

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目： 基盤研究 (B)
 研究期間： 2007 ~ 2008
 課題番号： 19340084
 研究課題名 (和文) 原子レベルで平坦な強誘電体の清浄表面の形成とその伝導層の物性解明
 研究課題名 (英文) Formation of atomically flat clean surface of ferroelectric and the investigation of the properties of the surface
 研究代表者
 渡部 行男 (Yukio Watanabe)
 九州大学・理学研究院・教授
 研究者番号： 40274550

研究成果の概要：

申請者らが、世界に先駆けて発見した、強誘電体の表面層の基礎物性とこの現象が、最も顕著に現れる強誘電体の基礎である分域構造を解明することを目的として以下の研究を行った。

これまでの実験では、清浄化と平坦化の不十分さのため、表面電子の捕獲がおこり、このために本来の電子層の特性が得られていないと考えた。このため、まず、これまで報告がない原子レベルに平坦な強誘電性単結晶(BaTiO_3)を形成した。次に、この表面を清浄化し、さらに原子レベルで清浄さを検出する方式を確立した。この原理は、超清浄な表面の化学結合の活性を超高真空原子間力顕微鏡で測定することである。この表面について、のような表面の形状(AFM)と、圧電応答顕微鏡(PFM)による分域構造、電位分布(KFM)を超高真空中で測定(図7)すると、従来の理論の50分の1程度の電位しかなく、従来の分域理論では説明できないことがわかった。一方、これと独立に、従来の理論の枠組みを用いて、実験的分域構造を定量的に説明すること検討したところ、上記実験と独立に、外因的でない電荷の遮蔽により強誘電体の電荷が50分の1程度に遮蔽する機構が必要であること示した。これらの実験と理論はほぼ定量的に一致し、前述の強誘電体の表面電子層の結果を支持した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2008年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物性 II

キーワード：誘電体 表面 分域 電子層 ナノ物性 分極 2次元電子

1. 研究開始当初の背景

強誘電体は、自発分極と呼ばれる電気的な分極をもつ絶縁体である。静電気学的には、強誘電体=絶縁体+表面電荷と見なせるので、巨視的には、表面を除いて通常の絶縁体と差がないとも言える。

には不安点と考えられるhead-to-headまたはtail-to-tail分域も報告例がある。最近、分極から生じる電場（反電場）を考えると180°分域は不安定で、90°分域をつなげたような環状分域（磁性体では知られている）が存在するという第一原理計算を応用した理論結果もある。

これまでに、述べた強誘電体の分域は、強磁性体のそれと同様に理解されている。しかし、電磁気学の原理に戻れば、両者には自由電荷の有無という違いがあり、強誘電体では、磁性体のように考えてはいけない点がある。

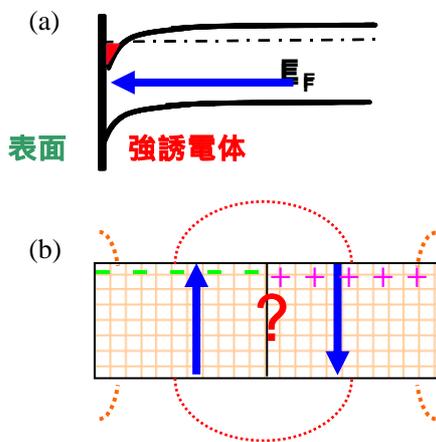


図1(a) 自発分極で電子が蓄積する状態の様子バンド, (b)これを考慮した強誘電体分域モデル記号は上記と同様,-は電子+はホール。分域の大きさによるエネルギー差は、従来理論より小さくなる。

2. 研究の目的

報告者らは、この問題を理論的に指摘し¹⁾、検証として、大気中の不純物等で電氣的遮蔽が起こらない超高真空では、強誘電体の表面に電子層ができることを世界で初めて示した²⁾。即ち、もし、強誘電体の分極が十分大きく、それを遮蔽するものがない場合には、強誘電体は電界効果で自分の電子分布を変えることにより遮蔽を行った方が、安定であると結論した(図1a)。この立場では、強誘電体の分域は、図1bのように改訂される。

3. 研究の方法

前述のように、分域理論は、汚れや水分のような外部遮蔽がないとして構築されているにもかかわらず、このような実験は報告されていない。そこで、本研究では、特に180°分域に注目して、理論的および実験的に再検討を行った。上記の理由で、実験上には、超高真空の清浄表面を使うことが必須であり、その特性を研究した。

4. 研究成果

強誘電体の自発分極が表面に垂直で表面が十分広い場合、分極電荷が正負に並ぶ180°分域(cc分域)を形成して安定すると考えられている(図1(a))³⁾⁻⁵⁾。この理論は磁性体のKittel理論を強誘電体に適用し、分極電荷から生じる電場（反電場）と分域壁エネルギーのバランスで説明する。このため、磁性の分域理論と同様に、遮蔽電荷が存在しないことを要請して定式化する。静電ポテンシャル ϕ を用いた定式化 $\epsilon_x \partial^2 \phi / \partial x^2 + \epsilon_z \partial^2 \phi / \partial z^2 = 0$ では、強誘電体の線形誘電率 ϵ_x, ϵ_z を用いているが、その整合性の報告はないので、これを理論的に検討した。

まず、原子レベルで表面の格子が制御した試料を用意した。また、固体表面は、超高真空の保持のみでは1-3nmの有機物系の付着物に覆われているので、通常、超高真空中で高温加熱し清浄化する。強誘電体酸化物では、表面の酸素が欠損するため、この問題を解決しながら、吸着物の除去をした。

この実験的検証として、原子レベルに平坦で、原子レベルに清浄な表面を清浄化した BaTiO₃ 単結晶を超高真空中で測定し、分域構造を同時に測定しながら、電位分布を測定したところ、報告者らの理論の要求どおりの遮蔽があることがわかった。この結果は、報告者らの、理論と実験による、表面電子層と一致する。

参考文献

- ¹⁾Y. Watanabe, Phys. Rev. B57, 789 (1998)
²⁾ Y. Watanabe et al., Phys. Rev. Lett. 86, 332 (2001)
³⁾ T. Mitsui and T. Furuuchi, Phys. Rev. 90, 193(1953).
⁴⁾ A. Kopal et al., Ferroelectr. 223, 267(1999).
⁵⁾ S. K. Streiffer et al., Phys. Rev. Lett. 89, 06760
Ohta, S. Morita, and M. Suzuki, Phys. Rev. B56, 9834

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 41 件)

1. **Y. Watanabe**, Shigeru Kaku, Daisuke Matsumoto, Yosuke Urakami, and S.W. Cheong, Investigation of Clean Ferroelectric Surface in Ultra High Vacuum (UHV): Surface Conduction and Scanning Probe Microscopy in UHV, *Ferroelectrics* 379(1) 157 (2009).
2. D. Matsumoto, Y. Urakami, T. Arai and **Y. Watanabe**, S. W. Cheong, Carrier Generation at Ferroelectric Phase Transitions evidenced in Conductivity-Overshooting, *Ferroelectrics*,369 (1) 18 - 21 ,2008
3. S. Kaku and **Y. Watanabe**, Conductor-Insulator transition-like phenomenon in thin BaTiO₃ Film heterostructures, *Ferroelectrics*, 370(1), 39 - 45 , 2008

4. **Y. Watanabe**, D. Matsumoto, Y. Urakami, A. Masuda, and S.W. Cheong, Bipolar Carrier (e-/h+) Layer on Clean Surface of Insulating BaTiO₃ Crystal Intrinsic to Ferroelectrics, *Ferroelectrics*,367 (1) 23 - 37, 2008.
5. **Y. Watanabe**, Status of Surface Electron/Hole Layer on Oxide Ferroelectrics, *Ferroelectrics*, 355, p13 – 18 (2007).
6. S. Kaku, **Y. Watanabe**, Conductance Oscillation in BaTiO₃ Films, *Ferroelectrics*,355, p99 - 102 (2007).
7. K. Yamada, S. Kaku, M. Yamato , D. Matsumoto and **Y. Watanabe**, The Relaxation of Reproducible Resistance Modulations in a Au/(Pb,La)(Zr,Ti)O₃/(La,Sr)₂CuO₄ Thin Film in High Temperatures, *Ferroelectrics*, 355, p70 – 73 (2007).
8. Y. Urakami, M Yamato, **Y. Watanabe**, Conductance Peaking in Quasi-Equilibrium Ferroelectrics, *Ferroelectrics*, 355, p 136 - 139 (2007).
9. **Y. Watanabe**, S. Kaku, M. Yamato, D. Matsumoto, Switching in View of Electron Hole Dynamics in Ferroelectric Related Oxides, *J. Korean Phys. Soc.*,51 (92S), 815-818 (2007).
10. D. Matsumoto, M.Yamato, Y. Urakami and **Y. Watanabe**, Electrical Conductivity of Insulating SrTiO₃ and LaGaO₃ at Phase Transitions, *Ferroelectrics*,348, 58-61, (2007).
11. **Y. Watanabe** and S. Kaku, Temperature-Induced Insulator-Metal- Insulator Transitions and Conductance Oscillations in Epitaxial BaTiO₃ Films, *Ferroelectrics*, 348:62–66, (2007).
12. S. Balamurugan, K. Yamaura, **Masao Arai**, E. Takayama-Muromachi, Charge transport and ferromagnetic critical behavior of the correlated 3d perovskite Sr_{1-x}Ce_xCoO₃, Phys. Rev. B76 (2007) 014414
13. Y. X. Wang, **Masao Arai** First-principles study of the (001) surface of cubic SrZrO₃, Surf. Sci. 601 (2007)4092
14. K. Yamaura, **Masao Arai**, A. Sato, A. B. Karki, D. P. Young, R.Movshovich, S. Okamoto, D. Mandrus, and E. Takayama- Muromachi, NaV₂O₄: A Quasi-1D Metallic Antiferromagnet with Half-Metallic Chains, Phys. Rev. Lett. 99 (2007)196601-1-4
15. K. Yamaura, Y. Shirako, H. Kojitani, **M. Arai**, D. P. Young, M. Akaogi, M. Nakashima, T. Katsumata, Y. Inaguma and E.

- Takayama-Muromachi, Synthesis and Magnetic and Charge-Transport Properties of the Correlated 4d Post-Perovskite CaRhO_3 , *J. Am. Chem. Soc.* **131** (2009) 2722-2726
16. "The Role of Proton-Proton Interaction in $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ -type Crystals", Yoshihiro Ishibashi and **Makoto Iwata**: *Journal of Physical Society of Japan* **78** (2009) 014704/1-3.
17. "Pressure-modulated free energy change in piezoelectric and dielectric responses for relaxor ferroelectric solid solution $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 binary system single crystal and ceramics near a morphotropic phase boundary composition", Naohiko Yasuda, Satoshi Suzuki, Md.M.Rahman, Hidehiro Ohwa, Mituyoshi Matsushita, Yohachi Yamashita **Makoto Iwata**, Hikaru Terauchi, and Yoshihiro Ishibashi: *Journal of Applied Physics* **103** (2008) 064509-(1-5).
18. "Relationship between MPB and Emergence of Structural Boundary in Cubic Phase of Pb-Based Perovskite-Type Solid Solutions PZN and PZN-PT", Yoshihiro Terado, Chikako Moriyoshi, Yoshihiro Kuroiwa, Yasuhisa Yamamura, and **Makoto Iwata**: *Transactions of the Materials Research Society of Japan* **33**, 1 (2008) 47-51.
19. "Comments on the Critical End Point in Relaxor Ferroelectrics under the Applied Field", **Makoto Iwata**, Zdravko Kutnjak, Yoshihiro Ishibashi, and Robert Blinc: *Journal of Physical Society of Japan* **77**, 6 (2008) 065003/1-2.
20. "Lattice Vibrations in Finite Systems with the Boundary Conditions Given with the Extrapolation Length I. Continuum Model", Yoshihiro Ishibashi and **Makoto Iwata**: *Journal of Physical Society of Japan* **78** (2008) 104707-(1-9).
21. "Phase Diagram in $\text{Bi}_{4-x}\text{Sm}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ", **Makoto Iwata**, Akihiro Toya, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, Yoshihiro Ishibashi: *Japanese Journal of Applied Physics* **47** (2008) 7749-7752.
22. "Polarization Reversal Process in $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ with 90° Domain Wall Structure", **Makoto Iwata**, Takuma Morishita, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, and Yoshihiro Ishibashi: *Ferroelectrics* **368** (2008) 36-41.
23. "Polarized Raman Study in $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 Mixed Crystal", **Makoto Iwata**, Yusuke Hasegawa, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, Naoki Wakiya, Hisao Suzuki, and Yoshihiro Ishibashi: *Ferroelectrics* **376** (2008) 74-80.
24. "Exact Expressions for Dielectric Susceptibilities in the Paraelectric Phase of Ferroelectric Superlattices Based on the Ginzburg-Landau Theory", Khian-Hooi Chew, **Makoto Iwata**, Franklin G. Shin, and Yoshihiro Ishibashi: *Integrated Ferroelectrics* **Vol. 100** (2008) 79-87.
25. "Landau Theory of Phase Transition in Pyridinium Tetrafluoroborate Crystal", **Makoto Iwata**, Yoshihiro Ishibashi, and Kiyoshi Deguchi: *Journal of Physical Society of Japan* **77**, 1 (2008) 015001-1-2.
26. "Domains and Domain Walls in Ferroelectric $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ - A System with Biquadratic Order Parameter Coupling -", Yoshihiro Ishibashi and **Makoto Iwata**: *Japanese Journal of Applied Physics* **46**, 1A (2007) pp. 272-275.
27. "Domain Wall Observations and the Phase Transition in $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -8% PbTiO_3 by AFM", **Makoto Iwata**, Kohei Katsuraya, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, Ikuo Suzuki, and Yoshihiro Ishibashi: *Ferroelectrics* **347** (2007) pp. 157-161.
28. "Piezoelectric Properties of Relaxor Ferroelectric Solid Solution Single Crystals PMN-PT and PZN-PT near MPB under Pressures", N. Yasuda, T. Banno, K. Fujita, H. Ohwa, M. Matsushita, Y. Yamashita, **M. Iwata**, and Y. Ishibashi: *Ferroelectrics* **347** (2007) pp. 44-49.
29. "Field-Induced Polarization State and the Phase Transition in $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - Dielectric dispersions and nonlinear dielectric constants -", **Makoto Iwata**, Kohei Katsuraya, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, Ikuo Suzuki, and Yoshihiro Ishibashi: *Japanese Journal of Applied Physics* **46**, 5A (2007) pp. 2991-2994.
30. "In Situ Observation of Polarization Reversal of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ with 90° Domain Walls", **M. Iwata**, T. Morishita, M. Maeda, I. Suzuki, N. Yasuda, and Y. Ishibashi: *Japanese Journal of Applied Physics* **46**, 6A (2007) pp. 3485-3490.
31. "Polarization Reversals with 90° Domain walls in $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ", **Makoto Iwata**, Takuma Morishita, Cheng-Hua Zhao, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, Ikuo Suzuki, Naohiko Yasuda, and Yoshihiro Ishibashi: *J. Korean Phys. Soc.* **51** (2007) 740-743.
32. "Landau-Ginzburg Theory of Phase Transition of Ferroelectric Superlattices", Yoshihiro Ishibashi and **Makoto Iwata**: *Ferroelectrics* **354** (2007) pp. 8-12.
33. "Splitting of the Triggered Phase Transition in $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Mixed Crystals", **Makoto Iwata**, Cheng-Hua Zhao, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, and Yoshihiro Ishibashi: *Japanese Journal of Applied Physics* **46**, 9A (2007)

5894-5900.

34. "Exact Expressions for Some Dielectric Properties of Ferroelectric Thin Films Based on the Tilley-Zeks Model", Yoshihiro Ishibashi, **Makoto Iwata**, and Ahmad M. A. Masleh: Journal of Physical Society of Japan **76**, 10 (2007) 104702/1-8.

35. "Effect of Sintering Temperature on the Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics", Rintaro Aoyagi, **Makoto Iwata**, and Masaki Maeda: Ferroelectrics **356** (2007) pp. 90-94.

36. "Observations of Domains and Polarization Reversals in $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ", **Makoto Iwata**, Takuma Morishita, Cheng-Hua Zhao, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, Ikuo Suzuki, Naohiko Yasuda, and Yoshihiro Ishibashi: Ferroelectrics **355** (2007) pp. 28-36.

37. "Phase Diagram in $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ", **Makoto Iwata**, Cheng-Hua Zhao, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, Ikuo Suzuki, and Yoshihiro Ishibashi: Ferroelectrics **355** (2007) pp. 96-100.

38. "Lattice and Multi-Domain Effects of Piezoelectric Properties of Relaxor Ferroelectric $\text{Pb}[(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.68}\text{Ti}_{0.32}\text{O}_3]$ [PMNT(68/32)] Binary System Single Crystal under Hydrostatic Pressure", N. Yasuda, Md.M.Rahman, S. Suzuki, H. Ohwa, M. Matushita, Y. Yamashita, **M. Iwata**, and Y. Ishibashi: Ferroelectrics **355** (2007) pp. 240-244.

39. "Phase Diagram in $\text{Bi}_{4-x}\text{Nd}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Mixed Crystals", **Makoto Iwata**, Cheng-Hua Zhao, Yuya Suzuki, Rintaro Aoyagi, Masaki Maeda, and Yoshihiro Ishibashi: Japanese Journal of Applied Physics **46**, 10B (2007) 7155- 7158.

40. H.Miyagawa, **G.Oomi**, M.Ohashi, I.Satoh, T.Komatsubara, M.Hedo and Y.Uwatoko, Electronic states of single crystal CeAl_2 near the pressure-induced quantum critical point, Phys.Rev.B **78** (2008) 064403-1-8

41. M.Ohashi, **G. Oomi**, E. Ohmichi, T. Osada, K. Takano, H. Sakurai and F. Itoh, The enhanced negative magnetoresistance of Fe/Tb multilayer at multiextreme conditions, J. Appl. Phys. **104**, 073901-1-4 (2008)

[学会発表](計 31件)

1. **Yukio Watanabe**, Re-examination of Depolarization Instability and Expression of Permittivity, European Meeting on Ferroelectricity 11,2007.09.
2. **Y. Watanabe**, D. Matsumoto, Y. Urakami, Bipolar Carrier (e-/h+) Layer on Clean Surface of Insulating BaTiO_3 Crystal Intrinsic to Ferroelectrics (招待講演), European Meeting on Ferroelectricity 11,2007.09.
3. S. Kaku, **Y. Watanabe**, PTCR-like Property of

Lattice-Mismatched Epitaxial BaTiO_3 Films, European Meeting on Ferroelectricity EMF-11,2007.09.

4. S. Kaku, S. Miyauchi, **Y. Watanabe**, Recurring Insulator-Conductor Transition and Conductance Oscillation in Epitaxial BaTiO_3 Films, European Meeting on Ferroelectricity EMF-11,2007.09.
5. D. Matsumoto, Y. Urakami and Y. Watanabe, Carrier Generation at Ferroelectric Phase Transitions Evidenced in Conductivity-Overshooting European Meeting on Ferroelectricity 11,2007.09.
6. **Yukio Watanabe**, Bipolar Carrier (e-/h+) Layer on Clean Surface of Insulating BaTiO_3 Crystal Intrinsic to Ferroelectrics (招待), IBM Zurich 研究所講演会, 2007.09.
7. **Yukio Watanabe**, Bulk-limited Asymmetric Conduction, IBM Zurich 研究所, 2007.09.
8. **Yukio Watanabe**, Intrinsic Bipolar Carrier Layer on Clean Surface of Insulating BaTiO_3 (招待), Augsburg U. 講演会, 2008.02.
9. **Yukio Watanabe**, Intrinsic Bipolar Carrier Layer on Clean Surface of Insulating BaTiO_3 (招待), Rutgers U. 講演会, 2008.03.
10. **Yukio Watanabe**, Intrinsic Bipolar Carrier Layer on Clean Surface of Insulating BaTiO_3 (招待), Princeton U. 講演会, 2008.03.
11. **Y. Watanabe**, D. Matsumoto, Y. Urakami and S. Kaku, Intrinsic Bipolar Carrier e-/h+ Layer on Clean Surface of Insulating BaTiO_3 (Oral), American Physical Society March Meeting, 2008.03 (New Orleans).
12. **渡部**, はじめに (物理学会シンポ招待), 日本物理学会シンポ 強誘電体分域の測定法の新展開と新しい分域像 (企画提案者), 2008.03. (大阪)
13. **渡部**, 強誘電体 180°分域理論の整合性の検討, 日本物理学会年次大会 (2008年3月)
14. 加来滋, 宮内聡, 根本達也, **渡部行男**, 超高真空原子間力顕微鏡(UHV-AFM)による清浄化 BaTiO_3 表面の観察, 日本物理学会年次大会 (2008年3月) (大阪)
15. 松元大輔, 加来滋, 根本達也, **渡部行男**, BaTiO_3 単結晶の伝導異常と構造との関係, 日本物理学会年次大会 (2008年3月)
16. Y. Watanabe, S. Kaku, D. Matsumoto, Y. Urakami, S. Cheong, Investigation of Properties of Clean Surface of Ferroelectric in UHV (招待講演), RCBJSF-9 (The 9th

Russian-CIS-Baltic- Japan Symposium on Ferroelectricity, 2008.06.15. (Lithuania)

17. **Y. Watanabe**, Reexamination of consistency of 180° domain theory and Its revision, RCBJSF-9 (The 9th Russian-CIS-Baltic-Japan Symposium on Ferroelectricity, 2008.06.15).
18. D. Matsumoto, Y. Urakami and **Y. Watanabe**, Carrier Generation in BaTiO₃ Evidenced in Conductivity-Overshooting, The 7th Korea-Japan Conference on Ferroelectrics, 2008.8.6-9 (Cheju)
19. Shigeru Kaku, Satoshi Miyauchi and **Yukio Watanabe**, Measurement of BaTiO₃ domain structure using ultrahigh vacuum - atomic force microscopy (UHV- AFM), The 7th Korea-Japan Conference on Ferroelectrics, 2008.8.6-9 (Cheju)
20. T. Nemoto and **Y. Watanabe**, Strict measurement of the PTCR effect, 7th Korea-Japan Conference on Ferroelectricity, 2008.8.6-9 (Cheju)
21. 加来滋, 宮内聡, **渡部行男**, 超高真空原子間力顕微鏡による BaTiO₃ 分域の変化の観察, 2008 年日本物理学会秋季大会 (岩手大学)
22. 松元 大輔, 浦上 洋輔, 根本 達也, **渡部行男**, BaTiO₃ 単結晶の表面伝導層の安定性, 2008 年度 日本物理学会秋季大会, 2008.9, 岩手大学
23. **渡部**, 絶縁体における非表面起源のダイオード的電流電圧特性: 背景と定式化, 日本物理学会年次大会 (2008 年 9 月, 岩手)
24. **渡部**, 絶縁体における非表面起源のダイオード的電流電圧特性: 実験との比較, 日本物理学会年次大会 (2008 年 9 月, 岩手)
25. Shigeru Kaku, Daisuke Matsumoto, Daishi Nakahara, Takuya Minakuchi S. W. Cheong and **Yukio Watanabe**, "Potential and piezoelectric-response imaging of 180° domain of atomically ordered clean surfaces of BaTiO₃ single crystals in UHV" (oral), Fundamental Physics of Ferroelectrics 2009 (2009.2.9-12, Williamsburg, Virginia USA)
26. **M. Iwata**, Low Frequency Raman Spectroscopy in Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ Mixed Crystals The 9th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-9) (2008 年 6 月 18 日) (Vilnius, Lithuania)(招待講演)
27. 加来滋, 中原大志, 宮内聡, 水口拓也, 倉岡稔, **渡部行男**, 超高真空原子間力顕微鏡による BaTiO₃ 分域の表面電位変化の観察, 第 64 回日本物理学会年次大会 2009.3 東京 (立教大学)
28. 松元 大輔, 加来 滋, 中原 大志, 水口拓也, 倉岡 稔, **渡部 行男**, 原子レベルに表面を制御したチタン酸バリウム単結晶の表面伝導, 日本物理学会春季大会, 2009.3,

立教大学

29. 中原大志, 加来滋, **渡部行男**, 原子間力顕微鏡と圧電心答顕微鏡による原子ステップと分域の観察, 日本物理学会春季大会, 2009.3, 立教大学
30. **Yukio Watanabe**, Shigeru Kaku, Daisuke Matsumoto, and S.W. Cheong, Potential and piezoelectric response imaging of 180° domain of atomically ordered clean surfaces of BaTiO₃ single crystals in UHV, American Physical Society March Meeting, 2009.03(Pittsburg).
31. **Y. Watanabe**, Space-Charge-Limited Conduction Under Trap Density Gradient Exhibiting Bulk-Limited Diode, American Physical Society March Meeting, 2009.03(Pittsburg).

[その他]

1. 渡部, 超高真空中の清浄な表面をもつ強誘電体の分域構造の研究, 豊田研究報告 No. 61, 119(2008)
2. 渡部, 領域10" シンポジウム報告 " 強誘電体分域の測定法の新展開と新しい分域像 ", 日本物理学会誌63(7), 558(2008).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 行男 (Yukio Watanabe)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号: 40274550

(2) 研究分担者

新井 正男 (Masao Arai)

物質材料研究機構・主幹研究員

研究者番号: 40222723

岩田 真 (Makoto Iwata)

名古屋工業大学・工学系研究科・准教授

研究者番号: 40262886

巨海 玄道 (Gendo Oomi)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号: 00111146

謝辞

IBM Dr. J.G. Bednorz, Princeton 大 Prof. D.C. Tsui の有益なご指摘に深く感謝いたします。

本研究は、上記の共同研究者に加え、博士課程大学院生: 加来滋君 (日本学術振興会特別研究員) 松元大輔君 (日本学術振興会特別研究員) の弛まぬ研究への情熱に支えられてきたものであり、深く感謝いたします。

また、本研究のような未知数の高い研究に、皆様の税金である科研費として多額の配分を頂いたことに厚く感謝申し上げます。この支援により、本研究だけでなく、研究室の学生諸氏の将来の活躍への教育ができたことは、日本学術振興会とその関係する全ての日本国の皆様のお蔭である、心から感謝申し上げます。