

論文内容の要旨

論文題目 **Metal-Insulator Transition and Anomalous
Hall Effect in Pyrochlore Molybdates**

(パイロクロア型モリブデン酸化物の
金属-絶縁体転移と異常ホール効果)

氏名 井口 敏

本論文の構成

1. Introduction
 2. Experimental
 3. Pressure Induced Anomalous Diffusive Paramagnetic Metal State in $R_2\text{Mo}_2\text{O}_7$
 4. Scaling of Anomalous Hall Effect in Nb-doped $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ with Spin Chirality
 5. Magneto-Optical Probing of Anomalous Hall Resonance in Filling Controlled $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$
 6. Filling Controlled Anomalous Hall Effect
 7. Conclusion
- Appendix A1. Chemical Control of Anomalous Hall Effect in $(\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{Mo}_2\text{O}_7$

概要

強相関電子系における大きなテーマの一つとして、電荷-スピン自由度の結合による様々な物理現象の探求とその理解が挙げられる。特に、しばしばフラストレーションを有する系において発現する非自明な磁気構造とそれに伴う電荷-スピン結合系の物理は、従来からのモット転移系における様々な電子相とその相制御への興味のみならず、近年のマ

ルチフェロイクスに代表される新しい量子現象の探求としても非常に注目を浴びている。

本論文で扱ったパイロクロア型モリブデン酸化物は、その名の通りパイロクロア構造という特徴的なフラストレーション格子を形成し、1電子バンド幅の変化による金属-絶縁体転移、非常に特殊なスピン構造（スピнкаイラリティー）とそれに伴う特徴的な異常ホール効果を示すことが知られており、上記のような新しい物理現象の探求の場として非常に理想的である。

そこで、この系におけるフラストレーションの存在下での金属-絶縁体転移（3章）、ベリー位相による異常ホール効果（4-6章、付録1章）について行った研究をまとめたものが本論文である。

3. Pressure Induced Anomalous Diffusive Paramagnetic Metal State in $R_2\text{Mo}_2\text{O}_7$

$R = \text{Nd} \sim \text{Dy}$ の各単結晶試料において 16GPa までの超高压力下における基底状態の電子相を広範に調べた（図1）。その結果、超高压下においては常圧下では見られない新たな常磁性金属相が常圧下での基底状態に関わらず、ほとんどの物質において現れることが分かった。この常磁性金属相の特徴の一つは常圧下での金属-絶縁体転移点に収束しており高压下に広く存在していることである（図2）。そのため、この常磁性金属相はこの系における特徴的な電荷-スピン結合の結果として発現する本質的なものであると考えられる。さらに、常磁性金属相での抵抗率は温度依存性がほとんどなく、Ioffe-Regel limit より高い悪い金属であることも分かった。これらの結果から压力下で広く存在が確認される異常常磁性金属相についての起源が新しい電荷-スピン結合（拡張された2重交換相互作用モデル 図3）の結果として引き起こされる非フェルミ液体的状態である可能性を議論した。

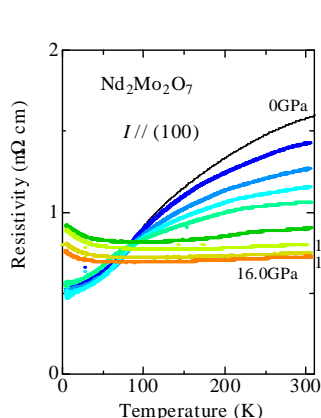


図1. $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ の压力下抵抗率

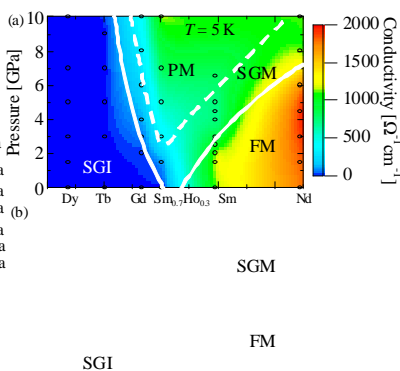


図2. 压力下の電子相図

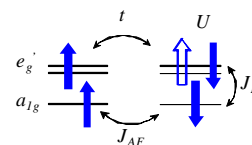


図3. 拡張2重交換相互作用

4. Scaling of Anomalous Hall Effect in Nb-doped $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ with Spin Chirality

スピнкаイラリティーを有する $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ において Nb 置換による抵抗率の増加（図1）を利用して異常ホール伝導度と縦伝導度のスケールング則について調べた結果である。ホール抵抗率の磁場依存性（図2）から、この系におけるスピнкаイラリティー (σ_{xy}^X)、スピナー軌道相互作用 (σ_{xy}^{SO}) による寄与を分離することができ、それぞれ伝導率 (σ_{xx}) の

1.61±0.07、1.46±0.15 乗のスケーリング則（図3）を示すことを確かめた。理論的にもバンド間の共鳴効果として1.6乗則が導かれている。また、実際に他の様々な物質系においても、この冪乗則は非常に良く成立することが知られており、スピнкаイラリティーによる異常ホール効果も例外ではないことが分かった。

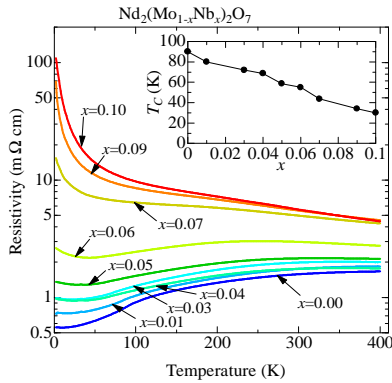


図1. $\text{Nd}_2(\text{Mo}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ の抵抗率と T_c

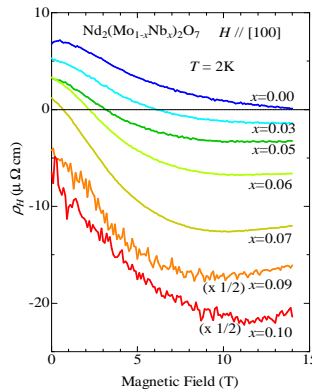


図2. $\text{Nd}_2(\text{Mo}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ の2Kでのホール抵抗率

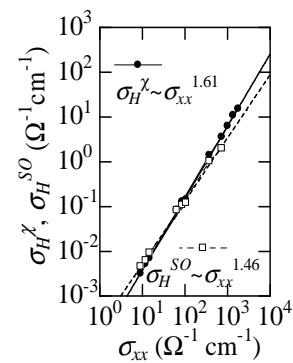


図3. $\text{Nd}_2(\text{Mo}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ のスケーリング

5. Magneto-Optical Probing of Anomalous Hall Resonance in Filling Controlled $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$

4章の結果を踏まえ、異常ホール効果の起源と考えられるバンド間共鳴効果（図1）を磁気光学カー効果によって観測を試みた結果である。磁気光学効果から得られるホール伝導度 $[\sigma_{xy}(\omega)]$ は、通常の dc での異常ホール効果におけるエネルギー領域の拡張を意味する。試料に使った $\text{Nd}_2(\text{Mo}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_7$ は電子、 $(\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x)_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ はホールドーピングに対応するためフィリングの変化に伴った光学ホール伝導度 $[\sigma_{xy}(\omega)]$ を系統的に観測できる。その結果、中赤外領域において光学ホール伝導度に明確なピーク構造を観測し（図2）、そのフィリング変化(図3)等も含めそれらがバンド間共鳴効果のモデルによって説明出来ることを示した。

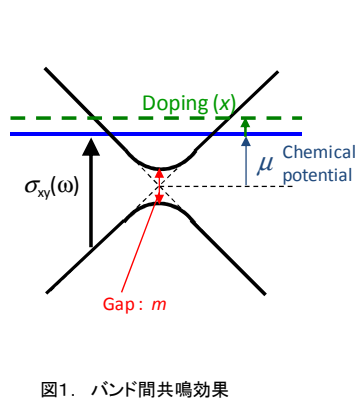


図1. バンド間共鳴効果

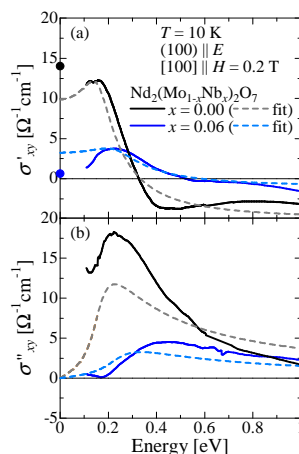


図2. 光学的ホール伝導度

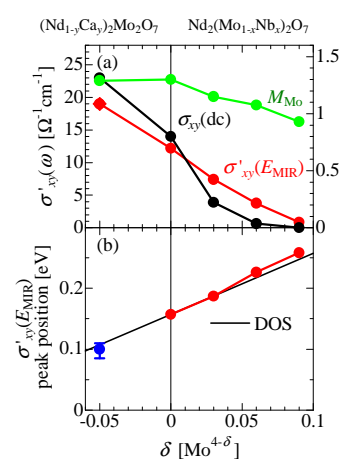


図3. ピーク、磁化、dcホール伝導度のフィリング依存性

6. Filling Controlled Anomalous Hall Effect

6章では5章の結果からも推測される異常ホール効果の共鳴(モノポール)による増大(図

1)について電子フィリングを変化させることによって dc 領域で観測を試みた結果である。特にスピнкаイラリティーの存在しない $\text{Gd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ ではスピ軌道相互作用のみによる異常ホール効果を観測できる。5章の結果からは $x=0.15$ 程度のホールドーピング量でホール伝導度のピークが dc 領域に入ることが推測され、予測通りバンド間共鳴効果による異常ホール伝導度の増大(図3)を観測できたと考えられる。

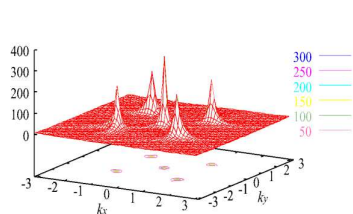


図1. バンド交差点での磁気フラックス異常
M. Onoda, N. Nagaosa, JPSJ 71,19(2002)

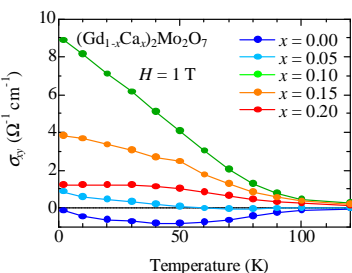


図2. ホール抵抗率の温度依存性

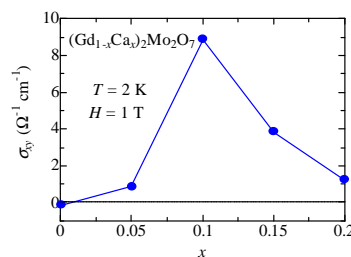


図3. ホール伝導度のフィリング依存性

A1. Chemical Control of Anomalous Hall Effect in $(\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{Mo}_2\text{O}_7$

付録の A1 章はスピнкаイラリティーによる異常ホール効果を効率的に制御する方法についての実験である。Dy は Nd の 3 倍程度の磁化を持ち、さらに[111]方向の強い異方性を持っているイジングスピンであるため、Nd を Dy で部分的に置換することにより低磁場でのスピнкаイラリティーの制御が可能であることが分かった。しかし Dy は上記のように非常に理想的なスピンを持つが、Mo スピンとの磁氣的相互作用が強磁性的であり、反強磁性的である Nd とは異なっている。そのため Dy の置換による Mo スピンへの寄与は、Dy と逆向きのスピンを持つ Nd と同様の効果 (図 1) である。それらを考慮すると磁化の増加の割合、ホール抵抗率の急激な減少、ホール抵抗率の Dy 置換量依存性などの実験結果 (図 2) を良く説明出来る。

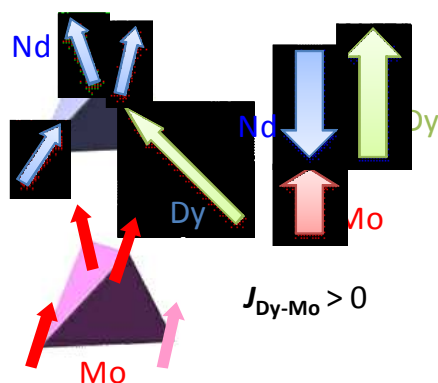


図1. 強磁性的Dy-Mo相互作用とスピнкаイラリティーの変化

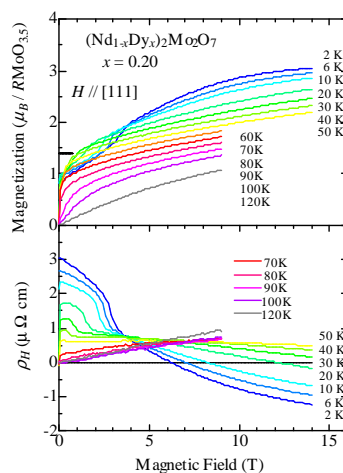


図2. $(\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ の磁化、ホール抵抗率