



Title	Pt(Bi _{1-x} Se _x) ₂ 超伝導体における“逆向き”磁気抵抗ヒステリシス
Author(s)	蔣, 男
Citation	大阪大学低温センターだより. 2026, 175, p. 1-4
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/104134
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Pt(Bi_{1-x}Se_x)₂ 超伝導体における“逆向き”磁気抵抗ヒステリシス

理学研究科 蔣 男

E-mail : nan.jiang@phys.sci.osaka-u.ac.jp

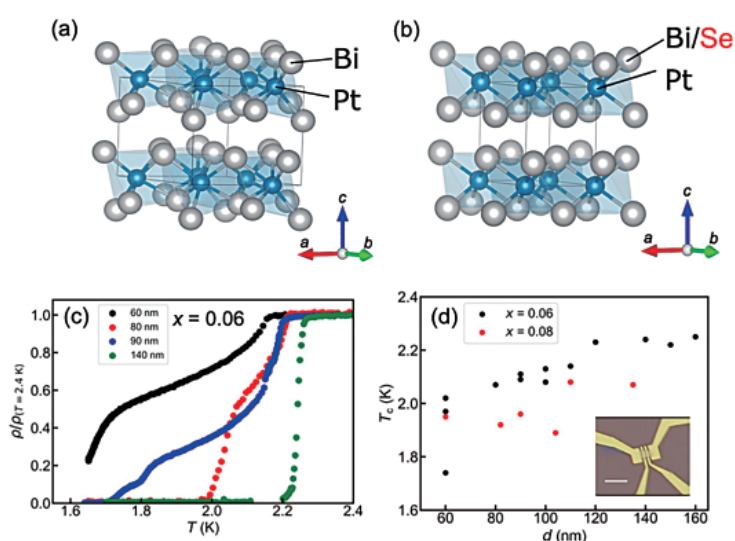
1. はじめに

van der Waals (vdW) 物質は、結晶性の良い単結晶を薄片として容易に取り出せることから、二次元物性やデバイス応用の観点で注目されています。本稿では、vdW 超伝導体 Pt(Bi_{1-x}Se_x)₂ 薄膜デバイスにおける磁気抵抗測定から見えた、やや直感に反する「逆向き」のヒステリシスと、その解釈について紹介します。通常、強磁性体などにおいて磁場を掃引したときに現れる履歴効果（ヒステリシス）は、前の状態を引きずるようなふるまいを示します。しかし本系では、超伝導が壊れる磁場が“より小さく”、超伝導に戻る磁場が“より大きい”という、いわば「符号が逆」のヒステリシスが観測されました（図2）。この特異な挙動は、試料内部に強弱2種類の超伝導領域が共存するという two-level critical-state model[1]で理解できます[2]。

2. 物質とデバイス作製

母物質の三方晶 PtBi₂（図1(a)）は、極性構造をとる vdW 物質で、低温で超伝導転移（ $T_c \approx 0.6$ K）を示します。Bi サイトを Se で置換すると、ある濃度（ $x \approx 0.032$ ）を境に極性—非極性の構造相転移を伴い（図1(b)）、 T_c が最大で約 2.4 K まで上昇することが報告されています[3]。その後、さらに Se 濃度を上げると T_c は単調に低下します。

本研究では $x = 0.06$ および 0.08 の単結晶から薄片を劈開し、Si/SiO₂ 基板上に転写した後、電子線描画・金属蒸着（Ti/Au）により四端子デバイスを作製しました（図1(d) inset）。厚み d は 60–160 nm の範囲で比較しました。電気抵抗の温度依存性 $\rho(T)$ を測定すると、厚みが薄いほど転移が広がり、段差状の“多段転移”が現れるデバイスもあります（図1(c)）。これは、「超伝導が一樣ではない」状況が生じていることを示唆しています。



3. “逆向き”ヒステリシスの観測

次に、 $T = 100$ mK で磁場を掃引し

図1. (a)PtBi₂と(b)Pt(Bi_{1-x}Se_x)₂の結晶構造。(c)異なる膜厚における T_c 近傍の ρ の温度依存性。(d) T_c の d 依存性。挿入図は典型的なデバイスの光学顕微鏡像で、白線は 5 μm に相当する。

ながら磁気抵抗 $\rho(H)$ を測定しました。磁場は薄膜面内および面直の両方向で調べ、いずれでも臨界磁場付近でヒステリシスを確認しましたが、面内磁場の方がより顕著でした (図 2 (a, b))。

特徴的なのは、ヒステリシスの向きです。一般的なヒステリシスは前の状態を引きずるようなふるまい、つまり“超伝導が壊れる方が大きい磁場”になります。ところが本系では逆で、磁場を増やす掃引 (正掃引) では比較的小さな磁場で抵抗が立ち上がる一方、磁場を減らす掃引 (負掃引) ではより大きな磁場まで抵抗が小さいまま保たれる、という挙動が現れます。

4. two-level critical-state model による解釈

この「逆向き」ヒステリシスは、超伝導の“強い領域”と“弱い領域”が共存すると仮定すると説明できます (two-level critical-state model)。

正掃引：外部磁場が増えると、まず弱い超伝導領域に渦糸が侵入します。弱い領域ではピン止めが弱く、渦糸が電流で動きやすいため、抵抗が出ます (図 2 (c) 右上)。さらに磁場を上げると、渦糸は強い領域にも侵入し、最終的には全体として常伝導に近づきます。

負掃引：磁場を下げ始めると、弱い領域の渦糸は先に抜けやすい一方で、強い領域には渦糸がトラップされます。強い領域にトラップされた渦糸は動かないため (図 2 (c) 右下)、同じ外部磁場でも負掃引の方が抵抗が小さくなり、回復側の磁場 $\mu_0 H_r$ が大きいという逆向きの履歴が生じます。

この枠組みの妥当性を確かめるために、①磁場掃引速度、②最大印加磁場、③温度を系統的に変えて測定しました。ヒステリシスを定量化するため、図 3 (a) のように、正掃引と負掃引それぞれで抵抗が常伝導状態の半分になる磁場を定義し、その差 $\Delta\mu_0 H_{c2} = \mu_0 H_r - \mu_0 H_c$ をヒステリシスの大きさとしました。

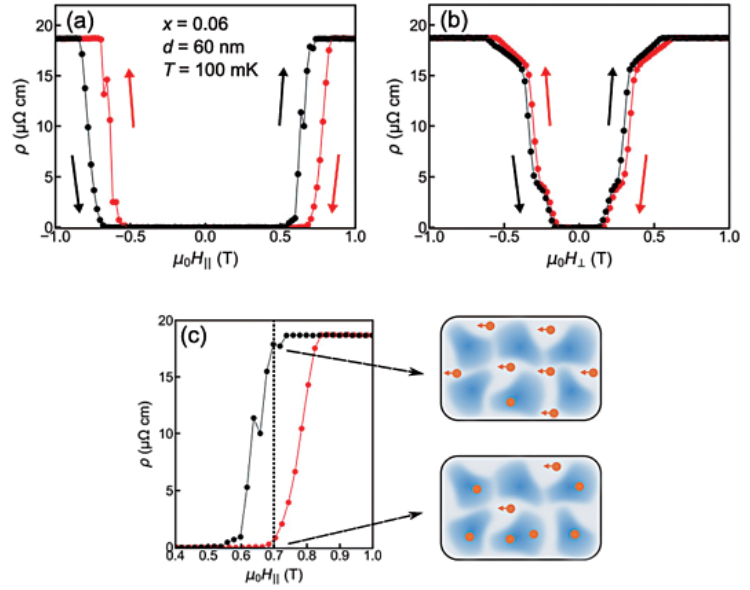


図2. (a) 面内磁場、および (b) 面直磁場の下での ρ の磁場依存性。磁場掃引速度は 0.065 T/min、印加最大磁場は 2 T である。(c) (a) の拡大図に、two-level critical-state model に基づきデバイス内部に捕捉された磁束の模式図を併せて示す。模式図中の青色および灰色の領域は、それぞれ強い超伝導領域と弱い超伝導領域を表す。橙色の点は磁束を表す。弱い超伝導領域中の磁束は電流によって移動して電圧を生じ得る一方、強い超伝導領域中の磁束は強いピン止めポテンシャルにより移動できず、その結果 $\rho = 0$ となる。

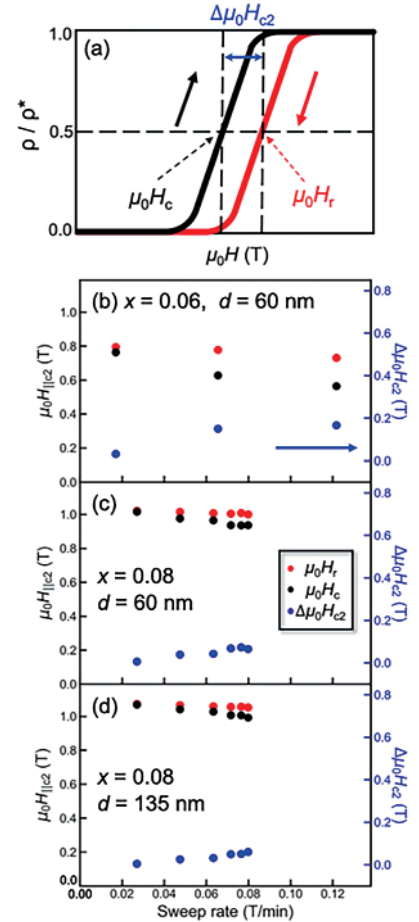


図3. (a) ヒステリシス挙動の模式図。(b)–(d) $\mu_0 H_r$ 、 $\mu_0 H_c$ 、および $\Delta\mu_0 H_{c2}$ の磁場掃引速度依存性。面内方向に最大磁場 ± 2 T を印加した。

①磁場掃引速度依存性

まず磁場掃引速度を変えると、 $\mu_0 H_c$ は掃引を速くするほど小さくなり、一方で $\mu_0 H_r$ は掃引速度にあまり依存しませんでした(図3(b)–(d))。その結果、ヒステリシス幅 $\Delta\mu_0 H_{c2}$ は掃引速度が速いほど大きくなります。直感的には、掃引が遅いと電場や熱ゆらぎに駆動され「強い領域に捕獲される渦糸」が増え、正掃引側でも抵抗が出にくくなって $\mu_0 H_c$ が大きくなります。逆に掃引が速いと、その“落ち着き”が起こりにくく、正掃引側で抵抗が生じやすい、と理解できます。

②最大印加磁場依存性

次に、掃引の最大磁場 $\mu_0 H_{\max}$ を変えると、 $\mu_0 H_r$ は最大磁場とともに増加し、約2 T以上で飽和しました(図4)。一方、 $\mu_0 H_c$ は系統的な変化を示しませんでした。

これは、最大磁場を上げるほど強い領域に多くの渦糸をトラップできるため、負掃引で“動けない渦糸”がより多く残り、抵抗が小さい範囲が広がる、と解釈できます。飽和が2 T程度で起きることは、この系ではそのあたりで強い領域のピン止めサイトが埋まると解釈できます。

③温度依存性

最後に温度を上げると、 $\mu_0 H_r$ と $\mu_0 H_c$ はともに単調に低下し、 T_c 近傍でヒステリシスは消失しました。これは、観測された履歴が超伝導起源であることを示しています。

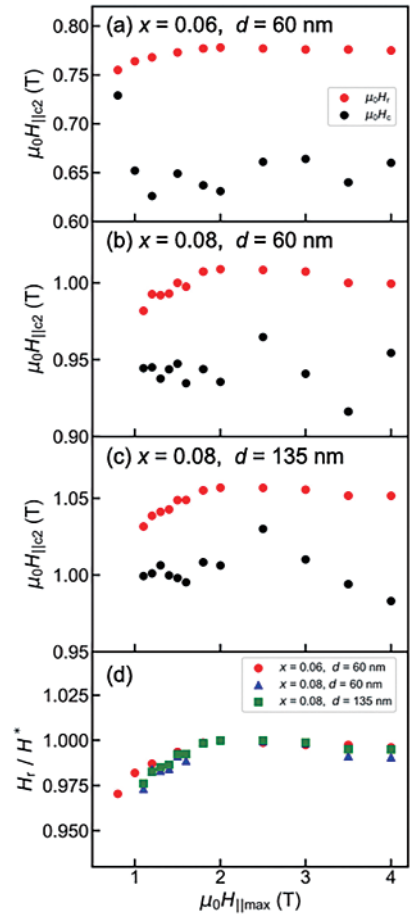


図4. (a)–(c) 最大面内磁場 $\mu_0 H_{||\max}$ に対する $\mu_0 H_r$ (赤点) および $\mu_0 H_c$ (黒点) の依存性。(a) の磁場掃引速度は 0.065 T/min、(b) と (c) では 0.077 T/min である。(d) $\mu_0 H_{||\max}$ 依存性の $\mu_0 H_r$ を $\mu_0 H_r^*$ ($\mu_0 H_{||\max} = 2$ T における値) で規格化したもの。

5. 不均一性の起源

二準位的な振る舞いの起源として、まず疑うのはSe濃度の空間不均一です。しかし元素分析 (EDS) では、少なくとも数 μm 程度のスケールでは顕著な組成むらは見えませんでした。一方で、より小さなスケールを探るために走査型トンネル顕微鏡 (STM) 観察を行うと、 $x=0.08$ 試料の表面トポグラフィには複数レベルのコントラストが現れました。これは、局所的に異なる電子状態が存在する可能性を示唆しています。さらにコヒーレンス長が数十nm程度であることを踏まえ、STM像に対してFWHM 60 nmのぼかし (ガウシアン) を施すと、そのスケールでの不均一性が浮かび上がりました。現段階では決定的証拠はありませんが、少なくとも「数十nmスケールで強弱の異なる領域が共存」していそうです。また、SeはBiより原子半径が小さいため、局所的な格子ひずみを誘起し得ます。加えて、単結晶育成時の急冷過程なども空間的に不均一なひずみを導入し得るため、ドーピングとひずみの双方が寄与している可能性があります。

6. まとめと展望

Pt(Bi_{1-x}Se_x)₂ 薄膜デバイスの磁気抵抗測定により、「逆向き」のヒステリシスを観測しました。掃引速度、最大磁場、温度依存性を系統的に調べることで、この挙動がtwo-level critical-state modelで理解できることを示しました。本結果は、vdW超伝導体の薄膜デバイスにおいて、 T_c や臨界磁場だけでは捉えにくい“空間的不均一性”が、渦糸ダイナミクスを通じて輸送特性に強く現れることを示しています。今後、局所分光や局所磁束イメージング、あるいは外部からひずみを制御する実験などにより、「二準位」を生む本質を解明することで、vdW超伝導の設計指針にもつながると期待されます。

謝辞

本研究は大阪大学工藤一貴教授から試料をご提供いただき可能となったものです。STMに関しては沖縄科学技術大学院大学岡田佳憲准教授にご協力いただきました。

参考文献

- [1] L. Ji, M. S. Rzchowski, N. Anand, and M. Tinkham, PRB **47**, 470 (1993).
- [2] Y. Samukawa, M. Maeda, N. Jiang*, R. Nakamura, M. Watanabe, K. Takaki, Y. Moriyasu, T. Ikushima, T. Kida, M. Hagiwara, T. Nakamura, Y. Okada, K. Kudo, and Y. Niimi, PRB **111**, 064506 (2025).
- [3] K. Takaki, M. Yamamoto, M. Nakajima, T. Takeuchi, H. Y. Nguyen, M. Nohara, Y. Kishioji, T. Fujii, K. Yoshino, S. Miyasaka, and K. Kudo, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 034703 (2022).