

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16079205

研究課題名（和文）電子分光法を用いた nano-NEMCA 現象の解明

研究課題名（英文）Nano-NEMCA phenomena investigated by means of electron spectroscopy

研究代表者

山口 周（YAMAGUCHI SHU）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：10182437

研究成果の概要：

電子分光を用いた物理的手法と電気化学的測定を織り交ぜて、ヘテロ界面近傍における電子構造の変調と電気化学的特性、特に速度論的性質に現れる化学特性の変化を検討した。

正逆光電子分光，軟 X 線分光，共鳴電子分光の各種方法を組み合わせて酸化物表面でのバンド屈曲および表面準位形成による電子状態の変化を明らかにした。これらの手法と電気化学的測定で得られる特性との相関を検討した。BaPr<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>O<sub>3</sub> の伝導特性は電子-ホールペアの強い相互作用による特異な電子構造に起因し，Pt 微粒子を粒界に分散させた Ce<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>O<sub>2</sub> における伝導度の向上は界面への酸素空孔注入メカニズムで説明した。さらに，電気化学的に分極した状態下での硬 X 線光電子分光の測定手法を確立し，電子-イオン混合伝導体の不定比性変化に伴う変化を観察した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	19,100,000	0	19,100,000
2005年度	24,300,000	0	24,300,000
2006年度	2,500,000	0	2,500,000
2007年度	2,600,000	0	2,600,000
2008年度	3,100,000	0	3,100,000
総計	51,600,000	0	51,600,000

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：

キーワード：ナノイオニクス 固体イオニクス 空間電荷層 ショットキー障壁

軟 X 線分光法 NEMCA 電極反応 混成電位

## 1. 研究開始当初の背景

イオン伝導体表面に電子（またはホール）-イオン混合伝導体層からなる酸化物電極を形成したとき，酸化物電極上の表面電荷量はイオン伝導体とのヘテロ接触の特性によって

決定される。したがって，(1) 酸化物電極とイオン伝導体の接触電位（両相の固体のガルバニ電位差），(2) 電子構造，(3) 電荷担体の状態密度，(4) 電荷中性電位（接触界面準位のピン止め効果），(5) 酸化物電極の厚さ

などの要因が影響を及ぼすと推定される．特異吸着層を形成するガス分子種の種類や被覆率は，表面吸着による電荷移動反応の親和力や酸化物電極基板上的吸着サイトと分子との空間的な構造一致性などに依存すると考えられるが，どの要因が支配的であるかについては明らかではなかった．

## 2. 研究の目的

本研究では，[金属・合金薄膜または酸化物] / [イオン伝導体または酸化物系電子（ホール）- イオン混合伝導体] から構成されるヘテロ界面上で，電気化学反応によって形成されるラジカルによる高反応活性状態である NEMCA 現象のナノ構造設計を目指し，マクロな電気化学反応特性と先端電子分光を利用して観察した電子構造との相関を明らかにする．これに基づいて，ヘテロ界面の新しい化学機能制御の概念である「ナノイオニクス現象」について，基礎特性の解明と機能設計の指針を探索することを目的とした．

## 3. 研究の方法

### (1) 電子分光法によるヘテロ界面の電子構造の解明

イオン 電子混合伝導体または酸化物半導体界面において形成が予想される空間電荷層の形成過程の解明のため，正逆光電子分光，軟 X 線吸収・発光分光を組み合わせ，角度分解による深さ方向の分析を行った．対象として Nd ドープ SrTiO<sub>3</sub> (n 型 STO) と Sc ドープ SrTiO<sub>3</sub> (p 型 STO) を選択した．

Nd-CeO<sub>2</sub> について，表面近傍の電子構造の変化と電荷移動について軟 X 線吸収分光ならびに共鳴電子分光法で測定し，バルクとの比較により検討した．

### (2) ヘテロ接触界面の電子構造と電気化学特性

BaPr<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>O<sub>3</sub> 系について，電気化学的測定による伝導特性を測定し，その特性と電子構造との相関を検討するために軟 X 線分光法および Raman 散乱分光法により測定した．

特異な電子状態が期待される Pt/CeO<sub>2</sub> 界面における電子構造の変化を電子分光法と電気化学的測定により明らかにすることを目的として，白金ナノ粒子分散酸化物試料を対象とした．この試料の種々の酸化状態におけるフェルミ準位付近の電子分光測定，酸素および水素の酸化還元反応における電荷移動過程の速度論パラメータを電気化学測定より推定し，Pt の電子状態と反応活性の相関を調べるとともに，ナノ白金分散体表面の反応活性と比較した．

### (3) 電気化学的分極状態下における電子分光測定

薄膜の電子 イオン混合伝導体では，応力や外部電界による分極が生じると，イオンによる緩和過程が生じるために，イオン欠陥（不定比性）の緩和によるキャリア変調が生じることがわかってきた．この電子状態変化と反応活性について電子分光測定と電気化学測定を組み合わせ検討を行った．対象は Cu<sub>2</sub>S を電解質に用いた二端子ギャップレス型原子スイッチ構造とし，電極間に電圧を印加しながら，硬 X 線光電子分光測定を行った．

## 4. 研究成果

### (1) 電子分光法によるヘテロ界面の電子構造の解明

n 型 STO と p 型 STO について逆光電子分光測定 (IPES) を角度分解で測定した結果を Fig. 1 に示す．角度  $\theta$  が小さいスペクトルほど，表面近傍の伝導帯の構造を反映する．p 型では典型的なバンド屈曲が観察され，n 型ではバンドの屈曲は観察されずスペクトルのシフトが見られなかった．これは室温での n 型 STO の光電子分光による精密測定により，準粒子バンドがフェルミ準位付近に存在しており，これが表面のバンドをクランプしているドナー準位に対応していることが明らかにした．高い反応活性を有することが知られる Nd

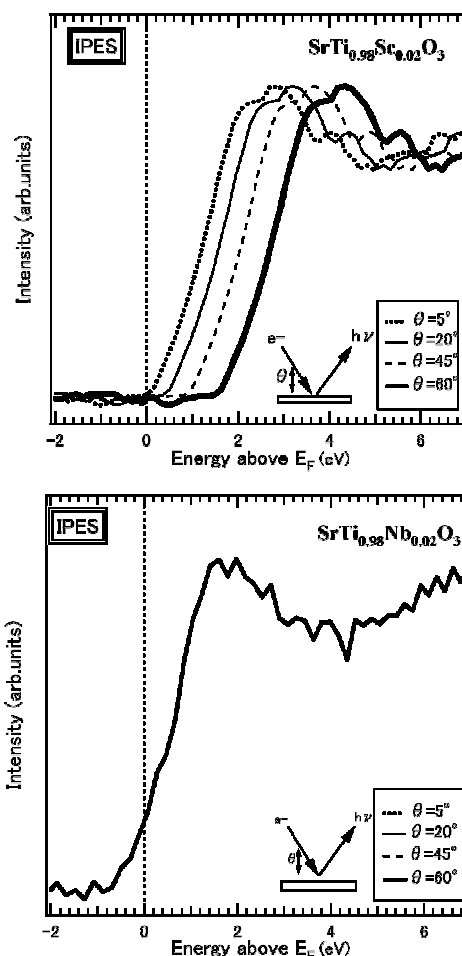
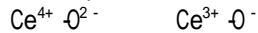


Fig. 1. IPES spectra of (a) p-type SrTiO<sub>3</sub> and (b) n-type

ドーパ CeO<sub>2</sub> について測定した。その一例として、共鳴電子分光 (RPES) の結果を Fig. 2 に示す。Ce4f 伝導帯と O2p 価電子帯が混成した表面準位が形成され、表面においては



による原子価揺動が顕著に現れ、Ce<sup>3+</sup>/Ce<sup>4+</sup> の混合原子価状態が表面で安定となることを見出した。これが表面準位としてバンドをクランプしているものと考えられる

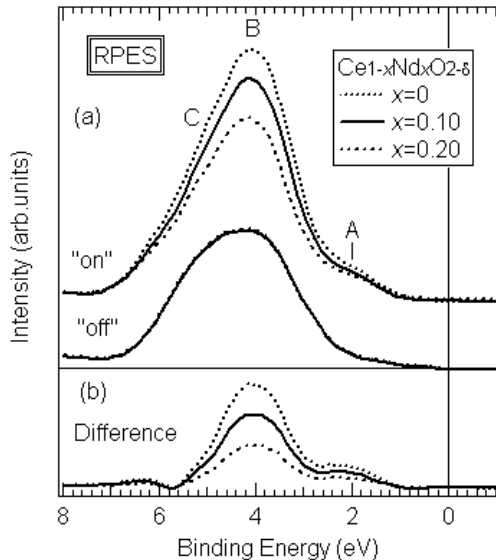
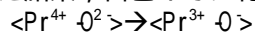


Fig. 2 O1s XAS spectra of Ce<sub>1-x</sub>Nd<sub>x</sub>O<sub>2.8</sub>.

のヘテロ界面で見られる電子構造については、ヘテロ界面で発生する電荷移動のアンバランスから生じた過剰電子が伝導帯まで軌道を占有するために表面準位を生成すると考えることで合理的に説明できる。

### (2) ヘテロ接触界面の電子構造と電気化学特性

BaPr<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>O<sub>3</sub> について電気化学特性を評価し、その結果ホールとプロトンの混合伝導体であることが明らかとなった。この物質の電子構造を測定した結果、自己イオン化反応:



による Pr<sup>3+</sup> の生成と生成した電子 ホールペアの強い相互作用による特異な電子構造であることを明らかにした。

Pt を溶解した Gd-ドーパ CeO<sub>2</sub> について、低温での還元処理により粒界近傍の固溶したサイトでのみ Pt が分散し、このとき Pt が Pt<sup>0</sup> と Pt<sup>2+</sup> の 2 つの状態で存在していることを光電子分光により確認した。また、酸化・還元と雰囲気を変化させた際の重量変化からイオン種の拡散係数の相違と析出挙動を検討した結果、この系における PtO<sub>2</sub> の熱力学的量は大幅に低下して酸化物が安定に存在している

ことがわかった。導電率測定から、粒界近傍にのみ Pt を析出させた試料において、イオン伝導度が向上した。これは、Pt が酸化物中で還元されることで、その近傍に酸素空孔が注入されることになり、空乏層を解消しているためと推定できる。

なお、粒界での特性が伝導特性に大きく影響を与えていることから、ナノ粒子酸化物バルク体による測定が有効であり、ソフト化学的低温合成法と室温における超高压プレスを行うことで、粒径を 10nm 以下のままで酸化物緻密体を形成する方法を確立したことも成果の一つである。このことで、粒界というヘテロ界面に形成される空間電荷層の役割を顕在化させることが可能となった。

### (3) 電気化学的分極状態下における電子分光測定

Cu<sub>2</sub>S を電解質に用いた二端子ギャップ型原子スイッチでは、電圧印加によって少数キャリアであるイオン移動が生じ、不正比性変調を起こす。また、ブロッキング電極となる電極近傍での急峻な変化を示す電位分布と Cu 過飽和 (不定比性) の形成が電気化学的測定により明らかとなった。電極/電解質ヘテロ界面近傍での電子構造の外部電圧印加による変化を実験的に直接的な観察を行うため、

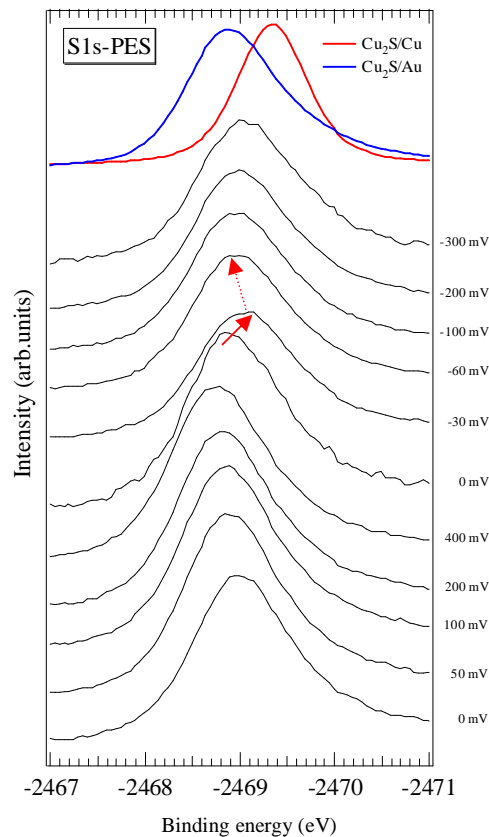


Fig.3 HX-PES spectra of S1s under bias condition

硬 X 線光電子分光法 (HX-PES) により in-situ

分極実験を行った。S1s のスペクトルの変化を Fig. 3 に示す。定電位分極により、ピーク位置のシフトが起こり、吸収ピーク幅のブロード化が観察された。これらの変化は、Cu<sub>2</sub>S 中の不定比性変化による化学シフトと減衰定数の変化によるものと考えられる。また、-30mV の分極で前後でのピーク位置のシフトに異常がみられた。これは、電解質内で Cu 析出による過飽和度の緩和によると推定している。このように電気化学的に界面状態を制御しながらその影響を分光学的手法で観察する方法を確立した。

#### 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 24 件)

1. Y. Matsushita, F. Izumi, K. Kobayashi, N. Igawa, H. Kitazawa, Y. Oyama, S. Miyoshi and S. Yamaguchi, "Powder neutron diffraction of La-apatite under low temperature", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 600(2009)319-321 査読有。
2. T. Tsuchiya, Y. Oyama, S. Miyoshi, and S. Yamaguchi, "Nonstoichiometry induced carrier modification in gapless type atomic switch device using Cu<sub>2</sub>S mixed conductor", Applied Physics Express, 2(2009)055002 査読有。
3. K. Kobayashi, Y. Matsushita, N. Igawa, F. Izumi, C. Nishimura, S. Miyoshi, Y. Oyama, S. Yamaguchi, "Water-based sol-gel synthesis and crystal structure refinement of lanthanum silicate apatite", Solid State Ionics, 179(2008)2209-2215 査読有。
4. R. B. Cervera, Y. Oyama, S. Miyoshi, K. Kobayashi, T. Yagi, S. Yamaguchi, "Structural study and proton transport of bulk nanograined Y-doped BaZrO<sub>3</sub> oxide protonics materials", Solid State Ionics, 179(2008)236-242 査読有。
5. Shu Yamaguchi, "Main group oxides: making the transition", Nature Materials, 7(2008)353-354 査読有。
6. R. B. Cervera, Y. Oyama, and S. Yamaguchi, "Low temperature synthesis of nanocrystalline proton conducting BaZr<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3</sub> by sol gel method", Solid State Ionics 178(2007)569-574 査読有。
7. S. Mimuro, S. Shibako, Y. Oyama, K. Kobayashi, T. Higuchi, S. Shin, and S. Yamaguchi, "Proton incorporation and defect chemistry of Yb-doped BaPrO<sub>3</sub>", Solid State Ionics, 178(2007)641-647 査読有。
8. Y. Oyama, S. Hirooka, K. Kobayashi, and S. Yamaguchi, "Phase stability of cerium species in aqueous solutions effected by water activity", 815-820 (2006), Proceedings of the 16th Iketani Conference, Masuko Symposium. 査読無。
9. R. B. Cervera, Y. Oyama, and S. Yamaguchi, "Nanoceramics and thin films of proton conducting BaZr<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3</sub> synthesized via sol-gel method", 883-888 (2006), Proceedings of the 16th Iketani Conference, Masuko Symposium. 査読無。
10. T. Tsuchiya, Y. Oyama, K. Terabe, and S. Yamaguchi, "Electrochemical analysis and SPM investigations of Solid Electrochemical Reaction in atomic switch using Cu<sub>2</sub>S ion/hole mixed conductor", 889-894 (2006), Proceedings of the 16th Iketani Conference, Masuko Symposium 査読無。
11. S. Mimuro, S. Shibako, K. Kobayashi, Y. Oyama, and S. Yamaguchi, "Defect chemistry of proton-hole mixed conducting oxides Yb-doped BaPrO<sub>3</sub>", 889-894 (2006), Proceedings of the 16th Iketani Conference, Masuko Symposium, 査読無。
12. T. Higuchi, T. Tsukamoto, H. Matsumoto, T. Shimura, K. Yashiro, T. Kawada, J. Mizusaki, S. Shin, S. Yamaguchi, T. Hattori, "Electronic Structure of Protonic Conductor BaCe<sub>0.90</sub>Y<sub>0.10</sub>O<sub>3</sub>", Solid State Ionics, 176, 2967-2970 (2005) 査読有。
13. T. Higuchi, T. Tsukamoto, N. Sata, S. Yamaguchi, S. Shin, T. Hattori, "Electronic Structure of Protonic Conductor SrCeO<sub>3</sub>-SrZrO<sub>3</sub> Mixed Thin Film", Solid State Ionics, 176, 2963-2966 (2005) 査読有。
14. T. Higuchi, T. Tsukamoto, H. Matsumoto, T. Shimura, K. Yashiro, T. Kawada, J. Mizusaki, S. Shin, T. Hattori, "Electronic Structure of Protonic Conductor SrZr<sub>0.90</sub>M<sub>0.10</sub>O<sub>3</sub> (M=Y<sup>3+</sup>, Sc<sup>3+</sup>) Probed by Soft X-Ray Spectroscopy", Solid State Ionics, 176, 2435-2438 (2005) 査読有。
15. T. Higuchi, S. Yamaguchi, S. Shin, T. Hattori, T. Tsukamoto, "Electronic Structure of Protonic Conductor

- SrTi<sub>0.98</sub>Sc<sub>0.02</sub>O<sub>3</sub> Probed by Soft X-ray Spectroscopy”, Jpn. J. Appl. Phys. 43, 285-286 (2005) 査読有
16. H. Matsumoto, T. Shimura, T. Higuchi, H. Tanaka, H. Iwahara, K. Katahira, T. Otake, T. Kudo, K. Yashiro, A. Kaimai, T. Kawada, J. Mizusaki, “Protonic-Electronic Mixed Conduction and Hydrogen Permeation in BaCe<sub>0.9-x</sub>Y<sub>0.1</sub>Ru<sub>x</sub>O<sub>3</sub>.”, J. Electrochemical Society, 152, A488-492 (2005) 査読有
  17. T. Higuchi, Y. Tezuka, T. Hattori, S. Yamaguchi, S. Shin, T. Tsukamoto, “Unoccupied Electronic State of SrTi<sub>1-x</sub>Nb<sub>x</sub>O<sub>3</sub> Observed by Inverse-Photoemission Spectroscopy”, Jpn. J. Appl. Phys., 43, 7623-7624 (2004) 査読有
  18. T. Higuchi, S. Yamaguchi, K. Kobayashi, T. Hattori, A. Fukushima, S. Shin, T. Tsukamoto, “Electronic Structure of Ce<sub>1-x</sub>Nd<sub>x</sub>O<sub>2</sub>. Probed by Soft X-Ray Spectroscopy”, Jpn. J. Appl. Phys., 43, L1463-L1465 (2004) 査読有
  19. N. Yamada, Y. Oyama, T. Higuchi, S. Yamaguchi, “Fabrication of CeO<sub>2</sub> Thin Film on Quartz Glass and MgO(100) by Electron Beam Evaporation”, Solid State Ionics, 172, 293-297(2004) 査読有
- [学会発表](計 147 件)
1. 菊池健夫, 三好正悟, 三室伸, 尾山由紀子, 樋口透, 山口周, 「アクセプターおよびドナーをドーピングした BaPrO<sub>3</sub> の電気輸送特性」, 固体化学の新しい指針を探る研究会 若手研究者による研究発表会, 東京工業大学, 2009 年 3 月 18 日.
  2. 田丸奏, 菊池健夫, 三室伸, 三好正悟, 樋口透, 小林清, 尾山由紀子, 幸埴, 山口周, 「Ba(Pr,M)O<sub>3</sub> (M=Yb, Zr)におけるイオン・電子伝導特性と欠陥・電子構造」, 第 34 回固体イオニクス討論会, 東京大学生産技術研究所, 2008 年 12 月 4 日.
  3. K. Yoshimura, S. Miyoshi, Y. Oyama, S. Yamaguchi, “Chemical Thermodynamics of Pt-(Ce,Gd)O<sub>2</sub> Mixed System”, PRIME 2008 (2008 年電気化学日米合同大会) 214th ECS Meeting, Honolulu, Hawaii, 13 October, 2008.
  4. Y. Akao, T. Fukuda, R. B. Cervera, S. Miyoshi, Y. Oyama, T. Yagi, S. Yamaguchi, “A possible proton conduction in nanograined Y-doped ZrO<sub>2</sub> and Yb-doped CeO<sub>2</sub>”, The 2008 Korea-Japan-China SOFC Symposium, Pohang, Korea, 18 September, 2008.
  5. S. Miyoshi, T. Kikuchi, S. Mimuro, T. Higuchi, K. Kobayashi, Y. Oyama, S. Shin, S. Yamaguchi, “Defect Chemical, Electronic and Transport Properties of Doped BaPrO<sub>3</sub>”, The 14th International Conference on Solid State Protonic Conductors (SSPC-14), Kyoto, 8 September, 2008.
  6. 土屋敬志, 三好正悟, 尾山由紀子, 山口周, 「抵抗変化型不揮発メモリ(ReRAM)の動作メカニズムに関する固体電気化学的解析」, 電気化学 75 回大会, 山梨 2008 年 3 月 30 日.
  7. 三室伸, 樋口透, 小林清, 尾山由紀子, 幸埴, 三好正悟, 山口周, 「Yb をドーピングした BaPrO<sub>3</sub> の電子輸送特性と欠陥・電子構造」, 第 33 回固体イオニクス討論会, 名古屋, 2007 年 12 月 8 日.
  8. 三室伸, 樋口透, 小林清, 尾山由紀子, 幸埴, 三好正悟, 山口周, 「Yb をドーピングした BaPrO<sub>3</sub> の電子輸送特性と電子構造」, 2007 年電気化学会秋季大会, 東京, 2007 年 9 月 20 日.
  9. S. Yamaguchi, T. Tsuchiya, Y. Oyama, K. Terabe, T. Hasegawa, “Development of Nonstoichiometry-Induced Carrier Modification Device Based on Nanoionics Principle”, Materials Science & Technology 2007 (MS&T'07), Detroit, 20 September, 2007.
  10. S. Mimuro, K. Tanaka, Y. Oyama, K. Kobayashi, S. Yamaguchi, “Simultaneous Measurements of Electrical Conductivity and Seebeck Coefficient in YB<sub>3+</sub>-Doped BaPrO<sub>3</sub>”, Materials Science & Technology 2007 (MS&T'07), Detroit, 17 September, 2007.
  11. T. Tsuchiya, Y. Oyama, S. Yamaguchi, “Anti-Schottky Type Rectification at Metal/Mixed Conductor Hetero-Interface Based on Nonstoichiometry Induced Carrier Doping”, 16th International conference on Solid State Ionics (SSI-16), Shanghai, 5 July, 2007.
  12. R. B. Cervera, Y. Oyama, K. Kobayashi, S. Yamaguchi, “Synthesis and characterization of Y-doped BaZrO<sub>3</sub> oxide protonic nanoceramics and thin films by sol-gel method”, The 5th Petite Workshop on Defect Chemical Nature of Advanced Materials, Kyoto, 18 November 2006.
  13. S. Mimuro, S. Shibako, K. Kobayashi, Y. Oyama, S. Yamaguchi, “Defect Chemistry of Proton-hole Mixed Conducting Oxides Yb-doped BaPrO<sub>3</sub>”, The 5th Petite Workshop on Defect

- Chemical Nature of Advanced Materials, Kyoto, 18 November 2006.
14. Y. Oyama, S. Hirooka, K. Kobayashi, S. Yamaguchi, "Phase stability of cerium species in aqueous solutions effected by water activity", The 16th Iketani Conference, Masuko Symposium, Tokyo, 13 November 2006.
  15. R. B. Cervera, Y. Oyama, S. Yamaguchi, "Nanoceramics and thin films of proton conducting  $BaZr_{0.8}Y_{0.2}O_3$ -synthesized via sol-gel method", The 16th Iketani Conference, Masuko Symposium, Tokyo, 13 November 2006.
  16. S. Shibako, S. Mimuro, K. Tanaka, Y. Oyama, S. Yamaguchi, "Hole-proton mixes conductivity in  $Yb^{3+}$  doped  $BaPrO_3$ ", Materials Science & Technology 2006 Conference and Exhibition (MS&T '06), Cincinnati, USA, 16 October 2006.
  17. R. B. Cervera, Y. Oyama, S. Yamaguchi, "Sol-gel synthesis of  $BaZr_{0.8}Y_{0.2}O_3$ -proton conducting ceramics and thin films", 13th Solid state proton conductors conference (SSPC-13), St Andrews, Scotland, UK, 5 September 2006.
  18. T. Higuchi, T. Tsukamoto, T. Hattori, S. Shin, Y. Oyama, S. Yamaguchi, "Mixed Valence State in the surface of  $Ce_{1-x}Nd_xO_2$ -probed by soft X-ray spectroscopy", 13th Solid state proton conductors conference (SSPC-13), St Andrews, Scotland, UK 5 September 2006.
  19. Y. Oyama, A. Kojima, K. Tanaka, S. Yamaguchi, "Phase relation in  $BaO-ZrO_2-LnO_{1.5}$  ( $Ln=Y, Sc$ ) system and chemical stability of doped  $BaZrO_3$ ", 13th Solid state proton conductors conference (SSPC-13), St Andrews, Scotland, UK, 5 September 2006.
  20. T. Higuchi, S. Okada, S. Shimizu, T. Hattori, T. Tsukamoto, S. Yamaguchi, "Proton conduction of  $SrZr_{1-x}Y_xO_3$  thin film on  $SrTiO_3$  substrate prepared by pulsed laser deposition", 13th Solid state proton conductors conference (SSPC-13), St Andrews, Scotland, UK, 5 September 2006.
  21. T. Higuchi, S. Yamaguchi, K. Kobayashi, T. Hattori, S. Shin, T. Tsukamoto, "Electronic Structure in the Surface State of  $Ce_{1-x}Nd_xO_{2-\delta}$  Probed by Resonant-Photoemission Spectroscopy", SSI-15, Barden-Barden, Germany, 10 July,

2005.

〔図書〕(計3件)

1. 山口 周,「高温ナノイオニクスが描く夢の技術」,ナノイオニクス 最新技術とその展望,シーエムシー出版,18(2008).
2. 山口周,樋口 透,尾山由紀子,三好正悟,「電子分光法による nano-NEMCA 現象の追及」,ナノイオニクス 最新技術とその展望,シーエムシー出版,144-155(2008).
3. 樋口 透,塚本桓世,山口 周,辛 埴,服部武志,「ペロブスカイト型プロトン導電体の分光学的解析」,マテリアルインテグレーション,7,18,28-36(2005)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.ionics.t.u-tokyo.ac.jp/tokutei/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

山口 周 (YAMAGUCHI SHU)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号：10182437

### (2)研究分担者

辛 埴 (SHIN SHOKU) [2004-2005年度]  
 東京大学・物性研究所・教授  
 研究者番号：00162785

樋口 透 (HIGUCHI TOURU)  
 東京理科大学・理学部・助教  
 研究者番号：80328559

尾山 由紀子 (OYAMA YUKIKO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・助教  
 研究者番号：00345373

田中 和彦 (TANAKA KAZUHIKO)

[2007年度]

東京大学・大学院工学系研究科・技術職員  
 研究者番号：20456156

小林 清 (KOBAYASHI KIYOSHI)

[2008年度]

物材機構・燃料電池センター・主任研究員  
 研究者番号：90357020

三好 正悟 (MIYOSHI SHOGO) [2008年度]  
 東京大学・大学院工学系研究科・助教  
 研究者番号：30398094

### (3)連携研究者

田中 和彦 (TANAKA KAZUHIKO)

[2008年度]

東京大学・大学院工学系研究科・技術職員  
 研究者番号：20456156