

トポロジカル物質で見つかったバルク超伝導と2次元超伝導の共存

[1] 要旨

層状構造をもつ NaAlSi は、“ディラック点”と呼ばれる特徴的なエネルギーバンドの交点が線状に繋がる“トポロジカル物質”である。NaAlSi は転移温度 7 K のバルク（試料全体）の超伝導体であることが知られていたが、詳細な磁気トルク測定からバルク超伝導とは異なる極めて 2 次元性が強い超伝導が共存していることが判明した。この結果は NaAlSi の結晶表面で特異な超伝導状態が形成されている可能性を示しており、トポロジカル超伝導体の研究に新たな展開をもたらすものである。

[2] 本文

特徴的なエネルギーバンド構造を持つ“トポロジカル物質”においては、特異な表面状態が出現する可能性が理論的に指摘されており、その表面状態の検証・解明のため世界的に盛んに研究が行われている。特にバルク（結晶全体）で超伝導となるトポロジカル物質において、どのような表面状態が生じるのか、大きな関心を集めている。

Al-Si 層と Na 層が交互に積み重なった層状構造を持つ NaAlSi は[図 1 (a)]において、エネルギーバンド計算から線形分散をもつバンドが交差しディラック点を形成していること、そのディラック点が連続的につながって閉じたループを形成していることが分かっている。そのためこの物質は一連のトポロジカル物質の中でも“ノーダルライン半金属”と呼ばれる特殊な物質である。この NaAlSi はフェルミ面が小さい（電子密度が小さい）にも関わらず、比較的高い転移温度 7 K を持つバルクの超伝導体である。

最近、物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センターのメンバーを中心とする研究グループは、トポロジカル物質 NaAlSi の磁気トルクを幅広い温度・磁場範囲で詳細に調べた結果、バルク超伝導とは別に極めて 2 次元性が強い超伝導が共存することを発見した。この結果はトポロジカル超伝導体の研究に大きな進展をもたらし、多値論理デバイス*開発へと発展する可能性を秘めている。この成果は JPSJ の 2023 年 7 月号に掲載された。

磁気トルクは、磁場中で試料が異方的な磁化を持つ時に働く回転力である。磁気トルクはマイクロキャンティレバーという手法[図 1 (b)]で測定することで、小さな単結晶試料においても磁氣的性質を精密に調べることができる。特に超伝導体においては、超伝導出現の証拠となる反磁性トルク信号を明確に観測することができる。

7 K 以下の超伝導状態において、NaAlSi の単結晶の磁気トルクを磁場方位の関数として精密に測定すると、バルクの超伝導由来のトルク信号とそれとは異なる極めて 2 次元性の強い超伝導由来のトルク信号が同時に出現することを見出した[図 1 (c)]。この 2 次元超伝導状態は、Al-Si 層に平行（c 軸に垂直）で、その厚さ(d^{layer})は結晶 c 軸の格子定数（0.736nm）の数倍程度しかない。2 次元超伝導の超伝導転移温度はバルク超伝導と同じ 7 K であるが、c 軸方向の臨界磁場はバルク超伝導と比較してずっと小さい。バンド計算から結晶表面で特異な表面状態の存在が予想されており、その結晶表面で 2 次元超伝導が実現している可能性がある[図 1 (d)]。2 次元超伝導とバルク超伝導との関連性や、2 次元超伝導の発現メカニズムなどについて、さらなる研究の進展が望まれる。

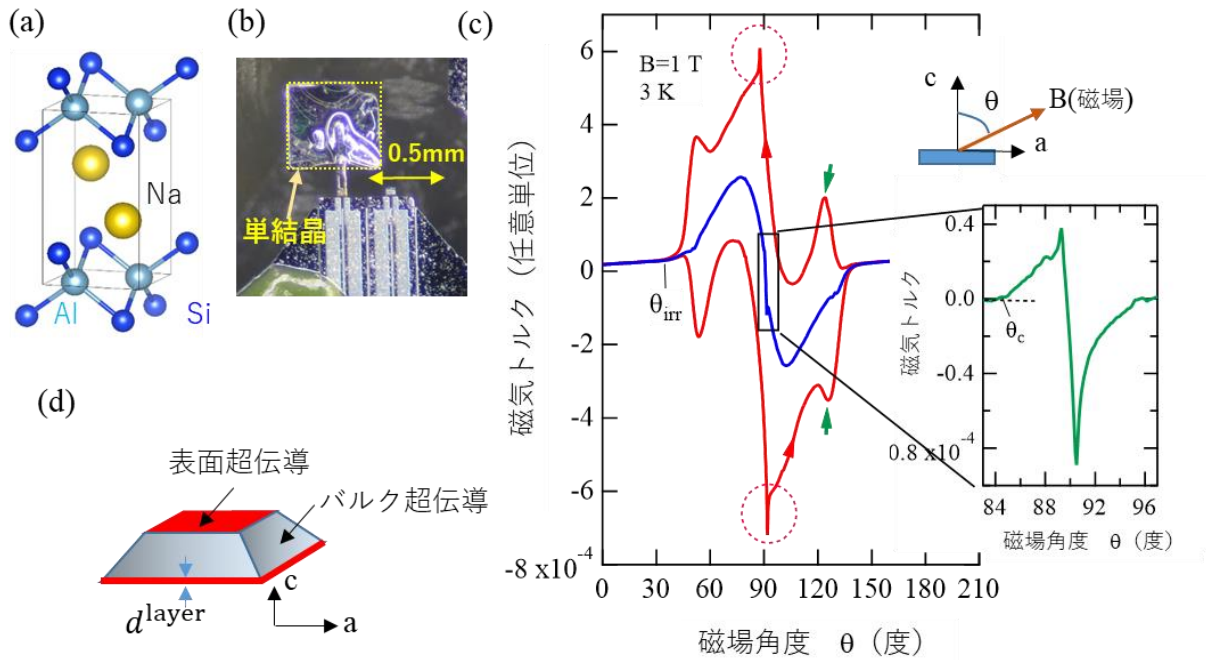


図1 (a)ノーダルライン半金属 NaAlSi の結晶構造。(b) 磁気トルク測定に用いたマイクロキャンティレバーと NaAlSi 単結晶。(c) 磁気トルクの磁場方位依存性 (赤カーブ)。青カーブはトルク信号の可逆部分 (両回転トルクデータの平均) でバルク超伝導由来。緑矢印はピーク効果によるもの。挿入図の緑カーブは 90 度付近に出現する分離された鋭いトルク信号の拡大図。(d) NaAlSi 単結晶において予想される表面超伝導状態 (赤部分)。 d^{layer} は表面超伝導の厚みで c 軸の格子定数 (0.736nm) の数倍と見積もれる。

*多値論理デバイス：現在実用化されているデバイスは on-off の 2 値（2 段階）を区別した論理デバイスとなっているが、もし 2 値を超える多値論理デバイスが実現すると、演算速度が格段に改善する論理計算が可能となる。

原論文（2023 年 6 月 8 日公開済）

[Anomalous Diamagnetic Torque Signals in Topological Nodal-Line Semimetal NaAlSi](#)

S. Uji, T. Konoike, Y. Hattori, T. Terashima, T. Oguchi, T. Yamada, D. Hirai, T. Ikenobe, and Z. Hiroi, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 074703 (2023).

<情報提供：宇治進也（物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センター）>