REBa₂Cu₃O_{7-δ} 系線材とその高 J_c 化

向田昌志^{1,*} 松本 要^{2,*} 吉田 隆^{3,*} 一瀬 中^{4,*} 堀井 滋^{5,*}
 喜多隆介^{6,*} 山田和宏^{7,*} 寺西 亮^{8,*} 森 信幸⁹

1. はじめに

銅系酸化物高温超電導体発見から20年が経ち、ついに高温超電導体線材の実用化時代に入ってきた。中でも先行している第一世代の高温超電導体線材材料である銀シース Bi2223 系においては、住友電工⁽¹⁾と東京大学の下山等が開発した高圧酸素アニール処理により超電導材料の密度を従来の85%からほぼ100%に向上させ、幅約4 mmのBi2223系高温超電導線においては77 K、自己磁場中で192 Aの臨界電流値を、また、150 Aの全長臨界電流値を持つ1500 m長級の長尺線材を達成している。

図1は各種材料の磁場中での臨界電流密度特性を示したものである。第一世代のBi系線材は、臨界温度 T_c が高いにもかかわらず、77 Kでの磁場中臨界電流密度 J_c が印加磁場の増加により、急激に小さくなるという問題点がある。一方、77 Kで低温超電導マグネットと同等以上の特性を出すために、Bi系ではなくRE123(RE:ランタノイド元素)系を用いた第二世代の超電導線材開発が、米国ではDOEプロジェクトのもと、ロスアラモス国立研究所⁽²⁾とオークリッジ国立研究所を中心⁽³⁾に、日本ではNEDOプロジェクトのもと、超電導工学研究所を中心⁽⁴⁾に進められている。

図1 磁場中における各種材料の臨界電流密度。

本解説では、日本および世界におけるRE123系線材とその磁場中高 J_c 化の研究状況を展望する。

¹ 九州大学教授；工学研究院材料工学部門(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

² 九州工業大学教授；工学部物質工学科

³ 名古屋大学准教授；大学院工学研究科エネルギー理工学専攻

⁴ 電力中央研究所主席研究員；電力技術研究所

⁵ 東京大学助教；大学院工学系研究科応用化学専攻

⁶ 静岡大学教授；創造科学技術大学院ナノマテリアル部門

⁷ 九州大学技術専門職員；大学院工学府材料物性工学専攻

⁸ 九州大学助教；工学研究院材料工学部門

⁹ 九州大学准教授；工学研究院材料工学部門

* 科学技術振興機構；戦略的創造研究推進

REBa₂Cu₃O_{7-δ} Coated Conductors and Their J_c Enhancement; Masashi Mukaida^{*1}, Kaname Matsumoto^{*2}, Yutaka Yoshida^{*3}, Ataru Ichinose^{*4}, Shigeru Horii^{*5}, Ryusuke Kita^{*6}, Kazuhiro Yamada^{*7}, Ryou Teranishi^{*8}, Nobuyuki Mori^{9(1,7,8,9)} Kyushu University, Fukuoka.

²Kyushu Institute of Technology, Kita-kyushu. ³Nagoya University, Nagoya. ⁴Central Research Institute of Electric Power Industry, Yokosuka. ⁵The University of Tokyo, Tokyo. ⁶Shizuoka University, Hamamatsu. ^{*}Japan Science and Technology, Kawaguchi

Keywords: J_c enhancement, REBa₂Cu₃O_{7-δ}, artificial pinning center, field angular dependence

2006年9月10日受理

2. RE123 系線材

(1) RE123 の特徴

RE123 系高温超電導体は、ペロブスカイトを三層積み上げた酸素欠損ペロブスカイト構造をしており、酸素欠損ペロブスカイトと言われている。この酸素欠損量は大きく変化し、それに伴って超電導特性が大きく変化するため、酸素量の制御は非常に重要となる。多くの研究機関では RE 元素として Y を用いた Y123 を選択しているが、近年、軽ランタノイド元素の Nd, Sm, Eu, Gd を用いた膜が注目されている。

超電導特性についても、結晶構造の異方性、超電導電子対の対称性を反映して、電流輸送特性にも大きな異方性⁽⁵⁾、粒界角度依存性があり、粒界の角度により臨界電流密度が大きく変化する。そのため、結晶方位の制御が高い臨界電流密度を維持する上で特に重要である。この観点から、超電導体膜の粒界は多くても10度以下、できれば、3~4度以下に面内方位のばらつきを抑える必要がある。

(2) 面内配向制御

RE123 系線材の基本的な構造を図2に示す。RE123 系線材は大きく分けて金属基板テープ線材、バッファ層、超電導層、安定化金属層よりなる。超電導体膜の面内配向揺らぎを低く抑えるためには、超電導層の下地バッファ層の面内方位揺らぎが小さくなければならない。表1にこれまで報告された下地バッファ層を面内配向させる主な技術を示す。これらの金属テープ線材上の下地バッファ層の面内配向制御技術こそが RE123 系線材実現の鍵となっている。面内配向制御技術は、大きく分けて、無配向基板テープ上に下地バッファ層材料で面内配向を構築する IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法、ISD (Inclined Substrate Deposition) 法と面内配向基板テープを構築する RABiTS (Rolling Assisted Biaxially

図2 コーテッドコンダクタの基本構造。

表1 超電導テープ線材の面内配向制御技術。

技術名	方 法	参 考
IBAD	イオンを照射しながら酸化物を蒸着する方法	飯島等 ⁽⁶⁾
ISD	ある角度を持って構成元素を蒸着する方法	長谷川等 ⁽⁷⁾
RABiTS	強圧延により二軸配向基材を得ようとする技術	Goyal 等 ⁽⁸⁾

Textured Substrates) 法とに分類される。IBAD 法はフジクラの飯島等⁽⁶⁾が開発した、特異な角度からイオンを照射しながら YSZ (Yttriumstabilized Zirconia) 膜蒸着を行うことにより無配向基板の上に配向膜を成長させる技術である。IBAD-YSZ 法では、面内配向揺らぎが5度以下になるための膜厚(蒸着時間)が大きいという問題点があった。高橋等は⁽⁹⁾は蛍石構造の ZrO_2 よりも面内配向速度が約2倍速くなるパイロクロア構造の $Gd_2Zr_2O_7$ を IBAD バッファ層に用いたことを報告している。さらに、室賀等⁽¹⁰⁾は IBAD- $Gd_2Zr_2O_7$ バッファ層上に CeO_2 第二バッファ層を用いることにより、面内配向揺らぎをさらに高速度に低減する方法を見いだした。現在では、10 nm 膜厚の MgO 膜を IBAD 蒸着膜に用いることにより、さらに速く面内配向を実現する方法⁽¹¹⁾が米国から報告されている。ISD 法は住友電工の長谷川等⁽⁷⁾により考案された、基板面にある角度を持って構成元素を入射することにより、面内配向を実現しようとする技術である。住友電工ではレーザー蒸着 (PLD: pulsed laser deposition) 法により ISD-YSZ 膜を作製し、その上に RE123 膜を成長させていた。現在は THEVA 社が高真空中で MgO を用い、面内配向 ISD-MgO 膜⁽¹²⁾を実現している。IBAD 法や ISD 法に用いられる基材としては、強度の点から Hastelloy を用いることが多い。

一方、RABiTS 法は強圧延により二軸配向基材を得ようとする米国オークリッジ国立研究所の技術⁽⁸⁾で、RABiTS 法に用いられる基材は Ni-ベースに W や Cr を数%含ませたものである。圧延だけで二軸配向基材が得られるため、コスト的には大きな強みとなっている。さらに RABiTS 法において、Ni 表面を酸化させ、その NiO 面を用いた SOE (Surface Oxidization Epitaxy) 法がある。この技術は古河電工⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を中心に精力的に研究されている。

(3) 線材化

RE123 膜の作製方法⁽¹⁵⁾は物理蒸着法である MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法、PLD 法、スパッタリング法、化学蒸着法である CVD (Chemical Vapor Deposition) 法、固相エピタキシャル法である MOD (Metal Organic Deposition) 法と液相エピタキシャル (Liquid Phase Epitaxy) 法がある。

現在、物理蒸着法では PLD 法が主流となっている。PLD 法は高速成膜に適していないと考えられていたが、渡部等は複数のプルムを立て、かつ複数回テープを往復させるマルチプルムマルチターン法⁽¹⁶⁾を開発し、高速化を可能とした。化学蒸着法である CVD 法は高速成膜に適しており、それによる低コスト化が見込まれている。この方法により、現在では、臨界電流値 (I_c) × 長さ (L) 積において、219 A × 322 m の世界最高値が IGC-Superpower から報告された。固相エピタキシャル法である MOD 法は、真空装置を必要としないため、装置の資産分低コスト化が見込まれている。荒木等⁽¹⁷⁾は材料の高純度化により、この方法で高い I_c を示す TFA-MOD 膜が実現できることを報告している。

一方、第二世代超電導線材における応用研究も急ピッチで進んでいる。現在ではつなぎのない 110 m 長の第二世代超電導線材で、それを26層14回巻きとしたコイル⁽¹⁸⁾がフジクラで、また衣斐等⁽¹⁹⁾が作製した、数ヶ月前まで世界最高値

を示していた線材をそのまま用いて、超電導工学研究所の山田等⁽²⁰⁾が内径 40 mm, 外径 121 mm, 高さ 86 mm の超電導コイルに作り上げたことを報告している。このように、実際にコイル試作を行うことにより、テープ線材の巻き方、磁場に一番弱い箇所の同定とシミュレーションとの相違を調べることができ、急速に実用化に近づいていることが分かる。

(4) 高速成膜化と高 J_c 化

残された課題はまだたくさんあるが、中でもコストの面から、高速成膜化と高 J_c 化が大きな課題となっている。高速成膜化においては、これまで中部電力で12段リアクタ⁽²¹⁾を有する CVD (chemical vapor deposition) システムを用い、世界最速となる線材合成速度 50 m/h を実現していた。この分野も進展が速く、2006年11月には Superpower から 100 m/h の報告があった。

このように基礎技術が成熟しつつある中、高温超電導体線材をマグネットに用いるにあたって、超電導線材そのものの特性を向上させる、いわゆる磁場中 J_c の向上が特に重要となってきた。本来非常にクリーンな、言い換えれば不純物や欠陥等の無いきれいな超電導体では、内部に磁束量子が存在すると、通電により、その磁束量子にローレンツ力が働き、磁束量子の運動が起こる。磁束量子の運動は、エネルギーの散逸を伴うため、この通電により電圧(抵抗)が発生することとなる。超電導コイル等においては、必ず磁束量子が超電導線材中に侵入している。すなわち電気抵抗無く電流を流すためには、如何にローレンツ力に打ち勝って超電導線材中の磁束量子の運動を阻止するかに掛かってくる。そのため、現在磁束量子の運動を阻止する人工ピンニングセンター(APC)導入の研究に力が注がれている。

3. 高 J_c 化

第二世代の高温超電導線材に一番多く用いられている材料は Y123 である。ランタノイド系で注目されている元素としては、高い T_c が期待できる Nd, Sm, Eu, J_c 特性が高い Gd や Ho, 酸素ドーピングしやすい Er 等がある。

高 J_c 化の基本は、超電導体内の磁束量子のローレンツ力による運動を阻止することである。そのために、超電導体内に磁束量子をピン止めする APC 導入が非常に重要な研究となっている。ここでピンニングセンター(PC)は、その形状から図3に示すように 0-次元(以下 0-D), 1-D, 2-D, 3-D APC に分類できる。図3から分かるように、0-D および 3-D APC を含んだ超電導膜では、 J_c 増大の磁場方位依存性がない。一方、1-D および 2-D APC を含んだ超電導膜では強い磁場方位依存性が観察できると推測される。そのため、磁場方位依存性は内部の APC の特徴を推測する強力な手段である。これらの APC の実現を各国の研究機関が独自のコンセプトで目指している。次に日本および、世界における、これらの各次元の APC 実現の研究状況と、そのコンセプトを紹介する。

(1) 0-D APC

RE123 において、微少量置換することのできる元素には、RE, Ba, Cu と O の 4 種類がある。この中で置換が多く行わ

図3 0-, 1-, 2-, 3-次元人工ピンニングセンターのイメージ。

れている元素は RE と Cu である。

RE サイトの置換 Air Force の Barnes 等⁽²²⁾は Y123 における 0.1% の Y サイトをそれぞれ La, Nd, Ce, Pr と Tb で置換した薄膜を作製し、その 0-D APC としての結果を報告した。その結果によれば、3 T の磁場下において、置換しない純粋な Y123 膜の 77 K における J_c に対して、0.1% の Tb と Nd 置換では約 2.3 倍に、Pr と La 置換では約 1.7 倍に、Ce 置換では約 1.3 倍に J_c が上昇したことを示した。さらに彼等は Tb に対して、0.01% から 10% までの Y サイトを置換し、それに対する J_c の変化を調べた。その結果、Y123 の Y サイトを、Tb で 1% 置換することにより、置換しない場合に比べて 3 倍以上の J_c 増大の効果があることを示している。

Cu サイトの置換 RE123 において、Cu サイトへの置換は、これまで非常に多く報告されてきた。しかし、これらの報告は、置換量 1% 以上の報告⁽²³⁾が大半で、その置換による超電導臨界温度の変化やキャリア密度の変化、超電導転移温度の低下やキャリア伝導機構の変化等を論議するものであった。それに対して、1% 以下の Cu サイトに超電導キラー原子を置換する 0-D APC の導入は、超電導転移温度をほとんど変えることなく、磁束量子をピン止めしようとするもので、上記の多量置換とは異なるものである。このように Cu サイトへの不純物置換では、これまで Zn や Co が用いられてきた⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。Zn は CuO_2 面の Cu サイトに、Co は CuO_2 面と CuO 面の両方に入ると言われており、通常、Zn や Co 置換は T_c を低下させる。すなわち、Cu サイトへの置換は超電導にとって致命的となるため、APC として用いるためには、多くとも 1% 以下の置換量でなければ、超電導転移温度が低下する。大狭間等⁽²⁶⁾は Zn を 0.3% Cu サイトに置換導入し、Zn を入れていない超電導膜に対して、薄膜の表面抵抗を大幅に低下させたことを報告している。また、Co 置換においては、堀井等⁽²⁷⁾が同じく 0.5% 導入し、 J_c の向上を報告している。

(2) 1-D APC

酸化物高温超電導体では電流輸送特性に大きな異方性があることが発見されるとすぐに酸化物高温超電導体に導入すべき 1-D APC の重要性が指摘⁽²⁸⁾されている。1-D APC 導入ではこれまで、トップダウン方式の重イオン照射による、columnar defects 作製がほとんどであった⁽²⁹⁾。一方、1-D APC をボトムアップで Y123 膜中に入れる試みを初めに行ったのは、Wang 等⁽³⁰⁾であろう。彼らは 1.6° に傾斜切断し

た $\text{LaAlO}_3(001)$ 基板上に発生するモザイク構造を起点とする柱状欠陥により、 J_c を向上させた。松本等⁽³¹⁾は、基板上に Y_2O_3 ナノパーティクルを分散させた後に、 Y123 膜を成長させ、 Y_2O_3 ナノパーティクルを起点とする転位の導入に成功した。彼らの論文では透過電子顕微鏡観察により、その転位が基板面から膜表面に向けて走っていることが確認でき、さらに、この転位の走っている方向に対応して、 J_c の磁場方位依存性に、1-D APC を導入していない膜には現れなかった、新たなピークを観測しており、そのピークが Y_2O_3 ナノパーティクル密度を上げると大きくなることを報告している。また、Bagarinao 等⁽³²⁾は同様に表面に CeO_2 ナノパーティクルを用いても、 c -軸方向の J_c 化ができることを報告している。

1-D APC で、現在一番着目されている材料が BaZrO_3 である。これまで BaZrO_3 は Y123 と反応しないことから、るつば材⁽³³⁾、基板⁽³⁴⁾、バルク材料への PC 材料⁽³⁵⁾や MgO 基板上のバッファ層⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾として研究が進められてきた。Driscoll 等⁽³⁸⁾はこの材料をターゲット内に粉末として入れるという方法で、薄膜内への導入を行ったところ、薄膜内でナノロッドとして自己組織化していることが分かった。我々も独自に BaZrO_3 を薄膜内に入れる研究を行っていたが、二つのターゲットを交換しながら入れる方法であったため、ナノロッドとはならずナノパーティクルとして導入されていた。 BaZrO_3 ナノロッドは RE123 膜における磁場中 J_c の一番弱い c -軸方向の J_c を向上させるため、非常に着目され、多くの論文が続いた⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾。ここで、 RE123 膜中には Ba 元素があるため、 Zr のみ添加する方法⁽⁴¹⁾も行われている。

図4に代表的な BaZrO_3 ナノロッドを導入した RE123 膜の断面透過電子顕微鏡像(TEM)像を示す。 BaZrO_3 ナノロッドがほぼ c -軸方向に沿って成長していることが分かる。ここで、ナノロッドに濃淡が観察される。この濃淡は、 RE123 と BaZrO_3 との格子不整合によるモアレであると山田等⁽⁴²⁾によって報告されている。彼等は RE123 と BaZrO_3 の格子定数から計算されるモアレフリンジの間隔と TEM 像から読みとれるモアレフリンジの間隔がほぼ一致することを示した。実際にこのような APC が導入された超電導膜の典型的な J_c の磁場方位依存性を図5に示す。図において、横軸は印加している 1 T の磁場の方向、縦軸が磁場が印加された時の J_c である。図中、黒丸(●)は 0.5 mass% BaZrO_3 が導入された膜、白抜き丸(○)は 1.5 mass% BaZrO_3 が導入された膜の特性である。1-D APC を入れることにより、本来なら格段に低くなる c -軸方向に磁場が印加された時の J_c ⁽⁴⁴⁾ が a -軸方向に磁場が印加された時よりも大きくなっていることが分かる。

(3) 2-D APC

2-D APC としては、自然発生する粒界による 2-D APC⁽⁴⁵⁾とリソグラフィによる 2-D APC⁽⁴⁶⁾とによる報告はあるが少ない。

(4) 3-D APC

膜中に導入する 3-D APC としては、バルク材料へのピンング材料として用いられてきた $\text{RE}_2\text{BaCuO}_x$ ⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾、 RE_2O_3 ⁽⁴⁹⁾、 BaTiO_3 、 BaZrO_3 等⁽⁵⁰⁾や金等⁽⁵¹⁾を導入したもの、

ランタノイド軽元素が Ba サイトに置換し、低 T_c 化したナノパーティクル等がある。 RE123 膜や線材においても、これらの APC を導入する研究が進められている。3-D APC と 0-D APC は 1-D や 2-D APC と異なり J_c の印加磁場方位依存性が無く、全方位的に上昇させる効果があるため、それを含んだ超電導線材はマグネット応用に適している。

これまで報告した APC 導入を行った膜の作製方法はすべてパルスレーザー蒸着法であった。しかし、Obradors 等⁽⁵²⁾は TFA-MOD 法において、プリカーサー BaZrO_3 ナノパーティクルを導入し、高い J_c を得た。さらに TFA-MOD 膜での J_c の膜厚依存性において、Obradors 等⁽⁵²⁾は非常に興味深い結果を示している。膜厚が 100 nm から 600 nm の領域の比較的膜厚の薄いところでの報告であるが、0-0.03 T の弱い磁場中で J_c が膜厚とともに増加するという結果を示した。それと同時に a -軸方向に印加された磁場中での J_c も上昇しており、それが、 ab -軸方向に発生した stacking faults による可能性があることを示した。TFA-MOD 法は、その他の真空システムを必要とする物理・化学蒸着法と異なり、真空チャンバーが不要のため、コストの面から、線材作製に有望な方法と目されていた。しかしながら、TFA-MOD 法においては、PLD 法と成長機構が異なるため、PLD 法での APC 導入手法が必ずしも適用できるわけではなく、PLD 法

図4 BaZrO_3 ナノロッドを導入した RE123 膜の断面透過電子顕微鏡像⁽³⁹⁾。

図5 BaZrO_3 ナノロッドを導入した RE123 膜の J_c の印加磁場方位依存性⁽⁴³⁾。

で非常に効果を発揮している BaZrO₃ ナノロッド導入⁽³⁸⁾⁻⁽⁴¹⁾や基板上にナノアイランドを形成し、表面まで欠陥を導入する手法⁽³¹⁾などは、APC がコラムナー組織で成長する PLD 法に適した方法であり、層状成長組織を有する TFA-MOD 法へのそのままの適用は困難であると考えられていた。そこに、APC 導入が可能かつ高 J_c 膜が作製されたことから、今後 TFA-MOD 法における APC 導入の研究が非常に激しくなると考えられる。

(1) Low T_c 相

吉田ら⁽⁵³⁾は Sm123 系において、Sm を 8% 過剰、Ba を同量不足とした Sm_{1.08}Ba_{1.92}Cu₃O_{7- δ} ターゲットを用い作製した。この膜では、内部に Ba 元素の不均一部分 (low- T_c) ができていることを断面 TEM 観察時のエネルギー分散型特性 X-線分析装置を用いて確認しており、高い J_c を示している。さらに Sm 過剰 Sm123 膜の作製条件を膜成長初期には高い温度で、その後比較的低い温度⁽⁵⁴⁾で作製することにより、さらに高い J_c を得ている。この作製方法により、膜を構成する結晶粒が非常に小さくなっていることが分かっている⁽⁵⁵⁾。膜を高密度微小結晶粒で構成すると、その間に転位が高密度に入り、それが J_c を上げている可能性がある。また、三浦等⁽⁵⁶⁾はこの膜に 250 nm 毎に nano-particle を入れる方法で 8 T, 77 K で 0.1 A/cm² の J_c を得ている。現在、この膜が世界最高の J_c を示していると思われる。この膜の J_c - B 特性を図 6 に示す。6 T 以下では、4.2 K での NbTi 金属系超電導体の磁場中 J_c を凌駕する値に到達している。このように、 J_c を向上させる技術はまだまだ限りがないように思える。77 K で非常に高い磁場中まで NbTi よりも特性の良い RE123 超電導膜の実現が非常に近いであろう。

4. 終わりに

RE123 膜の線材化の研究状況と現在一番研究競争が激しくなっている臨界電流密度の向上に対する研究状況について、APC の次元性で分類し、その特徴とこれまでの経緯、現状と今後の研究方向について述べた。0-D APC では Cu サイトの置換は T_c の低下が著しく、希釈ドーピングが重要である。それに対して、RE のドーピングは、過剰に入れた場合に、RE₂O₃ や RE₂BaCuO_x 等の APC となる可能性があり、作製 window が広いと考えられる。1-D APC では酸化物超電導体発見当初から言われているように、 c -軸方向の J_c 向上に重要である。しかし、強く c -軸相関した APC のみを導入したのでは、 a -軸方向と c -軸方向の間に J_c の低い方向が発生する。そのため、0-D もしくは 3-D APC との混合が今後重要となる。2-D APC は作製が難しいが、磁束量子制御の最も効果的な PC であると考えられる。3-D APC は今後、PLD 法以外への適用から、大きな進展および、熾烈な研究競争が予想される。中でも Ba をエンドメンバーに持つ単純ペロブスカイトナノパーティクルの膜中への導入が活発化しており、導入が簡単な PLD 法から難しい TFA-MOD 法にも APC 導入の波が押し寄せている。さらに、高速成膜に適した MOCVD 法に特化した 3-D APC 導入方法が見つれば、大きくそちらに傾く可能性が高い。

図 6 ナノパーティクルを入れた LTG-SmE123 膜の磁場中 J_c 特性. 三浦等⁽⁵⁶⁾による。

本解説を執筆するに当たり、住友電気工業の大松一也氏、長谷川勝哉氏、母倉修司氏、上山宗譜氏、株式会社フジクラの飯島康裕氏、古河電気工業株式会社の三村正直氏、中部電力株式会社の鹿島直二氏、長屋重夫氏、渡部智則氏はかの方々に、最新の情報を頂きました。この場を借りて感謝いたします。

文 献

- (1) T. Kato, S. Kobayashi, K. Yamazaki, K. Ohkura, M. Ueyama, N. Ayai, J. Fujikami, E. Ueno, M. Kikuchi, K. Hayashi and K. Sato: Phys. C, **412-414**(2004), 1066-1072.
- (2) R. A. Hawsey, D. M. Kroeger and D. K. Christen: Advances in Superconductivity, **12**(2000), 561-566.
- (3) J. O. Willis, P. N. Arendt, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, J. R. Groves, R. F. Depaula, P. C. Dowden, E. J. Peterson, T. G. Holesinger, J. Y. Coulter, M. Ma, M. P. Maley and D. E. Peterson: Phys. C, **335**(2000), 73-77.
- (4) Y. Shiohara and N. Hobara: Advances in Superconductivity, **12**(2000), 567-573.
- (5) L. F. Schneemeyer, J. V. Waszczak, T. Siegrist, R. B. van Dover, L. W. Rupp, B. Batlogg, R. J. Cava and D. W. Murphy: Nature, **328**(1987), 601-603.
- (6) Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno and Y. Ikeno: Appl. Phys. Lett., **60**(1992), 769-771.
- (7) K. Hasegawa, N. Yoshida, K. Fujino, H. Mukai, K. Hayashi, K. Sato, S. Honjo, Y. Sato, T. Ohkuma, H. Ishii, Y. Iwata and T. Hara: Advances in Superconductivity, **9**(1997), 745-748.
- (8) A. Goyal, D. P. Norton, J. D. Budai, M. Paranthaman, E. D. Specht, D. M. Kroeger, D. K. Christen, Q. He, B. Saffian, F. A. List, D. F. Lee, P. M. Martin, C. E. Klabunde, E. Hartfield and V. K. Sikka: Appl. Phys. Lett., **69**(1996), 1795-1797.
- (9) Y. Takahashi, Y. Aoki, T. Hasegawa, Y. Iijima, T. Saito, I. Hirabayashi, T. Honjo, Y. Yoshida, Y. Takai and Y. Shiohara: Advances in Superconductivity, **14**(2002), 1024-1027.
- (10) T. Muroga, T. Watanabe, S. Miyata, H. Iwai, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Kato, H. Sasaki, Y. Sugawara and T. Hirayama: Phys. C, **412-414**(2004), 807-812.
- (11) J. R. Groves, P. N. Arendt, S. R. Foltyn, R. F. DePaula, C. P. Wang, R. H. Hammond, E. J. Peterson, T. J. Holesinger, J. Y. Coulter and R. W. Springer: IEEE Trans. Appl. Supercond., **9**(1999), 1964-1966.
- (12) W. Prusseit, R. Nemetschek, C. Hoffmann, G. Sigl, A. Lumkemann and H. Kinder: Phys. C, **426-431**(2005), 866-871.
- (13) K. Matsumoto, S. Kim, J.-G. Wen, I. Hirabayashi, T. Watanabe, N. Uno and M. Ikeda: Advances in Superconductivity, **11**(1999), 773-776.
- (14) T. Watanabe, Y. Ohashi, T. Maeda, M. Mimura and I. Hirabayashi: IEEE Trans. Appl. Supercond., **13**(2003), 2484-2487.

- (15) 内藤方夫編集：超伝導体(下)—材料と応用—応用物理学学会超伝導分科会，(2005)。
 - (16) T. Watanabe, R. Kuriki, H. Iwai, T. Muroga, S. Miyata, A. Ibi, Y. Yamada and Y. Shiohara: IEEE Trans. Appl. Supercond., **15**(2005), 2566–2569.
 - (17) T. Araki, K. Yamagiwa, S. B. Kim, K. Matsumoto and I. Hirabayashi: In Advances in Superconductivity XII Springer-Verlag, Tokyo (2000), 610.
 - (18) Y. Iijima, N. Kaneko, S. Hanyu, Y. Sutoh, K. Kakimoto, S. Ajimura and T. Saitoh: Phys. C, **445–448**(2006), 509–514.
 - (19) 衣斐 顕, 山田 稜, 福島弘之, 栗木礼二, 宮田成紀, 渡部智則, 塩原 融 : 低温工学, **40**(2005), 585–590.
 - (20) Y. Yamada, A. Ibi, H. Fukushima, R. Kuriki, S. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Kato, T. Hirayama and Y. Shiohara: IEEE Trans. Appl. Supercond., **16**(2006)。
 - (21) 鹿島直二, 長屋重夫 : 電気学会特集号(次世代高温超電導線材開発の現状と応用への展望), (2006)。
 - (22) P. N. Barnes, J. W. Kell, B. C. Harrison, T. J. Haugan, C. V. Varanasi, M. Rane and F. Ramos: Appl. Phys. Lett., **89**(2006) 12503–12505.
 - (23) P. Mandal, A. Poddar, P. Choudhury, A. N. Das and B. Ghosh: Nature, **20**(1987), 953–957.
 - (24) G. K. Bichile, D. G. Kuberkar, S. Deshmukh, R. G. Kulkarni, M. A. Abdelgadir and P. Boolchand: Supercond. Sci. Technol., **4**(1991), 57–61.
 - (25) S. B. Ogale, S. T. Bendre, P. Guptaarma and M. Multani: J. Appl. Phys., **70**(1991), 5763.
 - (26) T. Ohazama, M. Mukaida, S. Horii, A. Saito, R. Kita, A. Ichinose, Y. Yoshida, K. Matsumoto and S. Ohshima: Phys. C, **426–431**(2005), 1611–1615.
 - (27) S. Horii, Y. Ichino, T. Ozaki, K. Matsumoto, Y. Yoshida, M. Mukaida, A. Ichinose, J. Shimoyama and K. Kishio: Jpn. J. Appl. Phys., **45**(2006), L617–L620.
 - (28) M. L. Kulic, A. Kramer and K. D. Schotte: Solid State Commun., **82**(1992), 541–546.
 - (29) Th. Schuster, H. Kuhn, M. R. Koblishka, H. Theuss, H. Kronmuller, M. Leghissa, M. Kraus and G. Saemann-Ischenko: Phys. Rev. B, **47**(1993), 373–383.
 - (30) Z. L. Wang, D. H. Lowndes, D. K. Christen, D. M. Kroeger, C. E. Klabunde and D. P. Norton: Phys. C, **252**(1995), 125–137.
 - (31) K. Matsumoto, T. Horide, K. Osamura, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida and S. Horii: Phys. C, **412–414**(2004), 1267–1271.
 - (32) K. Develos-Bagarinao, H. Yamasaki and Y. Nakagawa: Supercond. Sci. Technol., **19**(2006), 873–882.
 - (33) A. Erb, E. Walker and R. Flukiger: Phys. C, **258**(1996), 9–20.
 - (34) N. S. N. Grammatika and D. S. McLachlan: Supercond. Sci. Technol., **6**(1993), 469–475.
 - (35) M. Muralidhar, N. Sakai, M. Jirsa, M. Murakami and N. Koshizuka: Supercond. Sci. Technol., **18**(2005), L9–L12.
 - (36) K. Hasegawa, K. Fujino, K. Ohmatsu, K. Sato, Y. Sato, S. Honjo, N. Nobara and Y. Iwata: Advances in Superconductivity, **XI**(1999), 793–796.
 - (37) M. Mukaida, Y. Yamazaki, Y. Shingai, S. Makino, M. Kusunoki, A. Saito and S. Ohshima: Supercond. Sci. Technol., **17**(2003), 337–341.
 - (38) J. L. Macmanus-Driscoll, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, H. Wang, A. Serquis, B. Maiorov L. Civale, M. E. Hawley, M. P. Maley and D. E. Peterson: Nature Materials, **3**(2004), 439–443.
 - (39) M. Mukaida, M. Ito, R. Kita, A. Saito, S. Horii, A. Ichinose, Y. Yoshida, K. Matsumoto and S. Ohshima: Jpn. J. Appl. Phys. Express Letter, **43**(2004), L1623–L1625.
 - (40) M. Mukaida, T. Horide, R. Kita, S. Horii, A. Ichinose, Y. Yoshida, O. Miura, K. Matsumoto, K. Yamada and N. Mori: Jpn. J. Appl. Phys. Express Letter, **44**(2005), L952–L954.
 - (41) Y. Yamada, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Kato, T. Hirayama and Y. Shiohara: Appl. Phys. Lett., **87**(2005), 132502.
 - (42) K. Yamada, A. Ichinose, Y. Shingai, K. Matsumoto, Y. Yoshida, S. Horii, R. Kita, S. Toh, K. Kaneko, N. Mori and M. Mukaida: Phys. C, **445–448**(2006), 660–664.
 - (43) M. Mukaida, T. Horide, R. Kita, S. Horii, A. Ichinose, Y. Yoshida, O. Miura, K. Matsumoto, K. Yamada and N. Mori: Jpn. J. Appl. Phys. pt. 2, **44**(2005), L952–L954.
 - (44) M. Konishi, K. Takahashi, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, H. Kobayashi, Y. Yamada and Y. Shiohara: Phys. C, **445–448**(2006), 633–636.
 - (45) K. Matsumoto, D. Takahara, T. Horide, A. Ichinose, S. Horii, Y. Yoshida, M. Mukaida and K. Osamura: IEEE Trans. Appl. Supercond., **15**(2005), 2719–2722.
 - (46) Y. Shingai, M. Mukaida, K. Matsumoto, Y. Yoshida, A. Ichinose, S. Horii, A. Saito and S. Ohshima: Phys. C, **412–414**(2004), 1296–1300.
 - (47) T. Haugan, P. N. Barnes, I. Maartense, C. B. Cobb, E. J. Lee and M. Sumption: J. Mater. Res., **18**(2003), 2618–2623.
 - (48) N. A. Pierce, T. J. Haugan, B. C. Harrison, P. N. Barnes and I. Maartense: IEEE Trans. Appl. Supercond., **16**(2006)。
 - (49) K. Matsumoto, T. Horide, P. Mele, A. Ichinose, S. Horii, Y. Yoshida, M. Mukaida and K. Osamura: IEEE Trans. Appl. Supercond., **15**(2005), 3774–3777.
 - (50) P. Mele, K. Matsumoto, T. Horide, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida and S. Horii: Supercond. Sci. Technol., **20**(2007), 244–250.
 - (51) T. Horide, K. Matsumoto, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida and S. Horii: Supercond. Sci. Technol., **20**(2007), 303–306.
 - (52) X. Obradors, M. Gibert, A. Llodes, S. Morlens, N. Roma, P. Abellan, A. Hassini, K. Zalamova, J. Gutierrez, S. Ricart, T. Puig, A. Pomar and F. Sandiumenge: IEEE Trans. Appl. Supercond., **16**(2006)。
 - (53) 吉田 隆, 松本 要, 須藤公彦, 一野祐亮, 宮地幸司, 一瀬中, 堀井 滋, 向田昌志, 高井吉明 : 日本金属学会誌, **68**(2004), 737–741.
 - (54) Y. Yoshida, K. Matsumoto, M. Miura, Y. Ichino, Y. Takai, A. Ichinose, S. Horii and M. Mukaida: Jpn. J. Appl. Phys., **44**(2005), L129–L132.
 - (55) M. Miura, Y. Yoshida, Y. Ichino, T. Ozaki, Y. Takai, K. Matsumoto, A. Ichinose, S. Horii and M. Mukaida: Jpn. J. Appl. Phys., **45**(2006), L701–L704.
 - (56) M. Miura, Y. Yoshida, Y. Ichino, Y. Takai, K. Matsumoto, A. Ichinose, S. Horii and M. Mukaida: Jpn. J. Appl. Phys., **45**(2006), L11–L13.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

向田昌志

1983年 3月 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了
 1983年 4月 日本電信電話公社電気通信研究所
 1998年 4月 山形大学工学部助教授、教授を経て
 2005年 4月 九州大学大学院工学研究院教授・超伝導システム科学研究センター兼任、現在に至る。

専門分野：材料物性工学、低温度物理学、超伝導
 材料の新規な機能を引き出すため、ナノテクノロジーを用いた構造組織制御による高機能化を結晶成長の観点から目指している。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

向田昌志	松本 要	吉田 隆

一瀬 中	堀井 滋	喜多隆介

山田和宏	寺西 亮	森 信幸