

ナノテクノロジーによるメートルレベルの超伝導特性の向上

愛知工業大学 工学部 電気学科
教授 一野 祐亮



Aichi Institute of technology Department of Electrical and Electronics Engineering
Professor Yusuke Ichino

超伝導体は電気抵抗ゼロという特異な性質を持つことから、超低損失送電ケーブルや強磁場発生電磁石（超伝導マグネット）などへの応用開発が行われている。特に超伝導マグネットは、常伝導電磁石に比べてはるかに大きな磁場を発生可能であるため、超伝導リニアモーターカー、核融合発電、電動飛行機、10MW級風力発電機や磁気画像診断装置（MRI）など多岐にわたる分野で、なくてはならないキーデバイスになっている。これらには超伝導体を線状に加工した超伝導線材が用いられている。図1に我々が研究を行っているREBa₂Cu₃O_y（REBCO, RE=希土類元素）超伝導線材の模式図を示す。柔軟な金属テープ上に中間層（緩衝層）と呼ばれる何層かの酸化物層を挟んでその上にREBCO膜が積層され、最後には保護層と過剰電流のバイパスとなる金属層でコーティングされる。REBCOは、半導体技術を用いて線材全長に渡って結晶方位が揃ったエピタキシャル膜になっている。

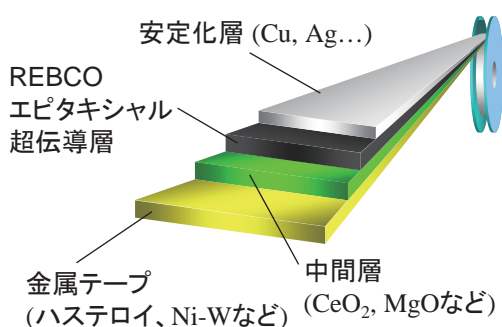


図1 REBa₂Cu₃O_y 超伝導線材の模式図

しかし、強磁場下に置かれた超伝導体内部では、磁場が最小単位まで細分化された量子化磁束線（FQ: Flux Quantum）が多数侵入しており、それらが電流によってローレンツ力を受けて運動している。この運動によって電気エネルギーが消費されるため、超伝導体には実効的に電気抵抗が発生している状態となり、強磁場が発生できなくなる。FQの運動速度を \vec{v} とすると、発生電場は $\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}$ で表される。FQの運動を抑制できれば、 $\vec{E} = 0$ となり、エネルギーの散逸は起きない。そのため、FQをピン止めし、運動を抑制する技術が必要となる。多数侵入しているFQを効率よくピン止めするためには、FQと同程度の大きさの常伝導物質（ピンニングセンター）を超伝導体内に添加することが効果的である。FQの直径は数ナノメートル程度であり、その数密度は数千本/ μm^2 であるため、ピンニングセンターも同程度のサイズと密度が必要となる。つまり、ナノテクノロジーによる超伝導材料の微細組織制御が超伝導リニアモーターカーなどのメートル級の超伝導機器の性能に直結している。そのため、マルチスケールな研究対象と言える。

近年、REBCOエピタキシャル膜を作る際にBaMO₃（BMO, M=Zr, Sn, Hfなど）を添加するとBMOが直径数ナノメートルの円柱（ナノロッド）状に自己組織化することが発見された。このBMOナノロッドがピンニングセンターとなり、強磁場下において強力にFQの運動をピン止めし、大幅に超伝導電流を増加させることが可能になってきた。我々は、パルスレーザー蒸着（PLD）法というエピタキシャル膜作製技術を駆使してBMOのサイズや数密度などの形状を制御し、REBCO膜のナノメートルレベルの微細組織を制御することを検討してきた。また、独自に開発した結晶自己組織化成長シミュレーションによってREBCO膜内におけるBMOの自己組織化メカニズムを明らかにした。

図2に結晶自己組織化成長シミュレーションによって得られたBMOナノロッドにおける自己組織化成長時のスナップショットを示す。シミュレーション結果から、BMOナノロッドの自己組織化にはBMOとREBCOの結晶成長様式の違いが影響を与えていることがわかった。BMOの成長はVW（Volmer-Weber）モードであり、中間層面内と面直方向にほぼ同じ速度で成長する。一方で

図2に結晶自己組織化成長シミュレーションによって得られたBMOナノロッドにおける自己組織化成長時のスナップショットを示す。シミュレーション結果から、BMOナノロッドの自己組織化にはBMOとREBCOの結晶成長様式の違いが影響を与えていることがわかった。BMOの成長はVW（Volmer-Weber）モードであり、中間層面内と面直方向にほぼ同じ速度で成長する。一方で

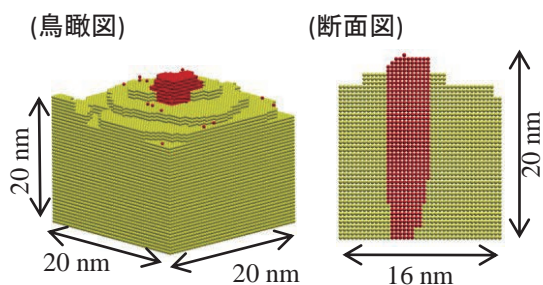


図2 結晶自己組織化成長シミュレーションによる自己組織化成長時のスナップショット。黄色はREBCO、赤色はBMOを示す。

REBCOはFM(Frank-van der Merwe)モードあるいはSK(Stranski-Krastanov)モードであり、中間層内方向に層状に成長し、出来上がったREBCO層上にさらに層状成長することを繰り返す。BMOの添加量はREBCOに対して数vol.%であるため、多数のBMOの島ができてその周りはすぐにREBCO層に囲まれるためBMOは面直方向にしか成長の余地がない。面直方向に成長してもまたすぐにREBCO層に囲まれる。以上を繰り返すことで円柱状のBMOナノロッドができあがる。この結晶自己組織化成長シミュレーションによって得られたBMOナノロッドの直径や数密度は実験結果とほぼ一致することを確認している。また、温度、成膜レートやBMO添加量など超伝導線材作製に関連するパラメータによるBMOナノロッド形状変化に対してもシミュレーションにより、ナノロッドの数密度や形状変化を計算した。図3に成膜温度と成膜レートに対するナノロッド形状のシミュレーション結果を示す。図より、成膜パラメータによってナノロッド形状が変化し、数密度も変化することがシミュレーションによって明らかにされた。また、実際に観察される微細組織の結果ともほぼ一致することが確認された。つま

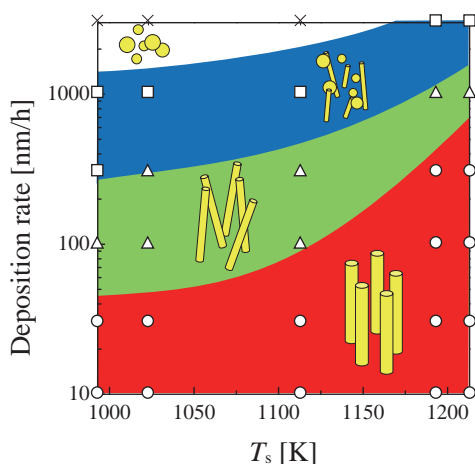


図3 成膜温度と成膜レートに対するナノロッドの形状変化

り、本シミュレーションを用いることでREBCO膜の微細組織を予測することが可能であり、所望の超伝導特性を持ったREBCO超伝導線材を、作製条件を通して微細組織制御し作製することができる。

強磁場下では超伝導体内に侵入するFQの数が1マイクロン四方に数千個にまで増えるため、BMOナノロッドの数密度も同程度以上に増加させる必要がある。シミュレーションの結果から、低い作製温度では細いナノロッドが多数できることが明らかになっている。そこで、BaHfO₃(BHO)添加SmBCO膜をできるだけ低い温度で作製し、その超伝導特性を評価した。図4に920℃(従来法)と750℃(低温成長法)で作製したBHO添加SmBCO膜の磁場に対する臨界電流密度(J_c)を示す。図より、750℃試料では J_c が大幅に向上していることがわかる。断面透過型電子顕微鏡観察から、750℃試料ではBHOナノロッドが細く高密度に自己組織化していることが確認された。これはシミュレーションで予測される結果と同じである。この細く高密度なナノロッドによってFQが効率的にピン止めされたために J_c が大幅に向上したと考えられる。

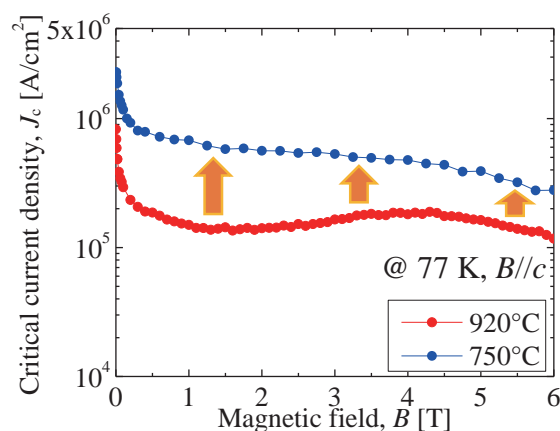


図4 低温と高温で作製したBHO添加SmBCO薄膜の磁場に対する臨界電流密度

今後は、この結晶自己組織化シミュレーションや酸化物薄膜技術を駆使して、ありふれた酸化物に高付加価値をつけた機能性酸化物材料の開発を行っていく。

一野 祐亮 (いちの ゆうすけ) 氏 略歴

- 2004年3月 名古屋大学大学院工学研究科電子工学専攻
博士後期課程短縮修了
- 2004年3月 博士(工学)名古屋大学
- 2004年4月 名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻
助手(2007年助教に職名変更)
- 2009年2月 名古屋大学エコトピア科学研究所 准教授
- 2016年4月 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻
准教授(配置換え)
- 2020年4月 愛知工業大学工学部電気学科 教授