

平成 22 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（S）
研究期間：2005 年～2009 年
課題番号：17104004
研究課題名（和文）強誘電性長距離秩序形成と競合するコヒーレント量子ゆらぎダイナミクスの研究
研究課題名（英文）Study of the coherent quantum fluctuations competed with formation of the long-range ferroelectric order
研究代表者 北海道大学・名誉教授 八木 駿郎
(Toshirou Yagi)
研究者番号：30002132

研究成果の概要（和文）

量子常誘電体の光散乱スペクトルの観測から量子ゆらぎのダイナミクスを解明するため、観測に有効な強度のレーザー入射光のもとで極低温を保持できる光学クライオスタットを工夫し、振動数領域と時間領域の分光法を結合した広帯域分光法と組み合わせた。これにより、4K 以下の極低温度を長時間保持し $0\sim 10^{11-12}\text{Hz}$ の広いダイナミックレンジで S/N 比の良いスペクトルを観測できる極低温光散乱分光法が完成した。理論面では量子ゆらぎの質量効果と強誘電性長距離秩序形成の関係が自己無撞着フォノン近似を用いて定量的に明らかにされた。

研究成果の概要（英文）：

For the observation of the dynamical property of the quantum fluctuations, utilizing a newly designed optical cryostat available with intensive incident radiation at ultra-low temperature, we have established an ultra-low temperature spectroscopic system of a wide dynamic range over $0\sim 10^{11-12}\text{ Hz}$ by combination of the time- and frequency domains. A theoretical investigation of the mass-effect on formation of the long-range ferroelectric order has been numerically given by the self-consistent phonon approximation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
17 年度	39,300,000	11,790,000	51,090,000
18 年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
19 年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
20 年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
21 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
総計	76,300,000	22,890,000	99,190,000

研究分野： 数物系科学
 科研費の分科・細目： 物理学・物性 I

キーワード：

- (1) 量子常誘電体 (2) 量子ゆらぎ (3) ソフトモード (4) 極低温光散乱分光
 (5) 時間-振動数結合広帯域分光法 (6) ミリケルビン領域 (7) 同位元素置換相転移 (8) EREC ク
 ライオスタット

1. 研究開始当初の背景

1979年にK.A.MullerとH.Burkardにより、SrTiO₃ (以下STO)の誘電率が4K近傍の極低温領域で、あたかも強誘電性相転移の前駆現象のように振る舞いながら増大し、増大した値のまま0Kに至る現象が報告された。高温での強誘電性相転移は、変位間相互作用による長距離秩序形成と、それを無秩序化する熱ゆらぎとの競合により生じる。両者が釣り合う相転移温度で誘電率が発散的増大を示し長距離秩序としての自発分極が発生する。降温に伴う秩序の形成の進行と共に誘電率は減少し発散型のピークを形成する。STO等でピークを形成しない秩序形成がなされず低温に至っているのは、熱ゆらぎの効果が低減された4K以下の低温領域では、熱ゆらぎに代わり残っている量子ゆらぎが強誘電性長距離秩序形成を妨げているためと考えられる。このように量子ゆらぎが強誘電性の発現を抑制して絶対零度まで強誘電相が生じない現象は量子常誘電性と呼ばれ、巨視的な量子効果が誘電体物性に初めて表れた例として注目を集め、誘電体物性の新しい局面として多くの研究の対象になっている。しかしながら、量子ゆらぎは原子の零点振動に起因するものの、その存在を直接観測した例は無く、その物理的な特性(ダイナミクス)が不明であり、さらにどのような機構によって強誘電性秩序形成が抑制されるかについても未知である。

2. 研究の目的

量子ゆらぎのダイナミクスを解明するためには、中性子や光子などエネルギーと運動量が明確に規定されたプローブを入射して試料からの非弾性散乱を観測し、得られるスペクトルとしてゆらぎの振動数、波長等に関する知見を得ることが有効である。本研究では、レーザー光散乱分光法を用いて量子ゆらぎの光散乱スペクトルを観測し、巨視的量子効果に関与する空間的に相関を持ったコヒーレントな量子ゆらぎのダイナミクスを明らかにすることが目的である。そのためには、未知の量子ゆらぎスペクトルの探索が必要不可欠な目標になる。具体的に量子ゆらぎスペクトルの探索は、(1)熱ゆらぎの効果が充分低減している極低温で、かつ(2)広いダイナ

ミックレンジで行われなければならない。さらに精度の良い解析のためには、(3)充分良いS/N比でスペクトル観測されることが必要である。また、量子ゆらぎのダイナミクスを予想するために、(4)理論的研究も必要である。

3. 研究の方法

量子ゆらぎスペクトルを観測するためには、極低温領域(以下では、量子常誘電体STOの誘電率が飽和状態を示す4K以下の領域を指す)における分光法を確立し、各種フォノンのスペクトルから明確に区別できる未知の、あるいは既知のフォノンスペクトルの未知の形状異常としてアサインが可能であるような光散乱スペクトルを、広いダイナミックレンジで探索しなければならない。そのため、(1)極低温状態における光散乱スペクトルを観測するための「極低温光散乱分光法」の確立、と(2)高振動数領域に有利な振動数分光法と低振動数領域において優れている時間分解分光法を結合した「広帯域分光法」の構築、を主要な実験的アプローチとした。これらの成果(1)と(2)を組み合わせることで未知の量子ゆらぎスペクトルの探索を行うことが本研究の実験計画である。理論的目標としては量子常誘電体で、酸素同位元素¹⁸Oの置換で強誘電性が実現されていることから、(3)変位間相互作用と競合する量子ゆらぎの質量効果を明らかにすることを計画した。

4. 研究成果

(1) 極低温光散乱分光システムの構築

量子ゆらぎスペクトルを精度良く観測するためには以下の2つの条件①と②を満たさなければならない；①試料としての量子常誘電体を極低温領域に保つことで熱ゆらぎの効果を十分に低減すること、一方、スペクトル強度は入射レーザー光強度に比例するのでS/N比の良いスペクトルを観測するためには、②充分な強度のレーザー光を入射すること。しかしながら、条件①と②は互いに相矛盾する。すなわち、①のためには、外部からの熱の流入を厳重に遮断する必要があり、他方で、②の充分な強度の入射レーザー光の照射は試料に多量の熱を供給することになる。これが本課題における最も困難な問題点であった。

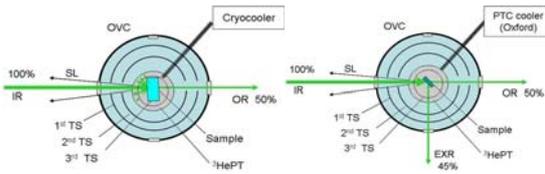


図1. (a) 従来型の極低温光学クライオスタットの構成概念図. (b) EREC型の光学極低温クライオスタットの構成概念図.

IR: incoming radiation, OR: outgoing radiation, SL: scattered light, TH: thermal shield, OVC: optical vacuum chamber, $^3\text{HePT}$: ^3He pot, EXR: extra radiation.

この問題に対処するため、試行錯誤の後、レーザー照射による侵入熱の遮断に工夫を凝らした新しい型の光学クライオスタット(余剰輻射排出型、**Extra Radiation Exhaust Cryostat, EREC**)を独創的な着想に基づき発案して、設計・製作した。このクライオスタットの完成により、十分な強度の入射光を照射しても試料の極低温状態を破壊しない状況を得ることが出来た。これにより前述の①と②の矛盾を解決でき、極低温を保ちながら精度の良い光散乱スペクトルを観測することが可能になった。図1(a)の従来の型の極低温用の光学クライオスタットの構成概念と比較して、図1(b)にEREC型極低温光学クライオスタットの構成概念を示す。図1(a)に示されるように、従来の光学クライオスタットでは、入射レーザー光はクライオスタットに入射後試料の表面反射その他の原因により、極低温を実現すべき $^3\text{HePT}$ の近傍に熱エネルギーを与え、そこに設置される試料に温度上昇をもたらしていた。本研究にて校正済パワーメータにより測定されたその定量的な割合は、図1(a)に示すように入射エネルギーのうち透過するものは約50

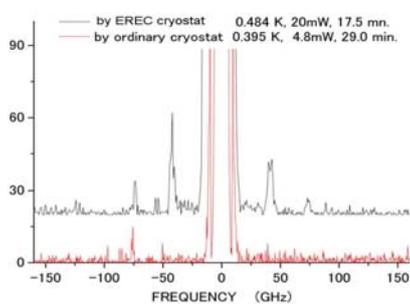


図2. EREC型光学クライオスタットと従来型のものによって観測されたSTOの1K以下の極低温における光散乱スペクトルの比較.

(黒線) EREC型光学クライオスタットによる、(赤線) 従来型光学クライオスタットによるスペクトル。

%, つまり内部散逸は残りの入射エネルギーの約50%であった。この散逸されるエネルギーによる温度上昇は試料が4K以下の極低温に保持される時間を短縮する。一方図1(b)のEREC型は、これらの輻射がクライオスタット内で散逸しないように鏡面反射を利用してクライオスタット外に排出する。実測の結果、入射光エネルギーのうち約45%が余剰輻射としてクライオスタット外部に排出された。つまり、内部散逸されるエネルギーは10分の1になった。これによりEREC型光学クライオスタットは試料温度の上昇を大きく低減することが出来た。したがって入射光強度を増加することが可能となり、十分な強度のスペクトルを観測することが出来、極低温分光法が実現した。さらに長時間の極低温保持によりスペクトル強度積算時間を増加させることも出来、総合的に優れたS/Nのスペクトルを観測することに成功した。その結果を図2に、従来の型の光学クライオスタットを用いて観測された例とEREC型光学クライオスタットを用いて観測された例を比較して示す。ここで示された例はいずれも1K以下の極低温領域において観測されたものである。図2の結果からも明らかのようにEREC型光学クライオスタットにより、課題の一つ、極低温におけるダイナミクスの研究に必要な不可欠な極低温光散乱分光法が完成した。

(2) 広帯域分光法の構築

EREC型光学クライオスタットの完成で実現した極低温光散乱分光法は、広帯域ダイナミックレンジをもつことで量子ゆらぎスペクトルの探索が可能になる。このために当研究グループに研究蓄積のある有効な方式として

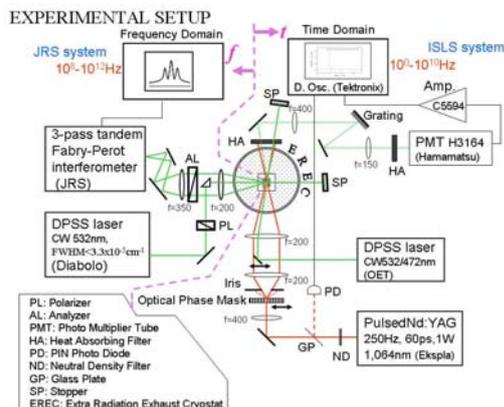


図3. 広帯域分光システム. 中央に EREC 型クライオスタットが配置され、紫点線から左側が振動数分光システム、右側が時間領域のパルス誘導光散乱システムを示す。

、振動数領域の分光法に、現在のところ最もダイナミックレンジの広いサンダーコック型3パスタンデム型干渉分光計を当補助金にて購入して用い、時間領域の分光法としてパルス誘導光散乱システムを自作構築し、両者を結合して $10^0 \sim 10^{11-12}$ Hzのダイナミックレンジをカバーする広帯域分光システムを構築した。その構成は図3に示すとおりである。

本研究目的に不可欠な極低温広帯域分光システムが、新型光学クライオスタットERECと振動数領域の分光法と時間領域の分光法の結合としての広帯域分光システムとの組み合わせとして具体的に実現された。実際の実験構成を図4に示す。

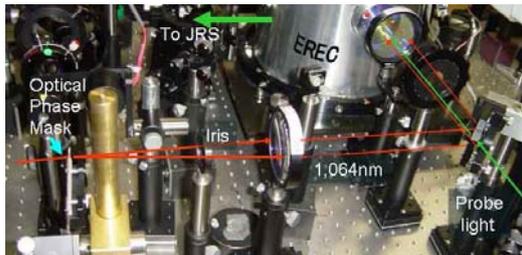


図4. 広帯域分光システムの EREC クライオスタット周辺の光学配置。太い緑色矢印はサンダーコック型3パスタンデム型干渉分光計の光軸を示し、赤い矢印は波長 1,064nm の励起用パルス光、細い緑色矢印はプローブ用 CW 光のパスを示す。

完成した広帯域分光システムは1台の実験除振台上にコンパクトに構築されており、通常の2部屋程度を使用するような大規模なシステムとして構築される場合に比較して、コンパクト化に成功した世界初の例である。

(3) スペクトル光学活性化のための試料の局所対称性制御と単分域化

未知の励起状態としての量子ゆらぎスペクトルが観測可能であるためには、その振動状態がラマン活性でなければならないが、このモードの対称性は不明である。そのため、電場を印可することで電歪結合による歪みを加え、局所的な対称中心の喪失で一次光散乱過程の選択則により光学活性化を誘起する必要がある。そのため、ERECクライオスタットに電極と電場印可装置を付加した。また、量子常誘電体の量子ゆらぎスペクトルを、他のフォノンスペクトルから精確に区別するためには、単分域ドメインとして結晶軸配列がそろっていることが必要である。特に量子常誘電体STOでは105Kに立方晶—正方晶構造相転移点があるので、低温相での正方晶軸がマルチドメインを形成するのを防いで単分域化するためにもこの装置は有用である。これはまた、誘電感受率等と光散乱スペクトルとの同

時測定も可能にする。電場印可装置の効果をもつて STO の正方晶で観測された、クロスニコル像として図5に示す。

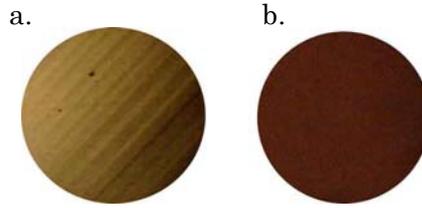


図5. 正方晶の STO 結晶のクロスニコル像。構造相転移点 T_t (105K) を温度降下で通過するとき、(a) 電場無印加で通過し多分域状態となった場合、(b) 電場印可 ($E = 1.6 \text{ kV/cm}$) で通過し単分域状態となった例。

(4) 理論的研究の成果

低温での変位型相転移の理論では、非調和格子振動系の Self-Consistent Phonon 近似 (SCPA) と呼ばれる形式で零点振動として量子揺らぎを取り入れる。この理論では相転移温度の低下の原因は圧力印加による変位間相互作用の減少を想定していた。他方、Barrett(1952)は平均場近似 (MFA) で量子揺らぎを取り入れた理論を提唱していた。両者を基にして Tokunaga らは 1989 年に SCPA で零点振動数が減少すれば、量子常誘電体が強誘電性相転移を起こすことを示した。しかしながら、STO の零点振動数の減少率は ^{18}O 置換の場合、換算質量 M^* が酸素の質量のみで決まり最小となる場合 (Case I) でも $\sqrt{16/18} \sim 0.94$ であり、後述の Case II, III のように強誘電性ソフトモード (FSM) の換算質量 M^* を考慮するとさらに 1 に近づく。本研究ではこの程度の僅少な零点振動数の減少による相転移の可能性を定量的に議論し確かめた。

本研究開始以前の ^{18}O 置換相転移の理論としては、(A) Bussmann-Holder ら (2000: SCPA)、(B) Kvyatkovskii (2001: 低温近似での SCPA)、(C) Mashiyama ら (2008: MFA) 等があった。(A) (B) は STO の実験で得られた FSM の振動数から決めた変位間相互作用と、 M^* の差を使って ^{18}O 置換 STO (STO18) の相転移温度 T_c を計算した。しかしながら、これらはいずれも本研究の視点と異なるものである。

本研究では ^{18}O 置換による零点振動数の減少のみによる相転移温度の変化を以下のように数値計算により明らかにした。図6では横軸 t はキューリー-ライス (C-W) 温度で規格化した温度、縦軸 y は変位間相互作用のみによるバネ定数により規格化された FSM のバネ定数、 x は ^{18}O の置換率を示す。青、黒、赤線は量子揺らぎを取り入れた場合の $y-t$ 曲線で色の

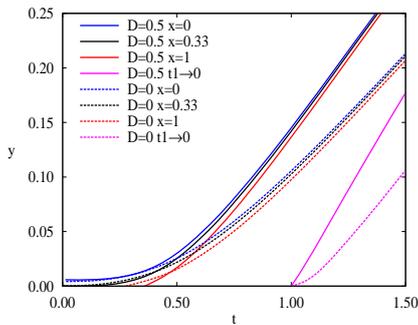


図 6. いくつかの ^{18}O 置換率(x)におけるソフトモード(FSM)のパネ定数(y)の温度依存性(t). 実線は静電相互作用の異方性(D)がある場合で、鎖線は無い場合。

違いは x の違いを示す。これらの曲線は、零点振動数と C-W 温度の比 t_1 を与えれば計算できる。右端のピンク色の 2 直線は C-W 則を表し、強誘電体では C-W 温度の極めて近傍までよく成り立つ。また図 6 では静電的相互作用による異方性 D の効果を実線 (D 有り)、鎖線 (D 無し) で示した。これは本研究により初めて明らかにされた成果の一つである。

t_1 は M^* を通じて x の関数 $t_1(x)$ である。量子揺らぎは直線を上に凹にすることで y

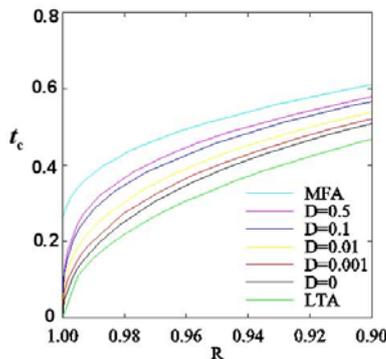


図 7. いくつかの D の値における規格化相転移温度 t_c の R 依存性。

が 0 に近づくのを妨げ、STO (青線) は絶対零度でも $y > 0$ となり相転移しない。 $x = 0.33 \equiv c$ で相転移温度が 0K という実験結果に対応して、 $t = 0$ で $y = 0$ になるよう $t_1(c)$ を決めて図 6 の黒線を求めた。 $t_1(1)$ (STO18) 及び $t_1(0)$ (STO) は $t_1(c)$ と M^* の比のみで決まると仮定して求め、それぞれ赤線及び青線を書いた。 D の有 (実線) 無 (鎖線) はこの勾配を大きく変化させる。

赤線が $y = 0$ を切る t を t_c とすると、 t_c と $t_1(x)$ の関係は一つ方程式に表され、この方程式を直接数値計算で解くことで t_c を求めることができる。この結果を $t_1(x)$ と $t_1(c)$ の比 R と t_c の関係として図 7 に示した。(B) 低温近似 (LTA) と (C) MFA は SCPA の特別な場合で図 7 の上端と下端の曲線と

なる。 D は t_c を決めるのに重要な役割を果たす。 R が 1 から少しでも小さくなると t_c が急激に 0 から立ち上がる。言い換えると、零点振動としての量子揺らぎを表す Bose 因子の非線形な M^* 依存性が ^{18}O 置換効果の原因であることが定量的にも明らかになった。 STO18 の相転移温度は t_c と C-W 温度の積として得られる。

R は x と M^* の酸素原子質量依存性により決まる。 M^* は STO18 の低温相の結晶構造が得られていないので、FSM として提案されている Slater モード (Case II)、及び Last モード (Case III) の M^* の ^{18}O 置換率依存性のみから R を求めた。先行していた仕事 (B) は Case を、(A) (C) は Case III を仮定している。図 7 から決めた t_c と C-W 温度の実験値 40K を使って STO18 の相転移温度 T_c を求めた。比較する実験値は $T_c = 24\text{K}$ である。最大は MFA で Case I の M^* で得られる $R = 0.962$ より $T_c = 19.6\text{K}$ である。実際により近い SCPA で Case II の M^* では、 $R = 0.982$ となり、理論値は $T_c = 14.4\text{K}$ となる。

5. 研究成果の意義とその重要性

(1) 極低温光散乱分光法の完成：これは従来相矛盾する因子により不可能とされていた極低温領域のレーザー分光法を確立したことであり、従来熱の遮断にのみ留意した静的実験が多く行われていた極低温物性に、動的な物性解明を可能にする大きな学問的意義がある。(2) 完成した広帯域分光システムで得られた 11–12 桁のダイナミックレンジは、フォノン以外の未知のスペクトルとしての量子揺らぎスペクトルの観測に有効である。(3) 理論的成果としては簡単なモデルにもかかわらず相転移温度の実験値の $1/2 \sim 2/3$ の値が得られることが確認されたので、STO の量子常誘電性は量子揺らぎによる強誘電性相転移の抑制の基本的原因であることが示された。また、(3-a) FSM での原子変位の位相関係、(3-b) 静電的相互作用 D による揺らぎの異方性、それに (3-c) C-W 温度の値が、 ^{18}O 置換相転移温度を決めるのに重要な寄与をすることが定量的に明らかになった。

6. 今後の展望

量子揺らぎスペクトルの同定まで至らなかったのは残念であるが、独創的な EREC 型光学クライオスタットの実現は極低温分光法へのブレークスルーであり世界最初の例である。本研究期間終了後も、完成した研究装置の使用希望が他大学も含めて出ており、今後有効に活用される計画が確定している。

6. 主な発表論文等

(1) [雑誌論文] (計 18 件) (全部査読有り)

- ① M. Tokunaga and Y. Aikawa, "Isotope-Induced Ferroelectric Phase Transition in Strontium Titanate Only by a Decrease in Zero-Point Vibration Frequency", J. Phys. Soc. Jpn., Vol.79 (2010) pp.024707-1-1-6.
- ② T.Yagi, M.Takesada, H.Taniguchi and M.Itoh, "Soft-mode Dynamics in the Ferroelectric Phase Transition of Quantum Paraelectric SrTiO₃", Ferroelectrics, Vol.379, (2009) pp.168-176.
- ③ M. Tokunaga and Y. Aikawa, "Theoretical Investigation of the Isotope-induced Ferroelectric Phase Transition in Quantum Paraelectric Strontium Titanate", Ferroelectrics 378 (2009) pp.8-11.
- ④ H.P. Soon, H. Taniguchi, and M. Itoh, "Ferroelectricity Triggered in the Quantum Paraelectric AgTaO₃ by Li-substitution", Appl. Phys. Lett., Vol.95, (2009), pp.242904 1-3.
- ⑤ M. Takesada, H. Nihonmatsu, T. Yagi, A. Onodera, and Y. Akishige, "Ultraviolet Photoexcited Soft Mode Dynamics in Quantum Paraelectrics KTaO₃ Doped with Nickel", Jpn. J. Appl. Phys. 48 (Part 2 Sp. Iss.) pp.09KF08 1-3 (2009).
- ⑥ D. Fu, H. Taniguchi, M. Itoh, S. Koshihara, N. Yamamoto, and S. Mori, "Relaxor Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃: A Ferroelectric with Multiple Inhomogeneities", Phys. Rev. Lett., Vol.103, (2009), pp.207601 1-4.
- ⑦ H. Taniguchi, T. Yagi, and M. Itoh, "Dynamics of the Ferroelectric Phase Transition in ¹⁸O-exchanged SrTiO₃ Studied by Raman Scattering", Ferroelectrics, 369 (2008) pp.3-9.
- ⑧ H. Taniguchi, Y. J. Shan, H. Mori, and M. Itoh, "Critical Soft-Mode Dynamics and Unusual Anti-crossing in CdTiO₃ Studied by Raman Scattering", Phys. Rev. B, Vol. 76, (2007), pp.212103 1-4.
- ⑨ H. Taniguchi, M. Itoh, and T. Yagi, "Ideal Soft Mode-Type Quantum Phase Transition and Phase Coexistence at Quantum Critical Point in ¹⁸O-Exchanged SrTiO₃", Phys. Rev. Lett., Vol.99, (2007), pp.017602 1-4.

(2) [学会発表] (計 20 件)

- ① 八木駿郎, 武貞正樹, "極低温における SrTiO₃ の光散乱スペクトル II", 日本物理学会第 65 回年次大会、2010/3/20~23、岡山大学.
- ② 森分博紀, 谷口博基, 伊藤 満, "CdTiO₃ のソフトモードの第一原理計算, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/3/20~3/23, 岡山大学.
- ③ 八木駿郎, "極低温における SrTiO₃ の光散乱スペクトル", 日本物理学会 2009 年秋季大会、2009/9/25~28、熊本大学.
- ④ 徳永正晴, "変位型強誘電体での新たな Rhodes-Wohlfarth 比", 日本物理学会 2009 年秋季大会、2009/9/25-28、熊本大学.

⑤ 森分博紀, 谷口博基, 伊藤満, "CdTiO₃ のソフトモードの第一原理計算, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/3/20~3/23, 岡山大学.

⑥ M. Itoh, "Oxygen-isotope Exchange Effect in Ferroelectric Oxides", The 26th International Japan-Korea Seminar on Ceramics, 2009/11/24~26, Tsukuba, Japan.

⑦ 伊藤 満, "ペロブスカイト型化合物の構造と物性", 日本セラミックス協会第 22 回秋季シンポジウム, 2009/9/16~9/18, 愛媛大学.

⑧ 藤井 康裕, 谷口 博基, 伊藤 満, 片山 正士, 松本 祐司, ホモエピタキシャル STO18 薄膜の構造相転移, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009/3/27~30, 立教大学.

⑨ H. Taniguchi and M. Itoh, "Light Scattering Study on Low-Temperature Soft-Mode-Type Phase Transitions", 9th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-9), 2008/6/15~6/19, Vilnius, Lithuania.

⑩ M. Tokunaga and Y. Aikawa, "Theoretical Investigation of the Isotope-induced Ferroelectric Phase Transition in Quantum Paraelectric Strontium Titanate", 9th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-9), 2008/6/15~6/19, Vilnius, Lithuania.

⑪ M. Itoh, "Ferroelectricity in Perovskite-Related Oxides", 11th European Meeting on Ferroelectricity (EMF-2007), 2007/9/3~9/7, Bled, Slovenia.

⑫ H. Taniguchi, T. Yagi, and M. Itoh, "Soft Mode Dynamics in Quantum Ferroelectric ¹⁸O-exchanged SrTiO₃ Studied by Raman Scattering", 2007 Workshop on Fundamental Physics of Ferroelectrics, 2007/2/11~2/14, Williamsburg, Virginia, USA.

(3) [図書] (計 0 件)

(4) [産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

(5) [その他]

ホームページ等 なし

(6) 研究組織

①研究代表者

八木 駿郎 (YAGI TOSHIROU)

北海道大学 名誉教授

研究者番号: 30002132

②研究分担者

武貞 正樹 (TAKESADA MASAKI)

北海道大学大学院 理学研究科 講師

研究者番号: 30311434

伊藤 満 (ITO MITSURU)

東京工業大学応用セラミックス研究所

教授

研究者番号: 30151541

徳永 正晴 (TOKUNAGA MASAHARU)

北海道大学 名誉教授

研究者番号: 60001682

小野寺 彰 (ONODERA AKIRA)

北海道大学大学院 理学研究科 教授

研究者番号: 40142682