

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760524

研究課題名(和文) リラクサー発現メカニズムの解明 ～極性ナノ領域と不均一結晶場～

研究課題名(英文) Elucidation of mechanism of relaxor ferroelectrics

-polar nano region and random field-

研究代表者 木口 賢紀 (Takanori Kiguchi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：70311660

研究成果の概要(和文)：塗布熱分解(MOD)法による $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PMN)薄膜成長条件を探索し、 SrTiO_3 (STO)単結晶基板にエピタキシャル成長した薄膜の作製に成功した。収差補正高分解能透過型電子顕微鏡(HRTEM)法により、PMNの原子分解能観察を行った。金属イオンだけでなく酸素イオンを含めた結晶構造像の撮影に成功した。 Pb-O 原子カラムと Ti-O 原子カラムを識別可能であった。得られた構造像より、原子カラム、特に Pb-O 原子カラムが $\langle 111 \rangle$ 方向に変位し、単位格子が大きく変調を受けている様子が明らかになったことから、Bサイト原子の不均一結晶場に起因したリラクサー固有の特異な原子変位について直視観察に成功したことを示している。

研究成果の概要(英文)：The deposition condition for the epitaxial growth of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PMN) on SrTiO_3 (STO) substrate was conducted. Epitaxial PMN thin film was obtained. The aberration-corrected transmission electron microscopy (HRTEM) analysis has elucidated the structure of PMN thin films by the atomic-resolution. In particular, Pb-O atomic columns randomly displaced in $\langle 111 \rangle$ direction. The result indicates that the direct observation of the characteristic atomic displacement by the random field from the B-site randomness. The HRTEM and the related strain mapping has elucidated that the detailed structure of the polar nano region (PNR).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：機能性セラミックス薄膜(電子セラミックス)、電子顕微鏡構造解析

科研費の分科・細目：材料工学・無機材料・物性

キーワード：リラクサー、強誘電体、極性ナノ領域(PNR)、化学的秩序領域(COR)、ランダム場、電子顕微鏡、幾何学的位相解析、歪みマッピング

1. 研究開始当初の背景

(1) リラクサーの発現メカニズム

$\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PMN)は、巨大圧電・巨大誘電応答・高い2次電気光学効果を示す代表的緩和型強誘電体(リラクサー)として注目されている。リラクサーのこれらの巨大物性発

現メカニズムとしては、球対称ランダム結合不均一結晶場モデルなど様々なモデルが提案されてきたが、未だに統一的に説明できるモデルは確立されていない。現時点では、「 MgO-O 、 Nb-O のランダムな結合に起因した不均一結晶場(Random Field)の存在によって、

極性領域に長距離秩序が存在せず強誘電体分域構造を形成することができないため、極性ナノ領域：Polar Nano Region (PNR)と呼ばれる数 nm の極性領域が非極性領域中に存在する」という考え方が注目されている。

一方、リラクサーには PNR とは別に、B サイトイオンが 1:1 にオーダーリングした化学的規則領域：Chemical Order Region (COR) と呼ばれる数 nm 程度のナノ領域が形成される。初期の研究では、COR が電子顕微鏡観察によって観察され、COR と PNR が混同されるなどの誤解があったが、近年 COR と PNR は別のものであり、PNR がリラクサーの起源であることが指摘されてきた。

これら PNR と COR の存在はリラクサーに特徴的なナノ組織であり、このうち PNR が自発分極を持った極性領域であり、リラクサーにとって最も重要なナノ組織であると考えられる。しかし、PNR の直視は未だなされておらず、さらには B サイトイオンの組み合わせによっては、COR の大きさがリラクサー特性と相関があることも明らかになっている。この様に、リラクサーはマトリックス中にリラクサーの起源である PNR と強誘電的な COR が共存し、せめぎ合いが起きていると考えられる。しかし、その実体解明は未だなされていない。

従って、B サイトイオンのランダム性に着眼し、不均一結晶場の視点から PNR の結晶構造・電子構造を解明することが PNR の挙動・生成メカニズムの理解に不可欠である。

(2) リラクサーのナノ構造解析

従来、リラクサーの PNR に関する研究は主に中性子回折、X 線回折、電子顕微鏡（電子回折を含む）による手法がとられてきたが、下表に比較した通り前 2 者は実空間での結像、空間分解能、電子構造解析、リアルタイムでのその場観察、多量（大型）試料が必要等の問題点が挙げられる。PNR の分布状態・サイズ・極性、構造遷移層、不均一結晶場などナノスケールの実空間構造・電子構造の解明には、原子分解能での結像、電子構造の情報をリアルタイムで得られる電子顕微鏡法が不可欠である。しかし、従来の電子顕微鏡法には空間分解能や定量精度に大きな問題点があった、PNR に関する報告も若干ではあるがなされているものの低分解能観察に留まっており、原子分解能で PNR の原子配列・極性、構造遷移層、不均一結晶場を解明した研究はない。その要因として、対物レンズの球面収差やその他の収差により原子位置の精密定量解析は困難であったことが挙げられる。しかし、近

年収差補正技術や画像解析法の飛躍的な発展によりこれらの問題解決が期待される。

2. 研究の目的

リラクサー現象の解明のために、本研究では代表的なリラクサー材料のうち最も基本的な $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ に着目した。この現象の解明には化学的規則化領域 (COR: Chemical Order Region) と極性ナノ領域 (PNR: Polar Nano Region) の 2 つのナノ構造が重要である。この解析には PMN 単結晶の TEM 観察が有効であるが、異相の生成等の問題から試料の作製が困難であることが知られている。

よって、本研究では、

- (1) PMN の TEM を用いた実空間における微細な構造解析
 - (2) その前段階として TEM 試料に用いる PMN エピタキシャル薄膜の作製条件の探索
- 以上 2 点を主な目的とする。

3. 研究の方法

成膜は MOD (有機金属化合物の熱分解) 法で行った。スピコート用いて SrTiO_3 (001) 基板に室温、4000rpm で均一に堆積し、赤外線ランプアニール炉を用い大気中 400°C で 5 分間仮焼して有機物を分解した後、5 回スピコートを繰り返した。最終的に大気中 600-800°C で 10 分間本焼成し結晶化させた。

PMN 薄膜の組成については EPMA 及び TEM-EDS 法によって評価した。薄膜の結晶化の有無、結晶相の確認、配向性については X 線回折計で行った。

電子顕微鏡試料は、エポキシ樹脂で薄膜同士を接着して 0.5 μm の砥粒で鏡面研磨した後、低加速イオンミリング加工によって薄膜断面観察用作製し、加工中のイオンビーム照射ダメージを抑制した。

Rose-Haider 型球面収差補正装置とエネルギーフィルターを組み込んだ 300kV 高分解能分析電子顕微鏡を用い、1.2mm ある対物レンズの球面収差係数を -1 μm に抑制するとともに非弾性散乱波を除去することによって、0.1nm 未満の分解能で原子分解能観察を行った。幾何学的位相解析による歪みマップを用いて PNR のイメージング及び解析を行った。なお、PMN は電子線照射ダメージを受けやすいためドーズ量を抑制して、ダメージの進行を抑制した。

4. 研究成果

(1) PMN エピタキシャル成長条件の最適化

乾燥温度、仮焼温度、本焼温度、焼成時間、昇温速度、焼成雰囲気等の各条件について組成、結晶相、配向性、微細組織の観点から最適化を行った。ここでは、顕著な影響の見られた本焼温度について述べる。

図1に示すように、XRD プロファイルから本焼温度が高いほどピーク半値幅が減少し、結晶性が向上した。しかし、高温ほどPbの欠損が促進され、XRD プロファイル(図1)及びTEM像・制限視野電子回折図形(図2)より、多結晶パイロクロア相の生成とそれに伴う組織の乱れが観察された。650-750°Cでは表面からパイロクロア相が層状に広がっていくことが分かったが、800°Cでは柱状的にパイロクロア相が生成している。これらの結果から、本焼温度が高くなるほどパイロクロア相の割合が増加するが、薄膜全体から均等にPbが欠損するのではなく、局部的に欠損が促進され、残留したペロブスカイト相領域では結晶性はむしろ向上していることが分かった。

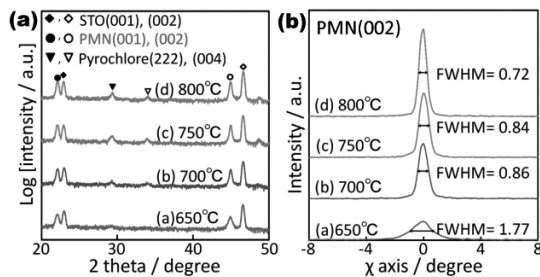


図1 PMN/STO 薄膜のXRD プロファイル。(a) $2\theta/\omega$ プロファイル、(b) 002 ピークのロックンクカーブ。

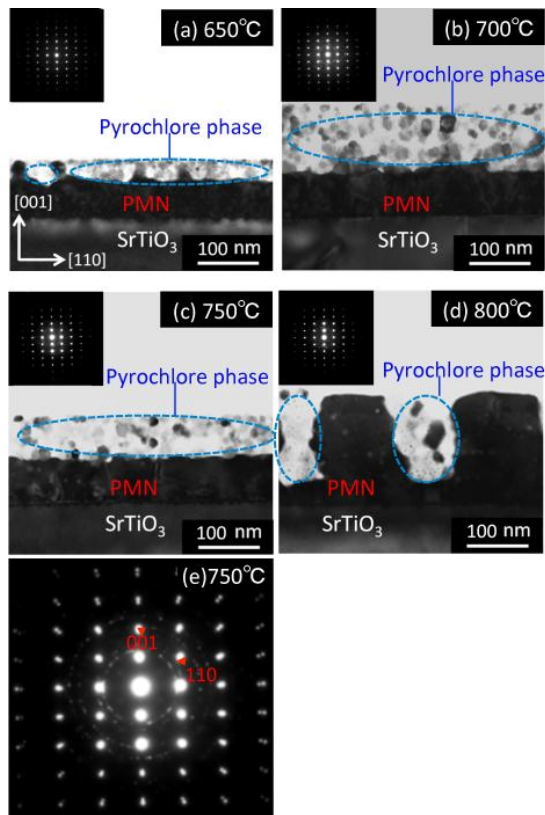


図2 本焼温度(a) 650°C、(b) 700°C、(c) 750°C、(d) 800°Cの試料の断面TEM像と(e) 750°Cの制限視野電子回折図形。

そこで、Pb欠損の抑制と結晶性向上の同時実現を狙って、(a) Pb10at%過剰のMOD溶液、(b) 膜面を重ね合わせた状態で650°C低温焼成、(c) 焼成後に膜面を貼り合わせずに700°C高温アニール、以上3点の工夫を検討した。その結果を図3に示す。電子回折図形からペロブスカイト相ほぼ単層からなるエピタキシャル薄膜が得られた。

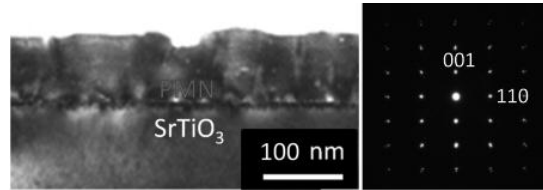


図3 最適条件で作製したPMN/STO薄膜の(a)断面TEM像と(b)制限視野電子回折図形。

(2) PNR と COR の解明

(1)で得られた薄膜に対して収差補正HRTEMによる原子分解能観察を行った。図4に(a) $\langle 101 \rangle$ 方向から投影したペロブスカイト相PMNの原子分解能像、(b) その拡大図を示す。負の球面収差係数の条件下で撮影したため、原子カラムが白いコントラストを示しており、マルチスライスシミュレーションから酸素原子を含めた原子位置が輝点として結像されている。ノーマルな強誘電体と異なって、原子カラムが格子点から変位していることが明らかになった。

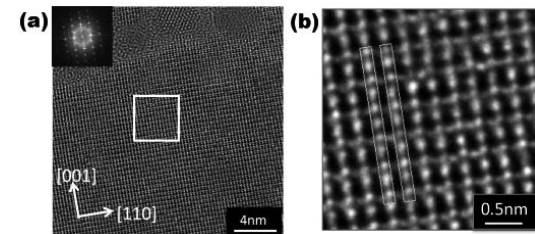


図4 PMN 薄膜断面の(a)原子分解能TEM像と(b)その拡大像。

次に、図4の幾何学的位相解析によって得られた歪みマップを図5に示す。 $\langle 110 \rangle$ 方向の垂直歪みは ± 0.02 以下でありほぼ計測誤差のレベルである。一方、 $\langle 001 \rangle$ 及び $\langle 111 \rangle$ 方向では局部的に $0.03-0.06$ 程度の歪みを示した。既往の研究では、粉末X線回折によるリートベルト解析より、Pb原子は $\langle 111 \rangle$ 方向に平均で 0.03nm の変位を示すことが分かっている。従って、この歪みマップはPb原子変位を反映したものであると考えられる。この変位領域は $2-3\text{nm}$ の大きさを持ち、またPNRは $\langle 111 \rangle$ 方向に分極を持つことから、この歪み領域がPNRに対応していると考えられる。Pb原子の大きな変位は、Bサイトのランダム場によるポテンシャル変調を反映したものと考えられる。一方、 $\langle 001 \rangle$ 方向には分極を

持たないが、大きな歪みが現れている。これは、 $[111]$ 、方向と直交した $[1-11]$ 、 $[-111]$ 方向の分極が (-110) 面上に投影されたものと考えられる。

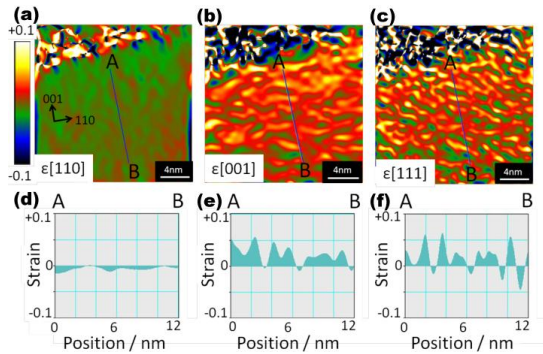


図5 図4の歪みマップ。(a) $\langle 110 \rangle$ 方向の垂直歪み、(b) $\langle 001 \rangle$ 方向の垂直歪み、(c) $\langle 111 \rangle$ 方向の垂直歪み。(d)-(f) (a)-(c)における線分A-B上の歪みプロファイル。

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 10 件)

1. Takanori Kiguchi, Toyohiko J. Konno, Naoki Wakiya, Hitoshi Morioka, Keisuke Saito, and Kazuo Shinozaki, "Nanostructure and strain analysis of CeO_2/YSZ strained superlattice", *Materials Science and Engineering B*, 査読有, 173, 220-228 (2010)
2. Takanori Kiguchi, Kenta Aoyagi, Toyohiko J. Konno, Satoru Utsugi, Tomoaki Yamada, Hiroshi Funakubo, "Geometric Phase Analysis of Nano-Scale Strain Fields Around 90° Domains in $\text{PbTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ Epitaxial Thin Film", *Materials Research Society Symposium Proceeding*, 査読有, 1199, 1199-F09-08-01-1199-F09-08-06 (2010)
3. Hyun-young Go, Naoki Wakiya, Takanori Kiguchi, Tomohiko Yoshioka, Osamu Sakurai, Jeorey S. Cross, Junzo Tanaka, Kazuo Shinozaki, "Ferroelectric Properties of epitaxial $\text{BiFe}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{O}_3$ thin films with dioerent crystal orientations deposited on buoeered Si substrate", *Key Engineering Materials*, 査読有, 445, 111-114 (2010)
4. Y. Mizutani, T. Kiguchi, T. J. Konno, H. Funakubo, and H. Uchida, "Crystal Structure and Dielectric Property of Bismuth Layer-Structured Dielectric Films with c-Axis Preferential Crystal Orientation", *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, 49,

09MA02-1-09MA02-6 (2010)

5. T. Yamada, T. Kiguchi, A. K. Tagantsev, H. Morioka, T. Iijima, H. Ohsumi. Kimura, M. Osada, N. Setter, and H. Funakubo, "Antiferrodistortive Structural Phase Transition in Compressively-strained Epitaxial SrTiO_3 Film Grown on $(\text{La}, \text{Sr})(\text{Al}, \text{Ta})\text{O}_3$ Substrate", *Integrated Ferroelectrics*, 査読有, 115, 57-62 (2010)
6. Takanori Kiguchi, Toyohiko J. Konno, Naoki Wakiya, and Kazuo Shinozaki, "Aberration-Corrected HRTEM Analysis of Transition Structure in Phase Boundary of ZrO_2 Ultra-Thin Film", *Materials Research Society Symposium Proceeding*, 査読有, 1231, 1231-NN03-12-01-1231-NN03-12-06 (2010)
7. Takanori Kiguchi, Naoki Wakiya, Kazuo Shinozaki, and Toyohiko J. Konno, "Valence-EELS analysis of local electronic and optical properties of PMN-PT epitaxial film", *Materials Science and Engineering B*, 査読有, 161, 160-165 (2009)
8. Naoki WAKIYA, Yusuke KIMURA, Naonori SAKAMOTO, Desheng FU, Toru HARA, Takashi ISHIG-URO, Takanori Kiguchi, Kazuo SHINOZAKI, and Hisao SUZUKI, "Doping eoeect of Dy on leakage current and oxygen sensing property of SrTiO_3 thin film prepared by PLD", *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 査読有, 117, 1004-1008 (2009)
9. Rintarou Morohashi, Naoki Wakiya, Takanori Kiguchi, Tomohiko Yoshioka, Junzo Tanaka, Kazuo Shinozaki, "Preparation of Epitaxial LiNbO_3 Thin Film by MOCVD and Its Properties", *Key Engineering Materials*, 査読有, 388, 179-182 (2009)
10. 木口賢紀, 今野豊彦、脇谷尚樹、篠崎和夫, 収差補正 TEM による ZrO_2 超薄膜における構造遷移層の解明, *日本金属学会 あたりあ*, 査読有, 48, 599 (2009)

[学会発表] (計 26 件)

1. 中村崇昭、青柳健大、木口賢紀、内田寛、坂元尚紀、脇谷尚樹、鈴木久男、宇佐美徳隆、今野豊彦, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 薄膜の作製と極性ナノ領域の解析, *日本セラミックス協会 2011 年年会* (2011年3月18日, 浜松) 口頭
2. 青柳健大、兒玉裕美子、木口賢紀、宇佐美徳隆、今野豊彦、江原祥隆、舟窪浩、

- 山田智, PbTiO₃ 膜における積層欠陥形成による歪み緩和, 日本セラミックス協会 2011 年年会 (2011 年 3 月 18 日, 浜松) 口頭
3. 木口賢紀, 青柳健大, 中村崇昭, 宇佐美徳隆, 今野豊彦, 江原祥隆, 舟窪浩, 山田智, Pb 系強誘電体薄膜における極性構造の原子分解能観察, 日本セラミックス協会 2011 年年会 (2011 年 3 月 18 日, 浜松) 口頭
 4. 中村崇昭・木口賢紀・内田寛・坂元尚紀・脇谷尚樹・鈴木久男・宇佐美徳隆・今野豊彦, 鉛系緩和型強誘電体薄膜の作製と局所構造評価, 日本セラミックス協会第 49 回セラミックス基礎科学討論会 (2011 年 1 月 12 日, 岡山) 口頭
 5. 木口賢紀, 青柳健大, 中村崇昭, 内田寛, 舟窪浩, 宇佐美徳隆, 今野豊彦鉛系強誘電体薄膜の局所弾性場イメージングによる格子欠陥相互作用の解明 [日本セラミックス協会第 49 回セラミックス基礎科学討論会 (2011 年 1 月 12 日, 岡山) 口頭
 6. 木口賢紀, 青柳健大, 宇佐美徳隆, 舟窪浩, 今野豊彦, 強誘電体薄膜における格子欠陥の弾性相互作用のナノイメージング, 金属材料研究所第 120 回講演会 (2010 年秋季) (2010 年 11 月 24 日, 金属材料研究所) ポスター
 7. 中村崇昭, 木口賢紀, 内田寛, 宇佐美徳隆, 今野豊彦, CSD 法による緩和型強誘電体の局所構造評価, 金属材料研究所第 120 回講演会 (2010 年秋季) (2010 年 11 月 24 日, 金属材料研究所) ポスター
 8. 青柳健大, 木口賢紀, 宇佐美徳隆, 舟窪浩, 今野豊彦 TEM 暗視野像による PbTiO₃ 薄膜ドメイン構造の極性判定, 金属材料研究所第 120 回講演会 (2010 年秋季) (2010 年 11 月 24 日, 金属材料研究所) ポスター
 9. Takanori Kiguchi, Kenta Aoyagi, Noritaka Usami, Toyohiko J. Konno, Yoshitaka Ehara, Tomoaki Yamada, Hiroshi Funakubo, Atomic-Resolution Imaging of Domain Polarity and Domain Wall Structure of PbTiO₃ Thin Film, 3rd International Congress on Ceramics (2010 年 11 月 15 日, Osaka) ポスター
 10. 青柳健大, 木口賢紀, 今野豊彦, 江原祥隆, 山田智明, 舟窪浩, 種々の膜厚を有する PbTiO₃ エピタキシャル膜微細組織の電子顕微鏡観察, 第 30 回エレクトロセラミックス研究討論会 (2010 年 10 月 30 日, 市ヶ谷) ポスター
 11. 青柳健大, 木口賢紀, 今野豊彦, 江原祥隆, 山田智明, 舟窪浩, 種々の膜厚を有する PbTiO₃ 膜微細組織の電子顕微鏡観察, 平成 22 年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会 (2010 年 10 月 28 日, 仙台市) ポスター
 12. T. Kiguchi, K. Aoyagi, T. J. Konno, S. Utsugi, T. Yamada, H. Funakubo, Nanoscale Analysis of Elastic Interaction between 90° Domain and Misfit Dislocation in PbTiO₃/SrTiO₃ Epitaxial Thin Film, The 4th International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-4) 2010 (2010 年 6 月 22 日, Yokohama) 口頭
 13. 江原 祥隆, 宇津木寛, 中島光雅, 山田智明, 舟窪浩, 飯島高志, 木口賢紀, 今野豊彦, 歪みの少ないエピタキシャル正方晶分極軸配向 Pb(Zr, Ti)O₃ 厚膜を用いたソフトモードによる強誘電性の見積もり, 第 27 回強誘電体応用会議 (FMA27) (2010 年 5 月 28 日, 京都) 口頭
 14. 水谷佑樹, 木口賢紀, 今野豊彦, 舟窪浩, 内田寛, 配向性ビスマス層状構造酸化物薄膜の結晶構造と誘電特性, 第 27 回強誘電体応用会議 (FMA-27) (2010 年 5 月 28 日, 京都) 口頭
 15. 木口賢紀, 今野豊彦, 青柳健大, 宇津木寛, 山田智明, 舟窪浩, PbTiO₃ 薄膜 90° ドメイン構造における局所歪み場の解析, 日本顕微鏡学会第 66 回学術講演会 (2010 年 5 月 25 日, 名古屋) 口頭
 16. 木口賢紀, 青柳健大, 今野豊彦, 宇津木寛, 山田智明, 舟窪浩, PbTiO₃/SrTiO₃ 薄膜における 90° ドメイン構造の歪み場イメージング, 日本セラミックス協会 2010 年年会 (2010 年 3 月 22 日, 東京) 口頭
 17. 木口賢紀, 今野豊彦, 青柳健大, 宇津木寛, 山田智明, 舟窪浩, 幾何学的位相解析による PbTiO₃ 薄膜 90° ドメインの局所歪み場解析, 第 57 回応用物理学会関係連合講演会 (春期) (2010 年 3 月 19 日, 平塚市) 口頭
 18. Takanori Kiguchi, Toyohiko J. Konno, Naoki Wakiya, and Kazuo Shinozaki, Aberration-Corrected HRTEM Analysis of Transition Structure in Phase Boundary of ZrO₂ Ultra-Thin Film, Materials Research Society 2009 Fall Meeting (2009 年 11 月 30 日, USA, Boston) ポスター
 19. Takanori Kiguchi, Kenta Aoyagi, Toyohiko J. Konno, Satoru Utsugi, Tomoaki Yamada, Hiroshi Funakubo, Geometric Phase Analysis of Nano-Scale Strain Fields around 90° Domains in PbTiO₃/SrTiO₃ Epitaxial Thin Film, Materials Research Society 2009

- Fall Meeting (2009年12月2日, USA, Boston) ポスター
20. 木口賢紀, 顕微鏡による結晶化メカニズムの解明, 金属材料研究所第118回講演会(2009年秋季)(2009年11月27日, 金属材料研究所) 口頭 (指定講演)
 21. Kazuo Shinozaki, Yusuke Inaba, Toru Hara, Takanori Kiguchi, Naoki Wakiya, Jeffrey S. Cross, Osamu Sakurai, Possibility of NO_x Sensing by using Titania Doped Ferrite Epitaxial Thin Film, The 26th International Japan-Korea Seminar on Ceramics (2009年11月6日, Japan, Tsukuba)
 22. K. Shinozaki, H-Y. Go, T. Kiguchi, N. Wakiya, J. S. Cross and O. Sakurai, Crystal orientation control of epitaxial Pb(Zr,Ti)O₃ and BiFeO₃ thin film deposited on atomic layer buffered Si and YSZ substrates, GJ-NST2009 (International Conference on Nano Science and Nano Technology 2009) (2009年11月6日, Korea, Mokpo) 口頭 (招待講演)
 23. 木口賢紀, 今野豊彦、脇谷尚樹、篠崎和夫 収差補正電子顕微鏡によるセラミック薄膜の界面構造解析、日本機械学会2009年度年次大会(2009年9月14日, 盛岡) 口頭
 24. 木口賢紀, 今野豊彦, 脇谷尚樹, 篠崎和夫、宇津木悟、山田智明、舟窪浩酸化物薄膜のナノ歪み場解析、日本セラミックス協会第22回秋季シンポジウム(2009年9月17日, 松山市) 口頭
 25. T. Kiguchi, T. J. Konno, N. Wakiya, and K. Shinozaki, Aberration-Corrected HRTEM Analysis of Transition Layer Structure in ZrO₂ Ultra-Thin Film, Microscopy Conference 2009 in Graz (2009年9月1日, Austria, Graz) ポスター
 26. 木口賢紀、今野豊彦、脇谷尚樹、篠崎和夫, 収差補正電子顕微鏡による ZrO₂ 超薄膜の相境界構造遷移層の解明、日本顕微鏡学会第65回学術講演会(2009年5月29日, 仙台市) 口頭

[その他] 受賞

1. コニカミノルタ画像科学進歩賞 (2011)
2. 第35回日本セラミックス協会学術写真賞 特別賞 (2010)
3. 第35回日本セラミックス協会学術写真賞 優秀賞 (2010)
4. Poster Award in 3rd International Congress on Ceramics (ICC3) (2010)
5. 第30回エレクトロセラミックス研究討

論会 奨励賞

6. 平成22年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会優秀ポスター賞
7. 日本顕微鏡学会第10回奨励賞 (2009)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木口 賢紀 (Takanori Kiguchi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号: 70311660

(2) 研究分担者 なし