# 新遊義鐵

## 高強度レーザー場での高速化学気相析出を 利用した高配向結晶成長

## 伊藤晚彦\*

shinshinkiei

## 1. はじめに

材料の合成プロセスにおいて,結晶配向成長の選択的かつ 精緻な制御は,材料の持つ特性を最大限に引き出すために必 須である.結晶配向成長の制御は,気相からの析出・結晶成 長のメカニズムを理解する鍵となる.化学気相析出(CVD: Chemical Vapor Deposition)法は,気相からの析出反応によ り基材をコーティングする手法であり,成膜温度や反応炉内 圧力,原料濃度を制御することで,多彩な微細組織が得られ る<sup>(1)</sup>.大面積に成膜でき,段差被覆性に優れるため,実用コ ーティング法として工業的に広く使用される.実用プロセス では,熱エネルギーを析出の駆動力とすることが多いが,電 場や磁場,プラズマなどの外部場により反応を促進すること ができる.

著者は、外部場励起源として、レーザーに着目した.レー ザーは、光を増幅する媒質を用い、再帰的に光を増幅して得 る人工の光である<sup>(2)</sup>. 波長と位相が揃っており、高いエネル ギー密度を持つ.代表的なものに、Cr:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や Nd:YAG 結 晶を用いた固体レーザー、InGaAlAs を用いた半導体レーザ ー、CO<sub>2</sub> ガスを用いた気体レーザーがある.一般に、レー ザー光を用いた材料の合成では、パルス化したレーザーを集 光させることで、局所的に大きな反応エネルギーを得る. CVD へのレーザー導入においても、パルスレーザーを、局 所的(直径数 µm)に集光して加熱源としたり<sup>(3)</sup>、原料ガスの 選択的光化学反応に用いたりした研究はあるが、これらの方 法は、大面積コーティングを強みとする CVD へのレーザー 導入の利点が活かされていない.

一方,高強度の連続発振レーザーをレンズで拡げて用いる

ことで,大きな領域(直径数十 mm)に活性な反応場を創り出 せる<sup>(4)</sup>.著者らは,気相中に発生させた強い光の場を,化学 気相析出の反応場として利用し,結晶配向成長が顕著になる ことを見出した.さらに,従来の熱プロセスでは合成が難し いとされる複酸化物化合物や特異なナノ構造組織の生成を報 告している.

図1に,成膜装置の概略を示す.コールドウォール型の縦 型反応炉を採用し,炉壁は加熱せず基板ステージを加熱し, 原料ガスを基板の上方から供給するため,成膜速度が高い. 原料には,固体もしくは液体の有機金属化合物を用いる.有



<sup>\*</sup> 東北大学助教;金属材料研究所(〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1) Laser Chemical Vapor Deposition of Oriented and Nanostructured Films; Akihiko Ito(Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai) Keywords: *chemical vapor deposition, laser, thick film, oriented growth, nanostructure* 

Keywords: chemical vapor deposition, laser, thick film, oriented growth, nanostructure 2013年8月7日受理[doi:10.2320/materia.52.525]

機金属化合物は、比較的高い蒸気圧を有し、大気中で変質が 少なく、取り扱い易い.レーザーは、窓材を通して、真空反 応炉の外側から照射する.成膜雰囲気には、 $O_2$ ,  $C_2H_2$  およ び  $NH_3$  など様々な反応ガスを使用できる.ここでは酸化物 膜を紹介するが、炭化物<sup>(5)(6)</sup>や窒化物膜<sup>(7)</sup>を合成することが できる.

本稿では,高強度レーザーと化学気相析出を組み合わせた 材料合成手法を用いた,選択的結晶配向成長,高速エピタキ シャル成長およびナノ構造成長に関する研究を紹介する.

#### 2. 選択的結晶配向成長

#### (1) 硬質材料 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は,高硬度であり,耐熱性に優れることから,切 削加工向け超硬工具の硬質コーティングに使われる.  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティングは,結晶配向により機械的性能が変化 し,実用上では c 軸配向が求められる<sup>(8)</sup>.  $\alpha$  相は, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>多 形の高温相であり,高い成膜温度が必要となる. さらに,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の c 面は,原子稠密面であることから,結晶成長速 度が低く,下地層なしでの $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の c 軸成長は難しい.  $\alpha$ 相の成膜に加えて,選択的配向成長を達成することは,学術 的にも挑戦的な課題である.

α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の成膜プロセスに高強度レーザー反応場を導入すると,析出反応が活性化され,成膜速度は最大 300 μm h<sup>-1</sup> へと大幅に向上する<sup>(9)(10)</sup>.これは,従来法の数百から数千倍の速さである. 図 2(a)に,多結晶 AlN 基板上に作製した



図2 (a) 多結晶 AIN 基板上に作製した(014) 配向 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の断面 SEM 像<sup>(10)</sup>, (b)(014) 配向 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 柱状晶の断面 TEM 像と電子回折図形(内挿 図), (c) 各結晶面に配向成長した α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の表 面組織と結晶構造の模式図<sup>(11)-(13)</sup>.

(014) 配向  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の断面 SEM 像を示す<sup>(10)</sup>.  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜 は,幅 2  $\mu$ m 程度の柱状晶からなり,成膜速度は 40  $\mu$ m h<sup>-1</sup> である. 柱状晶の表面には結晶自形が生成し,(001) 面と (100) 面に対応する(図 2(b)).

さらに、反応炉内圧力や原料供給量を制御することで、  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を選択的に結晶配向成長できる<sup>(11)(12)</sup>.原料供給量が過 量により、膜の c 軸方向が段階的に変化し、原料供給量が過 剰な雰囲気ほど、c 軸に面直な方向への結晶成長が優先され る.配向性  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の結晶自形は、結晶構造とよく対応 する(図 2(c))<sup>(11)(13)</sup>.  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は、コランダム構造をとり、 Al と O イオンが六方最密充填し、Al イオンの周囲を O イ オンが 6 配位して二重八面体 (Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub>)を形成する.(100) ま たは(110)面配向では、方形のファセットが、(012)面配向 では、ピラミッド状のファセットが膜表面に現れる.(014) 面配向では、六角形の結晶が重なり合い、(001)面配向で は、六角形のテラス構造が発達する.

レーザー反応場では,高い原料供給量下でも,気相–膜界 面での化学反応性が失わず,強い配向性を持った $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の高速気相析出が起こる.これは,従来の化学気相析出法 では全く実現できない環境である. CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>のような低酸化 性雰囲気においても, c軸配向 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜が得られる<sup>(14)</sup>. また,多結晶 AlN 基板上に,c軸配向係数90%の強配向性  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を,成膜速度 175  $\mu$ m h<sup>-1</sup> で高速合成できる<sup>(15)</sup>.

#### 高速エピタキシャル成長

### (1) 新規非鉛系強誘電体 $BaTi_2O_5$

強誘電体は、自発分極を有し、外部電界によって分極方向 を反転できる.比誘電率が高く、電気的-機械的エネルギー を変換できることから、コンデンサや圧電素子として、広く 実用される.BaO-TiO2 擬二元系には、BaTiO3 をはじめ、 工業的に有益な誘電体材料が多くあり、盛んに研究が行われ てきた.

BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>は、長い間、準安定な常誘電体であると見なされ、 1974年以降の相図には記載されていない.2002年、当研究 室の岩田らは、浮遊帯域溶融法を用いて BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>単結晶の 育成に成功し、b軸方向に大きな比誘電率を示す強誘電体で あることを見出した<sup>(16)</sup>. BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の圧電定数は、PbTiO<sub>3</sub> と 同程度の実用的な値と予想され<sup>(17)</sup>、非鉛系の新しい圧電材 料として期待される.

これまで、BaO-TiO<sub>2</sub>擬二元系の各複酸化物膜は、あまり 研究されてこなかった.これは、本系においては、TiO<sub>2</sub>が 熱力学的にも速度論的にも優先的に生成しやすいためであ る.一方、高強度レーザー場で析出反応を活性化することに より、BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のような安定生成温度域が極めて狭い複酸化 物を含め<sup>(18)(19)</sup>、各複酸化物(Ba<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, Ba<sub>4</sub>Ti<sub>13</sub>O<sub>30</sub> および BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>)の単相膜を高速配向成長できる<sup>(20)</sup>.

エピタキシャル成長は,基板の結晶面に整合するように, 膜の配向成長を促す手法である.一般的には,低い成膜速度 で高品質の膜を堆積させることが多いが,本手法では,Pt 電 極 被 覆 / Si 単 結 晶 基 板 や MgO 単 結 晶 基 板 上 に , BaTiO<sub>3</sub><sup>(21)</sup>および BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 厚膜<sup>(18)(19)</sup>を, 40–120 µm h<sup>-1</sup> で 高速成膜できる.

図3(a)に,(100) MgO 基板上に成膜したb軸配向 BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜の断面TEM像を示す<sup>(19)</sup>.BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜は,幅 100 nmの柱状晶からなっており,成膜速度は40 µm h<sup>-1</sup>で ある.BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜は,b軸に配向して成長しており,膜の制 限視野電子回折図形は[20Ī]および[104]晶帯軸で指数付け ることができる(図3(b)).極点X線図形には、8つの BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(311)反射が認められる(図3(c)).(311)反射は, MgO(110)反射から $\beta$ =54°の方位にあり,このとき, BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のTiO<sub>6</sub>八面体頂点のO原子と,MgO(100)面のO 原子が格子整合する(図3(d)).この基本ドメインに対し, 90°ドメイン(R),双晶ドメイン(T),双晶-90°ドメイン (T-R)を想定することで、極点図形の8つの反射が説明で きる(図3(d)).基本および90°ドメインの紙面縦方向の晶帯 軸は、それぞれ[20Ī]および[104]であり、TEM 観察結果と 一致する.

(110) MgO 基板上では(112) BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜が,(111) MgO 基 板上では(313)(113) BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜が,エピタキシャル成長 し,同様に極点図形とTEM 観察を併せ用いて,面内配向関 係を決定できる<sup>(19)</sup>.(111) Pt 電極被覆/Si 単結晶基板では, b 軸配向 BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜や(111) 配向 BaTiO<sub>3</sub> 膜が高速エピタキ シャル成長し,交流インピーダンス法を用いて,誘電応答を 詳細に解析できる<sup>(18)(21)</sup>.BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜の誘電特性( $\epsilon' = 650$ ) は,焼結体と同等以上であり,高い成膜速度と高い誘電的性 能を両立できる.



図3 (a) (100) MgO 基板上に作製したb軸配向 BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜の断面 TEM 像<sup>(19)</sup>, (b) 制限視野電子 回折図形(内挿図は MgO 基板)<sup>(19)</sup>, (c) 極点 X線 図形<sup>(19)</sup>, (d) 面内配向関係の模式図<sup>(13)(19)</sup>.

## (2) 高温酸化物超電導体 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>と CeO<sub>2</sub> 単結晶膜

超電導体は,臨界温度以下で電気抵抗がゼロになり,電力 損失が極めて少ないことから,超電導体を用いた電力輸送や 電動機の実証試験が行われている.YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>の臨界温度 (90 K)は,液体窒素温度(77 K)よりも高く,実用的な高温 酸化物超電導体である.超電導体は,撚線やコイルとして用 いるため,金属テープ線材上に連続製造する<sup>(22)</sup>.大きな超 電導臨界電流密度(MA cm<sup>-2</sup> 級)を得るためには,*c*軸配向 した YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>膜が必要である.金属テープ線材は多結 晶体であり,予め結晶方位の揃った CeO<sub>2</sub> や Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>等の バッファ層を成膜し,その上に YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>をエピタキシ ャル成長させる(図4(a)).実用化に向けて,CeO<sub>2</sub>や YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>層の成膜速度や収率の向上が開発目標になっ ており,世界的に熾烈な開発競争が続いている.

金属テープ線材の CeO<sub>2</sub> 層上に, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$ </sub> 膜が c 軸配 向してエピタキシャル成長する<sup>(23)(24)</sup>. YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$ </sub> 膜内に は, 異相は認められないが, 鉛直方向にらせん転位が存在す る(図 4(b))<sup>(24)</sup>. YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$ </sub>を含む第 II 種超電導体では, 磁東がローレンツ力を受け運動し, 電気抵抗が生じる. 一 方, 超電導体中に常電導相(点欠陥, 転位, 粒界, ナノ粒子) を分散させることで磁束をピン止めし, 臨界電流が向上する. YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$ </sub> は ab 面に超電導電流が流れることから, c 軸 方向に導入されたらせん転位は, 強いピン止め効果を示す. YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$ </sub> 膜の臨界電流密度は 2.7 MA cm<sup>-2</sup> に達し, 実



図4 (a) 超電導線材の模式図とYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>および CeO<sub>2</sub>の結晶構造<sup>(13)</sup>,(b)線材上に作製した*c*軸 配向YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>膜の断面TEM暗視野像(g = 006)<sup>(24)</sup>,(c)(100)SrTiO<sub>3</sub>基板上に作製した (100)CeO<sub>2</sub>単結晶膜と電子回折図形および膜-基 板界面の高分解能像(内挿図)<sup>(27)</sup>,(d)CeO<sub>2</sub>単結 晶膜の外観写真(中央)<sup>(27)</sup>.

用レベルの優れた超電導特性を示す.

実際の超電導線材の製造においては、数キロメートルの長 尺線材を、連続的に作製する必要があることから、テープ巻 き取り式の製造プロセスが用いられる.本手法は、レーザー 照射場において高い成膜速度と成膜効率を達成できるため、 このような連続製造プロセスと組み合わせて用いることがで きる.

金属テープ上に、 $CeO_2 膜を高速エピタキシャル成長させ、その上に YBa_2Cu_3O_{7-\delta} 膜を連続成膜できる<sup>(25)(26)</sup>. 一方、(100) SrTiO<sub>3</sub> 基板上に CeO<sub>2</sub> を成膜すると、CeO<sub>2</sub> 単結晶膜がエピタキシャル成長する<sup>(27)</sup>. 表面は平坦であり、膜内には粒界が認められない(図4(c)). 界面は原子レベルで平坦である(図4(c)内挿図). 成膜速度は 15 <math>\mu$ m h<sup>-1</sup> であり、可視光(波長 600 nm)での直線透過率は97%に達する(図4(d)). このように、本手法は、気相から単結晶厚膜を高速合成できる.

## 4. ナノ構造成長

#### (1) 層状構造 Ba β-アルミナ

Ba のヘキサアルミン酸は、蛍光体や固体電解質への応用 が期待される.Ba のヘキサアルミン酸は、Ca や Sr と同様 に、マグネトプランバイト型構造( $MAl_{12}O_{19}$ )を取りうると 考えられていたが、Ba の大きなイオン半径のため、 $\beta$ -アル ミナ型構造( $MAl_{11}O_{17}$ )をとる<sup>(28)</sup>. $\beta$ -アルミナ型構造は、Al イオンのスピネルブロックが、ミラー面をはさんで*c* 軸方向 に積層した層状構造である.一方、Ba  $\beta$ -アルミナには二つ の非化学量論組成相があり、Ba 欠乏 I 相と Ba 過剰 II 相で ある.I 相は欠損  $\beta$ -アルミナ構造であり、II 相は Ba-O 層 が規則的に挿入された超構造である.Ba  $\beta$ -アルミナは、チ ョクラルスキー法による単結晶育成や焼結体作製に関する報 告はあるが、膜の合成に関する報告はない、これは、アルカ リ土類金属元素の高い蒸気圧のため、気相法による合成が難 しいためである.

Ba β-アルミナ膜は、(110)面に配向して成長し、成膜速 度は 120 μm h<sup>-1</sup>に達する<sup>(29)</sup>. 図 5(a)に、Ba β-アルミナの (110)配向柱状晶の表面近傍の断面 TEM 像を示す. Ba β-アルミナの層状構造に起因した微細組織が観察される. 最表 面層の制限視野電子回折図形には、超構造によるスポットが 認められ、I 相結晶の表面に II 相層が生成することがわか る. II 相は、ミラー面を界面として生成し、二相間の格子整 合性は、[110] II 相//[010] I 相である(図 5(b)).

### 羽毛状組織 β-Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>

 $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>は、高耐蝕性、高耐熱衝撃性、低熱膨張率といった優れた化学的・機械的特性を有し、新しい高温構造材料 として注目されている.バルク体は、非鉄金属用溶湯部材や ディーゼル微粒子捕集フィルターに用いられる.一方、膜に 関する研究は、これまでほとんど報告されていない.これは、  $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>の合成の際に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とTiO<sub>2</sub>が生成しやすいた



図5 (a)多結晶 AIN 基板上に作製した Ba β-アルミナ 膜の断面 TEM 像と電子回折図形(内挿図)<sup>(29)</sup>,
(b) I相-II相界面の高分解能像と結晶構造の模式 図(s:スピネルブロック,m:ミラー面,ex: Ba-O 過剰層)<sup>(13)(29)</sup>,
(c)多結晶 AIN 基板上に作 製したβ-Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 膜の羽毛状組織の断面 SEM 像,(d)多結晶 AIN 基板上に作製した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ナノコンポジット膜中に発達した樹枝状構 造の断面 TEM 像<sup>(31)</sup>.

めである.

 $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 膜は,(130)面と(171)面に強く配向する.柱 状に成長し,柱状晶の表面には微細な柱状晶が成長し,羽毛 状組織を形成する(図5(c)).柱状晶の両側面に,数百 nm サイズのマイクロ柱状晶が成長し,その表面には,数十 nm サイズのナノ柱状晶が発達する.このような羽毛状組織を持 つ膜は,高い比表面積を必要するコーティングへ応用できる.

#### (3) ナノ樹枝状複合組織 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>

 $Al_2O_3 \ge ZrO_2$ は,構造材料として盛んに研究され,実用 材料として広く用いられている.一方, $Al_2O_3$ - $ZrO_2$ コンポ ジットは,優れた機械的特性と断熱性を併せ持つ材料として 期待される. $ZrO_2$ は,多形をとり,1373 K 以下では単斜晶 が安定である.高温相の正方晶  $ZrO_2(t-ZrO_2)$ は,強度およ び靭性に優れることから,工業的には Y や Ca イオンを添加 して t- $ZrO_2$  相を安定化させる.一方, $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  コンポジ ットにおいては,Alはイオン半径が小さいため t- $ZrO_2$  を安 定化せず,コンポジット体中で微小歪みやサイズ効果を受け て t- $ZrO_2$  が安定化する<sup>(30)</sup>.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ナノコンポジット膜中では、 $\alpha$ -あるいは $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の柱状晶中に、t-ZrO<sub>2</sub>のナノ樹枝状構造が発達する (図 5(d))<sup>(31)</sup>.このような特異なナノ構造膜は、これまで CVD 法で合成が報告された例がない.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ナノコン ポジット膜は,高い硬度(28 GPa)と高い遮熱性(4.8 kJ s<sup>-1/2</sup> m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>)を備えた新しい機能性ナノコンポジット膜である.

## 4. おわりに

本稿では、高強度レーザー場での気相析出を利用した構造 用および機能性酸化物膜の選択的結晶配向成長、高速エピタ キシャル成長およびナノ構造成長に関する研究を紹介した. 結晶の配向成長制御は、コーティングの特性を高めるために 必須であり、下地層に頼らない気相からの配向成長手法は、 産業への貢献という観点からも意義深い.これまで機能性材 料膜の研究の中心は薄膜材料であったが、本手法では、機能 性材料の厚膜を、結晶方位を揃えて高速成膜できる.さら に、気相からの単結晶成長や、特異なナノ構造を有するコン ポジット膜を作製できる.本手法は、気相からの結晶成長を 利用した材料合成プロセスの分野に、新たな展開を拓くもの である.

本研究の遂行にあたり,東北大学金属材料研究所 後藤孝 教授には,ご指導およびご助言を頂いた.また,研究室に在 籍した院生および研究員の協力に深く感謝する.本研究の一 部は,東北大学グローバル COE プログラム材料インテグレ ーション国際教育研究拠点,NEDO 希少金属代替材料開発 プロジェクト(W),同(Y),科学研究費助成事業 若手研究 (A)等の支援を受けて遂行した.末筆ながら,本稿を執筆す る機会を下さった関係各位に,深く謝意を表する.

### 文 献

- (1) W. A. Bryant: J. Mater. Sci., 12(1977), 1285-1306.
- (2) T. H. Maiman: Nature, **187**(1960), 493–494.
- (3) C. Duty, D. Jean and W. J. Lackey: Int. Mat. Rev., **46**(2001), 271–287.
- (4) T. Kimura and T. Goto: Mater. Trans., 44(2003), 421–424.
- (5) S. Yu, R. Tu, A. Ito and T. Goto: Mater. Lett.,  ${\bf 64}(2010),\ 2151-2154.$
- (6) S. Yu, A. Ito, R. Tu and T. Goto: Surf. Coat. Technol., 205 (2011), 2818–2822.
- (7) T. Yonesaki, A. Ito and T. Goto: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 59(2012), 405–409.
- (8) S. Ruppi: Surf. Coat. Technol., 202 (2008), 4257-4269.
- (9) H. Kadokura, A. Ito, T. Kimura and T. Goto: Surf. Coat. Technol., 204 (2010), 2302–2306.
- (10) Y. You, A. Ito, R. Tu and T. Goto: Appl. Surf. Sci., 256 (2010),

3906-3911.

- (11) A. Ito, H. Kadokura, T. Kimura and T. Goto: J. Alloys Compd., 489 (2010), 469–474.
- (12) Y. You, A. Ito, R. Tu and T. Goto: J. Ceram. Soc. Japan, 118 (2010), 366–369.
- (13) K. Momma and F. Izumi: J. Appl. Crystallogr., 44(2011), 1272–1276.
- (14) Y. You, A. Ito, R. Tu and T. Goto: Mater. Sci. Eng. B, 176 (2011), 984–989.
- (15) Y. You, A. Ito and T. Goto: Mater. Lett., **106**(2013), 11–13.
- (16) T. Akashi, H. Iwata and T. Goto: Mater. Trans., 44(2003), 802–804.
- (17) U. Waghmare, M. H. F. Sluiter, T. Kimura, T. Goto and Y. Kawazoe: Appl. Phys. Lett., 84(2004), 4917–4919.
- (18) A. Ito, D. Guo, R. Tu and T. Goto: J. Eur. Ceram. Soc., 32 (2012), 2459–2467.
- (19) D. Guo, A. Ito, R. Tu and T. Goto: Appl. Surf. Sci., 259 (2012), 178–185.
- (20) A. Ito, D. Guo, R. Tu and T. Goto: Mater. Chem. Phys., 133 (2012), 398–404.
- (21) D. Guo, A. Ito, R. Tu and T. Goto: J. Asian Ceram. Soc., 1 (2013), 197–201.
- (22) S. R. Foltyn, L. Civale, J. L. MacManus–Driscoll, Q. X. Jia, B. Maiorov, H. Wang and M. Maley: Nat. Mater., 6(2007), 631– 642.
- (23) P. Zhao, A. Ito, T. Kato, D. Yokoe, T. Hirayama and T. Goto: Supercond. Sci. Technol., 26 (2013), 055020.
- (24) P. Zhao, A. Ito, T. Kato, D. Yokoe, T. Hirayama and T. Goto: Supercond. Sci. Technol., 26 (2013), 095016.
- (25) P. Zhao, A. Ito, R. Tu and T. Goto: Appl. Surf. Sci., 256 (2010), 6395–6398.
- (26) P. Zhao, A. Ito and T. Goto: Ceram. Int., (2013), http://dx.doi. org/10.1016/j.ceramint.2013.07.118.
- (27) P. Zhao, A. Ito and T. Goto: Surf. Coat. Technol., (2013), http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.048.
- (28) N. Iyi, S. Takekawa, Y. Bando and S. Kimura: J. Solid State Chem., 47 (1983), 34–40.
- (29) A. Ito, Y. You, H. Katsui and T. Goto: J. Eur. Ceram. Soc., 33 (2013), 2655–2661.
- (30) A. K. Deb, P. Chatterjee and S. P. Sen Gupta: J. Appl. Crystallogr., 39 (2006), 601–603.
- (31) A. Ito, Y. You, T. Ichikawa, K. Tsuda and T. Goto: J. Eur. Ceram. Soc., 34(2014), 155–159.

#### 

修了 2007年4月 同多元物質科学研究所 助教(研究特任)

2009年4月 現職

専門分野:無機材料合成

◎レーザー反応場での高速化学気相析出を利用した無 機材料合成および外部場励起焼結法を用いた透明セ ラミックスの作製に従事.

\*\*\*\*

