

オスmium酸化物 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁場誘起絶縁体金属転移の探索

物質系専攻 47-176052 三田 航平

指導教員：松田 康弘（准教授）

キーワード：金属絶縁体転移, $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$, 破壊型パルス強磁場, 高周波透過法

1. 序論

金属絶縁体転移とは、高温で金属であった物質が臨界温度を境に低温側で絶縁体となる現象である [1]. 様々な物質において金属絶縁体転移が観測されているが、その転移の機構は物質により異なるため、転移機構を理解することで多体物理の観点において物質の電子状態の理解につながる。モット転移は、大きな電子-電子クーロン相互作用をもつ物質において予想される転移機構である。一方で、電荷密度波転移、スピン密度波転移は、フェルミ面の異常が取り除かれることによって起こる転移である。また、スレーター転移は、反強磁性秩序が磁気単位胞を2倍にすることによって絶縁体状態を生み出すことで転移が起こる [2]. この様にいくつかの転移機構が提唱され多くの物質の電子状態が明らかになっているが、未だにその機構が解明されていない物質も存在し、その解明が求められている。

その機構が未解明の物質の1つに $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ が挙げられる。オスmium酸化物 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ は、1974 年に Sleight らによって~225 K 以下で急激な電気抵抗率の上昇が発見され、古くから金属絶縁体転移を示すことが知られている物質である [3]. 図1に $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の電気抵抗率温度依存性とパイロクロア格子の模式図を示す。パイロクロア格子は磁気フラストレートすることで知られており、その磁気秩序は、自明ではない。 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の場合、1つの四面体のスピンの全てが内向き、もう1つが全て外向きとなる、All-in/all-out 型の反強磁性秩序となることが報告されている[5]. また、金属絶縁体転移と同時に磁気秩序が形成されることも報告されている[5]. 図2に $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁化率温度依存性を示す。このことから、金属絶縁体転移と磁気秩序が密接に関係していることが伺えるが、転移機構の解明には至っていない。

そこで本研究では、未解明である $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の金属絶縁体転移機構の解明を目的とし、転移温度以下の絶縁体反強磁性相の $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ に 100 T 以上の超強磁場を印加した際の電気抵抗率変化の測定を行った。これにより、 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の金属絶縁体転移とスピンの関係を明らかにできると期待される。

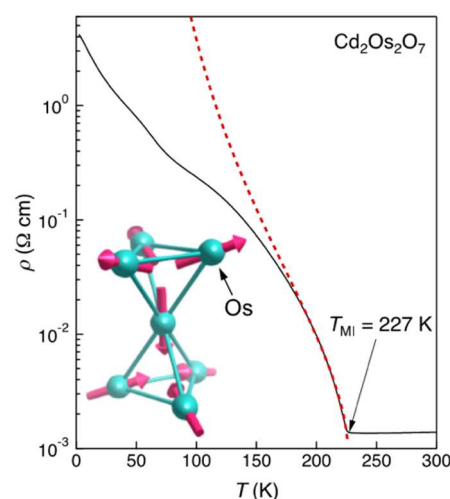


図1 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の電気抵抗率の温度依存性^[4]

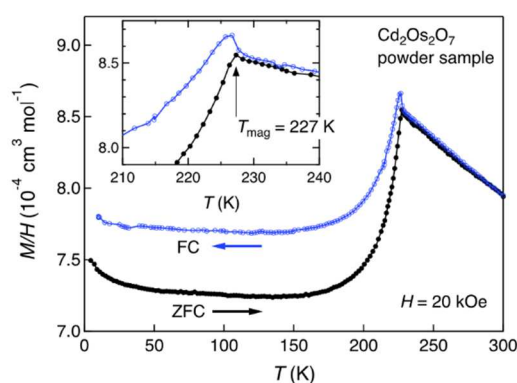


図2 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁化率の温度依存性^[4]

2. 実験手法

100 T 以上の超強磁場の発生には、破壊型パルスマグネットを用いる必要があり、電気抵抗率測定には工夫が必要である。本研究では、破壊型パルスマグネットを用いた超伝導-常伝導転移[6]と酸化コバルトの金属-絶縁体転移の観測[7]で実績のある、高周波(RF)領域を用いた透過率測定技術を用いた。磁場発生には、破壊型パルス磁場発生手法の1つである、一巻きコイル法を用いた。試料は、縦 2.95 mm、横 2.2 mm、厚み 0.22 mm と 0.18 mm の板状の焼結体 2 枚を絶縁効果のあるカプトンシート挟んで重ねたものを用いた。これは、パルス磁場による誘導電流に伴う試料の発熱効果を軽減するための対策である。図 3 に示すよう

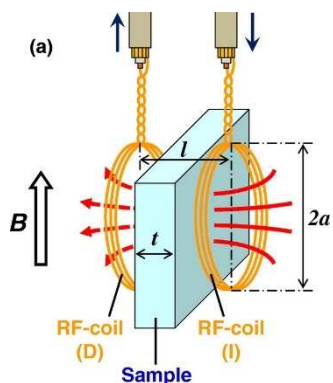


図 3 高周波透過法原理 [7]

に、高周波入力用と検出用のコイルの間に試料を挟み込み、試料の電気抵抗率の変化に伴う高周波信号の透過率の変化を測定した。強磁場による試料の絶縁体から金属への転移が起これば、高周波磁場誘起の誘導電流が顕著となり、それによる遮蔽効果で高周波の透過率が減少する。本研究では、印加する磁場、測定する温度を変化させて複数回の測定を行った。

3. 結果・考察

図 4 に 51 K で最高磁場 191 T のパルス磁場を印加した際の透過率測定の結果を示す。左図の青線は磁場、橙色線は高周波信号、赤線は数値ロックイン検波による高周波信号の振幅を示している。これは、一巻きコイル法による本研究の電気抵抗率測定において最大の磁場を発生できる条件で行った結果である。この結果から、磁場中で透過率に変化がみられない。つまり、磁場誘起絶縁体金属転移は観測されなかった。これは最高磁場 191 T では、磁気秩序を抑制しうるエネルギーに達していなかったことが原因であると考えられる。そこで、この磁気秩序を抑制するのに必要な磁場を見積もる。ゼーマンエネルギーは、 $E = g \mu_B \mathbf{S} \cdot \mathbf{B}$ で表される。ここで、 g は g 因子、 μ_B はボーア磁子である。ネール温度 $T_N = 227$ K、 $S = 3/2$ 、 $g = 2$ とすると、磁場は $B = 112$ T と見積もられる。最高磁場 191 T であればこの値を超えているため、磁場誘起絶縁体転移は起こりうると考えられる。しかし、 Os^{5+} が $5d^3$ であることからスピンを $S = 3/2$ としたが、有効磁気モーメントは $\mu_{\text{eff}} \sim 1 \mu_B$ であるという報告がされている[8]。その場合、 S は実効的に 0.83 程度に相当し、必要な磁場は 202 T となる。300 T 以上（最高磁場 1200 T）の磁場発生が可能である破壊型パルス強磁場発生手法の、電磁濃縮法[9]を用いた測定に取り組む予定である。

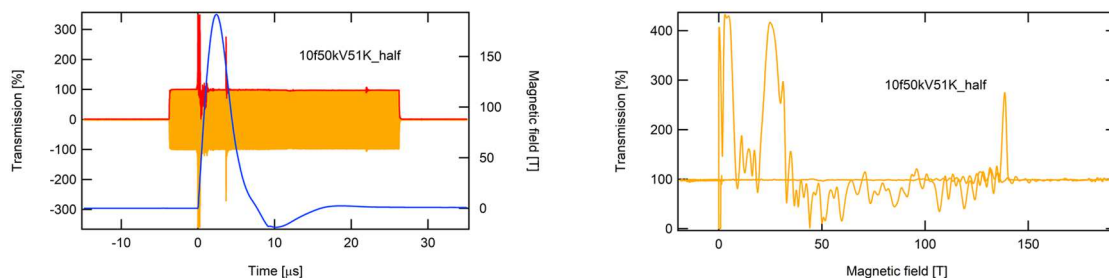


図 4 最高磁場 191 T 中での $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の透過率測定結果
(左)磁場波形 (青) と透過高周波信号 (橙), (右)透過率の磁場依存性

4. 結論

本研究では、金属絶縁体転移を示すオスミウム酸化物 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の転移機構解明を目的とした、強磁場中高周波透過法による $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の電気抵抗率測定を行った。一卷きコイル法における今回の実験条件における最高磁場発生条件で測定を行った結果、磁場誘起絶縁体金属転移は観測されなかった。これは、 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ に転移温度以下で現れる磁気秩序を抑制するために必要なエネルギーが不足していたためであると考えられる。観測のためには、300 T 以上（最高 1200 T）の磁場発生が可能である破壊型パルス強磁場発生手法である電磁濃縮法を用いた測定が必要である。

[参考文献]

- [1] M. Imada et al., Rev. Mod. Phys. **70**, 1039 (1998).
- [2] J. C. Slater, Phys. Rev. **82**, 538 (1951).
- [3] A. W. Sleight et al., Solid State Commun. **14**, 357 (1974).
- [4] Z. Hiroi et al, APL Materials **3**, 041501 (2015).
- [5] J. Yamaura et al, Phys. Rev. Lett. **108**, 247205 (2012).
- [6] T. Sekitani et al., New J. Phys. **9**, 47 (2007).
- [7] S. Lee et al., J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 044703 (2015).
- [8] H. Shinaoka et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 247204 (2012).
- [9] D. Nakamura et al., Rev. Sci. Inst. **89**, 095106 (2018).

【論文・学会発表】

1. 三田航平, 山浦淳一, 廣井善二, 松田康弘, 「高周波透過法による $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁場誘起絶縁体金属転移の探索」, 強磁場コラボラトリーが拓く未踏計測領域への挑戦と物質・材料科学の最先端（物質・材料研究機構）
2. 三田航平, 山浦淳一, 廣井善二, 松田康弘, 「超強磁場高周波透過法による $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁場誘起絶縁体金属転移の探索」, 第 7 2 回日本物理学会春季大会（東京理科大学野田キャンパス）
3. 三田航平, 山浦淳一, 廣瀬陽代, 廣井善二, 松田康弘, 「超強磁場高周波透過法による $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁場誘起絶縁体金属転移の探索Ⅱ」, 第 7 3 回日本物理学会秋季大会（同志社大学今出川キャンパス）
4. 三田航平, 山浦淳一, 廣瀬陽代, 廣井善二, 松田康弘, 「超強磁場高周波透過法による磁場誘起絶縁体金属転移の探索」, 強磁場コラボラトリーにおける物性研究の現状と展望（東北大学金属材料研究所）
5. 三田航平, 山浦淳一, 廣瀬陽代, 廣井善二, 松田康弘, 「Quest for the magnetic-field-induced insulator-metal transition in $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ using RF transmission technique」, MG-X VI（東京大学柏キャンパス）
6. 三田航平, 山浦淳一, 廣瀬陽代, 廣井善二, 松田康弘, 「超強磁場高周波透過法による $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁場誘起絶縁体金属転移の探索Ⅲ」, 第 7 4 回日本物理学会春季大会（九州大学伊都キャンパス）