけられる。これは今後さらなる物理機構の解明や未知の物質のセンシング等に活用できる可能性も秘めており、今後が楽しみな物理現象である。

・ガドリニウム-ガリウム-ガーネット（GGG）での長距離スピン流伝搬の検出

スピン流の長距離伝搬は、これまで強磁性体など磁気秩序を持つ物質のみで観測されてきた。これに対して、常磁性絶縁体のGGGにおいても、室温・弱磁場環境下でスピン流の μm オーダーの長距離伝搬を初めて観測し、磁気秩序がなくてもスピン流が長距離伝搬することを実証した。これは、ゼーマンエネルギーにより誘起された磁化同士の双極子相互作用によりスピン波が形成された結果と考えられる。常磁性体におけるスピン流の長距離伝搬の実現は、基礎物理および応用の両面で興味深い。

・磁気補償物質での室温スピンゼーベック効果増強効果の実証

磁気補償フェリ磁性体である $\text{Lu}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$ を用いて、比較的低磁界において室温でスピントリック効果の増強効果の観測に成功している。マグノンとフォノンの分散関係の共鳴条件においてスピントリック効果が増強することをこれまでに見出していたが、反強磁性体に近い条件であるフェリ磁性体の磁気補償を活用することにより、室温・低磁界でこの共鳴条件を実現した。マグノンの分散関係をエンジニアリングすることでスピントリック効果を増大させるという新しい物質設計指針が示されたことは、応用に向けて重要な成果である。

- ・非線形マグノン励起によるアニーリング演算素子の検証

YIG ドットのマグノンのパラメトリック発振の実験を行い、励起マイクロ波に対して同位相 (0 状態) と逆位相 (π 状態) の 2 状態の確率的な励起と操作に成功している。この成果は確率的演算素子としての性能を示すものであり、アニーリング演算子の基盤となる。**ERATO** 後継プロジェクトでの研究開発のさらなる進展が大いに期待される。

2-2. 核ダイナミクスグループ

本グループが担う研究課題は、スピン流と力学運動の相関現象の解明である。研究の中核は理論・実験の双方で担われており、達成度は高い。実験的側面では、独自の試作でバーネット効果や核バーネット効果を測定できるオリジナル装置を作製・活用した。また、独自の実験装置の作製によりスピン流体発電を発見し、流体渦度分布を解明し、本現象がスピン由来、流体の渦度由来の新規の発電現象であることを示した。理論的側面では、スピン流と物体回転運動の関係を解明するために、一般相対論を拡張した理論を構築し解析することに成功した。理論、実験とも今後の学術的な広がりが見込まれる。実際、既に高エネルギー・素粒子物理研究者にも注目されており、分野横断的な波及効果として注目されている。

- ・液体金属によるスピン流体発電

液体金属によるスピン流体発電に成功し、本プロジェクトの当初の問いの一つであった力学的回転からのスピン流生成が可能かという問題設定に対して直接的な解答を示した。具体的には、流体の流れが作る渦や速度勾配等の力学的角運動量の一部が、微視的な電子のスピン角運動量に変換され、スピントリック効果により発電できることを実証した。また、この現象を流体力学におけるナビエ・ストークス方程式への角運動量の項の追加により理論的に説明した。これは、スピンも流体渦の回転運動も同じ角運動量で示すことができることを意味する。その論文が後に素粒子物理学の研究者から引用されたことは、齊藤研究総括が練り上げてきた角運動量を有する物性物理学の本質を表現したものとなった。基礎学術的な成果として高く評価したい。一方、発電技術としての実用性が高いとは思えないので、無理して高効率化を追求する必要はないのではないかと思われる。

- ・バーネット磁場測定系の開発と回転系での物性測定

古くから知られていたバーネット効果の測定を高精度化し、フェリ磁性体の角運動量補償を直接的に示し、それが実現する温度を測定した点を高く評価したい。高速回転で生じる磁化の世界最高精度の測定系を開発し、常磁性体のバーネット効果の測定、ナノ粒子における軌道角運動量の増大現象の発見、ランタノイド系元素の g 因子の測定、フェリ磁性体の角運動量補償点の直接観測などを行った。本プロジェクトの遂行過程で、研究の視点が、当初の「回転と磁場の類似性」から「回転と磁場の相違性」の追求へと発展しているのは興味深い。物性 (低エネルギー) 測定による原子核構造の知見の取得など、また異なった側面からの分野融合が期待される。

- ・スピン流注入による機械駆動 (Spin-MEMS) の実証

磁性体で作製したカンチレバーを用いて、スピン流が作り出す (注ぎ込む) 微小なトルクの検出に成功した。これは、アインシュタイン・ドハース効果のように、与えられた物質中に含まれる限られた量の角運動量だけに頼るのではなく、スピン注入によって「回転の素」を次々と導入している。

すなわち、スピン流を用いて、アインシュタイン・ドハース効果を一般化したものとみなせる現象である。

- ・スピン・回転結合とスピン輸送の理論的枠組みの構築

上記のスピン流体発電の原理は、スピンと力学回転の関係の一般理論を構築することにより、理論式による説明も必要であった。これは従来の固体物理が扱ってきた慣性系における物理学の範疇を越え、非慣性系における物理学を展開する必要があった。東北大学と日本原子力研究所のグループは合同でこれに挑戦し、慣性系において電子の運動を記述するディラック方程式を、非慣性系における一般座標共変な方程式に書き換え、スピン接続を計算することで、渦度が局所的な有効磁場となることを導いた。さらにこの局所的なスピン回転結合の理論からナビエ・ストークス方程式に角運動量の項を導入して、乱流と層流のそれぞれの場合にスピン流体発電の理論式を導いた。この理論は物性物理にとどまらず、高エネルギー・素粒子物理研究者にも注目されており、分野横断的な波及効果を有する物である。

これらの成果は、本研究課題の目標を十分に達成するものといえる。こうした一般相対論をスピンの諸現象に拡張する取り組みは、分野横断・異分野融合の理想的な例ともいえ、学術的にきわめて価値が高いと思われる。

2-3. スピンゼーベック応用グループ

本グループが担う研究課題は、スピン流を用いた発電を応用に展開するための技術開発（スピンゼーベックの増強など）である。齊藤研究総括が発見したスピンゼーベック効果の実用化を目指した試みは高く評価できる。ただし、当初に比べて性能など大きく進展したものの、実用化のめどに関する達成度はまだ道半ばと言える。

- ・マテリアルズインフォマティクス型材料探索手法の開発

機械学習を取り入れることで、希土類含有材料のスピンゼーベック効果の増強や、スピン分極を増大することで Pt 合金材料の異常ネルンスト効果の増大を実現し、熱電効果の比較的高い鉄系材料も見出した。また、企業の強みを活かし、熱電発電デバイスの構造の設計も行い、成果をあげた。

また、機械学習に加えコンビナトリアルスパッタを活用した材料開発により、スピンゼーベック効果の熱電性能を初期の性能から5～6桁向上させ、半導体素子を用いたものにあと1桁と迫った成果を高く評価したい。

一方で、現在、通常の高性能熱電材料の約50分の1以下の最大発電性能であるスピンゼーベック効果や異常ネルンスト効果の性能の伸びしろをより明確にすることが必要である。スピンゼーベック効果などの発電では効率の決定因子が多く、機械学習的な方法で、今後強力に推進するためにデータ量が十分あるかどうかを検討する必要がある。これは、本グループだけの責務ではなく、学理や原理を解明する方の研究でも、本プロジェクトで発見されたスピン流体発電なども含めた比較的微小な発電現象の応用可能性および展望をさらに明らかにすることが望まれる。また、応用グループとしては、発電性能だけでなく実用化のための諸因子の割り出し、整理することも望ましい。

〔研究の達成状況および得られた研究成果〕 a+（十分に高い水準にある）

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3-1. 科学技術への貢献

本プロジェクトは、齊藤研究総括が先行研究として発見して開発していたスピンゼーベック効果研究の単なる延長ではない。スピンの回転運動の時間反転対称性の破れに着目することで、ス

ピン流をさまざまな量子や物性（フォノン、機械的運動、核スピン、など）とカップリングさせて、新規なスピン波・スピン流制御（整流）現象や発電を見出している。「スピン量子整流」の概念のもとに、様々な分野との融合的研究に成功しており、今後もスピン流関連現象の新規な科学技術分野を展開するのに大きく貢献するだけでなく、異分野との融合を促進することも期待される。予想外の新しい発見（兆候含む）も複数あり、今後さらなる発展が期待できる。

代表的な個別成果を列挙すると以下の通りである。

- ・力学運動による電子スピンの整流効果（スピン流体発電）の実証

流体の流れが作る渦や速度差等の力学的角運動量の一部が、微視的な電子のスピン角運動量に変換され、スピンホール効果により電圧として取り出せることを実証した。

- ・新しいスピン波分光法の開発／マグノン-フォノン・カップリングの直接観測

スピン波トモグラフィ法と呼ばれるスピン波のイメージング手法を開拓し、これを用いて固体中のスピンとフォノンによるラビ振動現象を、両者の分散特性が一致する点での現象として説明した。また、マグノン-フォノン結合の効果により、スピンゼーベック効果が増大することを発見した。さらに、カップリング現象の詳細が解明され、カップリングを制御することでスピンゼーベック効果の熱電変換を制御できることが示された。

- ・スピンゼーベック発電技術の性能の大幅な向上

コンビナトリアルスパッタと機械学習を活用した材料開発手法により研究スタート時に比べて6桁もの性能向上を達成した。従来の熱電材料との比較ではまだ劣る点があるが、今後の伸びしろを見極めてさらなる挑戦が期待される。

- ・環境揺らぎの整流／超伝導トポロジカル量子整流

第二種超伝導体に特有なボルテックス液体相における量子整流現象を見出した。環境の電磁揺らぎからも安定に直流電圧を作り出せることが示された。

- ・核スピン共鳴による電子スピン流信号の検出

これまであまり検討されていなかった核スピンに関して、電子とのカップリングの強い系に着目して、核スピン由来のスピン流信号の検出に成功した。未知の共鳴現象の兆候が観測されており、新しい準粒子の発見が期待される。

- ・スピン流注入による機械振動の実証

回転する非慣性系における電子スピンの振る舞いが定式化され、回転運動からのスピン流生成実験やマイクロ力学系を用いたスピン流の力学的作用（「モーター源」としての性質）の検証実験に成功した。

このように、スピンの根源に立ち返ることで産み出された種々の成果は先導的・独創的で、国際的に高く評価されることは明らかである。また、構築された学理は物性物理に限定されることなく高エネルギー物理や宇宙論にも展開可能であるなど、普遍性の高い視点を与えている。これらの成果は科学技術的価値があると考えられるものも多く、137本の論文掲載（Nature系雑誌19本含む）や1000を超える被引用回数、ICM基調講演やMRSなど大型の国際会議での多数の招待講演といった成果エビデンスも、本研究が国際的にも高く評価されていることを示している。また、特許出願を38件行っており、知財取得へ向けた取り組みも評価できる。

3-2. 社会・経済への貢献

スピン整流効果により熱から発電を起こすスピントロニクス効果の深耕、スピン流による機械振動を始めとして、様々な素励起とスピン流との間の変換現象が探求され、スピン量子整流という新しいパラダイムが創生された。今回得られた成果の多くは今すぐに新産業を創出するものではない。しかし、物性物理に対して新しいパラダイムを与えたことは確かであり、我が国の科学技術基盤力を世界に示した点で社会への貢献は大きい。

最も応用に近い熱電変換によるエネルギーハーベスティング技術は、マテリアルズインフォマティクスの手法の構築により、熱電発電能力の増強がはかられた。また、スピントロニクス効果を利用した熱流センサを用いて化学品プラントの異常モニタリングを目的とした実証実験を行っている。このような実証実験で得られた知見と将来的に期待されるスピントロニクス効果のさらなる増大により、熱流センサ応用の途が拓かれることが期待される。さらに、エネルギーハーベスティング技術についての市場性が示されており、社会実装に向けての今後の展開に大きく期待したい。

このように、将来的には、自発的なスピンの回転を基とする極低消費電力デバイスや微小な発電システムへの展開等が進むことで、科学技術イノベーションに貢献する可能性が強く期待される。

〔科学技術への貢献〕〔社会・経済への貢献〕 a (貢献が期待できる)

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

若手育成としては、若手の活躍、成長を促すようなリーダーシップが十分発揮されたと考えられる。学生から助教へ、助教や研究員が准教授へ、助教や准教授が教授もしくは相当職へ、12名の若手のアカデミアでのキャリアアップがあり、また、3名が企業へ就職した。一般に、プロジェクト推進中に優秀な若手を手放すことはプロジェクトの遂行に響くと思われるが、スピン流といった学問領域を広める観点から将来を見据えた運営がなされた点は特筆すべきである。

4-2. アウトリーチ活動

アウトリーチ活動を、専門家のみならず中高生や一般の人に向けても広く行うことで、当該分野、さらには科学技術の将来を担う人材育成を図った点も大変に意義がある。対象を3層（アカデミアの若手研究者や学生、企業に所属する研究者・開発者、一般の社会人）に分けて、それぞれの層に対して効果的なアプローチをとるといふ多方面を意識した活動が積極的に図られ、将来へ向けた活動がなされた点を高く評価したい。

具体的には、TDK 未来館展示ブース、サイエンスカフェ、スクールの開催、企業との交流会議など、工夫されたイベントを企画した。特に、中高生に向けた「スピン」を紹介する取り組みは特徴的で有意義であると思われる。こういう比較的難しい科学的話題を、中高生のような若い世代が興味を持ってくれることは重要である。また、「スピン量子整流・スピントロニクスアソシエーション」を設立し、大学等公的研究機関と産業界とのスピン量子整流・スピントロニクス効果に関する情報共有を行い、今後の技術開発の方向性について先導的に検討した。

4-3. 新型コロナウイルス対応

2020年度はコロナ禍の影響を受け、世界的にも研究が停滞するとともに研究の進め方も変化した。本プロジェクトにおいてはプロジェクト特別重点期間にあたるが、コロナ後も視野に研究環境の整備が進みつつ持続的な成果創出がなされた。

5. 総合評価

齊藤研究総括自らが発見したスピントロニクス効果の本質を「スピンの量子整流効果」という概念として抽出し、その視点でもって物質中の角運動量現象・整流現象に広く深く切り込むことにより、多くの新現象を発見した。スピントロニクスという一分野に留まることなく、機械工学、流体物理学、強相関量子スピン系、超伝導物理、核スピン物理、一般相対性理論、材料データ科学といった様々な分野とスピン流科学を融合する多くの成果を挙げた。これらの多方面にわたる研究成果は、どれも十分高い水準にある。得られた成果のさらなる理解の深耕とその後の応用展開とともに、さらに多くの新規な現象が見いだされることも十分期待される。

5-1. このプロジェクトが達成した成果の素晴らしい点・特筆すべき点とその理由

本プロジェクトの大きな目標は、様々な形態のスピン流をさまざまな量子状態や物性と結合させて、新規なスピン流制御（整流）現象の創出を目指すことである。また、分野融合的な側面として、例えば、スピン流現象の非慣性系への拡張など、物性物理を一般相対論などと普遍的に結び付けることに成功した。

新規な相関・制御方法を見出すことにおいては、フォノン、機械的運動、核スピンなどに関わるいくつかの新規なスピン流制御現象を見出している。具体的には、スピン波とフォノンの混成波によるスピン流の増大・スピントロニクス効果の増大や、スピン流に由来すると考えられる機械的振動の観測は興味深い。核スピン由来のスピン流信号の検出、スピン流体発電など、新現象の発見がなされ、今後の発展が期待される。

スピン流の新規な評価技術の開発において、スピン波のイメージングシステムの立ち上げに成功しており、このスピン波トモグラフィ法によるスピン波分散関係の測定、マグノン-フォノン系のラビ振動観測も、目覚ましい成果と考えられ、今後のスピン流現象のさらなる探求の強力なツールとなることが期待される。

また、一般相対論を拡張して非慣性系におけるスピン流現象の定式化した取り組みは、今後のスピン波と流体を含める力学運動の相関などを活用するための理論解析ツールになるだけでなく、高エネルギー素粒子物理研究者にも注目されており、更なる分野横断的な波及効果も期待できそうである。

さらに、当初完全には想定されていなかった方向での新たな成果も得られている。具体的には、これまであまり検討されていなかった核スピンに関して、カップリングの強い系に着目して、核スピン由来のスピン流信号の検出に成功している（核スピンポンピング検出の成果）。

いずれの成果も秀逸であり、その中には、長年使われてきた物理学の方程式を拡張するものなど、これまでの常識を覆すものも含まれている。スピン量子整流という魅力ある研究分野を切り拓き、さらに力強く推進しており、特筆すべきものである。

また、一般相対論を拡張してスピン流現象を非慣性系（回転系）において定式化した取り組みなどは、素粒子・宇宙などの異分野と物性分野を物理の普遍原理で結び付けるような特筆すべき成果で、異分野横断・融合の理想的な例といえる。

5-2. このプロジェクトの社会的・経済的インパクトとその理由

本プロジェクトのより明確な社会的インパクトは、本プロジェクトで得られた数々の物性現象・理論の成果が世の中の物性物理さらには宇宙物理にまで大きな影響を与えた（与えつつある）点と考える。

スピン整流効果により熱から発電するスピントロニクス効果、スピン流による機械振動を始めとして、様々な素励起とスピン流との変換現象が示され、スピン量子整流という新しいパラダイムが創生された。中でも、最も応用に近い熱電変換によるエネルギーハーベスティング技術は、コンビナトリアルスパッタと機械学習を活用したマテリアルズインフォマティクスの手法の構築により効率の増強がはかられ、IoTの動作電源としての応用を検討する手がかりが得られつつある。今後の更なる理解の深耕により、自発的なスピンの回転を基とする極低消費電力デバイスや微小な発電システムへの展開が期待される。また、熱流センサとしての動作実証実験が行われ、製造コスト

面での検討も含め、スピンゼーベック効果の用途と市場性が示された意義は大きい。将来的には社会的・経済的インパクトをもたらす可能性もある。また、様々な形態のスピン流と、種々の量子や物性（フォノン、機械的運動、核スピン、など）との結合が新たに見出されており、新たな発想のデバイス（センサー）などにつながる豊富な手掛かりを提供している。さらに、スピン波トモグラフィ法の開発、コンビナトリアルスパッタと機械学習を活用した材料開発、バーネット効果を用いたフェリ磁性体の角運動量補償温度の測定法など、他分野の研究開発に活用できる手法が開発されている。このように、潜在的な経済的インパクトは大きいと考えられる。また、「文化」的な側面も大きいと思われる。産業革命を科学の目を見たとき、そこに整流作用があることを示すなど、呈示の仕方も魅力的である。

5-3. このプロジェクトが達成できなかった点（今後期待する点）とその理由

スピンゼーベック応用グループは、機械学習の手法を取り入れることにより、材料開発を当初予定より幅広く展開した。また、当初計画のスピンゼーベック効果だけに捕らわれることなく、CoPt系の異常ネルンスト効果の増強、鉄系材料を新たに見出し、展開したことは評価できる。ただし、当初の性能を6桁近く向上させた一方で、現時点での最大発電性能は現在の高性能熱電材料の約50分の1以下である。今後、実用化の展望を描くためには、熱電材料のさらなる向上に向けてそのポテンシャルを示すことが重要と思われ、そのためにはマテリアルインフォマティクスで得た知見を基に、再度サイエンスへ立ち返り掘り下げることも必要ではと思われる。また、実用化の展望を描くには、性能以外のコストなど応用の要件の整理も必要である。実用化フェーズにおいては、本プロジェクトとは異なる研究開発の進め方とプレーヤーが必要になると予想されるが、ERATO終了後も研究開発を継続し本プロジェクト成果がシームレスに実用化フェーズへ引き継がれることを期待したい。

5-4. 上記以外の全体所見

若手からベテランまで幅広い層の研究者の起用による研究推進、基礎から産業界まで巻き込んだ研究開発、若手の育成・輩出、中高生から専門家まで各方面に向けたアウトリーチ活動などが、ERATOの方式を最大限活用して運営を推進された。齊藤研究総括の運営方針・手腕は極めて高く評価される。

以上を総合すると、本プロジェクトは全体的に順調な進捗にあり、戦略目標「情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成」の達成に資する十分な成果が得られていると評価する。

〔総合評価〕 A+（十分な成果が得られている）

以上