

京都大学	博士 (工学)	氏名	Livio Leiva
論文題目	Study on the Interconversion Phenomena between Charge, Spin and Heat Currents in the Heusler Alloy Weyl Ferromagnet Co₂MnGa (ワイル強磁性体 Co ₂ MnGa における電流・スピン流・熱流の相互変換に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>現代の固体物理では、位相幾何学におけるトポロジーの果たす役割は大きくトポロジカル絶縁体・超伝導体研究は爆発的に流行している。更にトポロジカル物質の新しいファミリーとして、フェルミ点同士に node が現れるトポロジカル半金属物質 (ワイル半金属) に大きな注目が集まっている。本論文では、ワイル半金属でかつ強い強磁性を有するホイスラー合金であるワイル強磁性物質 Co₂MnGa(CMG) を対象材料として、CMG 中の電流・スピン流・熱流間のトポロジカルな効果による相互変換をスピントロニクス視点から多角的に研究した成果がまとめられている。以下に本論文の内容をまとめる。</p> <p>第一章では、本論文で記述される研究内容として重要なスピン流・スピンカロリトロニクス・ホイスラー合金・ワイル半金属・スピン変換に関する重要な理論や先行研究がまとめられており、本研究の立ち位置が客観的に示されている。</p> <p>第二章以降が研究成果のまとめとなる。</p> <p>第二章は電氣的なスピン流＝電流相互変換を CMG 中で実現した結果が述べられている。まず CMG 薄膜の結晶成長と実験に用いた非局所スピンバルブ素子の作製手法について簡単に述べられたのち、電氣的に純スピン流を生成しそれを CMG に吸収させ、CMG のトポロジカル物性 (有限のベリー位相) 由来の逆スピンホール効果を用いた高効率スピン変換を実現した結果が詳述されている。さらに CMG に電流を流すことで誘起される正スピンホール効果による純スピン流を電氣的に計測した結果が述べられ、正逆スピンホール効果間のオンサーガー相反定理が CMG では破れていること、その起源がスピンホール角のスピン依存性であることを世界で初めて明らかにした結果が議論されている。</p> <p>第三章では、CMG における熱流＝電流変換に関する研究成果が述べられている。CMG のトポロジカル性は、異常ネルンスト効果などのスピン熱電効果を向上させることは先行研究により知られているが、本研究ではホールバー素子を用いて CMG の結晶性によりスピン熱電効果がいかに増強されるかを系統的に調べ、実現した高い異常ネルンスト効果を用いて一軸性磁気抵抗効果を従来の強磁性金属材料のそれを 2 桁凌駕できることを実験的に実証している。</p> <p>第四章では、ゼーベック係数のスピン依存性に起因する新しいスピン熱電効果であるスピン依存ゼーベック効果(SDSE)に着目し、非局所スピンバルブ素子で電氣的な手法により生成されるスピン信号をその対称性に注目することで純粋に電氣的に生成される信号と熱的 (SDSE による) に生成される信号を分離している。更にこの結果を基に CMG のスピン依存ゼーベック係数を初めて定量的に同定することに成功している。</p> <p>第五章では、近年新たに発見された新しいホール効果ファミリーの 1 つであるスピン異常ホール効果に着目し、CMG の強磁性共鳴とスピントランスファートルクによる強磁性共鳴の変調、さらにスピン異常ホール効果の寄与について詳細な実験結果が紹介されている。</p> <p>第六章は本研究のまとめとなる。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、現代の物性物理学において極めて重要なトポロジカル物質群の1つである、ワイル強磁性体 Co_2MnGa を対象とした、そのトポロジカル性由来の電流・スピン流・熱流の相互変換物性に関する先駆的研究成果がまとめられている。以下がその成果となる。

1. 電荷の流れである電流とスピン角運動量の流れであるスピン流の相互変換は、ホール効果のスピン版とも言える正逆スピンホール効果によって理解される。スピンホール効果には内因的・外因的の2つの要因があるが、物質中の波動関数の捻じれの反映であるトポロジカルな効果によって内因的スピンホール効果が増強されることが知られている。本研究では **CMG** の有するトポロジカルな効果による巨大なスピンホール効果が現れ、電流・スピン流変換係数であるスピンホール角が強磁性体中で最大、全物質中での2番目の大きさであることを明らかにした。
2. スピンホール効果同様に、熱流と電流の相互変換もまたトポロジカルな効果による増強される。本研究では **CMG** における異常ネルンスト効果（強磁性体における熱流→電流変換効果）が巨大であることを利用し従来の強磁性体の2桁大きな一軸性磁気抵抗比を観測することに成功した。更に熱流とスピン流の相互変換であるスピン依存ゼーベック効果が **CMG** におけるスピン流生成効率にどのように効いているかも精査している。
3. スピンホール効果の新しいファミリーである正逆スピン異常ホール効果は2019年に発見された極めて新しい効果であり、その名の通り強磁性体で発現する異常ホール効果に新たな深みを加えている。本研究では未開拓であるワイル強磁性体におけるスピン異常ホール効果の存在性についてスピントルク強磁性共鳴法を用いて精査し、**CMG** におけるトポロジカル物性が同効果どのような効果を与えているかを検討している。

以上のように、本論文では現代物理学で極めて重要な物質群であるワイル強磁性体群においてもっとも優れた材料である **CMG** を対象として、同物質の有するトポロジカル物性が最も顕在化するスピントロニクス物性現象にフォーカスして新奇なトポロジカル効果を詳細に検討した革新的業績がまとめられており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年8月20日に士学位論文調査委員の3名（白石誠司・山田啓文・引原隆士）の前で、申請者である Livio Leiva 氏による論文内容の説明、及び論文内容とそれに関連した物性物理学に関する事項について試問を行い、申請者の研究が世界的に当該研究分野において優れた内容と先進性を有しており、また申請者が本研究に関する十分な物理的知見を深い理解を有していることを確認できたことから、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規定第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。