

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	山崎照夫
論文題目	Novel phenomena caused by the chiral orders in metallic magnets (金属磁性体におけるカイラル秩序がもたらす新奇現象)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、ヘリカル(らせん)スピン構造をとる金属磁性体 MnP および $Gd_{1-x}Y_x$ に対して、その物性を極めて微小な外部磁場下で精密に測定し、その結果、スピンのカイラル自由度(スピнкаイラリティ)の秩序化(カイラル秩序)、および、それに伴う新現象、を新たに見出した、という成果をまとめたものである。それぞれの系に対して記述した2部構成であり、第1部が5章、第2部が4章、の計9章からなる。</p> <p>第1章は序論であり、スピнкаイラリティが他の自由度と結合することで生じる現象と、カイラル秩序の1つであるヘリカルスピン構造を持つ金属磁性体 MnP に対する既報の物性、を紹介している。カイラリティが他の自由度と結合する際、結晶構造の対称性に由来して生じる Dzyaloshinsky-Moriya (DM) 相互作用 (Heisenberg 型交換相互作用より高次のベクトル積型の反対称交換相互作用) が重要な役割を演じる。たとえば、磁気秩序と誘電分極が同時に生じるマルチフェロイック物質では、外部磁場が磁気構造を変化させると、DM 相互作用の逆効果を通じて格子系が変化し、結果として電気分極が反転する、という極めて興味深い現象が起こる。一方、金属磁性体 MnP は、古くからその磁性が調べられ、また、DM 相互作用が存在しうる結晶構造を持つものの、DM 相互作用の影響はこれまで検討されてこなかった。その影響を調べるのが第1部の目的である。</p> <p>第2章では MnP の単結晶育成方法、および実験手法について述べている。</p> <p>第3章では MnP に対する磁化、電気抵抗率、比熱、および中性子散乱の測定結果について述べている。磁化測定によれば、中間温度域で、磁化容易軸と垂直な b 軸方向に $10^{-3}\mu_B$ 程度の極微小な自発磁化を持つ弱強磁性が生じ、また、この弱強磁性が、反強磁性的な a 軸成分が DM 相互作用によって b 軸方向に傾けられた結果生じる傾角反強磁性であることが明らかになった。さらに、試料が低温のヘリカル相まで冷却されたかどうかによって、中間温度域の傾角反強磁性相が全く異なる自発磁化を持つという、極めて特異な温度履歴現象が見出された。核散乱強度にも同様の温度履歴現象が観測され、この履歴現象が格子の変形を伴うことが示唆された。さらに、温度履歴現象の引き金となっている低温ヘリカル相を中性子散乱実験で調べたところ、これまで観測されていない新たな磁気散乱が観測された。この結果は、低温のヘリカル秩序のスピンの回転面が、伝搬ベクトル(a軸と平行)に垂直ではなく、DM 相互作用によって +a 軸方向および -a 軸方向に交互に傾いていることを示している。すなわち低温相のスピンの構造は傾斜ヘリカル構造であることを意味する。</p>			

第4章では、本研究で初めて観測された特異な温度履歴現象の解釈について議論している。磁化および中性子核散乱の温度履歴は、低温域の傾斜ヘリカル相で秩序化するベクトルスピカイラリティが、DM相互作用の逆効果によって格子系を変化させ、さらに、中間相に昇温後もその格子変形が残留する結果発現する、と解釈できる。これは、金属磁性体でDM相互作用の逆効果を観測した初めての例である。

第5章は第1部の結論であり、得られた成果を要約している。

第6章は第2部の序論であり、スピン移行トルクに関する研究の現状と理論的に予言された新現象について紹介している。バルクの金属ヘリカル磁性体に電流を流すと、スピン移行トルクによって、スピン全体がそのヘリシティを保ったままヘリカル軸を回転軸とした回転運動が誘起される、という電流誘起スピンドイナミクスが最近理論的に示唆されている。このスピンドイナミクスを実験的に観測することが第2部の目的である。

第7章では、 $Gd_{1-x}Y_x$ の単結晶育成方法および、実験手法について述べている。

第8章では、 $Gd_{1-x}Y_x$ の単結晶試料に電流を流した状態で行った交流磁化率測定、およびゼロ電流下で行った交流および直流磁化率測定の結果を述べている。この物質の磁性は磁場に非常に敏感で、交流磁化率が電流の影響を受けることがわかったが、それが電流そのものによる影響なのか、あるいは電流に伴って生じる磁場による影響なのかを分離できなかった。本研究を進める過程で、ゼロ電流中の交流磁化率の虚数成分が、ヘリカル秩序相に対応する温度域で顕著に増大することがわかった。これは、電流によって誘起されるスピンドイナミクスが電流を印可しなくても自発的に生じることを示唆する。これは、スピンの運動が交流磁場によって極めて容易に誘起されるものの、各スピンの相対関係で決まるヘリカル構造、すなわちベクトルカイラリティは保存されることを意味し、ある種のスピンとカイラリティの分離を観測したことを意味する。

第9章は第2部の結論であり、得られた成果を要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ヘリカル(らせん)スピン構造をとる金属磁性体 MnP および $Gd_{1-x}Y_x$ において、それらの物性を極めて微小な外部磁場下で精密に測定することで、スピンのカイラル自由度(スピンカイラリティ)の秩序化(カイラル秩序)、および、それに伴う新現象を新たに見出した成果をまとめたものである。主な成果は次のとおりである。

ヘリカル磁性体 MnP に対し、以下の事実を見出した。

1. $T_N=47$ K 以下における磁気構造は、従来考えられていたものと異なり、DM 相互作用によってヘリカル面が bc 面から a 方向に θ および $-\theta$ だけ交互に傾いた傾斜ヘリカル構造(変調強カイラル構造)である。
2. 47 K $< T < 282$ K の温度域では、反強磁性的な秩序モーメントの a 軸成分が DM 相互作用によって b 方向に傾けられ、b 軸方向に微小な自発磁化を生じる、傾角反強磁性状態(反強カイラル構造)である。
3. 試料が低温域の傾斜ヘリカル相まで冷却した後、再び中間温度域に昇温すると、傾角反強磁性状態における自発磁化が著しく増大する、という極めて特異な温度履歴現象を示す。
4. 同様の温度履歴現象は格子系でも見られ、この温度履歴現象が、低温域の傾斜ヘリカル相で秩序化するベクトルスピンカイラリティが、DM 相互作用の逆効果によって格子系を変化させ、さらに、中間相に戻した後でもその格子変形が残留する結果発現する、と解釈できる。

また、磁性合金 $Gd_{1-x}Y_x$ に対し、以下の事実を見出した。

5. ヘリカル秩序を示す温度域で、交流磁化率の虚数成分が低周波数域(< 10 Hz)のみで顕著に増大する。これは、スピン全体がヘリシティ(ベクトルカイラリティ)を保ったままヘリカル軸を回転軸とした回転が誘起される状態、つまり、ある種のスピンとカイラリティの分離を観測したことを意味する。

以上、本論文は、古典的な金属磁性体において、スピンのカイラリティという新たな視点から物性を再評価することで、新奇な物理現象を発見したものであり、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、平成 22 年 8 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。