

研究報告書

「カイラル磁気秩序を用いたスピン位相エレクトロニクス」の創成

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成25年10月～平成29年3月

研究者: 戸川 欣彦

1. 研究のねらい

カイラル磁性体と呼ばれる一群の磁性体に固有に現れるカイラルスピソリトン格子 (Chiral Spin Soliton Lattice: CSL、図1) を研究の舞台とし、物性研究において未開拓である“スピン位相の制御”に主眼を置く「スピン位相エレクトロニクス」を切り拓き、革新的スピンエレクトロニクスを創成することを研究のねらいとする。これは CSL が巨視的コヒーレンスを有するスピン位相秩序であることに基づき実現される。

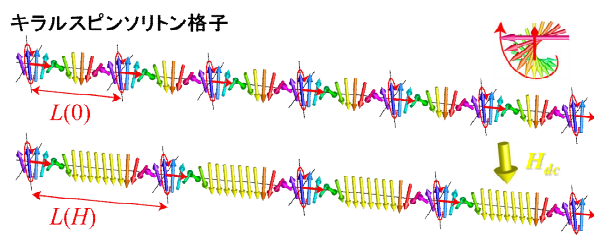


図1 キラルスピソリトン格子の模式図

物性科学において、電子の量子力学的な波動としての位相をマクロレベルで制御することは最も重要な課題の一つである。その好例は超伝導現象である。超伝導状態における電子(電荷)の位相はマクロな秩序状態と表現され、ゼロ抵抗・マイスナー効果・ジョセフソン効果などの顕著な物理現象が生じる。

着目するカイラル磁性体はらせん階段のようなカイラルな結晶構造を内在する。そのため、量子力学的なプロセスに基づき、ゼロ磁場で、カイラルらせん磁気秩序が数 nm から数十 nm 程度の微細な周期で形成される。この CSL のらせん周期は、0.1 テスラ程度の小さな磁場を用い、無限大(試料サイズ)まで変化することができる。CSL は結晶キラリティに頑強に保護され、結晶中の構造欠陥などの外的擾乱に対して強靱かつ安定に振舞う。研究者は最近、一軸性カイラル磁性体結晶 CrNb_3S_6 において、CSL が示すこれらの特異的な性質を世界で初めて実証することに成功した。

カイラル磁性体において発現する CSL は電子のスピン磁気モーメントの位相が巨視的に秩序化する稀有な状態である。結晶キラリティという従来と異なる概念に基づき具現化する巨視的スピン位相秩序であり、静磁エネルギーなどに起因する従来の強磁性体中の磁気ドメイン構造とは全く異なる特性を示す。CSL の巨視的スピン位相コヒーレンスを反映し、数多くの特異な物性(離散化、集団励起など)が発現すると期待される。本研究では、外力下でのカイラルソリトン格子の集団ダイナミクスの制御を通じて“スピン位相”を操り、カイラルソリトン格子の“巨視的スピン位相コヒーレンス”に起因して発現する離散的スピン応答や巨大集団運動などの新しい物質機能を実証することを目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

キラル磁性体に固有に現れるキラルスピンソリトン格子(CSL)を研究対象とし、CSLの“巨視的スピン位相コヒーレンス”に起因して発現する離散的スピン応答、集団励起運動などの新しい物質機能を実証することを目指している。

(共通の研究項目)外力下での CSL ダイナミクスの解明 では、単軸性キラル磁性体 CrNb_3S_6 においてキラル磁気共鳴を検出することに成功した。広帯域での高速情報伝達の実現に向けて重要なCSLの集団励起運動の基本特性を解明することができた。マイクロ波領域の電磁場に対する強い偏向依存性、磁場依存性の非対称性を見出した。磁気共鳴特性はキラル磁気秩序の構造に依存しており、共鳴周波数の磁場変調性を示す。また、特定の磁場領域で、共鳴周波数はソリトン数に応じて離散化する。これらはキラル磁性体特有の高周波スピン応答である。高周波回路中にキラル単結晶を配置すれば、帯域選択型、帯域可変型の伝送路やフィルターなどが構築できる可能性が見出された(研究成果リスト:特許出願2)。

(研究項目A)コヒーレントスピン位相に起因する多値的磁気抵抗効果の実証 では、キラル磁性体 CrNb_3S_6 の磁気抵抗などの物性がキラルソリトン格子のソリトン密度にスケールされて変化するを見出した。ソリトン密度は CSL 形成の秩序変数であり、磁気抵抗を含めたさまざまな物性が普遍的に秩序変数に従って変化するを示唆している。これはキラル磁性体に固有の性質であり、CSLに起因するスピン応答に高い制御性をもたらす(論文1)。

また、ソリトン数の離散性、また、トポロジカル・可算性な性質の顕れとして、CSL周期の20ケまでの多段階での離散的变化を直接観察することに成功した。さらに、磁気抵抗の多値化・離散化の電気的検出と高周波スピン応答である磁気共鳴信号の離散化の検出に成功した。マイクロメーターサイズの微小デバイスからバルク結晶まで離散性・多値的応答が安定して発現することを実証した(論文2)。

(研究項目B)CSLの滑走に伴う磁気情報転送の実証 では、キラル磁性体に固有な高周波信号伝達の非相反性特性を検出している。非局所型スピン応答デバイスを設計するのに有用な高周波特性となる。

キラル磁気構造の安定性の起源を解明した(論文3, 4)。(研究項目C)巨大スピン起電力の実証、(研究項目D)孤立ソリトン滑走による情報伝送の実証 に関して研究を進めている。

(2) 詳細

キラルソリトン格子を“粒”と見なせば可変周期性、可算性(トポロジカル)、離散化(量子化)などが、一方、“波”として見なせば、集団励起、巨大スピン応答、非局所応答 などの特異な物質機能の発現が期待される。これらの物質機能の検証を目指し、次に示す研究項目に取り組んだ。単軸性キラル磁性結晶である層状カルコゲナイト結晶 CrNb_3S_6 (空間群 $P6_322$)をモデル物質として研究を進めた。 CrNb_3S_6 の磁気転移温度は130 Kである。新材料開発により動作温度の問題は解決する必要があるが、最近では室温を越える転移温度を有する物質の報告例もあるため、基盤原理を確立することを最優先した。

(共通の研究項目)外力下での CSL ダイナミクスの解明

“キラル磁気共鳴現象の基本特性の解明”に焦点をあてて研究を進めた。10 μm 程度の微小結晶において高感度・広帯域での磁気共鳴計測を行い、集団ダイナミクスを介して生じるキ

ラル磁気共鳴を検出することに成功した。キラル磁気共鳴の特性は、広帯域での高速情報伝達を行うための基盤技術を与える。

試料冷却と磁場印加に対応した高周波回路システムとマイクロ波ネットワーク・アナライザを組み合わせ、最大周波数 40 GHz の帯域に対応した高周波信号計測システムを立ち上げた。電子線描画装置などを用いてサファイア基板やシリコン基

板上にマイクロストリップ回路を作製し、フォーカスイオンビーム装置などを用いてマイクロストリップ回路上にマイクロメーターサイズの単軸性キラル磁性結晶 CrNb_3S_6 を配置し、高周波特性計測用のデバイスを作製した。このデバイスにおいてキラル磁性結晶の CSL 集団励起運動を検出することに成功した(図2)。

磁気共鳴の基本特性を解明するため、共鳴周波数や共鳴強度の磁場依存性や温度依存性、外磁場・高周波信号・結晶方位の相互依存性、入力パワー依存性、試料サイズ依存性など、体系的な実験を進めた。その結果、磁気共鳴モードの磁場依存性は、高周波信号と結晶方位の相対配置や、キラル磁気ソリトン格子と強制強磁性状態において異なることが明らかになった。キラル磁気共鳴をキラル軸方向に平行に励起する場合(図2の赤色データ)、磁気共鳴モードの磁場依存性は原点に対して対称な振舞いを示す。キラルソリトン格子の磁気構造を反映して、より正確には、キラルソリトン格子の密度に応じて、磁気共鳴モードが変化することがわかった。一方、キラル軸方向に垂直に励起する場合(図2の青色データ)、原点に対して線形で非対称な依存性を示す。つまり、励起方向に応じて対称性が異なる、言い換えると、キラルソリトン格子の集団励起運動が強い偏光依存性を示すことが明らかになった。この非対称性と強い偏光依存性は磁場を用いて変調可能であり、高周波デバイス設計に有用な特性となる。

国際共同研究を行っているロシア・ウラル連邦大学の理論チームとこれらの実験データのモデル構築を進めている。スピン波を取り込んだモデルでの解析が必要であることがわかった。磁気共鳴モードを同定し、磁気共鳴の基本特性の解明するため、実験と理論データの詳細な比較検証を進めている。

本研究項目で得られた磁気共鳴の基本特性データは、広帯域での高速情報伝達を行うために重要な基盤技術を与える。ここで取得した CSL 集団ダイナミクスに関する知見を基に、(研究項目B)、(研究項目C)、(研究項目D) などの研究項目に着手している。

本研究項目で見出したキラル磁気共鳴特性と(研究項目A)で見出した閉じ込め効果の研究成果を利用する高周波デバイスに関する特許申請(特許出願2)は第3年度までに完了している。第一報となる論文(研究成果リスト記載外、PRB 95, 104415 (2017).)を公開済みであり、続報を準備している。これらの進捗状況からこの研究項目の研究目的は達成したと考えている。

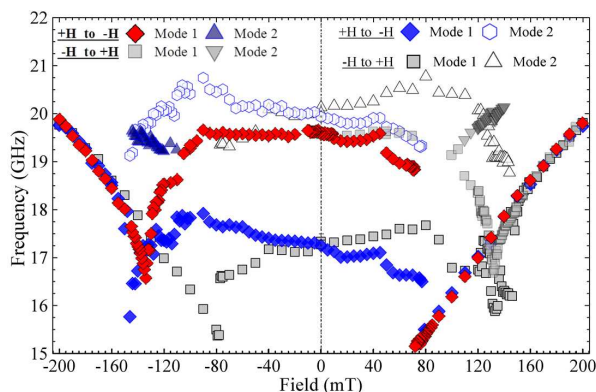


図2 微細キラル磁性結晶における磁気共鳴

(研究項目A)コヒーレントスピン位相に起因する多値的磁気抵抗効果の実証

キラル磁性体 CrNb_3S_6 のバルク結晶において、磁気抵抗の系統的な実験を行った(図3)。キラルソリトン格子の形成に伴って負の磁気抵抗が生じることを観察し、磁気抵抗の経験的スケーリング則が幅広い温度範囲において成り立つことを見出した。さらに、磁気抵抗の大きさがソリトン数に応じて変化する、つまり、キラルソリトン格子形成の秩序変数(オーダーパラメーター)であるソリトン密度に従って変化していることを明らかにした(図3(a)、論文1)。これらの振舞いはキラルソリトン格子の位相コヒーレンスが巨視的スケールに渡って発達していることに起因しており、磁気抵抗を含めた各種物性が普遍的に秩序変数に従い変化することを示唆している。

ローレンツ透過型顕微鏡法を用いた直接観察を行い、“ソリトン閉じ込め効果”を実証することに成功した。結晶キラリティの異なる領域に挟まれた領域において、キラルソリトン格子の周期が離散的に変化することを見出した。例えば、1 μm 幅のキラリティ結晶グレインでは、その領域に含まれる 20 ケのソリトンが磁場印加により一つずつほぐれていく(図4)。これは、ソリトン数に起因するスピン応答が 20 段階に離散化することを意味している。

さらに、TEM 試料加工技術を用い、電気抵抗計測用に 10 μm 角の CrNb_3S_6 結晶小片を作製し、磁気抵抗が離散的かつ多段階に変化することを電氣的に検出することに成功した(図3(b)、図5)。磁気抵抗のステップの大きさは臨界磁場近傍で 25 $\mu\Omega$ 程度に量子化されている。“ソリトン閉じ込め効果”と“磁気抵抗の離散化”もまたキラルソリトン格子が巨視的スケールに渡って示す位相コヒーレンスに起因して生じる特異な物性である。

ソリトン数を電氣的にカウントできることは、ソリトン数を磁気電子デバイスの情報信号として用いることが可能であることを意味している。一つのキラル磁性体から成る磁気デバイスに

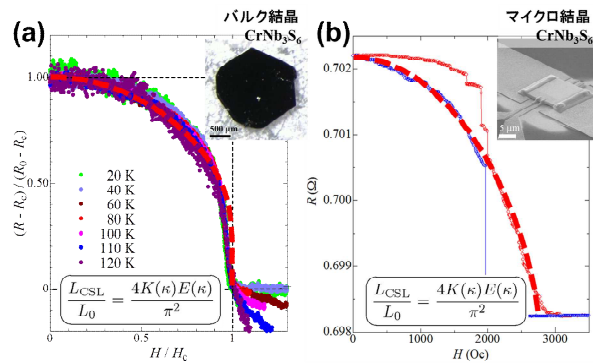


図3 キラル磁性結晶 CrNb_3S_6 における磁気抵抗のスケーリング則[1]

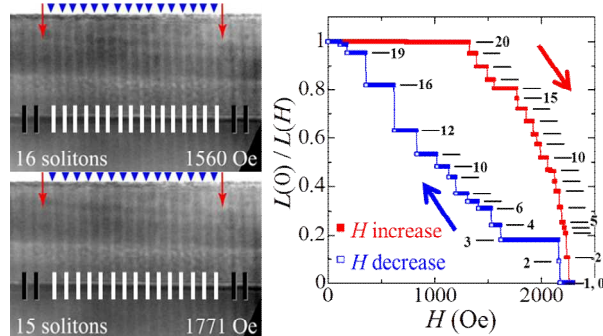


図4 キラル磁性結晶におけるソリトン閉じ込め効果の実証[2]

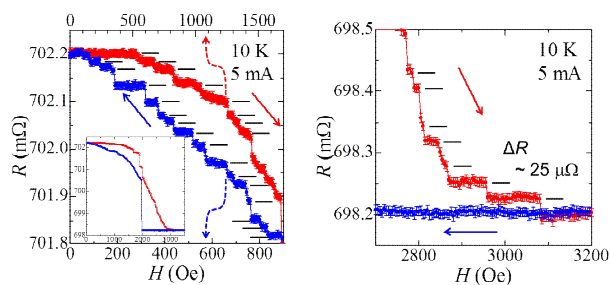


図5 微細キラル磁性結晶における離散的磁気抵抗[2]

において多数の離散信号の情報処理が可能となるであろう。これらの成果は論文(論文2)として発表済みである。関連して、プレスリリースを行い、新聞などに取り上げられた(その他の成果5)。これらの研究進捗を踏まえて、この研究項目の研究目的は達成したと考えている。

(研究項目B) CSLの滑走に伴う磁気情報転送の実証

入出力アンテナを備えたマイクロメーターサイズの微細結晶デバイスにおける“高周波信号の伝達特性の評価”に焦点をあてて、研究を進めた。具体的には、マイクロストリップ回路を介した高周波信号の入カラインおよび信号受信ラインを設けたサファイア基板へキラル磁性結晶 CrNb_3S_6 の微細試料を配置し、高周波信号の伝達特性を評価している。入力信号の進行方向とキラル磁気秩序構造の配置に応じた非相反応答やキラル磁気秩序構造の位相コヒーレンスに基づく非局所位相応答などの伝達特性を観測している。

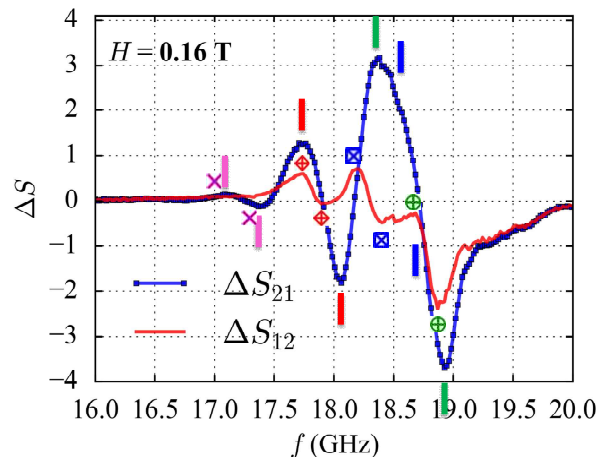


図6 微細キラル磁性結晶における
スピン応答の非相反伝搬

高周波信号の進行方向をキラル軸に平行にとる場合、強制強磁性状態において強い信号伝達が観察された。スピン波の進行方向の反転に対して信号強度に大きな違い(非相反性)を示すことがわかった(図6)。その比は臨界磁場近傍で20程度であり、金属系の材料としては大きい。静磁表面スピン波モードで知られる非相反伝搬の観点から膜厚依存性などを含めて系統的な解析を進めている。キラルソリトン格子の磁場領域では信号は極めて弱くなり、強い磁場依存性があることがわかった。

一方、キラル軸方向に垂直に高周波信号を入力する場合、強制強磁性領域とキラルソリトン格子領域の全領域で信号伝達が観察された。強度に関する非相反性は見出されないが、信号強度はゼロ磁場近傍で強くなる。キラルソリトン格子構造自身が伝送媒体となってスピン応答を増強している可能性が高く、その磁場依存性を系統的に調べている。また、周波数シフトがほぼ全磁場領域において観察された。これはキラルソリトン格子を構成している反対称交換相互作用によるマグノンバンドシフトのためであり、キラル磁性特有の効果であると解釈される。このキラル磁性体が示す強い非相反性はデバイス設計に興味深い高周波特性といえる。これらの研究成果について論文の準備を進めている。本研究項目では、別途にスピンモーメント流の検証という大きな目標があり、その意味では中途の段階にあるが、スピン波伝達の検出という観点からは目標を達成したと考えている。

上記の研究成果に加えて、2次元キラル磁気構造であるキラル磁気渦の磁気相転移現象の安定化メカニズム(論文3)や内部構造(論文4)を解明した。キラル磁性応用の学理構築において重要な研究成果である。(研究項目C) CSLの滑走に伴う巨大スピン起電力の実証 と (研究項目D) 孤立ソリトン滑走による情報転送の実証 は進行中であり、現時点で公開できる研究成果はない。

3. 今後の展開

本研究では、透過型電子顕微鏡法を用いた精密磁気構造解析、磁気抵抗計測、高周波スピン応答計測などを通じ、キラルスピンソリトン格子のスピン応答がトポジカルな離散性、広帯域化、巨大化、可変性、非対称性などの特異な性質を示すことを明らかにした。キラリティとスピン位相コヒーレンスに保護されて安定に発現するキラルスピンソリトン格子に固有のこれらの物質機能を活用

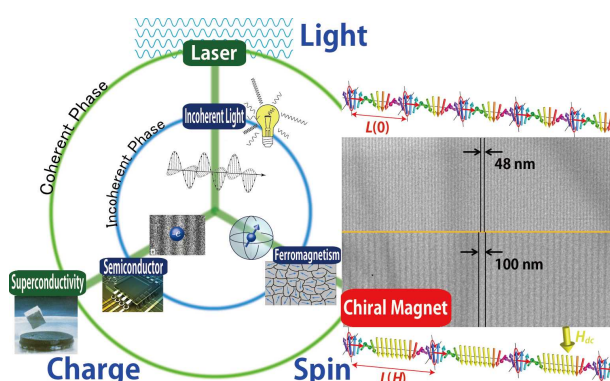


図11 位相コヒーレンスと物質機能[5]

すれば、磁気の根源である電子スピンの位相を制御し操るための基盤技術を開発することが可能になるであろう。つまり、従来からの磁気工学やスピントロニクス研究においてほとんど注目されることのなかったスピン位相に主眼を置く「スピン位相エレクトロニクス」という新たな研究領域を開拓するための基盤学理を構築することができつつある。研究成果は国内外からも注目を集めるようになってきており、例えば、日本物理学会の専門学術誌に invited review paper に研究成果とスピン位相エレクトロニクスの概念を紹介する機会を得た(研究成果リスト:論文5)。

物質科学における位相コヒーレンスの重要性は電荷の位相コヒーレント状態である超伝導や光のコヒーレント状態であるレーザーの研究において認識され、活用されている(図11)。キラル磁気秩序は磁性分野における位相コヒーレンス状態であり、技術革新を産み出すポテンシャルが大きい。研究成果を活用すれば、例えば、マルチビット化、非減衰高速ソリトン伝達、スピン位相変調を介した高速情報伝達などの情報処理技術が開発できるであろう。将来的には、磁気メモリ・センサ、高周波デバイス、論理回路などの磁気情報デバイスの新たな動作原理の開発につながると期待され、今後も精力的に研究活動を継続する。

その一方で、さきがけにおける研究活動期間中に、当該研究領域が戦略目標とする具体的な革新的デバイスの形を明確に見出すことはできなかった。デバイスにつながりそうな新しいデータが出た(出そうな)ときは、研究室内外で、時に共同研究者も交えて議論を重ねた。この取り組みの成果の一つとして、冗長性を持つ論理回路を提案している。しかしながら、CMOSが主流の現状を踏まえると、この提案が最良のデバイスであるかは明確ではない。言い換えると、研究が基礎学術段階にあることを強く反映しているともいえる。基礎学術レベルの段階からデバイスの形を絞り込むことは難しいが、できる限り早い段階でキラル磁性ならではのデバイス機能開拓の方針を定めたい。同領域のレイヤーにまたがるさきがけ研究者を含めた研究コミュニティにおいて幅広い視点から研究の意義に関する議論を交わしていきたい。

この関連で、さきがけ研究領域内でレイヤー間研究会を発案し、幹事を務めている。発案当初の参加メンバーは、アメーバ計算に強い関心を頂く研究者たちと領域の戦略目標であるレイヤー間融合の意図・意味に苦悩し自主的に勉強しようとする研究者らである。現段階では、お互いの研究の理解を進めることを最優先課題として、将来的な方向性、共同研究の可能性

を議論している。研究会ではプログラム(時間)を明確に区切らないスタイルとして、質疑・議論を重要視している。そのことがレイヤー間の相互理解を進めるのに功を奏しているように感じている。参加メンバーは副研究総括による研究者分布表においてエッジに位置している。結果論ではあるが、全研究者を包括しているともいえ、関心を抱くさきがけ研究者が参加できる体制となっている。これらの活動が将来的に領域の戦略目標に貢献できるものとなればよいと思う。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

・研究目的の達成状況

当初に設定した研究目的の達成度は70%程度である。想定外の研究成果も得られていることを考慮すると、当初の目標がそれ以上の成果が得たと考えている。一方で、特許申請を2件行ったものの、デバイスの明確な形を提案できなかった。これは本研究が基礎段階にある研究であることを反映しており、キラル磁性体のポテンシャルの高さを示唆するものと考えて研究を継続する予定である。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究室の学生(3名)と研究補助者(1名)を登録し、また、他の学生の研究テーマも関連したものに設定することで、精力的かつ効率的に研究を進めることができたと考えている。また、数多くの研究者と共同研究を行った。日本国内にとどまることなく、海外の共同研究先に断続的に中長期滞在を行い、現在の共同研究体制を構築することに成功した。加えて、国際的なコンソーシアムを形成することに成功し、日本側の一翼を担って研究活動を進めている。これらの点は高く評価されるべきと考えている。研究費執行は研究の進行を最優先に考え、項目間流用や前借りなどを含めて、有効に活用した。それにより、キラル磁気共鳴の検出、スピン波伝達の検出に成功するなど、大きく研究を進展させることができた。

・研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)

キラル磁性体のポテンシャルを開拓していると自負している。当初、世界の研究の主流(流行)から見れば、本研究は当初、孤軍奮闘したものであったが、さきがけ研究での研究成果も一因となり、学术界、また、産業界からの認知度も向上している。

キラリティの概念は、素粒子、分子、DNA、結晶、生体など、自然界の大小さまざまなスケールで見出すことができ、キラルゆえの有用な機能を物質にもたらしことが知られている。これは、電子がキラルな原子・分子配列の骨格の中を動き、キラル対称性に基づく特異な物理的性質を獲得することによる。本研究では、「キラリティ」は物質における機能発現の鍵になると考え、キラルな結晶構造をもつ磁性結晶に注目し研究を進め、数多くの興味深い研究成果を得た。このことは固体物理、物性物理のみならず多くの研究分野に影響を与えている。この意味で、研究成果は科学としての立ち位置を切り拓くのに十分のものであると考えている。

一方、技術という視点からは、ナノエレクトロニクスの革新を目指す研究領域でのさきがけ研究において確乎たる方針を示すことはできなかった。具体的な技術・デバイス・システムを以てして、社会・経済への波及効果を言及するのであれば、現時点では未知である。しかしな

がら、物質科学における位相物体および位相コヒーレンスの重要性は電荷の超伝導や光レーザーの研究において認識され、大いに活用されている。キラル磁性体におけるCSLは磁性分野における位相コヒーレンス状態であり、技術革新を産みだすポテンシャルが大きい。将来的には、磁気メモリ・センサ、高周波デバイス、論理回路などの磁気情報デバイスの新たな動作原理の開発につながると期待している。

・領域独自の評価項目

領域の戦略目標「素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術などの融合」の観点からは、評価が極めて低くなることもありうる。短期的視野に基づいた研究ではなく、数十年先を見据えた研究と理解していただきたい。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

カイラルソリトン格子の巨視的位相コヒーレンスを応用に結びつけようとするユニークな提案であり、長距離スピン秩序に基づく多値磁気抵抗の観測や集団共鳴現象の実験的検出に期待した成果が出ている。

具体的には、マイクロメーター程度の微細化単結晶デバイスを作製し、離散的ソリトン閉じ込め効果とコヒーレントスピン位相に起因する多値的磁気抵抗効果を実証した。これはカイラルソリトン格子の示す位相コヒーレンスが巨視的スケールにおいて顕在化することを世界で初めて実証したものである。カイラル磁性体のマイクロサンプリング試料を高周波回路に配置し、共鳴現象の測定を進めていくことで、スピン波の位相コヒーレンス、集団的共鳴現象のダイナミクスの解明も進展した。特に、磁気共鳴モードの非対称性など興味深い高周波特性が明らかになった。これらはカイラルソリトン格子の集団ダイナミクスの高速制御につながる成果である。強い偏光依存性や長距離スピンコヒーレンスに基づいた非局所応答など当初想定していなかった成果も出現している。課題名に「スピン位相エレクトロニクスの創成」とあるように、非常に高い目標を掲げている関係で、当初目標のすべてが達成されたわけではないが、「さきがけ」の研究成果として十分に高く評価できる研究内容である。研究実施に際しては、イギリス・グラスゴー大学との国際共同研究を積極的に推進したが、これも研究を良い方向に導いている。

カイラルソリトン格子が有するマクロスコピックなスケールでのスピンコヒーレンスは、ユニークで多様な制御性が期待され、潜在的なポテンシャルは高い。物理的理解をさらに深めながら、「さきがけ」で培ったエレクトロニクスの視点を加えることで、課題名にある「スピン位相エレクトロニクスの創成」により一層近づくことを期待したい。「さきがけ」期間中にレイヤー間研究会の幹事として形成した、若手研究者のネットワークも「スピン位相エレクトロニクスの創成」に役立つことが期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Y. Togawa, Y. Kousaka, S. Nishihara, K. Inoue, J. Akimitsu, A. S. Ovchinnikov, J. Kishine,

“Interlayer Magneto Resistance due to Chiral Soliton Lattice Formation in Hexagonal Chiral Magnet CrNb₃S₆”, *Physical Review Letters* **111**, 197204/1–5 (2013).

2. Y. Togawa, T. Koyama, Y. Nishimori, Y. Matsumoto, S. McVitie, D. McGrouther, R. L. Stamps, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, I. G. Bostrem, V. E. Sinitsyn, A. S. Ovchinnikov, J. Kishine, “Magnetic Soliton Confinement and Discretization Effects Arising from Macroscopic Coherence in a Chiral Spin Soliton Lattice”, *Physical Review B* **92**, 220412(R)/1–6 (2015). *Rapid Communication, Editors’ Suggestion*, 文部科学省プレスリリースレクチャ (2015/12/15), 日刊工業新聞 第 33 面 (2015/12/18), 科学新聞 第 4 面 (2016/1/1), 日本経済新聞 第 13 面 (2016/1/11), *AlphaGalileo* (2016/2/10), *EurekAlert!* (2016/2/11) など.

3. A. O. Leonov, Y. Togawa, T. L. Monchesky, A. N. Bogdanov, J. Kishine, Y. Kousaka, M. Miyagawa, T. Koyama, J. Akimitsu, Ts. Koyama, K. Harada, S. Mori, D. McGrouther, R. Lamb, M. Krajenak, S. McVitie, R. L. Stamps, K. Inoue, “Chiral Surface Twists and Skyrmion Stability in Nanolayers of Cubic Helimagnets”, *Physical Review Letters* **117**, 087202/1–5 (2016).

4. D. McGrouther, R. Lamb, M. Krajenak, S. McFadzean, S. McVitie, R. L. Stamps, A. O. Leonov, A. N. Bogdanov, Y. Togawa, “Internal structure of hexagonal Skyrmion lattices in cubic helimagnets”, *New Journal of Physics* **18**, 095004/1–12 (2016).

5. Y. Togawa, Y. Kousaka, K. Inoue, J. Kishine, “Symmetry, structure and dynamics of monoaxial chiral magnets”, *Journal of Physical Society of Japan* **85**, 112001/1–37 (2016), *Invited Review Paper, Cover image on JPSJ web site*.

(2)特許出願

研究期間累積件数:2件

1.

発 明 者: 戸川 欣彦、松本 悠、十河 忠幸、米村 潤一郎

発明の名称: 磁気デバイス及び論理回路装置

出 願 人: 大阪府立大学

出 願 日: 2015/2/27

出 願 番 号: 特願 2015-039011

2.

発 明 者: 戸川 欣彦、松本 悠、岸根 順一郎

発明の名称: 磁性体装置及び高周波デバイス

出 願 人: 大阪府立大学

出 願 日: 2015/2/27

出 願 番 号: 特願 2015-039016

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 【学会発表・招待講演】Yoshihiko Togawa, “Structure and Functionality of Chiral Soliton Lattice in a Monoaxial Crystal of Chiral Magnet”, 3rd. TOYOTA RIKEN International Workshop, 2016/7/2.

2. 【学会発表・招待講演】戸川 欣彦、「キラル磁気秩序の物理と応用」、2016 年 第 77 回

応用物理学会秋季学術講演会 スピントロニクス分科 シンポジウム「応用に向けた新規スピントロニクス現象の物理」、2015/9/15.

3. 【受賞】戸川 欣彦、「日本顕微鏡学会奨励賞」(2014)
4. 【解説】戸川 欣彦、キラル磁性のスピントロニクスへの応用、化学工業 67(3), 1-8 (2016).
5. 【プレスリリース】文部科学省プレスリリースレクチャ、「らせん結晶構造を持つ磁石のひねり数を制御・検出に成功～電子デバイスのメモリー密度の飛躍的な向上が期待～」、2015/12/15、<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20151217-2/index.html>.