



平成 25 年 10 月 15 日

文部科学省記者クラブ 御中  
文部科学省科学記者会 御中

東京工業大学  
東京大学物性研究所

## ガラガラ動く原子が超伝導転移温度を変化させる機構を解明 —超伝導転移温度を上げる新たな指針—

### 【概要】

東京工業大学の磯野貴之元大学院生（現 物質・材料研究機構 研究員）と井澤公一准教授、東京大学物性研究所の廣井善二教授、フランス原子力庁 (CEA) の Jacques Flouquet 博士らの共同研究グループは、 $\beta$  型パイロクロア酸化物（用語 1）において、超伝導転移温度を変化させる仕組みがラットリングと呼ばれる原子の非調和振動（用語 2）によってもたらされていることを突き止めた。これにより、これまでほとんど知られていなかった非調和振動が超伝導に与える影響を解明するための重要な知見を得ることに成功した。この成果は超伝導転移温度の上昇に向けた新たな指針となるものであり、より高い転移温度をもつ超伝導の発見が期待される。

この成果は 15 日発行の学術誌「ジャーナル・オブ・ザ・フィジカル・ソサイエティ・オブ・ジャパン」電子版に注目論文として掲載される。

### ●研究成果

同研究グループは  $\beta$  型パイロクロア酸化物における圧力を加えていった時の超伝導転移温度の特異な変化が、ラットリングと呼ばれる物質中の原子の非調和振動によって統一的に理解できることを明らかにした。圧力により非調和性が増大すると、転移温度を決定する二つの因子のうち「伝導電子と格子との相互作用」は増強し（図 2 中段）、もう一方の「格子振動のエネルギー」は減少する（図 2 下段）ことが高圧下磁場中比熱の実験で明らかになった。

前者は超伝導転移温度を上昇させ、後者は減少させる効果であり、これら二つの相反した効果の競合により、転移温度がある値で極大値を取る（図 2 上段）ことがわかった。これにより  $\beta$  型パイロクロア酸化物における一見系統性のない超伝導転移温度の加圧による変化を統一的に理解できることを突き止めた。また、この成果は非調和性の大きさを最適化することで、既存物質よりも数倍高い転移温度をもつ新たな超伝導体の実現可能であることも示唆している。

この成果は世界的に見ても稀な高圧下精密比熱測定システムを用い、東京大学物性研究所のグループが育成した高純度単結晶試料を用いて測定した結果得られた。

## ●研究の背景と経緯

単純な金属や合金などにみられる超伝導現象は、格子振動（原子の振動）を介して電子間に引力が働くことにより生じるという考えに基づく BCS 理論（用語 3）によりほぼ理解されている。

通常物質では、原子は周りの原子とバネで強く繋がれた調和振動子とみなすことができる（図 1 右）。ところがカゴ状物質と呼ばれる物質群では「ラットリング」とよばれる通常物質にはあまりみられない非調和な原子振動が存在する（図 1 中）。そして、そのような特異な格子振動が超伝導に及ぼす影響はこれまでほとんど理解されてはいなかった。

$\beta$  型パイロクロア酸化物  $KOs_2O_6$ 、 $RbOs_2O_6$  および  $CsOs_2O_6$  はカゴ状物質の一つであり、アルカリ原子 (K、Rb、Cs、用語 4) の非調和振動に由来した特異な超伝導状態が実現していると考えられている。例えば、BCS 理論の予言とは全く異なり、非調和振動の大きい  $KOs_2O_6$  が最も転移温度が高く、またその上部臨界磁場は低温で 30 テスラを超えるなど、従来の超伝導では考えられないような現象が見られている。

その一方で、外部から圧力を加えてアルカリ原子の非調和性を変化させても  $KOs_2O_6$ 、 $RbOs_2O_6$ 、 $CsOs_2O_6$  それぞれの転移温度は系統的な変化を示さない。このように超伝導と非調和性の関係性はある程度示唆されていたが、その詳細は明らかではなかった。

## ●本成果の意義、今後の展開

今回の研究成果は、これまで BCS 理論では想定されていなかった非調和振動が超伝導に与える影響を初めて実験的に明らかにしたものであり、格子振動を介した超伝導の理解を更に深める重要な情報を与えるものである。さらに、そのような学術的な意義だけではなく、応用的側面から超伝導転移温度を上げるための指針を与えるものとしても意義がある。今後、この研究成果をもとに、より高い転移温度をもつ超伝導体が発見されることに期待が持たれる。

この研究は、文部科学省新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」、科学研究費基盤研究 B（代表：井澤公一）、文部科学省グローバル COE プログラム「ナノサイエンスを拓く量子物理学拠点」の助成を受けた。

## 【用語説明】

- (用語 1)  **$\beta$  型パイロクロア酸化物**：一般化学式  $AOs_2O_6$  をもつパイロクロア型酸化物の一種。A はアルカリ金属元素（カリウム〈K〉、ルビジウム〈Rb〉、セシウム〈Cs〉）、Os はオスミウム、O は酸素である。OsO<sub>6</sub> 八面体を作る大きな原子カゴの中で相対的に小さなアルカリ金属イオンが非調和振動（用語 2）をするという特徴を有する（図 1 左）。
- (用語 2) **ラットリング、原子の非調和振動**：カゴ状物質と呼ばれる物質群における原子の特殊な振動。図 1 左に示すように□型パイロクロア酸化物では、酸素 (O) とオスミウム (Os) 原子とが互いに化学結合し、大きな原子カゴを形成している。そのカゴの中で、小さいアルカリ (K、Rb、Cs) 原子が孤立しており、カゴとのサイズのミスマッチによりガラガラと大きい振幅で振動している。これは、カゴの中にあるアルカリイオンのエネルギーが図 1 中に示すように広い範囲で低くなっていることにもなって可動範囲が広がっているからである。その結果、比較的低温（低エネルギー）においても大きい振幅で振動が可能となる。これは図 1 右に示す通常物質中の原子（調和振動子）のエネルギーの低い部分が狭いこととは対照的である。このようなカゴ中の原子の振動を非調和振動と呼び、そのエネルギーの低い部分の広がり非調和性の大きさに対応する。また、このカゴ内での振動は幼児などの玩具である「ガラガラ（英語ではラットラー）」に似ていることから、「活発な」「ガラガラ鳴る」という意味の「ラットリング」と呼ばれている。
- (用語 3) **BCS 理論**：バーディン、クーパー、シュリーファーが提唱した超伝導現象を微視的に解明した理論。超伝導は電子と電荷を帯びた結晶格子との相互作用により電子間に引力がはたらくことで形成されたクーパー対と呼ばれる電子対が凝縮した状態として説明されている。実用化されている超伝導体の多くがこの理論で良く説明される。
- (用語 4) **アルカリ原子**：周期表の一番左側にある 1 族の元素のうち、水素以外の元素。最外殻電子が 1 個で、陽イオンになりやすい。

【図】

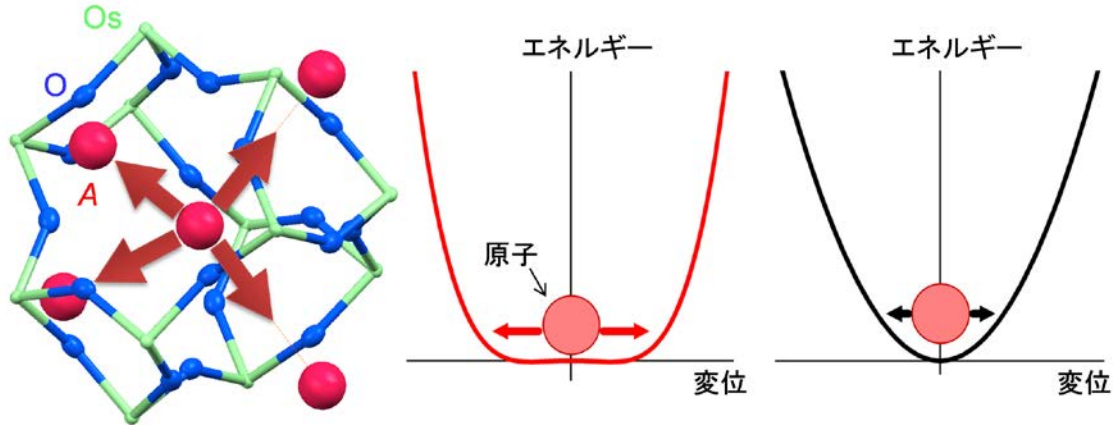


図 1  $\beta$  型パイロクロア酸化物におけるカゴ状構造 (左図)。赤、緑、青色はそれぞれアルカリ (K、Rb、Cs) 原子、オスミウム (Os) 原子、酸素 (O) 原子を示す。カゴの中にある原子が振動する様子 (図 1 中)。通常物質中において原子が振動する様子 (図 1 右)。

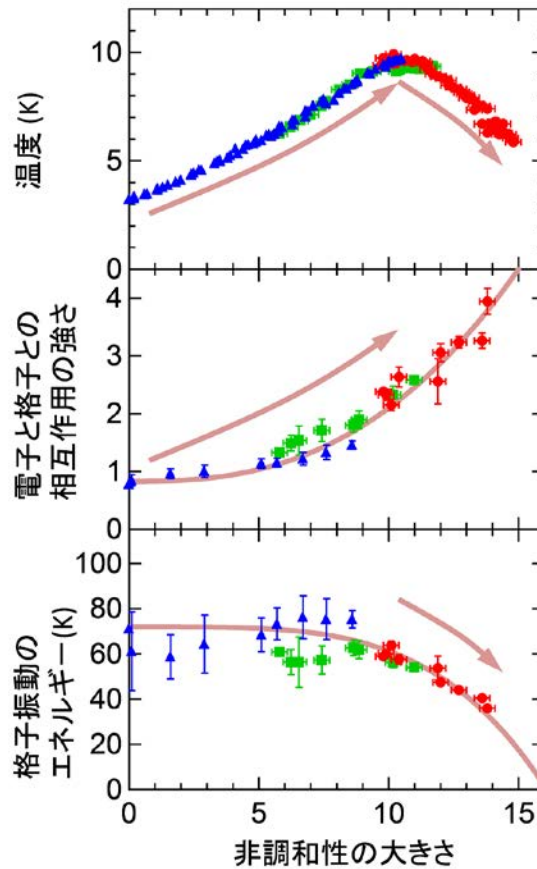


図 2 非調和性の変化に対する超伝導転移温度の変化 (上段)、電子と格子との相互作用の強さの変化 (中段)、格子振動のエネルギーの変化 (下段)。赤、緑、青色のプロットは、それぞれ  $\text{KOs}_2\text{O}_6$ 、 $\text{RbOs}_2\text{O}_6$ 、 $\text{CsOs}_2\text{O}_6$  の結果を示している。

**【発表論文】**

Understanding of the Temperature-Pressure Phase Diagram of  $\beta$ -Pyrochlore Oxides: a Role of Anharmonicity on Superconductivity

Takayuki ISONO, Daisuke IGUCHI, Takeshi MATSUBARA, Yo MACHIDA, Bernard SALCE, Jacques FLOUQUET, Hiroki OGUSU, Jun-ichi YAMAURA, Zenji HIROI, and Koichi IZAWA: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 114708.

**【問い合わせ先】**

東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻

准教授 井澤公一

Email: izawa@ap.titech.ac.jp

TEL&FAX: 03-5734-3832

物質・材料研究機構環境・エネルギー材料部門

NIMS ポスドク研究員 磯野貴之

Email: ISONO.Takayuki@nims.go.jp

TEL: 029-863-5606

東京大学物性研究所物質設計評価施設

教授 廣井善二

Email: hiroi@issp.u-tokyo.ac.jp

TEL: 04-7136-3445

以上