

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 宮田 敦彦

本論文「極限超強磁場下での磁気光学的手法によるフラストレート磁性体の研究」(研究題目)では、100 テスラから 700 テスラの超強磁場発生手法である一卷きコイル法と電磁濃縮法を用いて、フラストレート磁性体であるクロムスピネル酸化物の物性解明へと応用した研究成果をまとめたものである。

第1章「序論」では、近年、物性物理分野で盛んに研究が行われているフラストレート磁性体に関する研究背景及び意義について述べている。フラストレート磁性体では外部磁場印加により新奇かつ多彩な磁気相が出現する可能性がある。その理解には強磁場環境での物性測定が極めて有効であると考えられる。しかし、近年報告されている多くのフラストレート磁性体は強い反強磁性交換相互作用を示すため、飽和磁化までの全磁気相を解明することは困難とされてきた。そこで、超強磁場発生手法である電磁濃縮法での物性測定システムの開発を行いフラストレート磁性体のクロムスピネル酸化物へと応用するといった課題を提起している。

第2章「幾何学的フラストレート磁性体に関する基礎物性」では、フラストレート磁性体の研究背景に対して詳しく述べ、本論文で対象としたクロムスピネル酸化物 ACr_2O_4 ($A = Zn, Cd, Hg$)の基礎物性について述べている。クロム酸カドミウム ($CdCr_2O_4$) とクロム酸水銀 ($HgCr_2O_4$) の磁化過程は、スピン - 格子相互作用を取り入れた **Penc** 等による理論が上手く適用される。一方で、クロム酸亜鉛 ($ZnCr_2O_4$) は、スピン - 格子結合が弱いと考えられ、**Penc** 等の理論は新たな磁気相の出現を予言する。また、スピン - 格子結合以外の摂動の寄与が顕著になり、新奇な物理現象が現れる可能性もある。しかしながら、 $ZnCr_2O_4$ は、大きな反強磁性交換相互作用を示し、飽和磁化までの測定には、400 T 程度の超強磁場が必要であると予測され、これまで実験的検証は不可能とされていた。

第3章「実験手法及び開発」では、超強磁場の発生手法として一卷きコイル法及び電磁濃縮法について述べている。近年、電磁濃縮法では、銅を内張りしたコイルが開発され、室内世界最高磁場値を更新するに至った。本論文では、このシステムを物性測定に応用できるように、大口径破壊型磁場発生コイルおよび自作の極低温用ミニチュアクライオスタットの開発を行い、600 T の極限超強磁場かつ 5 K の極低温下といった複合極限環境下での物性測定を可能にした。極低温での物性測定では、世界でも 350 – 450 T 程度の磁場値が限界であったが、これを大幅に更新した。更に、このような環境下で高精度の磁気光学測定系を構築した。

第4章「実験結果と考察」では、 $ZnCr_2O_4$ における一卷きコイル法及び電磁濃縮法により得られた結果について考察している。

一卷きコイル法の測定 (< 190 T) により、 $ZnCr_2O_4$ では、キャントした 2:1:1 相が反強

磁性相とプラトー相の間に存在することをはじめて観測することに成功した。スピン - 格子相互作用を取り入れた Penc 等の理論によると、 ZnCr_2O_4 のようにスピン - 格子結合が弱結合極限に位置する物質では、このキャントした 2:1:1 相の存在が予言されており、この物質系での磁気秩序の理解において重要な発見である。また、温度上昇に対して 1/2 プラトー相が安定化する振る舞いを観測した。これは、エントロピーを増大しようとするコリニアな磁気構造が熱揺らぎにより安定化することを示している。

次に、電磁濃縮法の測定 (< 600 T) により、 ZnCr_2O_4 の全磁化過程の観測に成功し、温度 4.6 K、磁場 410 T で強磁性相転移に至ることを観測した。また、光吸収強度変化に着目することにより、350 T において磁気測定では観測が困難であった新たな相転移を見出した。これは、光吸収分光測定によって結晶場（結晶構造）を反映する遷移の光吸収強度に異常がみられたことから、構造相転移を伴った転移であるとしている。ここで発見した 350 T から 410 T に対応する磁気相は、ペンク (Penc) 等による従来の理論枠では説明できない磁気相である。同様の振る舞いを、 CdCr_2O_4 の磁気光学分光測定においても観測している。ここから、クロムスピネル酸化物に共通して現れる磁気相であることを示している。類似物質 CdCr_2O_4 と HgCr_2O_4 の測定結果との比較から、この 350 T に対応する転移では等方的な結晶構造になっていると示唆している。また、磁気構造も結晶構造と同様に等方的になっていることから、アンブレラ型の磁気構造となっていると結論づけている。ここで、バーグマン (Bergman) 等の理論的考察に着目し、この磁気構造は、スピン-格子結合によるボンド歪みを最隣接磁気副格子にまで拡張したスピン・ハミルトニアンによって説明できると提案している。また、スピン演算子をボソン描像で捉えることにより、 ZnCr_2O_4 の全磁気構造と ^4He の物質相との類似性に関する議論を行っている。この系では、並進対称性と回転対称性が破れた超固体相が、並進対称性の破れた固体相と回転対称性の破れた超流動相の中間状態として現れていることから、 ZnCr_2O_4 の磁気相と ^4He の物質相との間で、対称性の破れ方に極めて強い類似性があることを指摘している。

第 5 章「総括」では、本論文の結果をまとめ、今後の展望について述べている。

以上で述べたように、本論文では、電磁濃縮法超強磁場発生装置での物性測定技術開発を行うことにより、精度と信頼性の高い磁気物性計測システムを構築している。物性計測としてはこれまでの世界の最高磁場値を大幅に更新するという結果を得ている。そして、この物性計測技術を典型的なフラストレート磁性体であるクロムスピネル酸化物へと応用し、 ZnCr_2O_4 の磁化測定に成功し、600 T という極限超強磁場に至る全磁気相の解明をおこなった。本研究は、極めて強い磁場でかつ極低温環境を必要とするために解明が困難であったフラストレート磁性体の研究領域の発展に大きな貢献をしたといえる。また、これらの物性測定技術は、幾何学フラストレート磁性体だけではなく、多岐にわたる物性分野へと応用されることが期待され、物理工学としての貢献は大きいと言える。よって本論文は博士 (工学) の学位申請論文として合格と認められる。