



Title	少数キャリア磁性半導体の異方的な巨大磁気抵抗効果
Author(s)	村川, 寛
Citation	大阪大学低温センターだより. 2024, 174, p. 7-10
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/94815">https://hdl.handle.net/11094/94815</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 少数キャリア磁性半導体の異方的な巨大磁気抵抗効果

理学研究科 村川 寛

Email: murakawa@phys.sci.osaka-u.ac.jp

## 1. 概要

磁場中で物質の電気抵抗率が変化する磁気抵抗効果は磁気センサー等に利用される身近な現象であるとともに、物性物理学の最も興味深い研究対象のひとつである。とりわけ液体ヘリウム温度程度の低温環境においては電気抵抗率の変化が数桁に及ぶ巨大な磁気抵抗効果を示す物質がこれまでに多数報告されている。しかしながら、磁場の方向に依存して電気抵抗率が何桁も減少する異方的な巨大磁気抵抗効果が観測される物質はほとんど知られていなかった。最近我々は、0.4テスラ以上で磁場方向に対する電気抵抗率の異方性が4桁程度(at 2 K)と極めて大きい層状磁性半導体  $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$  を発見した。この結果について以下に詳しく述べる。

2. 少数キャリア磁性半導体  $\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ 

研究対象の  $\text{CeTe}_2$  は、磁性を担う  $\text{CeTe}$  層と、電気伝導を担う  $\text{Te}$  正方格子層から構成される (図1)。正方格子層の  $\text{Te}$ - $5p_x$  と  $5p_y$  軌道からなるフェルミ面はシート状であり、室温以上で格子周期が変化した電荷密度波状態となりフェルミ面の大部分の領域にバンドギャップが形成される。これにより、伝導電子が単位格子あたり 1/100 程度以下の低密度な状態となっている。残ったキャリアは電荷密度波状態に寄与しない3次元のフェルミ面によるものが主であると考えられるが、今回我々は、 $\text{Te}^{2-}$  サイトを  $\text{Sb}^-$  でわずかに置換 (ホールドープ) することによりこれを消滅させて狭ギャップの真性半導体を実現した。図1に示すように、温度降下とともに  $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$  の電気抵抗率は単調に増加して 2 K において室温の  $10^9$  倍に達しており、キャリア密度が非常に希薄な状態が実現している。本物質では 10 K 以下で層内に強磁性相関が発達して、3.8 K 以下で強磁性面が層間方向に反強磁性的に秩序すると考えられている。

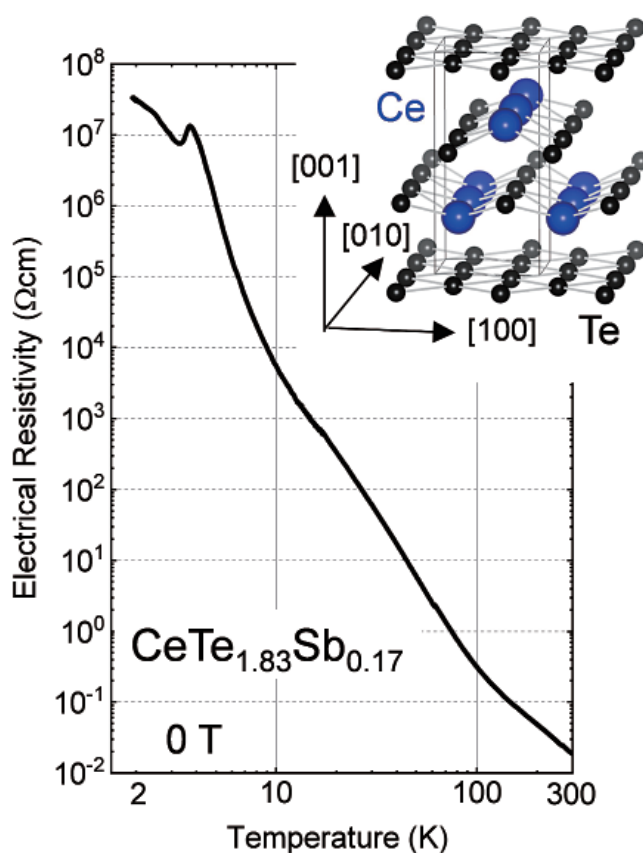


図1.  $\text{CeTe}_2$  の結晶構造と、 $\text{Te}$  を  $\text{Sb}$  で部分的に置換した真性半導体  $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$  の電気抵抗率の温度依存性。

### 3. 巨大な異方的磁気抵抗効果

図2に示すように、 $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$ では、2 Kにおいて $c$ 軸([001])方向におよそ0.4テスラの磁場をかけると強制強磁性状態となり、そこに至る過程で電気抵抗率が4桁近く減少する。一方で $c$ 軸と垂直方向の磁場中では磁化が飽和値に近づく高磁場領域(7テスラ)においても電気抵抗率の変化はわずかであった。その結果、磁場方向に対して極めて大きな異方性(0.4テスラで7500倍)が観測された。図3は低磁場領域( $H//[001]$ )の拡大図である。磁化は多段階の不連続な変化を示しながら飽和に達し、これと対応して電気抵抗率も桁で減少している。また、磁場反転の過程で明瞭なヒステリシスが観測された。このように、電気抵抗率は磁気状態と密接に関係している。結晶軸に対して磁場の方向を連続的に変えながら電気抵抗率の変化を測定した結果を図4に示す。2テスラまでは磁場が大きくなるほど高抵抗の角度領域は狭くなっていき、4テスラ以上では電気抵抗率の急峻な飛びは見られなくなり、裾を引いたように連続的に変化していく。図4(c)に示すように、1テスラまでの範囲では電気抵抗率の値は磁場の $c$ 軸方向への射影成分に対して同様の依存性を示すことがわかった。これは電気抵抗率の値が、容易軸である $c$ 軸方向の磁化成分に支配されていることを示すものである。

次に磁気抵抗効果が明瞭に観測される低温領域において電気抵抗率と磁化を測定して、これらの間にある関係について調べた。図5に示すように、磁化の $c$ 軸方向成分の増加に伴って電気抵抗率は減少し、強制強磁性状態に近づくとき温度によらず一定値に収束する傾向が観測された。この結果は、本物質中において磁気ポーラロンが形成され、強制強磁性状態に至る過程での移動度の変化が巨大な磁気抵抗効果の起源であることを示唆している。一方で、 $c$ 軸と垂直方向の磁場中では電気抵抗率の値が磁化の大きさにあまり依存しておらず、この異方性については現時点では十分に説明することはできない。

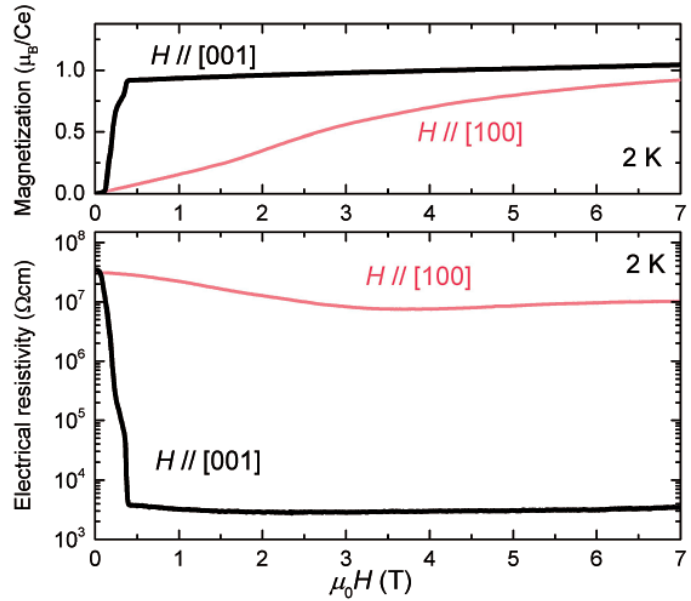


図2.  $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$ の2 Kにおける磁化と電気抵抗率の磁場依存性。

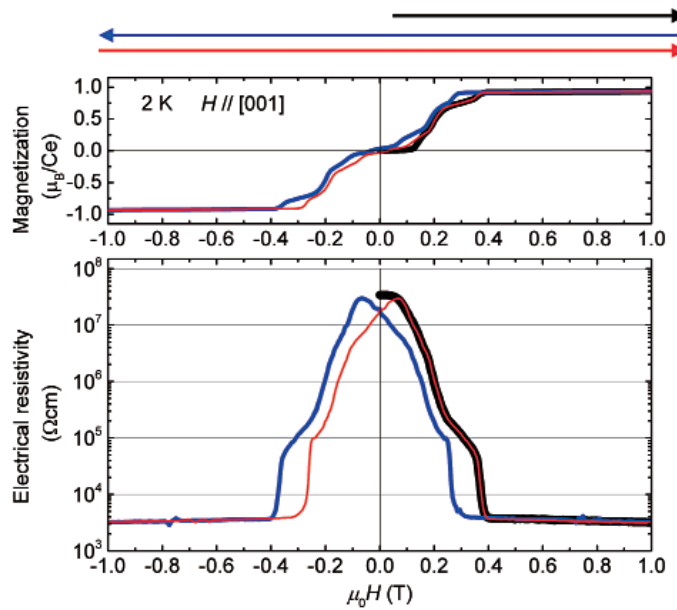


図3.  $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$ の2 Kにおける磁化と電気抵抗率の磁場依存性( $H//[001]$ の低磁場領域)。

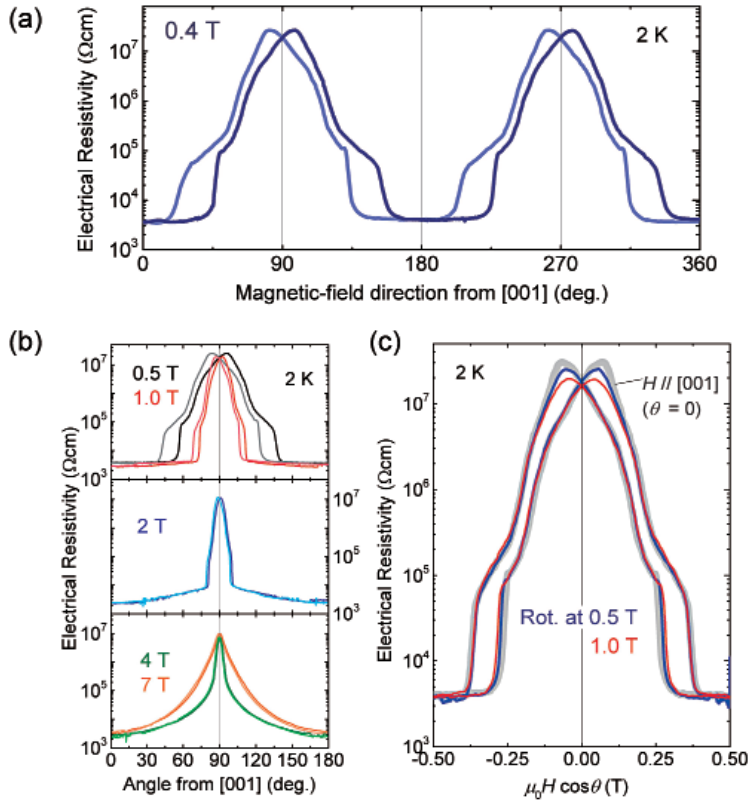


図4. (a), (b)  $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$ の電気抵抗率の磁場方向依存性。 (c) 電気抵抗率のc軸方向の磁場成分に対する依存性。

さらに、本物質で観測される巨大磁気抵抗効果のキャリア密度依存性について研究を行った。図6に示すように、TeとSbの比率を変えることにより10桁に及ぶ範囲で電気抵抗率の異なる試料を合成して2 Kにおける磁気抵抗効果の大きさを比較した。ホール抵抗率の測定から、試料BとCのキャリア密度はそれぞれ $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ と $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ と見積もられた。一方で試料Aについては縦抵抗率が高すぎてホール抵抗率の測定ができなかったが、キャリア密度が電気抵抗率の値の逆数に比例すると仮定すると、2 Kにおいておよそ $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度と見積もられる。c軸方向磁場下での磁気抵抗比の大きさを0.4テスラで比較したところ、試料Aでは9200倍、試料Bでは420倍の減少が見られたが、キャリア密度が最も高い試料Cではわずか1%しか変化しなかった。この

ように、本物質における巨大な磁気抵抗効果はキャリア密度が $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度以下の希薄な状態でのみ発現することが明らかとなった。この結果は磁気ポーラロン機構に基づいて以下のように解釈することができる。電子密度が希薄な系では、電子は交換相互作用により、相関長（磁気ポーラロン

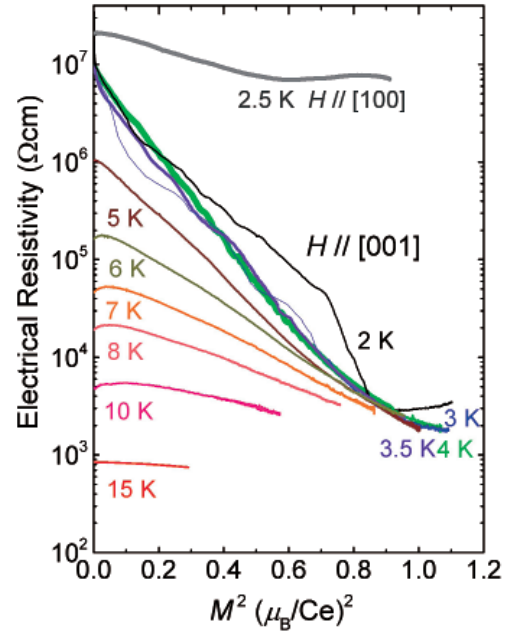


図5. 電気抵抗率と磁化との関係。  $H // [001]$  では磁化が飽和値に近づくとき電気抵抗率は一定値に収束していく。

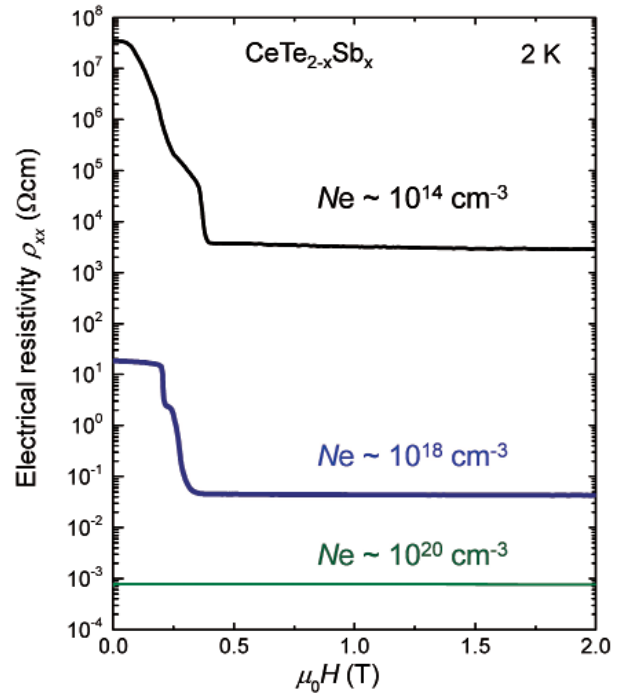


図6. 様々なキャリア密度の $\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ の磁気抵抗効果 ( $H // [001]$  at 2 K)。  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ よりも希薄な状態では2桁超の磁気抵抗効果が観測される。

半径)の範囲内にある局在磁気モーメントの向きをそろえて局所的な強磁性クラスター(磁気ポーラロン)を形成して自己束縛される。常磁性状態や反強磁性状態などのように、局在磁気モーメントの向きが様々な方向を向いている場合には、磁気ポーラロンが移動する際には局在磁気モーメントの方向の変化を伴うために移動度が低く高抵抗状態となるが、磁場により強制強磁性状態にすることでポーカロンの移動度が飛躍的に上昇する。しかしながら、磁気ポーラロン同士が重なりあうほどキャリア密度が高くなると、ゼロ磁場においても電荷キャリアは自己束縛されにくいために、強制強磁性状態に至る過程で移動度が増加する余地がなくなり電気抵抗率は変化しなくなる。本物質ではキャリア密度が $10^{18} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で磁気ポーラロンが重なりはじめると考えられる。

#### 4. まとめ

層状磁性半導体 $\text{CeTe}_{2-x}\text{Sb}_x$ では、キャリア密度を $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度以下にすることで2桁超の巨大な負の磁気抵抗効果が発現する( $H \parallel [001]$  at 2 K)。この現象は磁気ポーカロンの移動度の変化として理解できる。キャリア密度が特に希薄な $\text{CeTe}_{1.83}\text{Sb}_{0.17}$ では永久磁石で到達可能な0.4テスラ以上で、電気抵抗率が4桁程度の巨大な磁場方位依存性を示す。 $H \perp [001]$ では電気抵抗率は磁化の値にあまり依存しておらず、これについては従来の磁気抵抗モデルでは説明できない新しい現象である。少数キャリアの層状磁性半導体で発現する巨大な異方性磁気抵抗効果について、局在磁性との関係性を明らかにしていくために、現在はCeの他の希土類元素を用いた単結晶合成を行って研究を進めている。

#### 謝辞

本研究は大阪大学大学院理学研究科物理学専攻の中岡優大氏の修士論文の研究テーマとしてはじまり、単結晶合成や主要なデータの測定について大きく貢献していただいた。花咲徳亮教授、酒井英明准教授、先端強磁場科学研究センターの萩原政幸教授、木田孝則助教には、結果についてご議論いただくとともに技術的なご支援もいただいた。本研究の遂行にあたり、科学研究費助成事業(18H04226, 21K03445)と村田学術振興財団からの援助をいただいた。

#### 参考文献

- [1] H. Murakawa, Y. Nakaoka, T. Kida, M. Hagiwara, H. Sakai, and N. Hanasaki, *Physical Review Materials* **6** 054604 (2022).
- [2] H. Murakawa, Y. Nakaoka, K. Iwase, T. Kida, M. Hagiwara, H. Sakai, and N. Hanasaki, *Physical Review B* **107** 165138 (2023).