

トポロジカル物質における表面超伝導を発見 ～新しいタイプの非従来型超伝導物質～

【本研究のポイント】

- ・ノードルライン半金属^{注1)}CaAgP(カルシウム銀リン化物)の表面状態に起因する電子キャリア^{注2)}を発見。
- ・表面層に非従来型超伝導^{注3)}が発現していることを解明。
- ・トポロジカル物質^{注4)}の表面状態の持つ新たな性質を明らかにした。

【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院工学研究科の矢野 力三 助教、柏谷 聡 教授らの研究グループは、東京大学物性研究所の岡本 佳比古 教授らとの共同研究で、ノードルライン半金属と呼ばれるトポロジカル物質における表面超伝導^{注5)}を新たに発見しました。実験に用いられたのはCaAgPおよびPd(パラジウム)を少量ドーブ^{注6)}したPd-CaAgP(図1)であり、ディラック点^{注7)}と呼ばれる直線バンドの交差点が、フェルミレベル^{注8)}の近傍でリング状につながった特有な電子構造を有する物質です。本物質では理論解析に基づきフラットバンド^{注9)}表面状態が形成されること、またPdドーブにより超伝導が発現することは既に明らかにされていました。今回の研究では、電気2重層トランジスタ^{注10)}を用いた電気輸送測定(図2)に基づき、非常に高い移動度($\sim 10^5 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度)を有する電子キャリアは表面層に局在しており、物質内部とは異なる表面状態に起因することが明確になりました(図3)。またトンネル分光法^{注11)}という電子状態観察手法に基づき、発見した超伝導は表面層に存在することが同定され、表面状態が超伝導の起源となっている表面超伝導の可能性が示されました。さらに観察された超伝導ギャップ構造^{注12)}がゼロバイアス・コンダクタンスピーク^{注13)}という特徴的なスペクトル形状を有することにに基づき、表面超伝導が非従来型超伝導性を有していることが明らかにされました(図4)。

本研究にて、トポロジカル物質の表面状態が起源となる新たなタイプの超伝導状態が確認されたことにより、今後類似の物質群でもフラットバンド高温超伝導や新たな非従来型超伝導が発見されることが期待されます。

本研究成果は、2023年10月26日Nature Communications誌にウェブ上で先行公開されました。

【図】

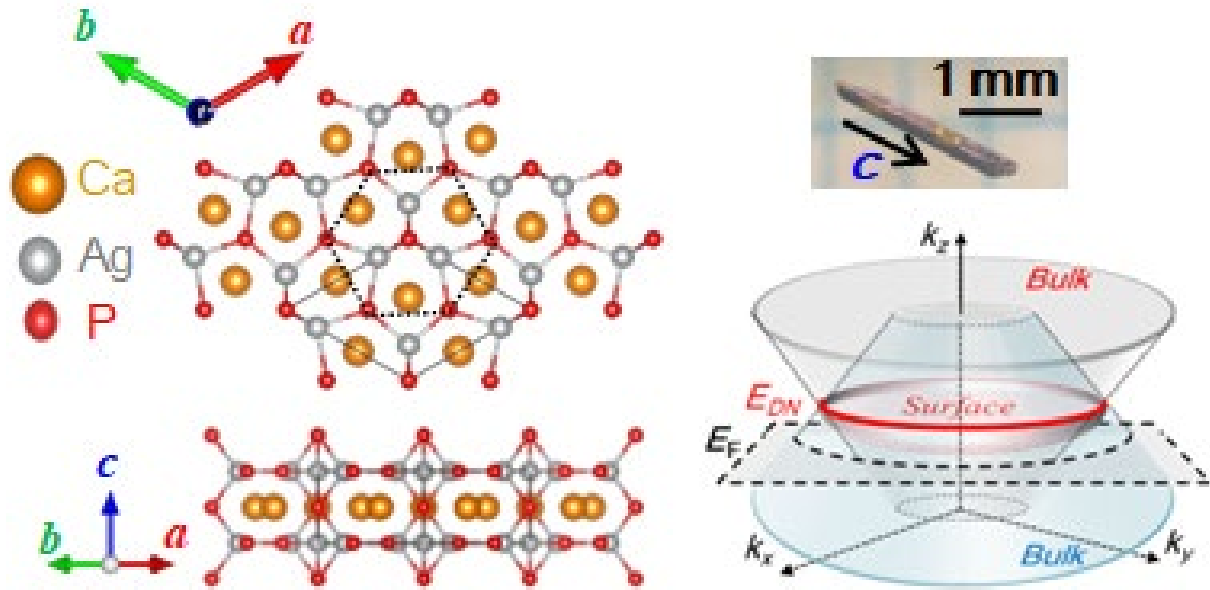


図1 CaAgP の結晶構造、結晶写真とエネルギーの波数依存性

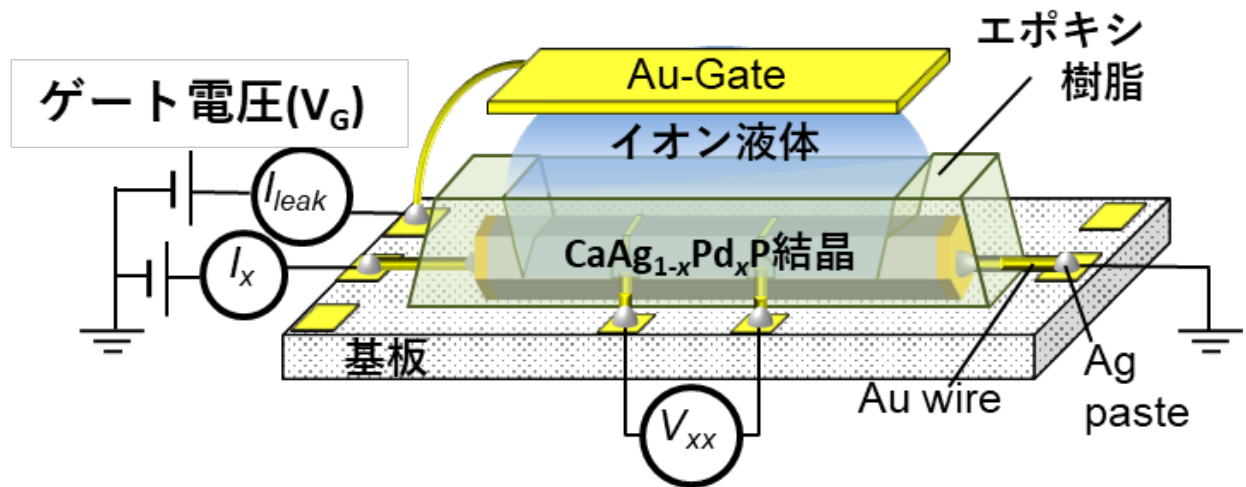


図2 電気 2 重層トランジスタによるキャリアー制御の実験配置

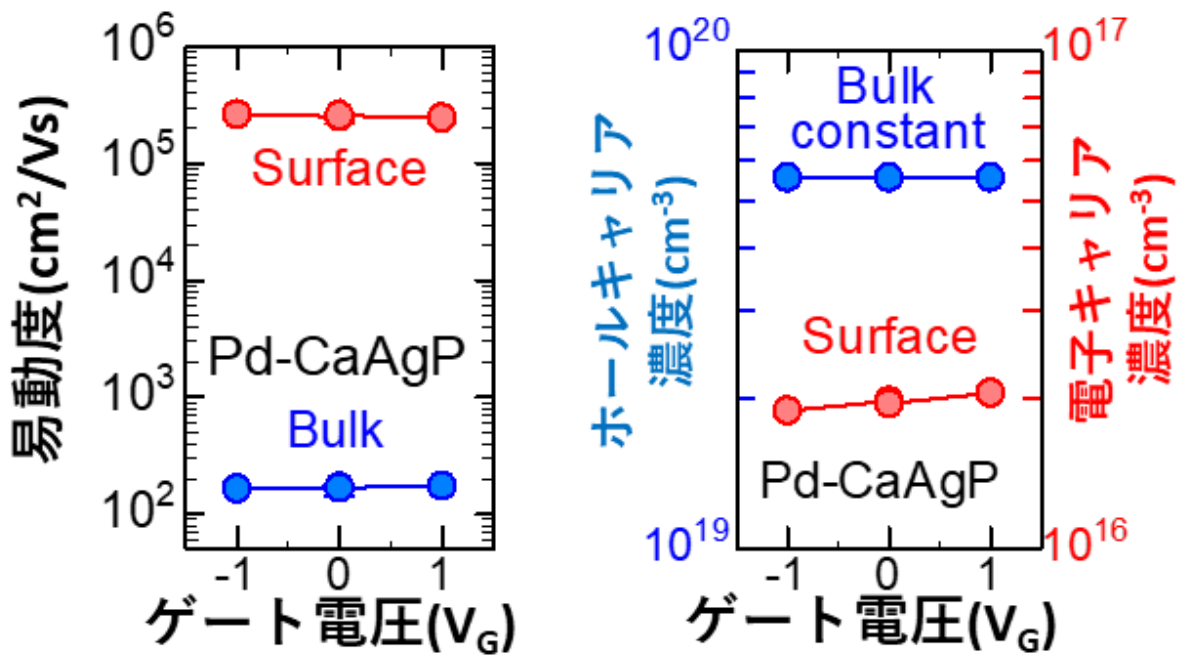


図3 電気2重層トランジスタによる Pd ドープ CaAgP のキャリアの移動度、キャリア濃度のゲート電圧依存性。ゲート電圧印可時に少数キャリアである電子キャリアの濃度のみが大きく変化していることから、電子キャリアが表面に局在していることがわかる。

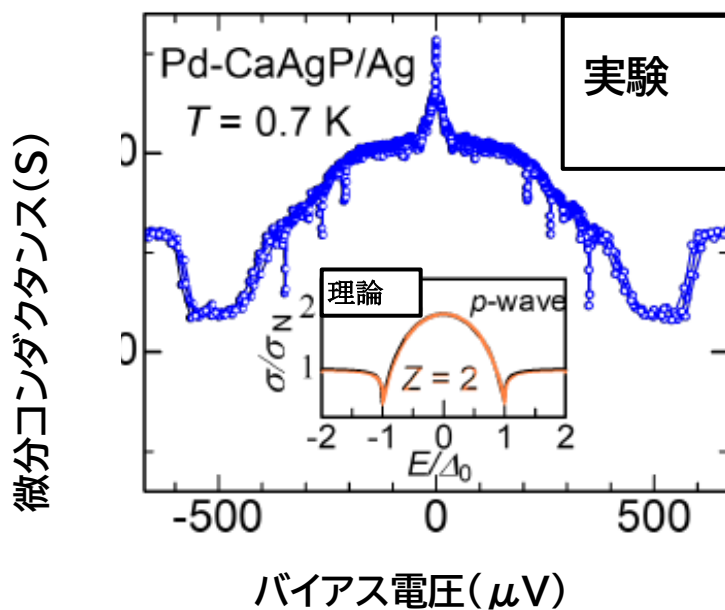


図4 トンネル分光による Pd-CaAgP における超伝導ギャップ構造。図中インセットに示した非従来型超伝導の理論的なバイアス電圧依存性と類似のゼロバイアス・コンダクタンスピークが観察されている。

本研究は、JSPS 科研費 JP18H01243、19K21846、19H05823、20H02603、20H00131、21H04652、21K13854、および JSTCREST (JPMJCR16F2)の助成を受けたものです。

【用語説明】

注 1)ノードルライン半金属:

トポロジカル物質の一種であり、ノードルライン半金属はディラック点がリング状に並んで存在している半金属物質のこと。CaAgP は物質内部ではノードルラインリングを有し、フェルミ面はノードルラインのごく近傍に位置し、表面層ではドラムヘッド型分散と呼ばれるフラットバンド状態が現れることが山影らの理論解析によって明らかにされている(図 1 を参照のこと)。CaAgP を研究に用いる長所としてフェルミ面近傍ではディラックバンド以外の余計なバンドが存在しないため、ノードルライン半金属固有の性質が研究できることが挙げられる。

注 2)電子キャリア:

半金属は伝導バンドと価電子バンドがフェルミレベル近傍で交差する電子構造を有し、半金属内のキャリアは、ホール係数が負の電子キャリアと、ホール係数が正のホールキャリアの 2 種類が共存する。輸送特性は通常2キャリアモデルに基づき解析される。

注 3)非従来型超伝導:

従来型の金属超伝導では超伝導電子対が BCS 理論に基づく等方的なスピン 1 重項状態であるのに対して、非従来型超伝導では超伝導電子対が非等方的、あるいはスピン 3 重項状態となっている。これらの電子対の状態に依存し、超伝導ギャップ構造が変化する。

注 4)トポロジカル物質:

従来によく知られた金属や半導体とは異なり、バンド構造に非自明な幾何学的性質をもつ物質群を指す。物質の端(エッジ)に対応する表面層に、物質内部(バルク)と異なる表面状態を有することが特徴として挙げられる。トポロジカル物質の代表例であるトポロジカル絶縁体では、内部は絶縁体であるが、表面層には金属状態が出現する。

注 5)表面超伝導:

物質内部とは異なる超伝導が表面層に発現したものを表面超伝導という。トポロジカル物質等では内部と表面層では電子状態が大きく異なるが、このような場合には、内部では超伝導が起こらず、表面層のみで超伝導が発現するようなことが起こりうる。

注 6)ドーピング:

電界効果や不純物等によりキャリア濃度の調整を行うことをドーピングという。電子(ホール)キャリアをドーピングすることを電子(ホール)ドーピングと呼ぶ。簡易なモデルでは、バンド構造は不変のままフェルミレベルを上下に変調させる効果を有する。

注 7)ディラック点:

ディラック電子系と呼ばれる物質群では、エネルギーの分散関係が直線である伝導バンドと価電子バンドが一点で交差する。この点をディラック点と呼ぶ。直線分散を有する電子は、相対論的效果を含めた運動方程式(ディラック方程式)に従うことが知られている。

注 8)フェルミレベル:

物質の有するエネルギーバンドにおいて、電子によって占有された最大のエネルギーレベルのこと。

注 9)フラットバンド:

電子の分散関係(エネルギーの波数依存性)において、エネルギーが波数に依存しないバンドをフラットバンドと呼ぶ。CaAgP に期待される表面状態はドラムヘッド型の弱い分散を有していると理論的に示されているが、実質的にフラットバンドに近い構造と言える。フラットバンドが存在すると、状態密度(単位エネルギー当たりの電子の状態数)がピークを作り、高温超伝導や強磁性を引き起こす可能性が指摘されている。

注 10)電気 2 重層トランジスタ:

電界効果トランジスタの一種で、電界を試料に印可することにより試料にキャリアをドーピングするために用いられる。通常の電界効果トランジスタでは固体絶縁膜を利用して電界を印加するのに対して、電気 2 重層トランジスタはイオン液体を用いて電界を印加することで、通常の電界効果トランジスタよりも 100 倍程度高いキャリア濃度の調整を可能としている。

注 11)トンネル分光法:

トンネル接合とトンネル効果を用いて金属の表面における電子状態密度分布を観測する手法であり、トンネル接合の微分コンダクタンスが電子の状態密度に対応する。特徴としてエネルギー分解能が極めて高いことが挙げられ、超伝導エネルギーギャップなどエネルギースケールの小さい電子現象の観測に力を発揮する。トポロジカル物質のような物質内部と表面層で電子状態が異なる物質の場合には、トンネル分光法で観測されるのは表面層の状態となる。

注 12)超伝導ギャップ構造:

超伝導は電子がクーパー対という電子対を構成することにより発現し、電子状態密度にはエネルギーギャップが生じる。このエネルギーギャップの波数空間内での構造を超伝導ギャップ構造と呼ぶ。従来型超伝導と非従来型超伝導ではクーパー対の有する対称性に対応して超伝導ギャップ構造が異なり、実験的にはこの超伝導ギャップ構造を明らかにすることで両者の区別が可能となる。

注 13)ゼロバイアス・コンダクタンスピーク:

トンネル分光法で超伝導体の観測を行うと、従来型超伝導の場合は、微分コンダクタンスには超伝導エネルギーギャップがそのままコンダクタンスディップとして観測されるが、非従来型超伝導の場合には、ギャップ構造に依存して、表面アンドレーエフ束縛状態の形成に対応したギャップ内コンダクタンスピークが現れる。特にゼロエネ

ルギーに表面アンドレーエフ束縛状態が形成される超伝導体においては、トンネルコンダクタンスにはゼロバイアス・コンダクタンスピークという特徴的な性質が現れ、非従来型超伝導性の証拠とされる。

【論文情報】

雑誌名: Nature Communications

論文タイトル: Evidence of unconventional superconductivity on the surface of the nodal semimetal $\text{CaAg}_{1-x}\text{Pd}_x\text{P}$

著者: 矢野力三、長坂翔太、松原直生、三枝一茂、反田剛、伊藤誠一郎

(名古屋大学大学院工学研究科)

山影相(名古屋大学大学院理学研究科)

岡本佳比古(東京大学物性研究所)

竹中康司、柏谷聡 (名古屋大学大学院工学研究科)

DOI: 10.1038/s41467-023-42535-5

URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-42535-5>