

超伝導の新種発見：液晶のような「ネマティック」超伝導

京都大学 大学院工学研究科

米澤 進吾

1. はじめに

京都大学工学研究科の米澤と申します。低温工学協会関西支部の創立 50 周年に心よりお慶びを申し上げます。私は 2023 年 4 月より工学研究科に異動しましたが、低温研究は変わらず行っていますので、引き続きよろしくお願いたします。本稿では、私が京都大学の理学研究科に所属していた際に行った、液晶のような「ネマティック超伝導」の一連の研究¹⁾について、ご紹介させていただきたいと思ます。

2. ネマティック超伝導の発見

超伝導は、物質を冷やしていったときにある温度以下で急激に電気抵抗がゼロになるという現象です。カマリンオネスによる超伝導現象の発見から 100 年以上が経ちますが、その劇的な現象はいまだに多くの研究者の心をつかんでいます。

ネマティック超伝導 (図 1a) は、超伝導の中でも特に奇妙な興味深い性質を持っており、超伝導現象の中の「新種」といっても過言ではありません。その舞台となる物質は Cu をドーブしたビスマス-セレン化合物 Bi_2Se_3 ($\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$) です。この物質は図 1b のように、120 周期で等価な方向を持つ結晶構造を持っており、Cu をドーブすることで T_c が 3 K 程度の超伝導を示します⁵⁾。私達がこの物質の熱容量の磁場方向依存性を測定すると、超伝導状態においては 180 度周期の振動を示すことが明らかになりました¹⁾(図 1c)。熱容量測定では、超伝導を形成する電子対 (クーペー対) が部分的に壊れた成分を検出していることに相当していますので、私たちの発見した現象は、「磁場方向によって電子対の壊れ易さが違う」ことを意味します。

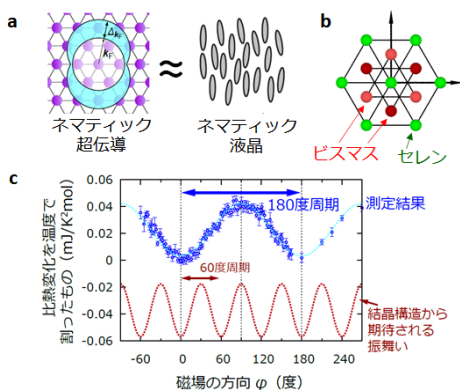


図 1 ネマティック超伝導。a. ネマティック超伝導とネマティック液晶の類似性。b. $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の結晶構造の模式図。c. 比熱の磁場方向依存性の測定結果¹⁾。

先にも述べたように、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ は 120 度おきに等価な方向を持っていますので、この結果は非常に奇妙です。通常ならば超伝導になった後も磁場を 120 度 (実際的には 60 度) 回せば全く等価な性質を示すはずですが、この物質ではその性質が成り立っていません。このことを専門用語では「回転対称性が破れている」といいます。

この新しい性質は、実は液晶と類似しています (図 1a)。液晶とは、液体と固体の中間の状態のことで、特に有名なのが棒状の分子が流動性を保ちながらある方向に整列する「ネマティック液晶」状態です。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ でみられた 180 度周期の性質も、「超伝導電子が流動性を保ちながらある方向に整列した」結果とみなすことができます。これらの類似性から、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導は「ネマティック超伝導状態」と名付けられ⁶⁾、世界中で研究が進んでいます²⁾。

3. ネマティック超伝導の制御

ネマティック液晶の分子配向は電場で容易に制御することができます。この、通常の液体には無い高い制御性を利用しているのが、液晶ディスプレイです。では、ネマティック超伝導も通常の超伝導にはない制御性を持っているのでしょうか。

我々は、電場の代わりに、結晶をある方向にひずませる一軸ひずみを用いることでネマティック超伝導のドメイン構造を制御することに成功しました。この実験で用いたのは、ストロンチウムをドーブした Bi_2Se_3 で、Cu ドープしたものと同様のネマティック超伝導を示します⁷⁾。図 2 に示すように、この試料にひずみを与える前は、電気抵抗から決めた上部臨界磁場 H_{c2} の方向依存性は、ネ

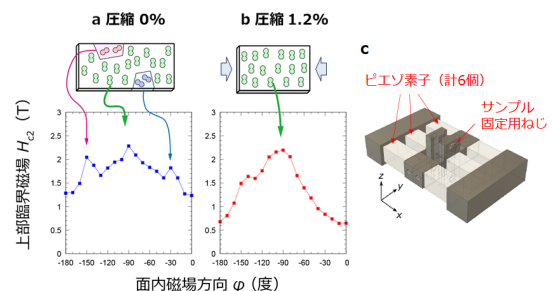


図 2 ネマティック超伝導の一軸ひずみ制御。a, b. $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の上部臨界磁場の面内方向依存性^{3),4)}。ひずみを印加する前(a)と後(b)でグラフの構造が大きく変わっている。c. 一軸ひずみ印加装置の模式図⁴⁾。

マティック超伝導配向の異なる複数ドメインからの寄与の重ね合わせにより、3つのピークを持つ複雑な構造をしています。ここに1%程度の一軸ひずみを与えると、 H_{c2} は単独のピークを持つ曲線へと変化しました³⁾。このことは試料が単一ドメインになったことを示しています。

4. 独自の実験装置たち

最後に、これらの研究に用いた装置について説明したいと思います。

非常に重要な役割を果たしたのが、磁場方向を自在に制御可能なベクトルマグネット装置(図3a)です⁸⁾。この装置は、縦方向と横方向の超伝導磁石を組み合わせてできており、それぞれの磁石に印加する電流の大きさを別々に制御することで、磁場を鉛直面内で回転することができます。さらに、装置全体が水平回転ステージに乗っていることで、水平方向にも磁場を回転することができます。この2つを組み合わせ、空間のどの方向にも磁場を向けることができます。これによって、精緻な磁場方向制御化可能になりました。

比熱の測定には、図3b-cに示す自作の熱容量計を用いました。この熱容量計では、試料が温度計とヒーターにサンドイッチされる構造になっているのが特徴的で、試料以外に起因するバックグラウンドの熱容量を大きく抑制できる構造になっています。測定には、ヒーターに交流電流を与えると、その2倍の周波数でジュール発熱が発生し、その発熱による温度変化をロックインアンプで位相検波するという交流方式を用いています。この方法は、交流電流の大きさや積算時間を最適化することで感度を上げ易いのが特徴です。

一軸ひずみを印加する実験では、ピエゾ素子を用いた一軸ひずみ印加装置を用いました。ピエゾ素子というのは電圧を印加すると伸長する素子の中で、この伸長する力を試料に伝えてひずませることができます。本実験では、2014年ころに

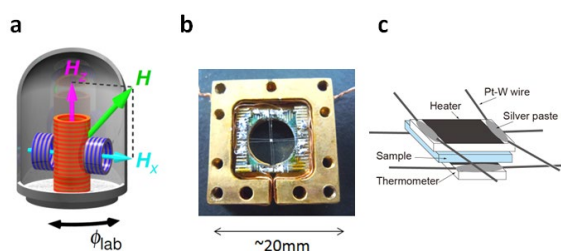


図3 本研究計画で用いた実験装置。a. ベクトルマグネット装置。b. 比熱測定装置。c. 比熱測定装置の中心部分の拡大模式図。

C. Hicksらによって発明された装置⁹⁾を一部最適化したもの(図2c)を用いています⁴⁾。この方式は、試料を極低温に冷却した状態でひずみ制御できるという極めて重要な長所を持っています。

5. おわりに

このように、測定・制御に関する高度技術をうまく組み合わせることによって、世界的にも独自性の高い実験を行うことができ、それによって超伝導の新種ともいえる「ネマティック超伝導」を発見・制御する研究に成功しました。

現在、他の興味深い超伝導に対してもこのような実験を行っており、ネマティック超伝導を凌駕する興味深い超伝導の可能性を示唆するデータも得られています。それらについても近いうちに発表できればと考えています。

本稿で紹介した研究は様々な方との共同研究によるものです。特に、実験は京大理学研究科の固体量子物性研究室(前野悦輝先生)のメンバーとの共同研究で、比熱実験は元修士課程学生の田尻氏、一軸ひずみ実験は元博士課程学生のKostylev氏が中心となって行いました。試料は大阪大・ケルン大の安藤陽一先生のグループから提供いただきました。また、科学研究費補助金26287078、17H04848、20H05158、22H04473、22H01168、23H04861の補助を受けました。この場をお借りして感謝申し上げます。

6. 参考文献

- 1) S. Yonezawa *et al.*, *Nature Phys.* **13**, 123 (2017).
- 2) Review として、俣野・米澤、*日本物理学会誌* 2018年2月号; S. Yonezawa: *Condens. Matter* **4**, 2 (2019).
- 3) I. Kostylev *et al.*, *Nature Commun.* **11**, 4152 (2020).
- 4) I. Kostylev *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **125**, 082535 (2019); 米澤、*高圧力の科学と技術* **31**, 236 (2021).
- 5) Y. S. Hor *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 057001 (2010).
- 6) L. Fu, *Phys. Rev. B* **90**, 100509(R) (2014).
- 7) Z. Liu *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 10512 (2015); Shruti *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 020506(R) (2015).
- 8) K. Deguchi *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 1188 (2004).
- 9) C. W. Hicks *et al.* *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 065003 (2014)