

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709069

研究課題名(和文) レーザー反応場における高速化学気相析出のダイナミクスを利用した完全配向成長の実現

研究課題名(英文) Highly Oriented Ceramic Coatings by Chemical Vapor Deposition under Intense Laser Field

研究代表者

伊藤 暁彦 (ITO, Akihiko)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：20451635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円

研究成果の概要(和文)：高強度の連続発振レーザー光をレンズで拡げて用いることで、大きな領域に活性な反応場を創り出すことができる。化学気相析出法は、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、合成温度や炉内圧力を変化させることで、多彩な構造制御が可能である。被覆性が高いことから、実用コーティング法として幅広く使用される。本研究課題では、レーザー照射により活性化させた反応場での化学気相析出プロセスにおいて、高過飽和度原料雰囲気下における高速化学気相析出のダイナミクスを利用することで、 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をはじめとして、機能性および構造セラミックス材料の配向成長を実現する。

研究成果の概要(英文)：The chemical vapor deposition process under intense laser field can produce ceramic coatings with a significant deposition rate and oriented growth. I have demonstrated phase and orientation control of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings by changing deposition conditions, and nearly perfect c-axis-orientation of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings has been reported. The developed method was used for the preparation of various structural and functional ceramic coatings: feather-like structure in b-axis-oriented  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> coatings, superstructure formation in c-axis-oriented oriented Ba<sub>2</sub>-alumina layers, high-speed epitaxial growth of b-axis-oriented BaTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ferroelectric coatings, c-axis-oriented YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> superconducting coatings, and 2H-polytype formation in a-axis-oriented SiC coatings. Relationships among orientation, microstructure and properties were discussed through an electron microscopy.

研究分野：無機材料合成

キーワード：化学気相析出 レーザー工学 セラミックス コーティング 配向制御

## 1. 研究開始当初の背景

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、局所的に極めて大きな反応エネルギーを得る。これに対して、高強度の連続発振レーザー光をレンズで拡げて用いることで、大きな領域に活性化反応場を創り出すことができる。研究代表者は、気相中に発生させたこの強い光の場を、結晶配向成長の場として利用する。

化学気相析出 (Chemical Vapor Deposition; CVD) 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、合成温度や炉内圧力を変化させることで、多彩な構造制御が可能である。被覆性が高いことから、実用コーティング法として幅広く使用される。近年、CVD プロセスへのレーザー導入が試みられているが、いずれもパルスレーザービームを局所的 (直径数  $\mu\text{m}$  程度) に集光して、基板の局部加熱や原料ガスの選択的光化学反応に用いている。

しかし、これらの方法は、従来の熱 CVD と差別化できるほどの優位性が認められず、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。研究代表者は、高強度の連続発振レーザービームをレンズで拡げて原料ガスおよび基板へ照射するコーティング法を研究していく中で本研究課題の着想を得た。

例えば、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  は、切削工具向けの硬質コーティング材料としての応用が期待される。結晶配向により機械性能が変化することが報告されており、実用上は  $c$  軸配向成長が求められる。しかし、 $c$  面は原子稠密面であり成長速度が低く、下地層なしでは  $c$  軸成長は不可能とされる。一方、活性化反応場を利用する本手法では、炉内圧力や原料気化量を変化させて、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  膜の結晶配向を制御できることがわかってきた。研究代表者が提案する活性化レーザー反応場は、高い原料供給量下でも高い反応性を保持できるため、強い配向性を持ったセラミックス膜の高速気相析出が可能になる。

一方、CVD プロセスは、工業的に広く用いられている実学的な分野である。結晶配向成長は、コーティング特性を高めるために必須の技術であり、下地層に頼らない気相からの配向結晶成長技術の開発は、産業への貢献という観点から波及効果は大きい。

## 2. 研究の目的

本研究課題は、従来の熱プロセスでは難しいが、レーザー反応場で活性化した化学気相

析出プロセスに高過飽和原料蒸気を導入することで、セラミックスコーティングにおける気相からの完全配向成長技術を達成し、レーザー反応場での気相成長の学理を追究することを目的とする。

具体的には、高強度連続発振レーザーを照射して活性化した反応場での化学気相析出プロセスにおいて、高過飽和度原料雰囲気下における高速化学気相析出のダイナミクスを利用することで、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  をはじめとして、機能性および構造セラミックス材料の配向成長を実現する。

## 3. 研究の方法

基礎的な実験の基板として、多結晶 AlN 基板を用い、結晶配向成長プロセスを議論するためにより多くのデータを得る。出発原料には、各元素の有機金属化合物を用いる。中でも、 $\beta$ -ジケトン錯体は、大気中で安定であり、昇華時の蒸気圧も高い。出発原料は所定の温度で気化させ、原料ガスは、Ar ガスを用いて基板直上に搬送する。反応ガスとして、酸素ガスを用い、二重ノズル管を用いて成膜チャンバー内に導入して基板直上で原料ガスと混合させる。成膜チャンバーは、真空ポンプを用いて排気し、成膜時の炉内圧力は、200–1000 Pa とした。

レーザー種には、連続発振モードの半導体レーザー (波長: 808 nm、最大出力 200 W) および Nd:YAG レーザー (波長: 1.064  $\mu\text{m}$ 、最大出力 250 W) を用い、石英窓を通して成膜チャンバーの外から基板全体に照射する。成膜温度は、基板の裏面に設置した熱電対を用いて測定する。

結晶相は、X 線回折 (XRD) を用いて同定する。配向度は、X 線回折強度を基に配向係数 (Texture coefficient) として評価し、得られた膜の組織を走査型電子顕微鏡 (SEM)、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて観察する。膜の組成は、電子線マイクロプローブアナライザー (EPMA)、または SEM および TEM に備え付けられたエネルギー分散型 X 線分光装置 (EDX) を用いて測定する。膜の化学結合状態は、X 線光電子分光装置 (XPS) を用いて評価する。

## 4. 研究成果

本成果報告書では、レーザー反応場での化学気相析出法を用いたセラミックスコーティングに関する実験結果のうち、特に  $\text{Al}_2\text{O}_3$  系コーティングにおける 3 つの研究成果について詳細を報告する。

### (1) $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

$\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は、高硬度かつ耐熱性に優れることから、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、結晶配向により工具特性が変化し、実用上は  $c$  軸配向が求められている。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の  $\alpha$  相は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 多形の中でも合成に高い成膜温度が必要となる。 $\alpha$  相の成膜に加え、結晶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。

本研究項目では、合成条件が  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の結晶配向に与える影響を明らかにし、多結晶基板上的  $c$  軸強配向  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の合成を実証する。

$\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> コーティングプロセスに高強度レーザー反応場を導入することで化学析出反応が活性化され、 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜は顕著な柱状成長を示した (図 1(a))。成膜速度は 300  $\mu\text{m h}^{-1}$  にも達した。これは、従来の熱 CVD 法と比べて、数百から数千倍の高速成膜であった。

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> 膜の結晶配向方向を選択的に制御できた (図 1(b))。合成条件により  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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ことを明らかにした。

合成条件を最適化することで、多結晶 AlN 基板に、 $c$  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  $\mu\text{m h}^{-1}$  で高速合成できた。 $c$  軸配向  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の表面には、 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の六方晶コランダム構造を反映した六角形のファセットが顕著に発達していた (図 1(c))。

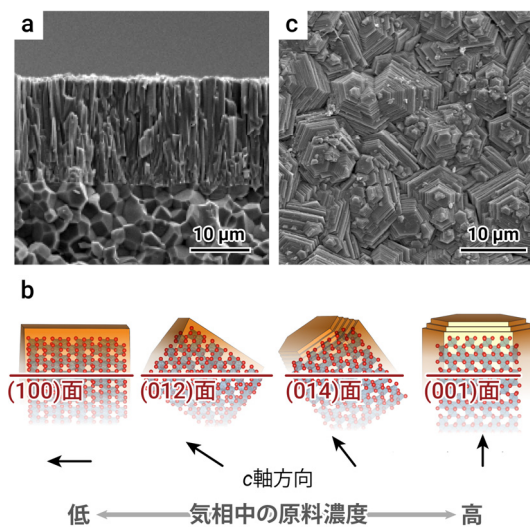


図 1. (a) 配向性  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の典型的な柱状組織の断面 SEM 像, (b) 成膜条件による配向制御の模式図, (c)  $c$  軸配向  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の表面 SEM 像。

### (2) $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>

$\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> は、高耐熱衝撃性と低熱膨張率であり、熔融 Al に対する耐食性が高いことから、炉材等の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への応用が期待される。しかし、 $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> は、生成温度が 1800 K と高い上に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と TiO<sub>2</sub> に分解しやすいことから、結晶性の高いコーティング膜の合成に関する研究報告はない。本手法を用いて、 $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 膜の結晶配向と微細組織を制御したコーティング手法を確立できれば、新たな高温エンジニアリングセラミックスコーティングへの応用が拓ける。

本研究項目では、 $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 膜の合成と配向成長を実証し、電顕観察を通じて羽毛状組織の形態と成長機構を明らかにする。

$\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 膜は、柱状に成長し、 $b$  軸方向に優先配向成長を示した (図 2(a))。柱状晶の頭部にはピラミッド状のファセットが生成した。柱状晶の側面には、微細な柱状晶が発達し、羽毛状組織を形成した。成膜速度は、64  $\mu\text{m h}^{-1}$  であった。

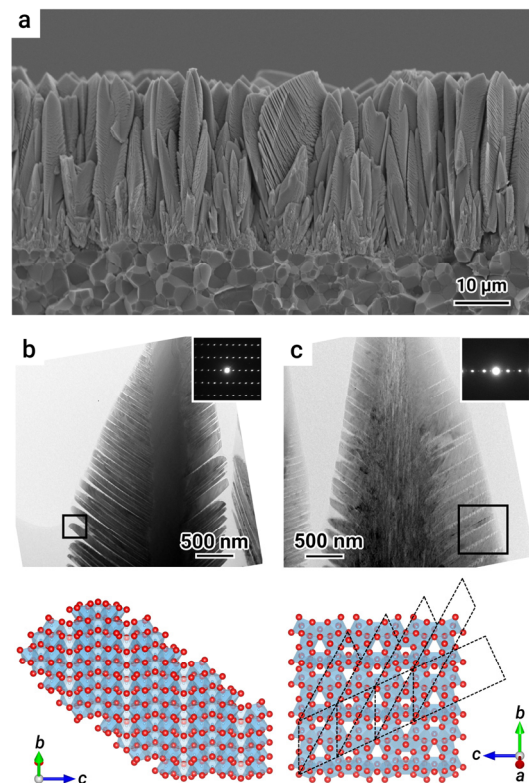


図 2. (a)  $b$  軸配向性  $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 膜の羽毛状組織の断面 SEM 像, (b) (130) 配向  $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 柱状晶の断面 TEM 像と結晶構造模式図, (c) (171) 配向  $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 柱状晶の断面 TEM 像と結晶構造模式図. (b, c) の内挿図は、制限視野電子線回折像。

(130) 配向した  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  柱状晶では、状晶の側面に、 $[01\bar{1}]$  配向した微細な柱状晶が発達して羽毛状組織を形成していた。微細な柱状晶上には、鋸状のファセットが成長しており、観察された微細構造は、結晶構造モデルとよく一致した (図 2(b))。

(171) 配向した  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  柱状晶では、柱状晶の側面に、 $[012]$  配向した微細な柱状晶が発達して羽毛状組織を形成することがわかる。さらに、微細な柱状晶の表面には、 $[02\bar{1}]$  配向したナノサイズの柱状晶が発達していた (図 2(c))。

$\beta$ - $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  は、擬ブルッカイト型の結晶構造をとり、3 つの  $(\text{Al}, \text{Ti})\text{O}_6$  八面体が稜共有して  $c$  軸方向に鎖状に連なっている。羽毛状組織内の微細柱状晶は、 $(\text{Al}, \text{Ti})\text{O}_6$  八面体鎖の長手方向に対して、直線的もしくは段階的に成長することを明らかにした。また、このような羽毛状組織は比表面積が大きく、多孔質構造を、基材に付与するコーティングとしての活用が期待できる。

### (3) Ba $\beta$ -alumina

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 の大きなイオン半径のため、 $\beta$ -アルミナ型構造 ( $\text{MAl}_{11}\text{O}_{17}$ ) をとる。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。また、高いイオン電導度を達成するためには、膜の結晶配向方向を揃えて成膜する必要がある。

本研究項目では、Ba  $\beta$ -alumina 膜の合成と配向成長を実証し、電顕観察を通じて超構造の成長様式を明らかにする。

Ba  $\beta$ -アルミナ膜は、(110) 面に配向して成長し、成膜速度は  $120 \mu\text{m h}^{-1}$  に達した (図 3(a))。断面 TEM 像には、Ba  $\beta$ -アルミナの層状構造に起因した微細組織が観察された。(110) 配向柱状晶の最表面層の制限視野電子回折図形には、超構造に起因するスポットが認められた (図 3(b))。

$\beta$ -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。TEM 観察結果より、I 相結晶の表面に II 相層が生成することがわかった。二相間の格子整合性は、 $[110]$  II 相 //  $[010]$  I 相であった (図 3(c))。

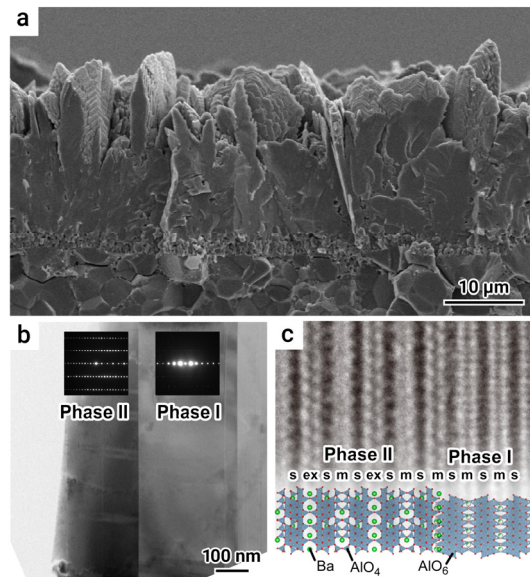


図 3 (a) (110) 配向 Ba  $\beta$ -alumina 膜の柱状組織の断面 SEM 像, (b) (110) 配向 Ba  $\beta$ -alumina 柱状晶の表面近傍の断面 TEM 像, (c) I 相/II 相界面の高分解能 TEM 像と格子整合性の模式図。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 25 件)

1. 伊藤暁彦, レーザー光を利用した気相からの高速結晶成長, 応用物理, 査読有, 85 巻, 2016 年, 印刷中。
2. J. Chen, A. Ito, T. Goto, High-speed epitaxial growth of  $\text{SrTiO}_3$  films on  $\text{MgO}$  substrates by laser chemical vapor deposition, *Ceramics International*, 査読有, 42 巻, 2016 年, 9981–9987. doi:10.1016/j.ceramint.2016.03.100
3. A. Ito, H. Kanno, T. Goto, 2H-SiC Films Grown by Laser Chemical Vapor Deposition, *Journal of the European Ceramic Society*, 査読有, 35 巻, 2015 年, 4611–4615. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2015.08.028
4. J. Chen, A. Ito, T. Goto, High-speed deposition of highly (001)-oriented  $\text{SrCO}_3$  films prepared using laser chemical vapor deposition, *Ceramics International*, 査読有, 41 巻, 2015 年, 11810–11814. doi:10.1016/j.ceramint.2015.05.149
5. L.F. Xu, A. Ito, T. Goto, High-speed Deposition of Tetragonal-ZrO<sub>2</sub>-dispersed

- SiO<sub>2</sub> Nanocomposite Films by Laser Chemical Vapor Deposition, *Materials Letters*, 査読有, 154 巻, 2015 年, 85–89.  
doi:10.1016/j.matlet.2015.04.065
6. A. Ito, S. Nishigaki, T. Goto, A feather-like structure of  $\beta$ -Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> film prepared by laser chemical vapor deposition, *Journal of the European Ceramic Society*, 査読有, 35 巻, 2015 年, 2195–2199.  
doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2015.01.027
  7. R. Hashimoto, A. Ito, T. Goto, Effect of deposition atmosphere on the phase composition and microstructure of silicon carbide films prepared by laser chemical vapour deposition, *Ceramics International*, 査読有, 41 巻, 2015 年, 6898–6904.  
doi:10.1016/j.ceramint.2015.01.142
  8. M. Gao, A. Ito, T. Goto, Preparation of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films by laser chemical vapor deposition, *Applied Surface Science*, 査読有, 340 巻, 2015 年, 160–165.  
doi:10.1016/j.apsusc.2015.02.196
  9. A. Ito, H.-S. Joo, T.-S. Kim, T. Goto, Synthesis of pseudobrookite titanium oxynitride Ti<sub>3- $\delta$</sub> O<sub>4</sub>N films by laser chemical vapor deposition, *Vacuum*, 査読有, 116 巻, 2015 年, 121–123.  
doi:10.1016/j.vacuum.2015.03.015
  10. P. Zhao, A. Ito, T. Goto, Effects of film thickness on the electrical properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  films grown on a multilayer-coated Hastelloy C276 tape by laser CVD, *Journal of Electroceramics*, 査読有, 34 巻, 2015 年, 137–141.  
doi:10.1007/s10832-014-9962-9
  11. P. Zhao, A. Ito, T. Goto, Orientation control and electrical properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  deposited onto CeO<sub>2</sub> buffer films by laser chemical vapor deposition using liquid source precursors, *Thin Solid Films*, 査読有, 564 巻, 2014 年, 92–96.  
doi:10.1016/j.tsf.2014.05.040
  12. M. Gao, A. Ito, T. Goto, Effect of laser wavelength on phase and microstructure of TiO<sub>2</sub> films prepared by laser chemical vapor deposition, *Surface and Coatings Technology*, 査読有, 244 巻, 2014 年, 166–172.  
doi:10.1016/j.surfcoat.2014.02.003
  13. P. Zhao, A. Ito, T. Goto, Preparation of (100) CeO<sub>2</sub> and (110) YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  films by laser chemical vapor deposition, *Ceramics International*, 査読有, 40 巻, 2014 年, 605–609.  
doi:10.1016/j.ceramint.2013.06.041
  14. P. Zhao, A. Ito, T. Goto, Effect of deposition temperature on the orientation and electrical properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  films prepared by laser CVD using liquid-source evaporation, *Ceramics International*, 査読有, 40 巻, 2014 年, 2057–2061.  
doi:10.1016/j.ceramint.2013.07.118
  15. A. Ito, Y. You, T. Ichikawa, K. Tsuda, T. Goto, Preparation of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> nanocomposite films by laser chemical vapor deposition, *Journal of the European Ceramic Society*, 査読有, 34 巻, 2014 年, 155–159.  
doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.025
  16. A. Ito, T. Sato, T. Goto, Transparent anatase and rutile TiO<sub>2</sub> films grown by laser chemical vapor deposition, *Thin Solid Films*, 査読有, 551 巻, 2014 年, 37–41.  
doi:10.1016/j.tsf.2013.11.089
  17. 伊藤暁彦, 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, 査読有, 52 巻, 2013 年, 525–529.  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/130003388685>
  18. A. Ito, Y. You, H. Katsui, T. Goto, Growth and microstructure of Ba  $\beta$ -alumina films by laser chemical vapor deposition, *Journal of the European Ceramic Society*, 査読有, 33 巻, 2013 年, 2655–2661.  
doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2013.04.003
  19. P. Zhao, A. Ito, T. Goto, Laser chemical vapor deposition of single-crystalline transparent CeO<sub>2</sub> films, *Surface and Coatings Technology*, 査読有, 235 巻, 2013 年, 273–276.  
doi:10.1016/j.surfcoat.2013.07.048
  20. Y. You, A. Ito, R. Tu, T. Goto, Effects of laser power on the growth of polycrystalline AlN films by laser chemical vapor deposition method, *Surface and Coatings Technology*, 査読有, 232 巻, 2013 年, 1–5.  
doi:10.1016/j.surfcoat.2013.04.043
  21. Y. You, A. Ito, T. Goto, Highly (001)-oriented  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films prepared by laser chemical vapor deposition, *Materials Letters*, 査読有, 106 巻, 2013 年, 11–13.  
doi:10.1016/j.matlet.2013.04.113
  22. 伊藤暁彦, 後藤 孝, レーザーを用いた超電導テープの高速合成と再生可能エネルギー設備への可能性, *MATERIAL*

STAGE, 査読無, 13 巻, 2013 年, 58–61.  
[http://www.gijutu.co.jp/doc/magazine/m\\_2013\\_07.htm](http://www.gijutu.co.jp/doc/magazine/m_2013_07.htm)

23. 伊藤暁彦, 後藤 孝, レーザーCVD によるチタン酸バリウム系強誘電体の作製, 金属, 査読無, 83 巻, 2013 年, 622–629.  
<http://www.agne.co.jp/kinzoku/kin1083.htm#no1122>
24. 伊藤暁彦, 後藤 孝, レーザーCVD による超電導線材の作製, 金属, 査読無, 83 巻, 2013 年, 608–615.  
<http://www.agne.co.jp/kinzoku/kin1083.htm#no1122>
25. 伊藤暁彦, 後藤 孝, レーザーCVD による超硬コーティングの配向制御, 金属, 査読無, 83 巻, 2013 年, 596–602.  
<http://www.agne.co.jp/kinzoku/kin1083.htm#no1122>

[学会発表] (計 6 件)

1. 菅野 均, 伊藤暁彦, 後藤孝, レーザーCVD による SiC–Ti(C, N)系膜の合成, 日本セラミックス協会 2015 年年会, 2015 年 3 月 18–20 日, 岡山市 (岡山大学).
2. 徐玲芳, 伊藤暁彦, 後藤孝, レーザーCVD 法により合成した ZrO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> ナノコンポジット膜の合成, 日本セラミックス協会第 53 回セラミックス基礎科学討論会, 2015 年 1 月 8–9 日, 京都市 (京都テルサ).
3. 伊藤暁彦, 高明, 後藤孝, レーザーCVD による配向性  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜の合成, 日本セラミックス協会第 27 回秋季シンポジウム, 2014 年 9 月 9 日–11 日, 鹿児島市 (鹿児島大学).
4. 橋本龍真, 伊藤暁彦, 後藤孝, レーザーCVD による  $\beta$ -SiC 膜の高速合成と成膜雰囲気の影響, 日本セラミックス協会 2014 年年会, 2014 年 3 月 17–19 日, 東京 (慶応義塾大学).
5. 金田優, 伊藤暁彦, 後藤孝, レーザーCVD による Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub> 系ナノコンポジット膜の合成, 日本セラミックス協会 2014 年年会, 2014 年 3 月 17–19 日, 東京 (慶応義塾大学).
6. A. Ito, P. Zhao, T. Goto, Laser Chemical Vapor Deposition for High- $J_c$  YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  films (招待講演), Electronic Materials and Applications 2014 (EMA2014), 2014 年 1

月 22–24 日, Orlando (米国).

[図書] (計 1 件)

1. 伊藤暁彦, 後藤 孝, コロナ社, 「”第 6 章コーティング技術とその傾斜機能材料化”傾斜機能材料の基礎と応用 (上村誠一, 渡辺義見編)」, 2015 年, 132–160.

[その他]

ホームページ等  
itonium.net  
<http://itonium.net/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 暁彦 (ITO, Akihiko)  
東北大学・金属材料研究所・助教  
研究者番号：20451635