

論文審査の結果の要旨

氏名 藤田 浩之

トポロジカル光波とは、光渦や cylindrical vector beam (CVB) などの、特異な空間構造をもつレーザーの総称である。これらは、1990年代以降に光学分野で開発された光源であり、現在では、幅広い周波数帯での生成が可能である。また、誘導放出制御 (STED) 顕微鏡やレーザー加工などへと応用されている。一方、このようなトポロジカル光波の物質科学への応用は、現在までほとんど議論されてこなかった。しかし、1980年代に発展した高強度超短パルス光の開発に端を発する光物性物理学の進展が、光誘起相転移や超高速消磁などの興味深い現象の発見につながったことを鑑みると、トポロジカル光波を用いた新奇物性の探求は光物性の重要なフロンティアであると考えられる。本論文は、このような背景のもと、1. 光渦を用いた磁性体の高速制御、特にカイラル磁性体における磁気欠陥の生成、2. CVBの特異な集光特性のフェルミ面や電気磁気結合などの物性測定への応用、の2つのトピックを論じたものであり、英文で4章からなる。

第1章は序論で、研究背景と目的、および本論文の構成について述べられている。特に、本論の解析で必要となる、光渦と CVB の詳細に割かれている。光渦とは、Laguerre-Gaussian モードとも呼ばれる、角運動量をもった光波である。特に中心部分で、その強度がゼロとなる特異な空間構造をもつ。これに対して、CVBは角運動量をもたない光波であるが、大きさが等しく逆符号の角運動量をもつ2つの光渦を重ね合わせたものとみなすことができる。CVBは、強集光時に特有の電磁場配位をもち、特に磁場成分のみを高周波で印加することを可能にする。

第2章では、光渦の磁性体の高速制御への応用について議論されている。まず、カイラル磁性体とその磁場中相図、スキルミオンやスキルミオニウムなどの磁気欠陥について導入した後に、磁性体と光波の典型的な時間・空間スケールの違いについて述べられている。磁性体中のスピンの集団ダイナミクスの時間スケールは THz (10^{12} Hz) 以下であり、この周波数帯の電磁波の波長は $100\ \mu\text{m}$ 以上となる。一方で、スキルミオンなどの磁気欠陥の大きさは、大きいものでも $1\ \mu\text{m}$ 以下であり、このスケールの乖離が光渦による磁気欠陥の生成を困難なものとしている。

本論文では、この困難を克服するアプローチを3つ提案している。最初の提案は、光渦によるスピン波の誘起である。スピン波は特定のスケールを持たない励起であるため、光渦と磁性体のスケールの違いが問題にならないと期待される。このことを、強磁性体中のスピンドायナミクスを記述する Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を解析することにより示している。第二の提案は、プラズモニクスなどの技術により、回折限界以下に集光した光渦を用いるというものである。このような光渦をスピン偏極したカイラル磁性体に照射した場合、スキルミオンをはじめとする多様なトポロジカル欠陥が安定に生成されることを、LLG 方程式を用いて示している。第三の提案は、高周波数帯の光渦を用い、光照射による局所的な加熱によって磁気欠陥を生成するというものである。Stochastic LLG 方程式を解析することにより、光渦によってスキルミオニウムと呼ばれるスキルミオンの分子状態が高確率で生成されることを示している。

第3章では、CVBの様々な物性測定への応用が議論されている。具体的には、局在磁気モーメントを有する金属磁性体のフェルミ面の測定、伝導電子系の高周波数帯における磁気共鳴の観測、マルチフェロイクスにおける動的電気磁気効果の観測、誘電媒質中分子の高周波電子スピン共鳴の観測などが原理的には可能であることを、簡単な理論模型の解析により示している。これらはいずれも、CVBの特異な集光特性を用いてはじめて可能となるものである。また、CVBによる電場の方位方向の成分とトポロジカル絶縁体の端電流との結合や、CVBを用いた磁性体の Floquet エンジニアリングについても議論されている。

最後に第4章では、論文全体のまとめと結論が述べられている。

以上のように、本論文は、光渦による磁性体の高速制御の可能性、また、CVBにより高周波磁場成分のみを印加できることをはじめて指摘し、その具体的な応用を理論的に提案したものである。得られた結果は、トポロジカル光波による光物性物理学という新分野を切り拓くものであり、今後のさらなる研究を刺激することが期待される。よって本論文は、学位論文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。なお、本論文の第2章の結果は佐藤正寛氏との、第3章の結果は佐藤氏と多田靖啓氏との共同研究に基づいているが、論文提出者が主体になって問題設定と定式化、解析及

び結果の検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。
したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。