

## 小型積層マグネットへの世界最高磁場の捕捉に成功

### 1. 発表者：

陶山 正裕（東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 修士課程2年）  
卞 舜生（東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教）  
為ヶ井 強（東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 准教授）  
淡路 智（東北大学 金属材料研究所 附属強磁場超伝導材料研究センター 教授）  
飯島 康裕（株式会社フジクラ 超電導研究部 フェロー）

### 2. 発表のポイント：

- ◆ 高性能コーテッド・コンダクター（注1）を用いた小型積層マグネット（注2）を作製し、世界最高記録となる 17.89 T（注3）の強磁場捕捉に成功しました。また、磁場捕捉に必要な時間を 75 分へと大幅に短縮しました。
- ◆ コーテッド・コンダクターに大きな比熱を持つ鉛を蒸着することにより、強磁場捕捉にとって大きな制約となる熱磁気不安定生に起因するフラックス・ジャンプ（注4）を抑制しました。
- ◆ 超伝導体（注5）の基板として用いているハステロイ（注6）基板の厚さを薄くすることにより、より高温でも 17 T 以上の強磁場が捕捉可能であることを示しました。

### 3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の陶山正裕大学院生、卞舜生助教、為ヶ井強准教授、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの淡路智教授、(株)フジクラ超電導研究部の飯島康裕フェローらの共同研究グループは、人工ピン（注7）として  $\text{BaHfO}_3$  を導入することにより低温・高磁場での臨界電流密度（注8）を高めた高性能の  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  コーテッド・コンダクターを用いた小型積層マグネット（ $12 \times 13 \times 12 \text{ mm}^3$ ）を作製し、これを金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの超伝導マグネットで発生した 18 T の強磁場中で 6.5 K（ $-266.7^\circ\text{C}$ ）まで冷却し磁場を取り除くことにより、17.89 T の強磁場の捕捉に成功しました。この捕捉磁場が、これまでの世界記録である 17.7 T を超えただけでなく、磁場捕捉に必要な時間も、これまでの 1/15 以下である 75 分に短縮することに成功しました。

本研究成果は、高温超伝導体の実用化へ大きく貢献するとともに、今後の捕捉磁場マグネットの開発・改良に大きな指針を与えるものと期待されます。

本研究成果は、2022 年 1 月 6 日（英国時間）に国際学術誌「Superconductor Science and Technology」のオンライン版に Letter として掲載されました。

### 4. 発表内容：

電気抵抗がゼロとなる超伝導体は、その特異な特性から様々な用途に応用されています。例えば、病院にある MRI 装置は大型の超伝導マグネットがその主要部品となっています。また、リニアモーターカーは冷凍機で冷却された超伝導マグネットを搭載することにより浮上走行します。しかし、一般的には超伝導現象は極低温でのみ起きる特殊な現象と考えられてきました。1986 年に発見された銅酸化物高温超伝導体（注9）は、それまで不可能と考

えられていた液体窒素温度（ $-196^{\circ}\text{C}$ 、 $77\text{ K}$ ）以上で超伝導性を示し、当時“超伝導フィーバー”とまで言われた社会現象を巻き起こしました。その後の着実な研究により、現在では何種類かの銅酸化物高温超伝導体を用いた超伝導線材（注10）が開発されています。初めに開発されたのがBi系銅酸化物高温超伝導体を用いたテープ線材です。その後、Y系銅酸化物高温超伝導体を用いた線材が、コーテッド・コンダクターという特殊な形状で開発されてきました。

超伝導体の最も重要な特性の一つである臨界電流密度は、電気抵抗ゼロで流すことのできる電流を超伝導体の断面積で割ったものですが、その大きさは超伝導体に侵入したマイクロな磁束の振る舞いにより決定されます。通常、超伝導体はマイスナー効果と呼ばれる弱い磁場の侵入を許さない特性を持っています。しかし、数 $10\text{ mT}$ 以上の磁場の下では、磁場により発生した磁束は量子化された“磁束量子”（注11）という形態で超伝導体に侵入します。超伝導体に電流を流すと侵入している磁束量子にローレンツ力が作用し運動を開始し、この運動が電気抵抗、すなわちエネルギー散逸を生んでしまいます。そこで、様々な手法を用いて磁束量子の運動を抑制（ピン止め）することが重要になります。具体的には、超伝導体に欠陥を導入し不均一にすることにより、磁束量子をピン止めすることができます。このような欠陥（ピン止め中心）は、化学的な元素置換や、高エネルギーの粒子線照射を行うことにより導入することができます。コーテッド・コンダクターは、薄膜堆積法を用いた非熱平衡過程で成長を行うため、超伝導体とは異なる別の物質を試料中に混在させながら作製することができます。今回の積層マグネットに用いたコーテッド・コンダクターでは、結晶配向性を高める何種類かのバッファ層上に（図1(a)）、低温・高磁場での特性を良くするため超伝導体に $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を用いると共に、その中に $\text{BaHfO}_3$ のナノメーターサイズの人工ピンを埋め込んでいます（図1(b)）。

積層マグネットは、これまで研究されてきたバルクマグネット（注12）に代わるものとして最近注目されているものです。バルクマグネットは、強磁場を捕捉することにより超伝導マグネットの代わりとして、また、モーターの磁極や磁気ベアリング等への利用が期待されています。今回作製した積層マグネットでは、幅 $12\text{ mm}$ のコーテッド・コンダクターを長さ $13\text{ mm}$ に切断したものを計 $200$ 枚積層しています（写真：図2(a)、断面図：図2(b)、詳細は後述）。また、 $100$ 枚+ $100$ 枚のコーテッド・コンダクタースタックには、最も捕捉磁場が強くなる中心部と、そこから外側へ $2, 4\text{ mm}$ 離れた位置に、捕捉磁場測定用の3つの微小ホール素子が配置されています（図2(c)）。全体を熱伝導度の高い銅製のケースに入れると共に上から銅の蓋で押さえ付けて、積層マグネットを構成しています。積層マグネットそれ自体には外部から電流を流すことができないため、別の大型超伝導マグネットを用いて強磁場を発生し、その磁場を積層マグネットに捕捉します。今回の実験では、着磁のために東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターにある $18\text{ T}$ 超伝導マグネットを用いました。着磁の過程は以下の通りです：

- (1) 積層マグネットをプローブの先に取り付け $18\text{ T}$ 超伝導マグネットに挿入
- (2) 超伝導転移温度（ $93\text{ K}$ ）以上で $18\text{ T}$ の高磁場を積層マグネットに印加
- (3) 積層マグネットを着磁する低温まで冷却
- (4) 超伝導マグネットの磁場をゼロまでゆっくりと減磁

図3に今回の実験の前に行った積層マグネット#1（後述の鉛は無し）における予備実験の結果を示します。外部磁場を最高磁場の $18\text{ T}$ から減少させながら測定した捕捉磁場と温度の変化を示しています。外部磁場が約 $1\text{ T}$ までは順調に着磁が行われていましたが、 $1\text{ T}$ において、突然温度が上昇すると共に捕捉磁場が $2\text{ T}$ 以下に減少しています。これは、フラッ

クス・ジャンプと呼ばれる現象による捕捉磁場の急減です。外部磁場掃引下で臨界状態（注13）にある超伝導体では、臨界電流密度に相当する電流が流れているため、わずかな擾乱でも熱磁気不安定性を生じ、内部の磁束量子が動き出し捕捉磁場が急減します。この熱磁気不安定性を抑制するには、熱伝導を良くするか、比熱を大きくする必要があります。コーテッド・コンダクターの場合、超伝導体自体には手を加えられないので、安定化のために付けられた銀の上に更に別の物質を堆積し、熱的安定性を高めることとなります。今回、本研究グループは10 K以下での比熱が非常に大きい鉛を1  $\mu\text{m}$  真空蒸着することにより、熱的な安定性を図りました。しかし、単に鉛を蒸着するとコーテッド・コンダクター全体の厚さが増加し捕捉磁場が減少するので、ハステロイ基板を機械的に3  $\mu\text{m}$  研磨しコーテッド・コンダクターの厚さを元より薄くしたものを50枚準備し中心部に設置し、積層マグネット#2を構成しています（図2(a)）。このようにして熱的安定化を図った積層マグネット#2における着磁過程を図4(a)に示します。6.5 Kにおいてフラックス・ジャンプを起こさずに着磁することに成功しています。この時の積層マグネット#2中心部のホール素子で計測された捕捉磁場が、世界記録にあたる17.89 Tになります。図4(b)に鉛を付ける前(#1)と付けた後(#2)の積層マグネットの捕捉磁場の温度依存性を比較しています。鉛を付けたことにより、低温までフラックス・ジャンプを起こさず捕捉磁場が増大していることがわかります。

今後の更なる発展に向けて、フラックス・ジャンプの起きにくい  $T=10\text{ K}$  におけるいくつかのシミュレーションも行いました。今回用いた積層マグネット#2と同じ配置でコーテッド・コンダクター計200枚を積層したときの捕捉磁場プロファイルを図5(a)に示します。中心で16.42 T、表面で11.14 Tの磁場を捕捉しています。この計算結果は、図4(b)で示した実験結果を良く再現しています。一方、図5(b)にコーテッド・コンダクターを30  $\mu\text{m}$  にまで薄くし、中心部に6x6 mm<sup>2</sup>の正方形の穴を穿けたものを計400枚積層したときの捕捉磁場プロファイルを示します。中心付近では最大値17.16 Tの比較的均一な磁場が捕捉できています。このような穴を持つ積層マグネットを用いることにより、捕捉された強磁場下における様々な実験が容易に行えるようになることが期待されます。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Superconductor Science and Technology」（オンライン版：1月6日）

論文タイトル：Trapping a magnetic field of 17.89 T in stacked coated conductors by suppression of flux jumps

著者：Masahiro Suyama, Sunseng Pyon, Yasuhiro Iijima, Satoshi Awaji, and Tsuyoshi Tamegai\*

DOI番号：doi.org/10.1088/1361-6668/ac4560

アブストラクト URL：https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ac4560

## 6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻  
准教授 為ヶ井 強（ためがい つよし）

東北大学 金属材料研究所 附属強磁場超伝導材料研究センター  
教授 淡路 智（あわじ さとし）

<報道に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

## 7. 用語解説：

(注1) コーテッド・コンダクター

金属基板上に各種薄膜堆積法を用いて作製した超伝導線材の総称。代表的なものは、Y系銅酸化物高温超伝導体を堆積したもので、ハステロイ基板上に結晶配向を助ける中間層を堆積した上に、超伝導層を堆積し、さらに保護のために金属を蒸着等により付けています。

(注2) 積層マグネット

幅 12 mm 程度のコーテッド・コンダクターを切断し、積層することによりバルクマグネットと類似の特性を持たせたマグネットの総称

(注3) T (テスラ)

磁場の強さの単位。地磁気は約 0.05 mT。また、最も強い磁石であるネオジウム磁石の表面磁場は約 1 T。

(注4) フラックス・ジャンプ

臨界状態にある超伝導体において、何らかの擾乱により磁束量子が動き出し、その運動に起因するエネルギー散逸による局所的な温度上昇が、更なる磁束量子の運動を引き起こすことにより雪崩的に生じる超伝導体における磁束密度の急激な変化のこと。

(注5) 超伝導体

電気抵抗がゼロとなる超伝導現象を示す物質の総称。リニアモーターカーや病院にある MRI 装置用の強力マグネットに用いられています。

(注6) ハステロイ

ニッケルを主成分とし、モリブデンやクロムを含む耐食性・耐熱性を高めた合金。

(注7) 人工ピン

磁束量子の運動を抑制するために意図的に導入した元素置換や相分離を利用した化学的欠陥や、高エネルギー粒子線照射により生成された物理的欠陥の総称。

(注8) 臨界電流密度

電気抵抗ゼロで超伝導体に流すことのできる電流密度の最大値。磁場の下において臨界電流密度は、磁束量子のピン止め力により決定されます。

(注9) 銅酸化物高温超伝導体

1986年にIBMチューリッヒの研究者 J. G. Bednorz、K. A. Müllerにより発見された高い温度で超伝導現象を示す物質群の総称。なかでも  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  は初めて液体窒素温度 ( $-196^\circ\text{C}$ 、77 K) 以上で超伝導となったことで有名です。

(注10) 超伝導線材

電気抵抗ゼロとなる超伝導体を線状に加工したもの。コイル状に巻くことにより、通常の金属では発生することのできないような超強磁場の発生が可能となります。

(注11) 磁束量子

超伝導体中では、磁場は量子化されます。特に磁場の侵入が容易な第2種超伝導体中では、磁場は磁束量子の単位でまで細分化され、その運動は超伝導体における様々な電磁現象の原因となります。

(注12) バルクマグネット

超伝導体の塊（バルク）に磁場を捕捉することにより用いられるマグネットの総称。銅酸化物高温超伝導体では溶融凝固法等を用いて作製した大型擬似単結晶体を、 $\text{MgB}_2$  や鉄系超伝導体では大型の多結晶体を用いることにより作製されます。バルクマグネットは強磁性体磁石と比べはるかに強い磁場を発生できると共に、通常の超伝導マグネットよりもずっと小型であることが特徴です。

（注13） 臨界状態

超伝導体全体に磁場履歴に応じた方向に臨界電流密度相当の電流が流れている状態。このとき、磁束量子への電流によるローレンツ力と欠陥によるピン止め力とが釣り合っています。

## 8. 添付資料：

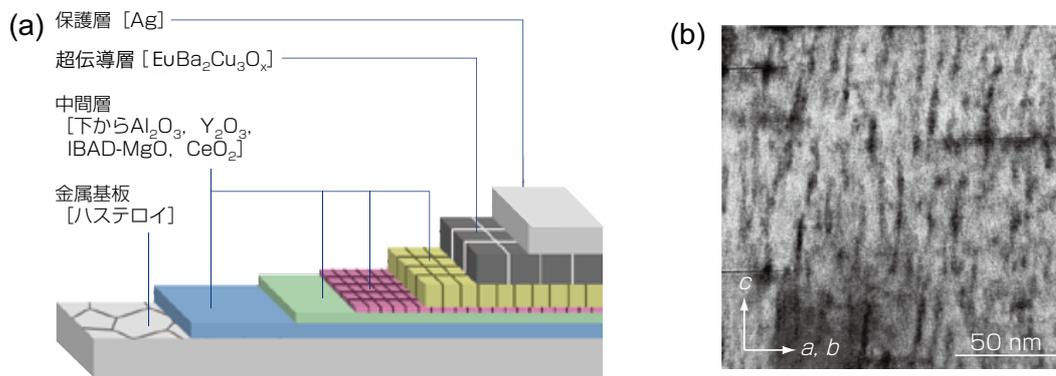


図1 (a)コーテッド・コンダクターの構造。ハステロイ基板の上に何種類かの中間層の上に超伝導層である  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  層が堆積され、Ag層で保護されている（フジクラ技報 130, 22 (2017)より一部変更の上、転載）。(b) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導層に導入された  $\text{BaHfO}_3$ 人工ピンの透過電子顕微鏡像（フジクラ技報 132, 24 (2019)より転載）。縦に走る黒い縞が  $\text{BaHfO}_3$ 。

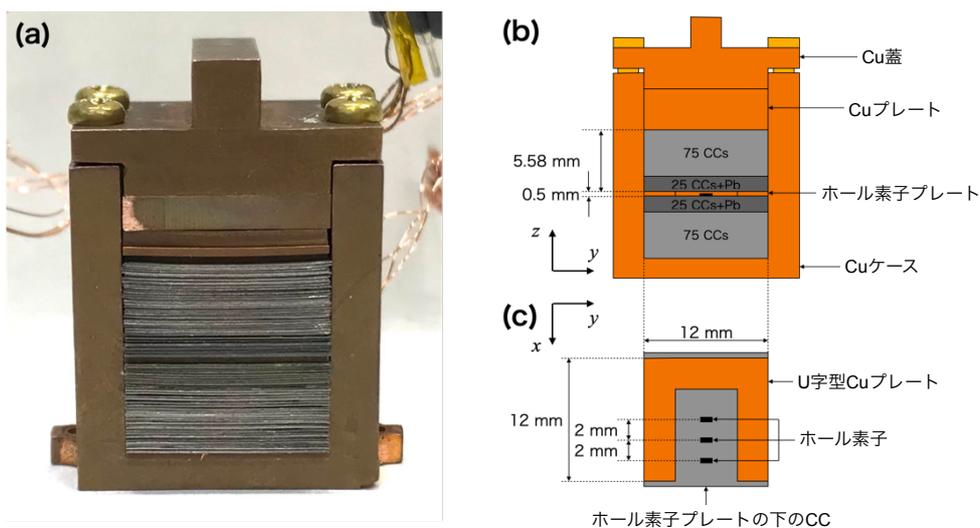


図2 (a)コーテッド・コンダクター (CC) を積み重ねた積層マグネットの写真。(b)積層マグネットの構造。中心部には、比熱を大きくするために鉛 (Pb) を蒸着し、基板を薄くしたコーテッド・コンダクター計 50 枚が使われている。(c) 捕捉磁場測定用のホール素子の配置。

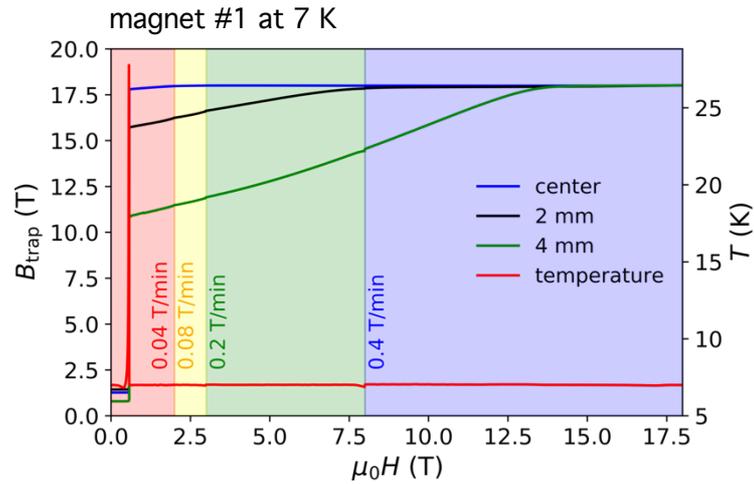


図3 鉛を導入していないコーテッド・コンダクターのみを積み重ねた積層マグネット#1における  $T=7\text{ K}$ での着磁の様子。外部磁場が約  $1\text{ T}$ の時に、フラックス・ジャンプにより急激に温度が上昇すると共に、捕捉磁場 ( $B_{\text{trap}}$ ) が減少している。

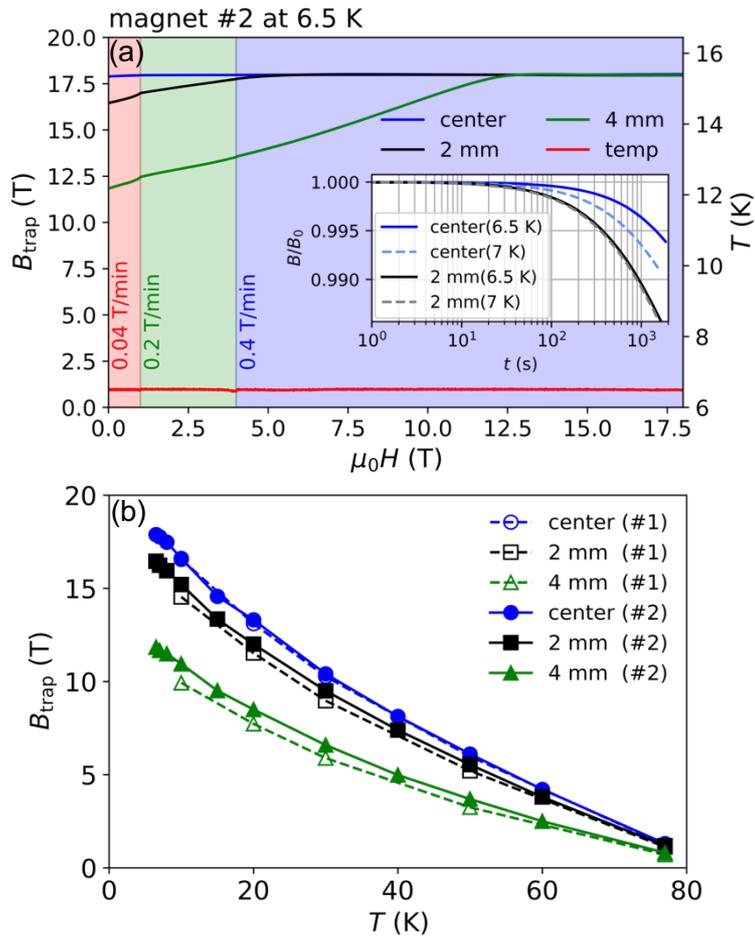


図4 (a)鉛を導入したコーテッド・コンダクター50枚を中心部に配置した積層マグネット#2における  $T=6.5\text{ K}$ での着磁の様子。挿入図は、外部磁場がゼロになった後の捕捉磁場の時間変化。(b) 積層マグネット#1、#2における捕捉磁場 ( $B_{\text{trap}}$ ) の温度依存性。

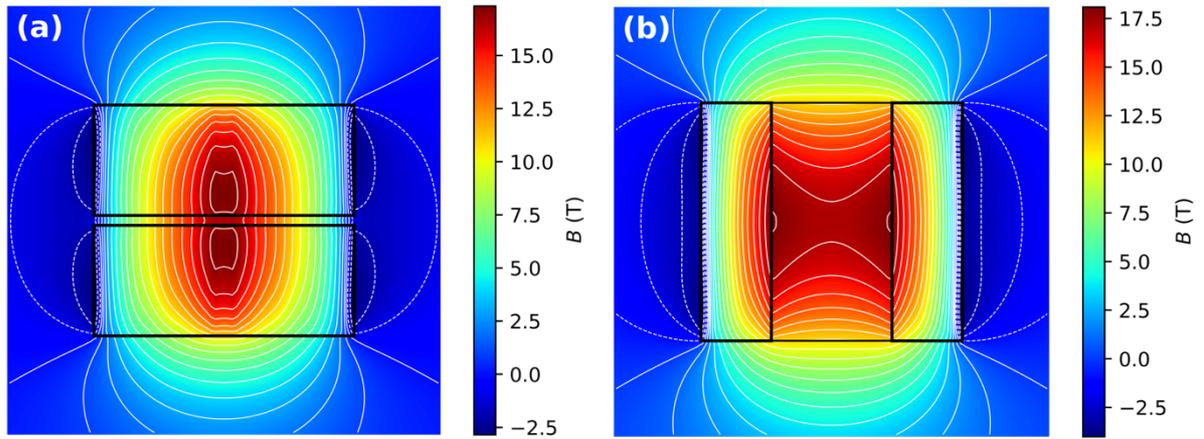


図5 (a)今回の実験で用いた積層マグネット#2における捕捉磁場のプロファイル ( $T=10\text{ K}$ )。中心で  $16.42\text{ T}$ 、表面で  $11.14\text{ T}$  の磁場を捕捉している。(b)  $30\text{ }\mu\text{m}$  まで薄くし、中心部に  $6\text{ x }6\text{ mm}^2$  の正方形の穴を穿けたコーテッド・コンダクターを計 400 枚積層したときの捕捉磁場のプロファイル ( $T=10\text{ K}$ )。中心部に  $17.16\text{ T}$  の磁場を捕捉している。