

「物質」を「材料」に 構造制御で超伝導を使いこなす

大学院工学研究院物質工学研究系 准教授 堀出 朋哉



後に取り組んでいる研究内容について紹介させていただきたいと思えます。

2012年に九州工業大学に着任し、5年がたちました。これまでこのような記事を書く機会がなかったので、まずは簡単に自己紹介をさせていただきます。2008年に京都大学大学院工学研究科材料工学専攻博士課程を修了し、高温超伝導薄膜の特性制御の研究に対し学位を取得しました。その後日立製作所中央研究所を経て、2012年より九州工業大学大学院工学研究院物質工学研究系助教（2017年4月より准教授）に着任しました。本学では一貫して超伝導材料をはじめとする機能性材料薄膜の特性制御の研究を行っています。本紹介記事では本学着任

物質科学の研究において新しい現象を示す「物質」が発見されてもそれを実際に何かの役に立つ「材料」とするには、特性を使いこなすことが必要です。例えば、使用可能な適切な形に加工すること、特性を向上させること、耐久性を上げることなど、「材料」に対する要求は多岐にわたっています。これを実現するうえで材料の原子スケール、ナノスケール、マイクロメートルスケールの構造を制御していくことが不可欠です。構造制御により材料の性質が変わることに「材料」開発の面白さがあると考え、これまでの研究では構造制御をキーワードとして研究を行ってきました。材料ごとに特有の構造制御の面白さがあるわけですが、私の研究では酸化銅高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を研究対象として

います。

超伝導体は抵抗ゼロで電流を流すことができるため、エネルギーの高効率利用が可能になります。超伝導を発現するためには低温に冷却しなければなりません。低温状態が必要であってもなおそれを上回るメリットが超伝導応用には期待できません。現在金属系の超伝導線材が先行して応用されていますが、液体窒素温度でも超伝導状態を得ることができる酸化銅高温超伝導体の材料開発が現在活発に進められている状況です。ケーブルやコイルに応用するには超伝導体を長尺線材化しなければなりません。さらに大電流を流せるようにするために、臨界電流密度の向上も求められます。

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の物質発見以来その線材開発に向けた研究が進められてきました。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の本来持つ高い臨界電流密度を生かすために、金属テープの上部に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜を作製するという形でテープ線材化が進められています。図1に示したようなテープ線材を作製することにより高い臨界電流密度が得られます。しかしそれで十分なわけではなく、さ



図1 市販の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 系線材

らに特性の向上が求められています。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜の特性を向上させるためには磁束ピンニングセンターを導入すること、つまり $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜の中に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ とは異なる物質をわずかに添加することが有効です。磁束ピンニングセンターの導入は金属系の超伝導材料でも特性向上のために行われていますが、その導入方法は金属系超伝導体と酸化物超伝導体では大きく異なります。例えば $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ は多くの種類の原子を含んでおり、含有量の比を精密にコントロールする必要があります。さらにピンニングセンターのサイズ・分布・密度を適切に制御しなければ、大きな磁束ピンニング効果が得られません。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜への磁束ピンニングセンターの導入とい

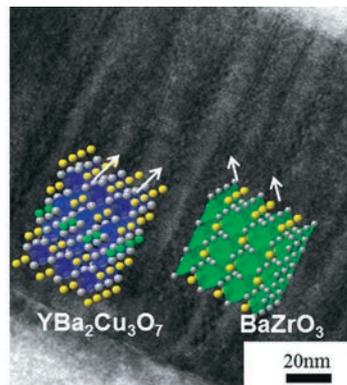


図2 ナノコンジット膜の電子顕微鏡写真

う構造制御手法を開発することが大きな課題となっています。

YBa₂Cu₃O₇膜に磁束ピンニングセンターを導入する方法として近年もつとも注目されているのがナノコンジット薄膜法です。作製したナノコンジット膜の電子顕微鏡写真を図2に示します。YBa₂Cu₃O₇膜成膜中にBaZrO₃を同時に供給すると、ナノスケールにYBa₂Cu₃O₇とBaZrO₃ナノロッドが別々に成長し、ナノコンジット膜が得られます。ナノロッドはYBa₂Cu₃O₇の構造を大きく乱すことなく成長します。さらにナノロッドのサイズは5ナノメートル程度であり、磁束ピンニングセンターのサイズとしては適した値です。BaSnO₃やBaHfO₃を用いても同様のナノロッドが作製できま

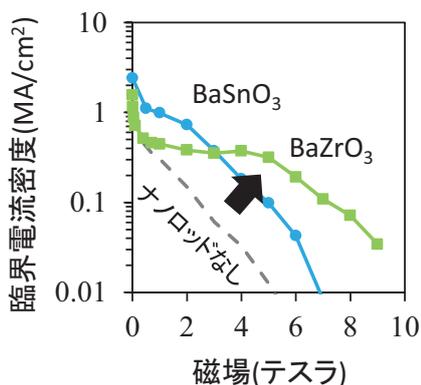


図3 ナノロッドを導入した膜の77Kにおける臨界電流密度

す。図3に示したように、ナノロッドを導入することにより磁場によっては臨界電流密度が10倍以上に向上します。このようなナノロッドの構造や成長機構は超伝導線材応用に向けた特性制御だけではなく、材料科学の基礎的観点からも非常に興味深い課題です。私の研究では、ナノロッドを基本構造として原子スケールからサブマイクロメートルスケールにまでマルチスケールにかつ三次元的に構造制御することにより臨界電流密度を向上させるための基礎研究を行っています。

YBa₂Cu₃O₇膜に導入するナノロッド材料の種類を変化させることでナノロッドのサイズが5~10ナノメートルに変化することを明らかに

しました。またナノロッド添加量によりナノロッド間隔を20~50ナノメートルに変化させました。このようなサイズと間隔を変化させたナノロッドによって磁場と温度に対して適したナノロッド構造を選択できるようにになりました。

またナノロッドに加えて別のタイプのピンニングセンターを導入するハイブリッドピンニングセンター法の提案も行っています。ナノ粒子、ナノレイヤー、セグメントナノロッドを導入し特性を評価した結果、ナノ粒子とナノロッドからなるハイブリッドピンニングセンターが特性向上に効果的であることを示しました。同時にハイブリッドピンニングセンターの特性機構についても研究を進めています。

さらにYBa₂Cu₃O₇とナノロッドとの界面の原子スケール構造を直接観察し、シミュレーション結果と比較することで原子スケール構造を明らかにしました。現在は原子スケール界面構造を制御する手法の開発にも取り組んでいます。

今後はこのようなYBa₂Cu₃O₇薄膜における三次元マルチスケールナ

ノ構造制御技術をさらに進化させ、ナノ構造制御の可能性を追求していきたいと思っています。また本技術を他の材料に展開し、さまざまな特性制御に貢献したいと考えています。例えば熱電変換や固体イオン伝導などがターゲットです。また研究を通して学生の教育という側面からは、研究内容は学生にとって魅力的かつ教育効果の高いものでなければなりません。今後とも、超伝導線材開発や薄膜材料工学の発展に、そして学生の成長の一助となれるよう、研究および教育に精進したいと考えています。