

## 新しい超伝導ファミリーを発見 —高温超伝導体探索に新たな道標—

### 1. 発表者：

大串 研也（東京大学物性研究所 特任准教授）

Bosen Wang（ボセン ワン）（東京大学物性研究所 特任研究員）

### 2. 発表のポイント：

- ◆新しいタイプの超伝導体を発見
- ◆発見した新しい超伝導体の転移温度の制御に成功
- ◆高温超伝導体の探索に新たな指針を提案

### 3. 発表概要：

超伝導は、特定の物質を非常に低い特定の温度（転移温度）に冷却したときに電気抵抗が完全に消失する現象です。20世紀初頭の水銀における超伝導の発見以来、その発現機構の解明に向けて多大な努力が払われてきました。20世紀中ごろに提唱されたBCS理論（注1）により、電子のペア形成によりゲージ対称性（注2）が自発的に破れることが超伝導の起こる本質的なメカニズムであることが突き止められました。超伝導状態では発熱による損失なく電気を流せるため、工学的観点からも重要です。しかし実用に向けて超伝導を示す温度領域が低温に限定されていることが最大の障壁となっていました。これまでに、銅酸化物・鉄ニクタイト・二ホウ化マグネシウムなどさまざまな種類の超伝導体（超伝導ファミリー）が発見されてきましたが、超伝導転移温度は室温には程遠い状況です。そのため、新たな超伝導ファミリーの発見が期待されていました。

今回、東京大学物性研究所の大串 研也 特任准教授らのグループは、新しい超伝導ファミリーを発見しました。同グループは、アンチポストペロブスカイト構造（注3）を有するバナジウム（V）・リン（P）・窒素（N）からなる化合物 $V_3PN$ に着目し、それが4.2 K（摂氏-268.9 °C）で超伝導を示すことを見いだしました。同様の結晶構造を有する化合物ではこれまで超伝導の報告がなく、新しい超伝導ファミリーの発見です。超伝導状態への転移温度はまだ低温に留まっているものの、わずかな組成の変更に応じて大きく変化することから、組成を最適化することで更なる転移温度の向上が見込めます。また、この物質が超伝導を発現する機構を解明することで、新たな高温超伝導体の探索につながる可能性が期待されます。

この研究成果は、Scientific Reports 誌（11月29日付け）に掲載されます。

### 4. 発表内容：

#### ① 研究の背景と経緯

1911年にオランダの物理学者 Heike Kamerlingh Onnes（ヘイケ・カメルリング・オネス）は、水銀を冷却すると4.2 Kで電気抵抗が完全に消失することを観測しました。この超伝導の発見以来長らく闇の中に包まれていたその発現機構は、1957年に提唱されたBCS理論により解明されました。超伝導は、物質中の電子がフォノン（注4）を媒介としてペアを形成し、そのペアが Bose-Einstein 凝縮（ボース=アインシュタイン凝縮）（注5）することに起因することが明らかにされました。超伝導転移はゲージ対称性の自発的な破れを伴い、この概念は素粒

子物理学にも影響を与えました。その後も超伝導の研究は発展を続けており、特に 1986 年の銅酸化物高温超伝導体の発見以降、スピン揺らぎ（注 6）を媒介としたペア形成に関する理解が飛躍的に進みました。

超伝導は、科学的観点からのみならず工学的観点からも重要な現象です。超伝導状態では電気抵抗が完全に消失するため、超伝導体からなる送電線を用いることで、発熱による損失なく電気を輸送することが可能になります。また、超伝導体には大電流を流すことが可能であるため、超伝導線のコイルにより強磁場を発生することができます。こうした超伝導磁石は、例えば、病院等で核磁気共鳴画像法（MRI）などの検査装置で実用化されており、リニアモーターカーなどの磁気浮上式鉄道での実用も計画されています。しかし、これまでに見つかっている超伝導体は、超伝導を示す温度領域が低温に限定されており、冷却に多大なコストがかかるという、実用化を図る上での障壁が存在します。現在までに知られている超伝導ファミリーには、銅酸化物・鉄ニクタイト・二ホウ化マグネシウムなどがありますが、さらに新しい超伝導ファミリーの開拓が期待されていました。

## ② 研究の内容

本研究では、地球のマントル最深部でケイ酸塩化合物が有するポストペロブスカイト構造のアンチ構造に着目して、新しいタイプの超伝導体を探索しました。その結果、バナジウム・リン・窒素からなるアンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物  $V_3PN$  が、4.2 K（摂氏 -268.9 °C）以下で電気抵抗を消失し、超伝導状態になることを発見しました。超伝導体の特徴の一つである外部磁場を完全に排除するという Meissner 効果（マイスナー効果）を確認し、超伝導が不純物由来ではなく試料固有のものであることを確認しました。これまでポストペロブスカイトおよびアンチポストペロブスカイト構造を有する化合物では超伝導状態の報告がないため、アンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物  $V_3PN$  は新しい超伝導ファミリーと言えます。

本研究では、アンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物  $V_3PN$  の窒素が欠損したり、リンが砒素に置き換わったりすることで、転移温度が大きく変化することも発見しました。例えば、この化合物の組成を最適化することにより、転移温度は 5.6 K（摂氏 -267.5 °C）に上昇しました。このような転移温度が化合物の組成によって変化するメカニズムには、結晶構造の二次元性が鍵を握っていることが判明しました。現段階では、アンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物における電子のペア形成の起源は解明されていませんが、電子間相互作用が重要な役割を担っていることが示唆されており、フォノンに加えてスピン揺らぎもペア媒介の起源として考慮する必要があることが分かりました。

## ③ 今後の展開

アンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物の超伝導転移温度は低温に留まっているものの、組成や構造を最適化することで転移温度をさらに改善することが見込めます。また、さまざまな先端の実験手法を駆使し、微視的観点からこの化合物がどのようなメカニズムによって超伝導を発現しているかを解明することで、新たな高温超伝導体の設計指針を確立できる可能性が期待されます。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Scientific Reports」（11月29日）

論文タイトル：Superconductivity in anti-post-perovskite vanadium compounds

著者：Bosen Wang, and Kenya Ohgushi

## 6. 問い合わせ先：

東京大学物性研究所

特任准教授 大串 研也

TEL：04-7136-3250

FAX：04-7136-3251

E-mail：ohgushi@issp.u-tokyo.ac.jp

## 7. 用語解説：

### （注1）BCS理論

1957年に、John Bardeen、Leon Neil Cooper、John Robert Schriefferにより提唱された、超伝導の基礎理論。Bardeen、Cooper、Schriefferの頭文字をとってBCS理論と呼ばれている。

### （注2）ゲージ対称性

波動関数の位相に関する対称性。

### （注3）アンチポストペロブスカイト構造

ポストペロブスカイト構造のアンチ構造。ポストペロブスカイト構造とは、ケイ酸マグネシウムが超高压で有する結晶構造のことであり、地球マントルの最深部に実在すると考えられている。アンチ構造とは、ある特定の結晶構造における「陰イオンを陽イオンに」「陽イオンを陰イオンに」置き換えた結晶構造のことである。

### （注4）フォノン

結晶中の格子振動を量子化した粒子。

### （注5）Bose-Einstein凝縮

多数の粒子が最低エネルギーの量子状態を占めること。

### （注6）スピン揺らぎ

スピンが静的に揃った磁気秩序相の近傍で発達するスピンの動的な揺らぎ。

8. 添付資料：

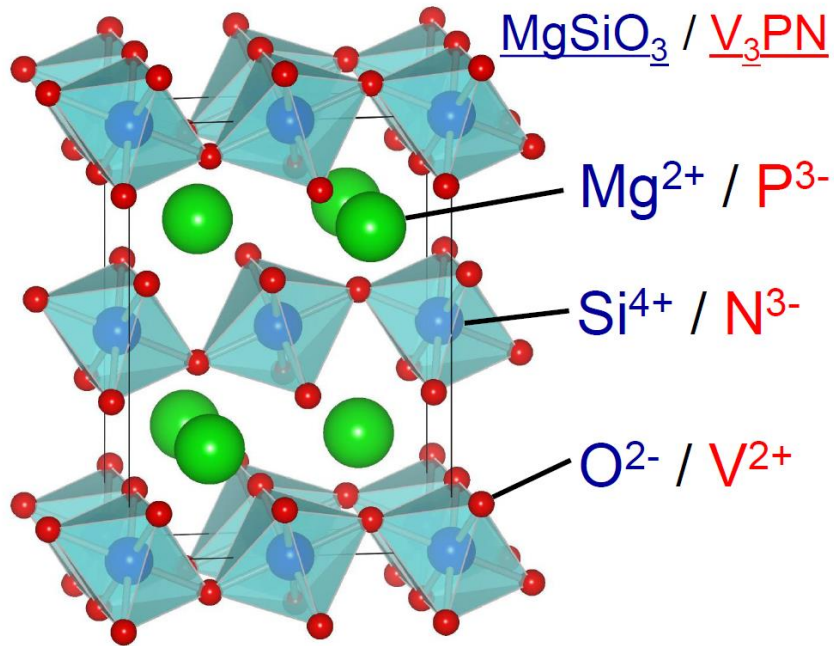


図1. アンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物  $\text{V}_3\text{PN}$  の結晶構造。ポストペロブスカイト型ケイ酸マグネシウム  $\text{MgSiO}_3$  と対比して描いている。

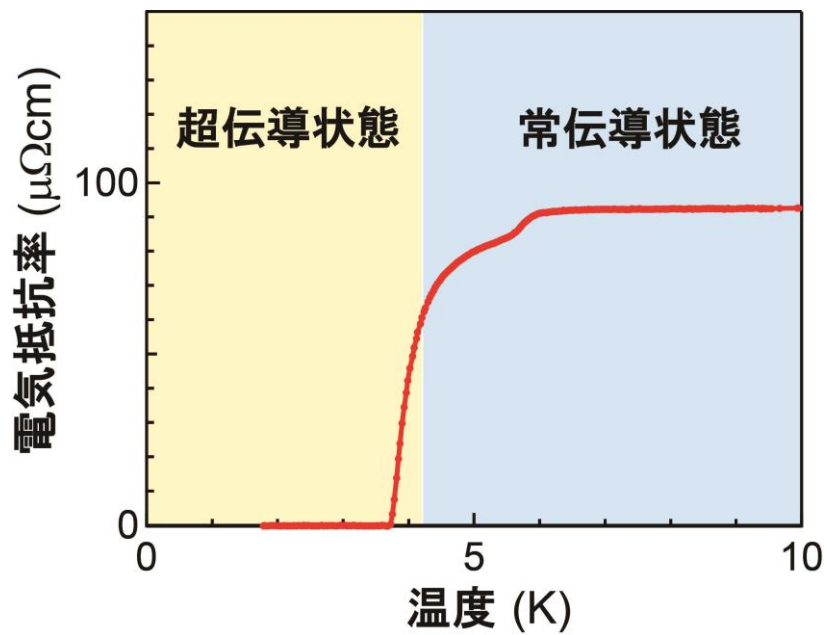


図2. アンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物  $\text{V}_3\text{PN}$  の電気抵抗率。低温で電気抵抗率がゼロとなり、超伝導状態になったことが分かる。

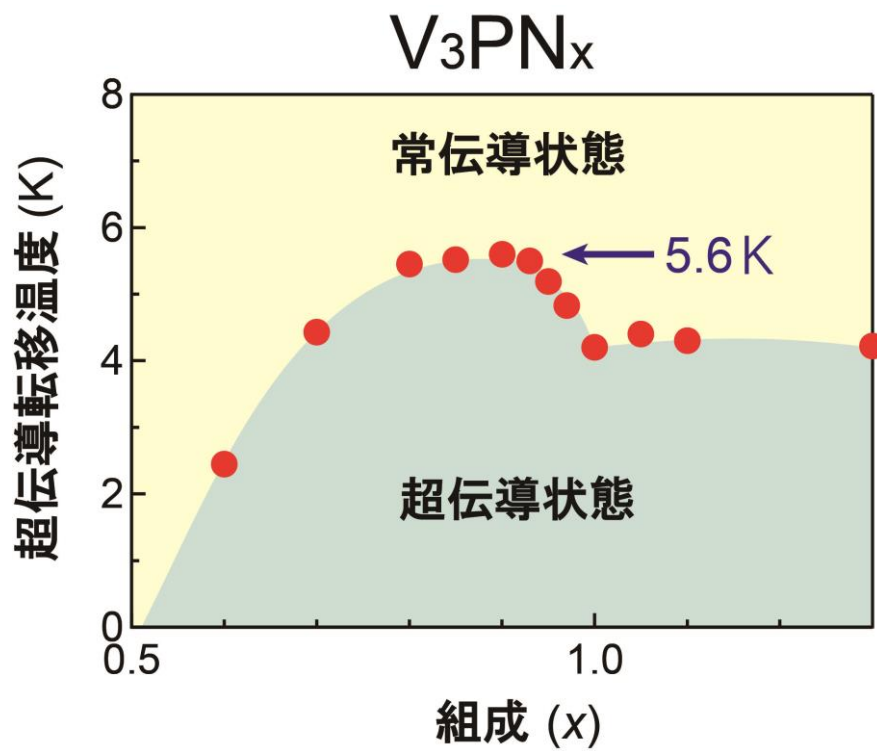


図3. アンチポストペロブスカイト型バナジウム化合物  $V_3PN_x$  における超伝導転移温度の窒素組成  $x$  依存性。  $x \sim 0.9$  で超伝導転移温度が最高値 5.6 K となる。