

平成 29 年 1 月 18 日

報道関係各位

国立大学法人九州工業大学

世界初！
ナノ複合化超伝導材料において特有の原子スケール構造を解明
- 実用超伝導線材高性能化に向けた材料設計に期待 -

九州工業大学大学院 工学研究院物質工学研究系の堀出朋哉助教、松本要教授らのグループはフロリダ州立大学、九州大学と共同でナノ複合化 Y 系超伝導材料における特有の原子スケール構造を世界で初めて解明しました。

本研究成果を発表した論文はアメリカ化学会(American Chemical Society、略称 ACS) の論文誌「ACS Nano」において、2017 年 1 月 17 日にオンラインで公開されました。

※詳細は別紙をご参照ください。

《問い合わせ先》

●研究内容について

九州工業大学 大学院工学研究院 物質工学研究系
助教 堀出 朋哉

E-mail : horide@post.matsc.kyutech.ac.jp

TEL:093-884-3377

●その他

九州工業大学 総務課広報企画係

E-mail : sou-kouhou@jimu.kyutech.ac.jp

TEL:093-884-3007

世界初、ナノ複合化 Y 系超伝導材料において特有の原子スケール構造を解明 - 実用超伝導線材高性能化に向けた材料設計に期待 -

[概要]

九州工業大学大学院工学研究院物質工学研究系の堀出朋哉助教、松本要教授らのグループはフロリダ州立大学、九州大学と共同でナノ複合化 Y 系超伝導材料における特有の原子スケール構造を世界で初めて解明しました。

30 年前に発見された高温超伝導体は物性物理や物質科学の分野にインパクトを与え、その応用も急速に発展してきました。最初に日本人の手によって発見された Bi 系超伝導体の実用化され、電力ケーブルなどに応用されてきました。Y 系超伝導体はそれを上回る特性をもつため、モーター、MRI(磁気共鳴画像法)、加速器などへの応用が大いに期待されています。Y 系超伝導体の性能はナノ複合化によって飛躍的に向上しましたが、今までナノ複合化 Y 系超伝導材料の詳細な構造は不明でした。今回、高分解能電子顕微鏡、X 線回折、放射光を使った原子局所構造解析、第一原理計算、有限要素法弾性計算を用いたマルチスケール構造解析を開発し、それにより世界で初めてナノ複合化 Y 系超伝導体の構造を明らかにしました。本成果は Y 系超伝導線材の特性向上に向けた材料設計につながる成果です。さらに高温超伝導体だけでなく燃料電池や熱電変換材料等におけるナノ構造解明にも展開可能であり、ナノ材料科学にインパクトを与える成果であると考えられます。

本研究成果を発表した論文はアメリカ化学会(American Chemical Society、略称 ACS) の論文誌「ACS Nano」において、2017 年 1 月 17 日にオンラインで公開されました。

[背景]

Y 系超伝導線材 超伝導線材は大電流の電流をエネルギー損失なく輸送できます。この特徴を生かしモーター、MRI(磁気共鳴画像法)、加速器等への応用が進められています。これまで金属超伝導体や Bi 系高温超伝導体を用いた実用超伝導線材の開発および応用研究が先行して進められてきました。一方 Y 系超伝導材料はこれらの超伝導材料よりも線材作製が難しいものの、特性が極めて高いため次世代高温超伝導線材として開発が進められています。この研究の結果、現在では数キロメートルの長さを有する Y 系超伝導線材が作製され、実際に販売も行われています。

ナノ複合化 Y 系超伝導材料は物質固有の性質として高い特性を示しますが、この特性をさらに高めることが求められています。Y 系超伝導体に非超伝導物質を数ナノメートル程度のサイズになるように分散させるナノ複合化技術により、特性が数倍から数十倍に向上することが分かっています。Y 系超伝導材料におけるナノ複合化技術は国内や海外の大学・研究機関が研究を進めているだけでなく、市販の線材にも適用されはじめています。さらなる高性能化に向けた構造制御法について各研究グループが盛んに研究を行っている状況ですが、現在新しい指針があるわけではありません。特性制御への新たな方針を得るためには特性を支配する構造を理解し、その知見をもとに構造設計を行うことが必要です。

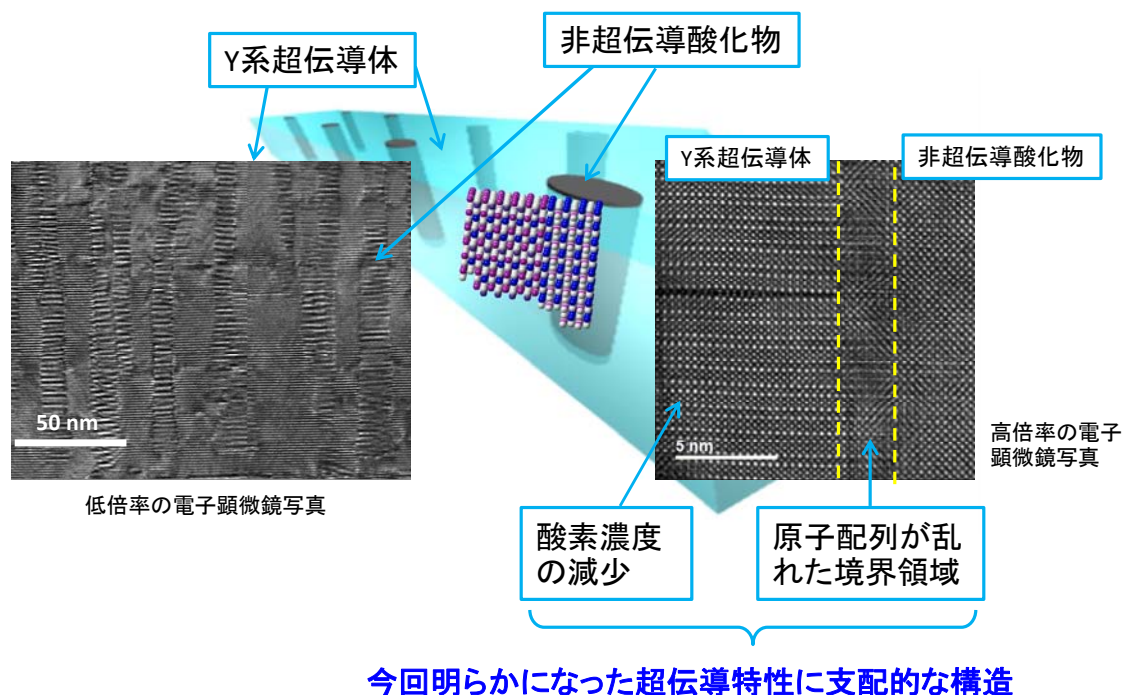
超伝導特性向上に向けて これまでの研究により 5-100 ナノメートルレベルの構造に関しては明らか

になってきています。しかしそれよりも 1-2 桁小さい原子スケールの構造となると、観察結果の報告はあるものの特性制御指針に結びつくような決定的な知見はえられていません。原子スケール構造からの特性制御に向けて、ナノ複合化 Y 系超伝導材料の原子スケールの構造解明が必要です。

[成果]

Y 系超伝導体のなかに非超伝導酸化物を分散させたナノ複合化 Y 系超伝導材料を作製しました。実際に市販の Y 系超伝導線材にもこの構造が使われています。本研究では作製した試料に対し、高分解能電子顕微鏡、X 線回折、放射光を使った原子局所構造解析、第一原理計算、有限要素法弾性計算という 5 つの手法を統合的に用いたマルチスケール構造解析を行いました。先端計測と計算科学を組み合わせたこのようなアプローチは材料科学分野における最先端のものです。結果の一部である電子顕微鏡写真を図に示しています。解析の結果、ナノ複合化 Y 系超伝導材料においてナノ複合化特有の以下の 2 つの構造を発見し、その構造が実現する原因についても明らかにしました。

1. ナノ複合化により Y 系超伝導体内の酸素の濃度が減少しています(ひずみ誘起酸素空孔形成)。ナノ複合化により Y 系超伝導体の原子の間隔がわずかに大きくなります。それにより酸素の安定性が減少したことが原因です。
2. Y 系超伝導体と非超伝導酸化物の境界では 1 ナノメートルの領域において原子配列と電子状態が大きく乱れています。これは異物質間の結合に起因し、乱れの範囲(1 ナノメートル)は Y 系超伝導体に存在する電子の挙動のみによって決まっています。



このようにナノ複合化 Y 系超伝導材料の特性を決定している原子スケールの構造を世界で初めて解明しました。特定の試料を観察しただけでは、観察された結果が試料特有のものか一般的なものか判断できません。しかし本研究では構造観察するだけでなくその構造が実現する原因をも解明できたことで、今回の試料に限らずナノ複合化材料一般にあてはまる結論が得られました。これはナノ材料科学において大きな学術的価値があります。

また本研究の成果はナノ複合化 Y 系超伝導材料の特性向上に向けた材料設計に直接つながります。本研究の結論によればこれまでのナノ複合化 Y 系超伝導材料では、ナノ複合化による特性向上効果が、先に述べた酸素濃度減少や境界での乱れによる特性劣化の影響を上回っていたと考えられます。そのためこれまでのナノ複合化 Y 系超伝導材料では特性劣化に対して特別な対策を行わなくても、自然に出来上がった構造において“偶然にも”特性向上効果がみられていました。しかし“偶然”に頼るだけでは効率的な材料開発は行えません。例えば本研究で明らかになったナノ複合化特有の構造は今後積極的に設計・制御していくべき対象です。このように原子スケールからのナノ複合化材料の“材料設計”を行うことで、Y 系超伝導材料の超伝導特性がさらに向上することが期待されます。

[今後の展開]

1. 今回得られた知見をもとにした原子スケールの材料設計を行い、ナノ複合化 Y 系超伝導材料のさらなる高性能化を行います。
2. 複雑なナノ複合化材料において原子スケール構造を解析することは難しく、それを解明し制御することはさまざまな分野において材料科学の重要課題となっています。今回は超伝導材料において材料科学における最先端の手法を統合的に用いて多数の原子を含むナノ複合化材料において複雑な原子スケール構造の問題を解決しました。今回の構造解析手法と構造に関する知見を他のナノ複合化材料(燃料電池や熱電変換材料等)に展開することで、超伝導以外の材料の構造制御にもつながると期待されます。

[用語]

超伝導：低温に冷却したときに電気抵抗がゼロとなる現象。

Y 系超伝導材料：イットリウム(または希土類元素)、バリウム、銅、酸素からなる高温超伝導体の一種です。液体窒素の沸点(-196℃)でも超伝導を示し、大きな電流を流せるという実用化に有利な特性を有しています。

ナノ複合化：異なる材料をナノスケールで組み合わせた材料。それぞれの材料の形状は粒子状やロッド状などさまざまです。本研究では、Y 系超伝導材料にバリウム、ジルコニウム(またはスズまたはハフニウム)、酸素からなる非超伝導酸化物を添加することによりナノロッドを導入しています。

ナノメートル：10 億分の 1 メートル。

X 線：X 線を照射することにより原子の並びの間隔を評価できます。

電子顕微鏡：電子線を照射することにより原子の並びを直接的に観察できます。原子スケールの分解能での観察も可能です。

放射光：光に近い速度を有する電子の進行方向を変化させたときに発生する電磁波であり、強力な X 線も得ることができます。放射光を用いた実験のための大型施設において実験を行うことが可能です。

第一原理計算：原子における電子を計算対象とし、物質における構造や特性を経験的なパラメータを使わずに計算できます。

有限要素法弾性計算：材料を細かな要素に分割し、それぞれの要素ごとに働く力を計算する手法です。本研究ではナノ複合化における Y 系超伝導体と非超伝導酸化物がお互いに及ぼす力を計算しました。

[論文]

論文誌名 : ACS Nano

タイトル : Structural Evolution Induced by Interfacial Lattice Mismatch in Self-Organized YBa₂Cu₃O_{7- δ} Nanocomposite Film

著者 : Tomoya Horide ¹, Fumitake Kametani ², Satoru Yoshioka ³, Takanori Kitamura ¹, Kaname Matsumoto¹

所属 : Kyushu Institute of Technology ¹, Florida State University², Kyushu University ³