

# ボースグラスとフェルミグラスの実験的繰込み法を確立

～未知なる超伝導物質発見への貢献に期待～

## ポイント

- ・超伝導発現の前駆現象であるボースグラスの有無が、実験的繰込み法により判別可能。
- ・ボースグラスとフェルミグラスの境目はユニバーサルな量子抵抗値であることを発見。
- ・この判別方法によって、未知なる超伝導物質発見への手がかりが容易に。

## 概要

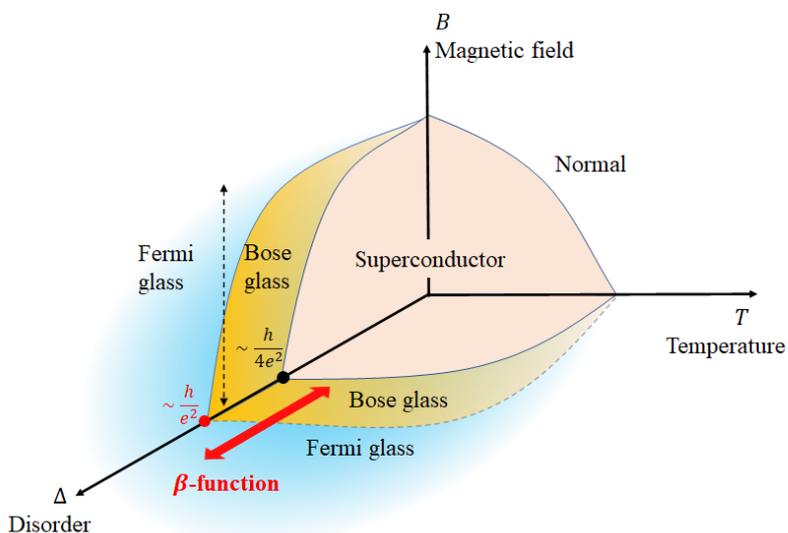
北海道大学大学院工学研究院の丹田 聡特任教授ら（第一著者：高橋是清氏）の研究グループは、ボースグラスとフェルミグラスの実験的繰込み法を確立しました。これにより、超伝導物質の超伝導発現直前の電子状態の描像が明らかになりました。

最近身近になってきた超伝導物質は、温度を冷やすと電気抵抗がゼロになることが知られています。この超伝導物質に変化を加えて温度を冷やすと、逆に電気抵抗が大きくなって局在状態になる場合があります。この場合、この物質の電気を運ぶ電子が、金属のように一つの電子としてふるまっているのか（フェルミグラス状態）、超伝導の特徴であるペアの電子でふるまっているのか（ボースグラス状態）を電気抵抗から判別する方法はありませんでした。

研究グループは、超伝導物質の中で性質の異なる Nd 系銅酸化物高温超伝導体と Pb 薄膜の実験データを使い、電気抵抗の温度変化を繰込み法という解析手法を用いて詳細に調査しました。その結果、電子のふるまいの違いがはっきりと判別できることが分かりました。これは、いままで理論で使われてきた繰込み法を実験分野に応用することに成功したことを意味しています。さらに、物質によらず、このふるまいの境目（ボースグラスとフェルミグラスの境目）が、ユニバーサルな量子抵抗値であることを発見できました。

この結果の応用として、ある物質が超伝導を発現しない場合においても、電気抵抗にボースグラス状態が判別できれば、超伝導状態が得られる可能性を意味しています。

なお、本研究成果は、2023年8月1日（火）公開の Scientific Reports 誌に掲載されました。



2次元超伝導物質の模式的な相図。本記事の解析では、Disorder軸を変化させ、超伝導に達する前のボースグラスからフェルミグラスへの変化を、 $\beta$ 関数を使った繰込み法にて解析（双方向赤矢印）。これらの境界抵抗値は、 $h/e^2$ （赤い点）付近を示した。

## 【背景】

リニアモーターカーや医療機器、さらには量子コンピュータ等で利用されている超伝導物質は科学の最前線で常に注目されています。通常、物質中に電気が流れる場合、電流を運ぶ電子が物質内の原子や不純物と衝突することで電気抵抗が生じますが、超伝導物質においては、電子がペアを組むことで抵抗を無くすことができます。この超伝導になりうる物質は、少しの条件を変えるだけで、超伝導を発現する温度であっても、超伝導から電気抵抗を発生する絶縁体へ変化する場合があります。この絶縁体の分析は、いままでフェルミオン\*1 で表現されるフェルミグラスの観点から議論されてきました。しかし、ボソン\*2 とフェルミオンの混合状態やフェルミグラスからボースグラスへの転移は考慮されていませんでした。本研究は、この領域に注目し分析したものです。

## 【研究手法・成果】

普遍性を議論するために、あえて明らかに異なる試料である、Nd 系銅酸化物高温超伝導体と Pb 薄膜を利用しました。Nd 系銅酸化物高温超伝導体は層状構造をもち、不純物をドーピングすることで、局在状態から超伝導状態への超伝導-絶縁体転移を起こします。一方、Pb 薄膜は、膜厚を増加することで絶縁体から超伝導体へと変化します。

これらの実験データを分析するために、実験的  $\beta$  関数を定義しました。 $\beta$  関数は、本来理論的な分野で、スケール依存性、すなわち繰込み群流れ\*3 を記述するために使用される関数です。今回このスケールを温度に置き換え、分析を行うことで、実験的繰込み法を確立しました。この方法は、従来の実験データをシンプルに活用するだけで、いままで見えてこなかった物質の側面が見えてきます。

この2種類の試料の分析結果は、どちらもフェルミグラスを示す、従来の自己無撞着  $\beta$  関数に見事に収まることが分かりました。しかし、驚くべきことに、局在がさらに弱くなる弱局在領域において、 $\beta$  関数に垂直な流れが観測されました(図1)。研究グループは、この垂直な流れがボースグラスの存在を示唆することを示しました。さらに、このフェルミグラスとボースグラスの境目は、どちらも二次元臨界面抵抗  $R_{\square}$  は  $h/e^2$  に近くなり(図2)、超伝導絶縁体転移の臨界面抵抗である  $h/4e^2$  と矛盾しない結果となりました。フェルミグラスとボースグラスの普遍的な量子面抵抗が存在することを意味しています。

## 【今後への期待】

研究成果は基礎科学と工学への応用の両方に対して、将来の貢献が予想されます。いままで分からなかったボースグラスの有無が、臨界面抵抗と実験的  $\beta$  関数で示される繰込み法によって容易に判別可能になります。そして、この判別方法によって、未知なる超伝導物質発見への手がかりが容易になっていくでしょう。

## 論文情報

論文名 Bose glass and Fermi glass (ボースガラスとフェルミガラス)  
著者名 高橋是清<sup>1</sup> (当時)、<sup>2</sup> (当時)、<sup>6</sup>、中津川啓治<sup>2</sup>、<sup>5</sup>、迫田将仁<sup>1</sup>、<sup>2</sup>、七尾美子<sup>3</sup>、延兼啓純<sup>2</sup>、<sup>4</sup>、小布施秀明<sup>1</sup>、<sup>2</sup>、丹田 聡<sup>1</sup>、<sup>2</sup> (<sup>1</sup>北海道大学大学院工学研究院、<sup>2</sup>北海道大学トポロジー理工学教育研究センター、<sup>3</sup>University of St Andrews、<sup>4</sup>北海道大学大学院理学研究院、<sup>5</sup>国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS)、<sup>6</sup>株式会社野村総合研究所)  
雑誌名 Scientific Reports (科学全般の専門誌)  
DOI 10.1038/s41598-023-39285-1  
公表日 2023年8月1日(火)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 特任教授 丹田 聡 (たんださとし)

T E L 011-706-7293 F A X 011-706-7818 メール tanda@eng.hokudai.ac.jp

U R L <https://exp-ap.eng.hokudai.ac.jp/>

北海道大学大学院工学研究院 准教授 小布施秀明 (おぶせひであき)

T E L 011-706-6620 メール hideaki.obuse@eng.hokudai.ac.jp

U R L <https://ssp-ap.eng.hokudai.ac.jp/>

国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS) ポスドク研究員 中津川啓治 (なかつがわけいじ)

T E L 029-851-3354 メール NAKATSUGAWA.Keiji@nims.go.jp

U R L <https://www.nims.go.jp/mana/jp/>

## 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 北海道札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

## 【参考図】

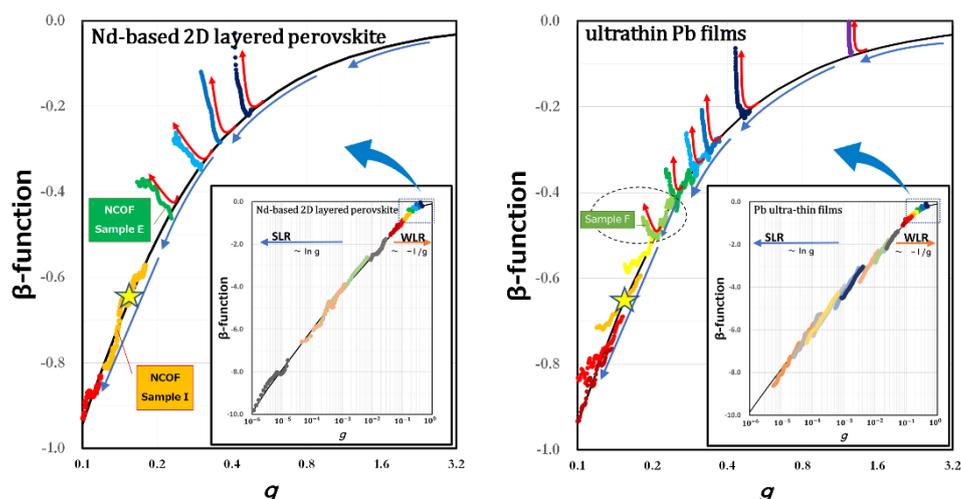


図 1. 実験的  $\beta$  関数。弱局在に近づくと垂直流れが発生する (左: Nd 系銅酸化物高温超伝導体、右: Pb 薄膜)。

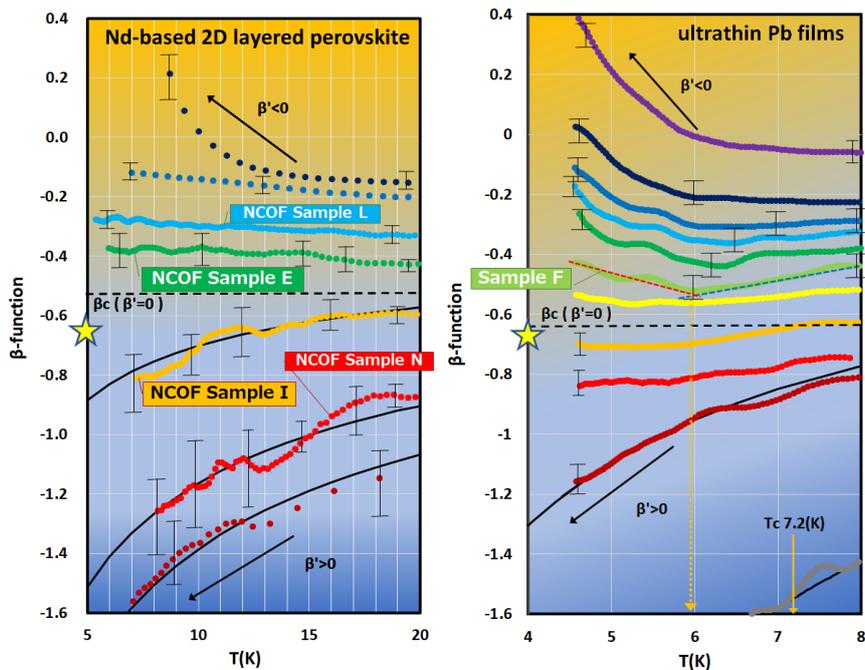


図 2. 横軸を温度にした実験的  $\beta$  関数（左：Nd 系銅酸化物高温超伝導体、右：Pb 薄膜） $\beta$  関数の傾きの境目が 0.64 近くであり、これは面抵抗  $R_{\square}=h/e^2$  を示す。

### 【用語解説】

- \*1 フェルミオン … フェルミオンは、私たちの身の回りにある物質を作る基本的な粒子の一種。電子や陽子、中性子などがフェルミオンの例。ただ、とてもユニークなルールを持っており、「同じ場所に同じ種類のフェルミオンは二つ以上存在できない」というルールがある。フェルミグラスはフェルミオンが固定化された状態を示す。
- \*2 ボソン … ボソンは、粒子の一種で、主に力を伝える役割を果たす。光を構成する光子や、ある粒子と別の粒子を引き合わせる粒子などが、ボソンの例。ボソンには、フェルミオンとは逆の特別なルールがあり、ボソンは、同じ場所に何個でも存在できる。ボスグラスはボソンが固定化された状態を示す。
- \*3 繰込み群流れ … 異なるスケールでの物理現象の関係を理解するための枠組み。非常に大きなスケール（例：銀河）から非常に小さなスケール（例：原子）まで、様々なレベルでの現象を研究するのに役に立つ。