

Nd₂Mo₂O₇ の中性子散乱と異常 Hall 効果

名大理; 安井幸夫、佐藤正俊

Neutron Scattering Studies and Anomalous Hall Effects of Nd₂Mo₂O₇

Dept. of Physics, Nagoya Univ.; Y. YASUI, and M. SATO

強磁性体の異常 Hall 効果は、Hall 抵抗 ρ_H に対して $\rho_H=R_0H+4\pi R_sM$ (正常 Hall 係数 R_0 、異常 Hall 係数 R_s 、磁化 M) の式を用いて表わされてきたが、最近、これでは表わせない特異な強磁性体が出てきた。この特異な異常 Hall 効果が注目される発端である物質のパイロクロア型酸化物 Nd₂Mo₂O₇について議論する。

Nd₂Mo₂O₇では、 $T_c=93\text{K}$ で主に Mo-moment が強磁性磁化を持って order し、さらに温度を下げていくと 30K 付近から Nd-moment の order が顕著になる。Mo と Nd の net moment は反平行であり、少なくとも 30K 以下では Mo と Nd-moment とともに non-coplanar な磁気構造を持っている。この系のホール抵抗 ρ_H は、約 30K 以上では通常の強磁性体に用いられる式 $\rho_H=R_0H+4\pi R_sM$ で記述できるが、30K 以下ではこの式では表わせない[1]。例として ρ_H の磁場依存性($H//[001]$)を図1に示す。この特異な振舞いに触発されて spin chirality χ (3つのスピン S_1, S_2, S_3 に対して $\chi=S_1 \cdot S_2 \times S_3$ で定義される)が仮想的な磁束を作り出しホール伝導に寄与するという chirality mechanism が提案され[2,3] 興味を持たれるが、Nd₂Mo₂O₇においてあてはまるかどうかは慎重に検証すべきである。

Hall 抵抗の振舞いを正しく理解するために、Nd₂Mo₂O₇に関してこれまで得られている実験データを統一的に解析した[4,5]。そこでは、中性子磁気散乱強度・磁気比熱・磁化の磁場や温度への依存性が再現されるように Mo-Mo, Mo-Nd, Nd-Nd の moment 間の相互作用や Mo 及び Nd-moment の single ion anisotropy 等の parameter を決定した。こうして求めた parameter を使って計算して得られた中性子磁気散乱強度の磁場依存性($H//[001]$)を図2に示す。実線で示した計算値が実験値(黒丸)を良く再現していることがわかる。図3に磁場を[001]方向に印加した場合の Mo 及び Nd-moment の磁気構造の磁場依存性を示す。Nd-moment は強い一軸異方性を持っており、Nd₄正四面体の重心と頂点を結ぶ直線と平行な方向にその向きが fix されている。Mo-moment はおよそ磁場方向($H//[001]$)を向いているが、Mo-Nd 間の exchange field により磁場方向からわずかに傾いている。200 反射や 600 反射、240 反射の中性子磁気散乱強度が $H=3\text{T}$ ではほぼゼロになっているが、これは外部磁場 ($H=3\text{T}$) と Mo-moment が Nd サイトに作る内部磁場が丁度打ち消し合ったために、Nd の長距離磁気秩序が消失したことによる (Nd-Nd 間の相互作用により、四面体内は”2in 2out 構造”であるが、四面体間の秩序が消失している)。また、磁気比熱の振舞いを再現するには Nd-Nd 間の相互作用として、最近接相互作用 (強磁性的) だけではなく次近接相互作用 (反強磁性的) を考慮することも重

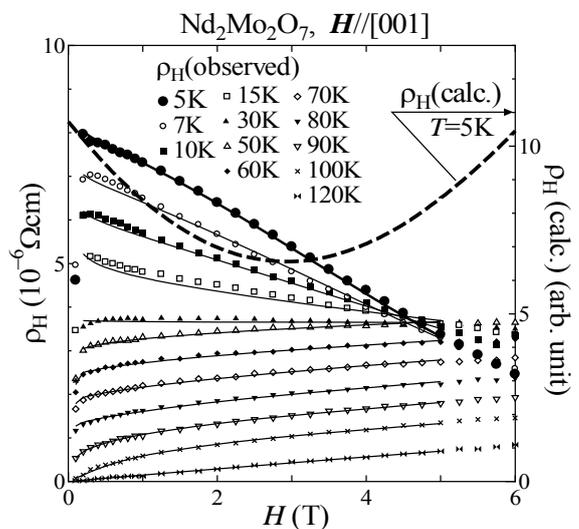


図1. Hall 抵抗 ρ_H の磁場依存性 ($H//[001]$)。点線は chirality mechanism により求めた $T=5\text{K}$ での ρ_H の計算値。

要で、Nd-Nd 間には Mo 電子を介した RKKY 相互作用が無視できない。ホール抵抗に関する以下の議論は、磁気構造や比熱の、磁場や温度への依存性の全容を正しく再現する parameter を明らかにした上で行なうものである。

chirality mechanism から期待される ρ_H の振舞も、この parameter を使って計算できる。 $T=5\text{ K}$ での ρ_H の計算結果 (図 1 の点線) を、実験値 (図 1 の黒丸) と比較したところ、両者の振舞が決定的に異なっていることがわかった。特に計算値では特徴的な磁場である $H=3\text{ T}$ において極小値を持つが、実験値にはその磁場で何の異常も観測されなかった。他の方向に磁場を印加した場合の振舞や温度依存性を比較しても spin chirality が決めているものとは定性的に相容れず、chirality mechanism のみでのホール抵抗の説明ができないことが明確にわかる。

一方、我々はこの系のホール抵抗を $\rho_H = R_0 H + 4\pi R_s^{\text{Mo}} M_{\text{Mo}} + 4\pi R_s^{\text{Nd}} M_{\text{Nd}}$ という、Mo と Nd の各々の磁化 M_{Mo} と M_{Nd} の 2 つの成分を考慮した現象論的な式でよく表せることを示した。図 1 の実線が上式の fitting の結果である。この現象論的な解釈では、Nd 磁化 M_{Nd} に比例した項をどう理解するかが問題であり、以下の考察があるものの具体的理解は今後の課題である。比較的イオン半径の大きい Nd^{3+} イオンでは、 $4f$ 軌道と伝導を担う Mo^{4+} の $4d$ 電子との間の波動関数の hybridization が大きいので、Nd の磁気状態が RKKY を通した機構、もしくはそれに関連した機構で Hall 抵抗に寄与していると考えられる。また、 $4d-4f$ の hybridization により Nd サイトに存在している伝導電子が、Karplus & Luttinger による従来の機構で異常 Hall 効果を与えている、というメカニズムも考えられるが、それにより Mo の磁化による異常項 $4\pi R_s^{\text{Mo}} M_{\text{Mo}}$ に匹敵する大きさの異常項 ($4\pi R_s^{\text{Nd}} M_{\text{Nd}}$) が生じ得るのかは定量的な考察が必要である。

最近、この chirality mechanism を含め、ベリ一位相の言葉での異常ホール効果の記述が進んでいる。伝導電子のスピンの軌道相互作用による interband 散乱による機構 (Karplus & Luttinger 機構) と chirality 機構とは、ともにベリ一位相の言葉で扱えるようであるが、きちんと区別して考えないと混乱が生じかねないので注意しなければならない。

なお、これらの研究は、吉居俊輔、飯久保智、影山健友、佐藤陽、加倉井和久各氏や他の多くの方との協力のもとに行なわれてきたものである。

- [1] S. Yoshii *et al.*; JPSJ **69** (2000) 3777.
- [2] K. Ohgushi *et al.*; PRB **62** (2000) R6065.
- [3] Y. Taguchi *et al.*; Science **291** (2001) 2573.
- [4] Y. Yasui *et al.*; JPSJ **72** (2003) 865.
- [5] Y. Yasui *et al.*; JPSJ **75** (2006) 084711.

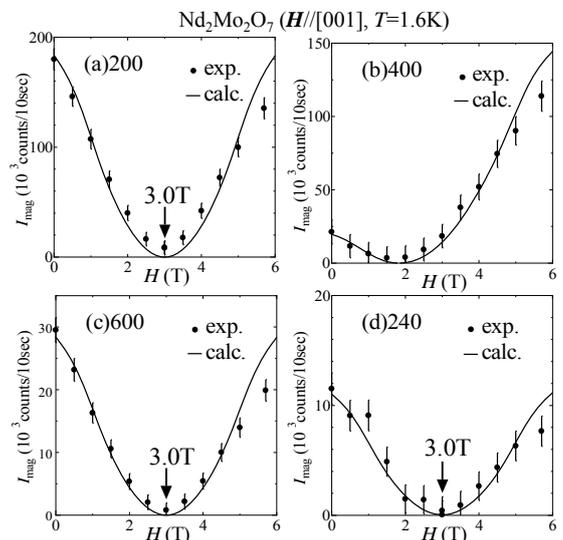


図 2. 中性子磁気散乱強度の磁場依存性 ($H//[001]$, $T=1.6\text{ K}$)。黒丸は実験値、実線は計算値。

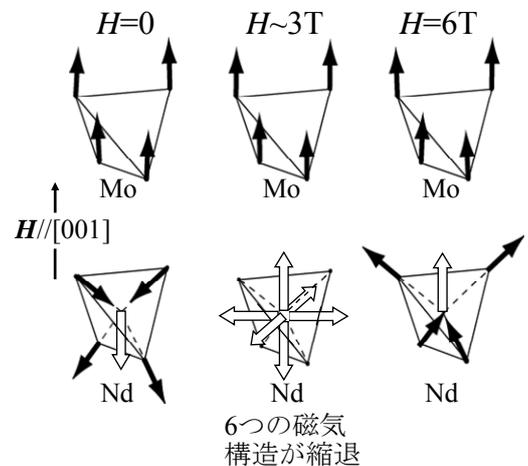


図 3. 磁気構造の磁場依存性 ($H//[001]$, $T=1.6\text{ K}$)。白抜き矢印は "2in 2out" 構造の net moment の方向