

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287067

研究課題名(和文) コヒーレントな熱の波動の効率的発生と光学的制御

研究課題名(英文) Highly efficient generation and optical control of coherent heat wave

研究代表者

是枝 聡肇 (Koreeda, Akitoshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40323878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：熱は本質的には波動としての性質を示すものであり、多くの場合に観測される拡散的な熱輸送は熱波動が摩擦によって強く減衰を受けている状態である。本研究では量子常誘電体における熱の波動をパルスレーザーによってコヒーレントに励振することに成功した。また、純光学的な操作によって、熱波動の周波数や干渉パターンなどの波動制御を実現できた。さらに、熱波動の存在に本質的な寄与をする強誘電的赤外活性フォノンモード(いわゆるソフトモード)を、高強度のテラヘルツ波レーザーによって励振することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Heat is intrinsically a wave, despite the fact that it only diffuses as is widely observed everywhere. However, such diffusive heat transport is just due to strong damping of the wave of heat by internal friction. In this research program, we have succeeded in excitation of a "coherent heat wave" via stimulated scattering process of pulsed laser light. Furthermore, we have realized optical controls of wave properties of heat, such as frequency and interference patterns. Finally, by constructing and using a high-power terahertz light source, we have successfully excite the ferroelectric IR-active "soft phonon mode" in SrTiO<sub>3</sub>, which is essential for the existence of the heat wave in quantum para-electrics.

研究分野：固体物理学

キーワード：第二音波 テラヘルツ波 ソフトモード 量子常誘電体 強誘電体

## 1. 研究開始当初の背景

物質科学では熱の発生はエネルギーの散逸とほぼ同義に解釈されることが多いが、これは多くの場合、物質内の熱伝導が拡散に支配されるため、いちど系に与えられた熱エネルギーが不可逆的に拡散するべし、というイメージに基づくものと思われる。しかしながら、あまり広くは認知されていないが、物質内の熱輸送はむしろ波動方程式によって記述されるのが本質であり、拡散的な熱伝導は物理的には「熱の波動」が強く減衰を受けた状態であると解釈されなければならない。このような「熱の波動」(「第二音波」と呼ばれる)は固体物質中においては1960年代から1970年代までの間にわずか3例の報告があるのみで、極めて希な現象であった。しかし、1990年代以降ペロフスカイト型酸化物の一部において、第二音波の存在が理論的、実験的に再検討され始めた。このペロフスカイト型酸化物という物質群は超伝導・強磁性・強誘電性・巨大応答特性など、応用上も極めて重要な物性を担う物質を豊富に含むが、これらの物性は温度に強く依存する素励起であるため、もし十分に制御された第二音波をこれらの物質内に保持できれば、積極的かつ多彩な物性操作を実現できる可能性が拓ける。また、熱を波動として保持できる物質を新たに発見、あるいは開発し、熱を改めて固有の周波数・速度を持つ「波動的な素励起」として科学者や社会に広く再認識させることは、物質科学における新たな普遍的視点を与えるという点でも極めて重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では量子常誘電体における熱の波動の存在に本質的な寄与をする強誘電的赤外活性フォノンモード(いわゆるソフトモード)を、高強度のテラヘルツ波レーザーによって励振し、通常の熱励起下では起こり得ないような熱波動のエンハンスメントを引き起こし、純光学的な熱波動のコヒーレント制御を実現することを目的とする。

近年分担者らによって開発が進められているテラヘルツ波レーザーの同調可能範囲(約1~3 THz)が低温領域でのソフトモードの周波数域をカバーできることに着目し、高強度テラヘルツ波レーザーによって赤外活性なソフトモードを共鳴励起してその状態密度を極度に増大させ、熱励起下では実現が困難な熱波動(第二音波)の理想的な存在条件を引き出すことを考えた。この目的のために、ソフトモードの共鳴周波数に同調可能な高強度テラヘルツ波レーザー光源を開発し、これを用いてソフトモードを大振幅で強制振動させ、正常散乱に関与する $\Gamma$ 点フォノンの状態密度を極度に増大させながら、誘導ブリルアン散乱過程によってコヒーレントな熱の波動(第二音波)を高い効率で発生できることを実験的に示したい。また、コヒーレント熱波動がエンハンスされた状況下においては、熱

振動の寿命も長くなることが期待される。そのため、様々な熱波動の初期分布(干渉パターン)を空間光変調器を用いた光学的手法によってダイナミックに生成し、熱波動のコヒーレント制御を実現したい。

## 3. 研究の方法

代表者はこれまでに、コヒーレントな熱の波動の発生に取り組んできた。ピコ秒レーザーをポンプ光に用いるインパルス誘導熱/ブリルアン散乱(Impulsive Stimulated Thermal / Brillouin Scattering: ISTS / ISBS)システムを完成させ、平成25年4月に立命館大学へ異動後、同システムの再構築を完了させた。このシステムでは30ピコ秒のパルス幅を持つパルスND:YAGレーザーを変形サニャック干渉計を用いて平行な2本のビームに分割した後に、レンズを用いて試料内で交叉させ入射する。試料内の交叉領域では2本のビームによる干渉縞に沿って過渡的な熱グレーティングが形成される。この熱グレーティングの回折効率(熱のダイナミクス(通常の熱拡散か?/熱の波動か?))を反映した時間変化をするため、プローブ光として連続波(CW)レーザーを入射し、回折される光強度の時間変化を観測することにより、熱のダイナミクスを実時間でモニターすることができる。理研のテラヘルツ光源研究チームと協力し、高強度テラヘルツ波レーザーを用いてソフトモードを共鳴励起しながら、ISTS / ISBSによってコヒーレント第二音波を発生させる。さらに二次元的な初期温度の振幅・位相パターンや時間変化するダイナミックな初期温度分布を励起することで、熱の波動性をより顕著に引き出したい。具体的には、ポンプ光を空間光変調器に通し、その像を試料内に結像させる。この変調器はPCによって瞬時にパターンを描き換えできるので、熱波動の波長(周波数)をより効率よく変更でき、また、多彩な二次元の初期温度パターンも試料に描き込める。このような温度パターンはいわば「熱のホログラフィ」であり、これまでの干渉計を用いた単純な一次元熱グレーティングよりも熱波動の位相の情報を反映させやすいため、熱の波動性をより顕著に引き出すことが可能である。さらに、高強度THz波光源によるソフトモードの共鳴励起下においては、熱波動のコヒーレンス長の増大が期待され、熱波動の振幅と位相を光によって自由に制御できるシステムを構築できると考えている。

光源開発については研究分担者である理研テラヘルツ光源研究チームの野竹が担当する。野竹氏はテラヘルツ光源開発に関して豊富な経験と実績を有しており、今回は、本研究テーマに特化した高強度・狭線幅・周波数可変(1-3THz)性を有するテラヘルツ光源を開発する。この光源は50cm×100cm程度の卓上光学定盤上にコンパクトに一体型で構築し、完全にポータブルな光源とする。そのため理

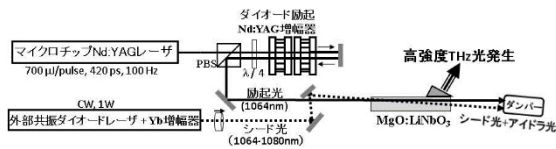


図 1: 光注入型高強度 THz パラメトリック光源の構成

化学研究所にて開発が完了した光源は電源装置や冷却装置とともに適切に梱包され、立命館大学へも輸送可能とする予定である。理研チームリーダーの南出氏には協力者として光源開発への助言と協力を頂く。

図 1 に光源の構成を示す。非線形光学結晶として、損傷閾値の高い MgO: LiNbO<sub>3</sub> 結晶を使用し、結晶中の誘導ポラリトン散乱を利用したパラメトリック波長変換によるテラヘルツ光源を開発する。励起光源には従来のナノ秒レーザーではなく、一桁短いパルス幅 (400 ピコ秒, 繰り返し 100Hz) を有するマイクロチップ Nd:YAG レーザーを用いる。これによりメガワット以上の高ピーク強度で励起しても、熱による結晶の損傷を回避でき、高効率で THz 光発生が可能となる。市販のマイクロチップ Nd:YAG レーザーの出力は、0.7mJ / pulse と低い為、出力をダイオードレーザー励起 Nd:YAG 光増幅器で約 20mJ / pulse まで増大させる。この場合、増幅後の励起光ピーク強度は 50MW まで増大し、大きな非線形光学効果を誘起し高効率で THz 光発生が可能となる。更に本開発では、光注入技術も駆使して更なる THz 光の高出力化と狭線幅化を実現する。一般にパラメトリック発生では共振構造を利用しない為、発生するアイドラ光及びテラヘルツ光 (シグナル光) の出力スペクトルはブロードなものとなる。しかし本開発では、発生するテラヘルツ光に対して利得集中による狭線幅化・高出力化を実現する為、アイドラ光に対して、別途 CW ダイオードレーザーを用意して光注入を行う。光注入用ダイオードレーザーは、量子常誘電体のソフトモード周波数 (約 1-3THz) に対応させる為、外部共振器型で波長可変 (1064-1080nm) のものを用意し、その出力をイトリビウム光ファイバー増幅器により平均出力 1W まで増幅させる。狭線幅・高強度テラヘルツ光発生のために、励起光とアイドラ注入光を同時に LiNbO<sub>3</sub> 結晶へ入射する。この際、発生するテラヘルツ周波数はアイドラ注入光の波長を変える事で制御可能であるが、位相整合条件とエネルギー保存則を満たす必要が有るため、励起光の光軸は固定し、注入光に対しては光回折格子と共焦点光学系を組み合わせたアクロマチック光学系を構築し、周波数を変化させても発生するテラヘルツ光の光軸が不変となるシステムを構築する。これらにより、周波数 1~3THz 程度の広帯域波長可変性と 10kW レベルのピーク強度、さらに、フーリエ限界に近い数 GHz の狭線幅を有するテラヘルツ光の発生が十分に期待できる。このような光源は本研究におけるソフトモードの励振において、同調可能周波数範囲、パ

ワー、線幅の全ての点において理想的な特性を持つ。

#### 4. 研究成果

パルスレーザーを用いた誘導ブリルアン散乱によってコヒーレントな第二音波の励振を試み、図 2 左パネルに示すような信号を得た [Koreeda et al, Int' 1 Conf. Phonon Scat. (2015)] 右パネルは解析によって熱の信号に対応する部分を抽出したものであるが、約 12K の臨界温度より低温側では、熱由来の信号がマイナス側へも振動していることがわかった。これはポンプ光の照射領域で位相の揃った大振幅の第二音波、すなわち「コヒーレントな熱の波動」が励起されたことを示している。この場合、決して単にある特定のフォノンモード (いわゆるコヒーレントフォノン) が励起されたわけではなく、フォノンのコヒーレントな集団励起状態 (=フォノン流体の疎密波) として「温度の固有状態」が実現されたことを強調しておきたい。さらに、このコヒーレント熱波動は空間光変調器を用いたポンプ光の制御を通して、容易にその周波数を可変できるようになった。

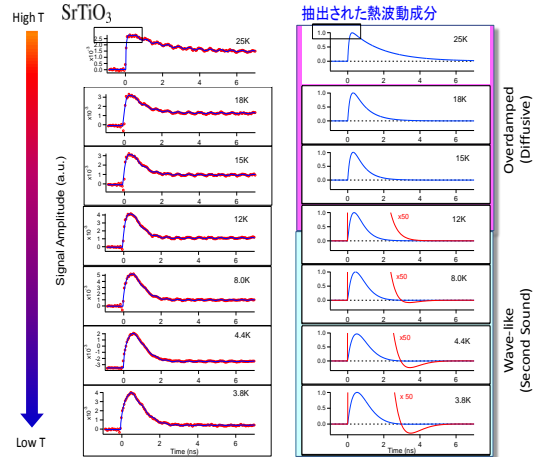


図 2 熱波動(第二音波)の温度変化

完成した高強度 THz 波光源の写真を図 3 に示す。当初の目標の通り、外部共振器型ダイオードレーザーによる注入同期によって、周波数 1~3THz 程度の広帯域波長可変性と

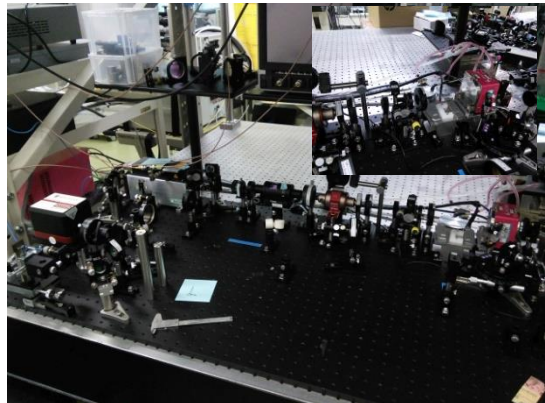


図 3 完成した高強度 THz 波光源

10kW レベルのピーク強度、さらに、フーリエ限界に近い数 GHz の狭線幅を有するテラヘルツ光の発生が実現された。また、すべての構成部品がブレッドボード上に配置されており、完全にポータブルな光源として完成されていることが重要である。

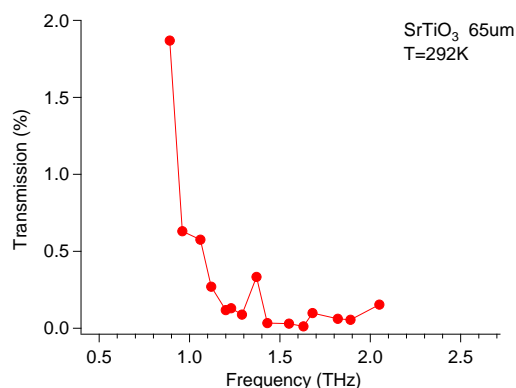


図 4 チタン酸ストロンチウムにおけるソフトモードによる THz 波の透過スペクトル

チタン酸ストロンチウムにおける強誘電的ソフトフォノンモードの励振をこの高強度 THz 光源で実現するため、チタン酸ストロンチウムにおいて、ソフトモードの共鳴周波数付近における THz 波の透過実験を行った。しかし、チタン酸ストロンチウムにおけるソフトモードフォノンによる THz 波の吸収と反射は思いのほか強く、200 μm の厚さのサンプルでも透過光を検出できなかった。そこで、理化学研究所にて 65 μm の薄さまでサンプルを研磨し、再度透過実験に挑戦した。図 4 にその結果を示す。室温付近 (292K) ではソフトモードの共鳴周波数は約 3THz であるため、それより十分に低い約 1.5THz 以下のレンジでは THz 光が透過するはずであるが、結果もそのようになっている。このようにバルクの試料において THz 波の透過スペクトルが観測できたのは、光強度 THz 波光源の高いピーク強度と 1~3THz 付近の同調性、さらには、同調時の光軸の不変性による。

この実験からソフトフォノンモードを確かに励振できていることは確認できた。しかし、光強度 THz 波光源を立命館大学へ輸送しての THz 波照射下 ISTS/ISBS 実験に関しては研究期間終了までには実施するには至っていない。こちらの実験についてはすでにグループ内で計画しており、近いうちに実施される予定である。

#### 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 12 件)

①著者名: Yohei Onodera, Shinji Kohara, Hirokazu Masai, Akitoshi Koreeda, Shun Okumura, and Takahiro Ohkubo, 論文表題:

Formation of metallic cation-oxygen network for anomalous thermal expansion coefficients in binary phosphate glass, 雑誌名: Nature Communications, 査読: 有, 巻: 8, 発行年: 2017, ページ: 15449, DOI: 10.1038/ncomms15449

②著者名: Hirokazu Masai, Akitoshi Koreeda, Yasuhiro Fujii, Takahiro Ohkubo, and Shinji Kohara, 論文表題: Photoluminescence of Sn<sup>2+</sup>-centre as probe of transient state of supercooled liquid, 雑誌名: Optical Materials Express, 査読: 有, 巻: 6, 発行年: 2016, ページ: 1827-1836, DOI: 10.1364/OME.6.001827

③著者名: Hirokazu Masai, Syuji Matsumoto, Yuki Ueda and Akitoshi Koreeda, 論文表題: Correlation between valence state of tin and elastic modulus of Sn-doped Li<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses, 雑誌名: Journal of Applied Physics, 査読: 有, 巻: 119, 発行年: 2016, ページ: 185104(1)-(4), DOI: 10.1063/1.4948685

④著者名: M. Kabeya, T. Mori, Y. Fujii, A. Koreeda, B-W. Lee, J-H. Ko, and S. Kojima, 論文表題: Boson peak dynamics of glassy glucose studied by integrated terahertz-band spectroscopy, 雑誌名: Physical Review B, 査読: 有, 巻: 94, 発行年: 2016, ページ: 224204 (1)-(9), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.224204

⑤著者名: Yasuhiro Fujii, Daisuke Katayama, and Akitoshi Koreeda, 論文表題: Broadband light scattering spectroscopy utilizing an ultra narrowband holographic notch filter, 雑誌名: Japanese Journal of Applied Physics, 査読: 有, 巻: 55, 発行年: 2016, ページ: 10TC03(1)-(4), DOI: 10.7567/JJAP.55.10TC03

⑥著者名: Akitoshi Koreeda, Tomohiro Ogawa, Daisuke Katayama, Yasuhiro Fujii, and Makoto Tachibana, 論文表題: Broadband light-scattering spectroscopy on fractal and non-fractal relaxors, 雑誌名: Japanese Journal of Applied Physics, 査読: 有, 巻: 55, 発行年: 2016, ページ: 10TC06(1)-(4), DOI: 10.7567/JJAP.55.10TC06

⑦著者名: S. Ohno, T. Sonehara, E. Tatsu, A. Koreeda, and S. Saikan, 論文表題: Spectral shape of stimulated Brillouin scattering in crystals, 雑誌名: Physical Review B, 査読: 有, 巻: 92, 発行年: 2015, ページ: 214105 1-10, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.214105

⑧著者名 : Shuzhen Fan, Feng Qi, Takashi Notake, Kouji Nawata, Yuma Takida, Takeshi Matsukawa, and Hiroaki Minamide, 論文表題 : Diffraction-limited real-time terahertz imaging by optical frequency up-conversion in a DAST crystal, 雑誌名 : Optics Express, 査読 : 有, 巻 : 23, 発行年 : 2015, ページ : 7611-7618, DOI: 10.1364/OE.23.007611

⑨著者名 : Takashi Notake, Banghong Zhang, Yandong Gong, Hiroaki Minamide, 論文表題 : Development of a Stokes polarimeter system for the high terahertz frequency region, 雑誌名 : Japanese Journal of Applied Physics, 査読 : 有, 巻 : 53, 発行年 : 2014, ページ : 92061, DOI: 10.7567/JJAP.53.092601

⑩著者名 : Takeshi Matsukawa, Takashi Notake, Kouji Nawata, Shunsuke Inada, Shuji Okada, and Hiroaki Minamide, 論文表題 : Terahertz-wave generation from 4-dimethylamino-N'-methyl-4'-Stilbazolium p-bromobenzenesulfonate crystal: Effect of halogen substitution in a counter benzenesulfonate of stilbazolium derivatives, 雑誌名 : Opt. Mater. 査読 : 有, 巻 : 36, 発行年 : 2014, ページ : 1995-1999 DOI: 10.1016/j.optmat.2014.01.012

⑪著者名 : Feng Qi, Shuzhen Fan, Takashi Notake, Kouji Nawata, Takeshi Matsukawa, Yuma Takida and Hiroaki Minamide, 論文表題 : An ultra-broadband frequency-domain terahertz measurement system based on frequency conversion via DAST crystal with an optimized phase-matching condition, 雑誌名 : Laser Physics Letters, 査読 : 有, 巻 : 11, 発行年 : 2014, ページ : 085403 1-7, DOI: 10.1088/1612-2011/11/8/085403

⑫著者名 : Yasuhiro Fujii, Masatsugu Noju, Takao Shimizu, Hiroki Taniguchi, Mitsuru Itoh, and Izumi Nishio, 論文表題 : Raman tensor analysis of crystalline lead titanate by quantitative polarized spectroscopy, 雑誌名 : Ferroelectrics, 査読 : 有, 巻 : 462-1, 発行年 : 2014, ページ : 8-13 DOI: 10.1080/00150193.2014.890470

[学会発表] (計 50 件)

①発表者名 : Takashi Notake, Kouji Nawata, Yu Tokizane, Yuma Takida, Zhengli Han, Mio Koyama, and Hiroaki Minamide, 発表標題 : Development of Mueller Stokes Polarimeter Toward Detailed Analysis of Complicate

Polarizing Devices in THz Frequency Region, 学会等名 : 41st International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz waves (国際学会), 発表年月日 : 2016年09月27日, 発表場所 : コペンハーゲン, デンマーク

②発表者名 : Takashi Notake, Kouji Nawata, Yuma Takida, Yu Tokizane, Zhengli Han, Mio Koyama, Yoichi Ogata, Andreas Karsaklian Dal Bosco, Hiroaki Minamide, 発表標題 : Development of Mueller-Matrix Polarimeter for Detailed Analysis of Polarization Devices at Terahertz Frequency Range, 学会等名 : JSAP-OSA Joint Symposia (国際学会), 発表年月日 : 2016年09月15日, 発表場所 : 朱鷺メッセ (新潟県新潟市)

③発表者名 : Yasuhiro Fujii, Daisuke Katayama, Mitsuyoshi Morita, Akitoshi Koreeda, Hiroki Taniguchi, and Ichiro Terasaki, 発表標題 : Broadband micro light scattering investigation on ferroelectric phase transition of NaVO<sub>3</sub> with pyroxene type one dimensional oxygen-tetrahedral chain structure, 学会等名 : Joint Russia-CIS-Baltic-Japan Symposium on Ferroelectrics & International Workshop on Relaxor Ferroelectrics Conference 2016 (国際学会), 発表年月日 : 2016年06月21日, 発表場所 : くにびきメッセ (島根県松江市)

④発表者名 : Akitoshi Koreeda, Tomohiro Ogawa, Daisuke Katayama, Yasuhiro Fujii, and Makoto Tachibana, 発表標題 : Broadband light-scattering study on fractal and non-fractal relaxors, 学会等名 : Joint Russia-CIS-Baltic-Japan Symposium on Ferroelectrics & International Workshop on Relaxor Ferroelectrics Conference 2016 (国際学会), 発表年月日 : 2016年06月20日, 発表場所 : くにびきメッセ (島根県松江市)

⑤発表者名 : Takashi Notake, Kouji Nawata, Yuma Takida, Yu Tokizane, Zhengli Han, Mio Koyama and Hiroaki Minamide, 発表標題 : Challenge to Excitation of the Low Frequency Collective Vibrational Mode in Proteins by using Intense Coherent Terahertz-Waves, 学会等名 : The 5th Advanced Lasers and Photon Sources (国際学会), 発表年月日 : 2016年05月17日, 発表場所 : パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

⑥発表者名 : 野竹孝志, 南出泰亜, 発表標題 : 可搬型高強度テラヘルツ光源の開発と蛋白質コンフォメーション制御への挑戦, 学会等名 : 第3回RAPシンポジウム, 発表年月日 : 2015



年 11 月 12 日, 発表場所: 理化学研究所 (埼玉県和光市)

⑦発表者名: Notake Takashi, Nawata Kouji; Takida Yuma; Tokizane Yu; Han Zhengli; Minamide Hiroaki, 発表標題: Attempt to conformation control of biological proteins by using intense coherent THz-wave, 学会等名: FTT2015 (国際学会), 発表年月日: 2015 年 08 月 30 日, 発表場所: アクトシティ浜松 コンgressセンター (静岡県浜松市)

⑧発表者名: A. Koreeda, Y. Fujii, H. Sakai, T. Notake, and Y. Minamide, 発表標題: Optical control of Second Sound in Quantum Paraelectric SrTiO<sub>3</sub>, 学会等名: The 15th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter (国際学会), 発表年月日: 2015 年 07 月 14 日, 発表場所: Nottingham (英国)

⑨発表者名: T. Notake, K. Nawata, Y. Takida, Y. Tokizane, Z. Han, and H. Minamide, 発表標題: Study on Effect of Intense THz-Wave Irradiation for Protein Conformation, 学会等名: The 4th Advanced Lasers and Photon Sources ALPS ' 15 (国際学会), 発表年月日: 2015 年 04 月 22 日, 発表場所: パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

⑩発表者名: 酒井洋徳, 小川智大, 藤井康裕, 是枝聡肇, 野竹孝志, 南出泰亜, 発表標題: 量子常誘電体におけるコヒーレントな熱波動の光学的制御 II, 学会等名: 日本物理学会第 70 回年次大会, 発表年月日: 2015 年 03 月 21 日, 発表場所: 早稲田大学早稲田キャンパス (東京都新宿区)

⑪発表者名: Yasuhiro Fujii, Tomohiro Ogawa, Hironori Sakai, Akitoshi Koreeda, and Hiroki Taniguchi, 発表標題: Light scattering investigation on fractal nature of relaxor, 学会等名: International Workshop on Relaxor Ferroelectrics 14, 発表年月日: 2014 年 10 月 14 日, 発表場所: ステイアリン (チェコ)

⑫発表者名: 酒井洋徳, 小川智大, 藤井康裕, 是枝聡肇, 野竹孝志, 南出泰亜, 発表標題: 量子常誘電体におけるコヒーレントな熱波動の光学的制御, 学会等名: 日本物理学会 2014 年秋季大会, 発表年月日: 2014 年 9 月 7 日, 発表場所: 中部大学 (愛知県春日井市)

⑬発表者名: Akitoshi Koreeda, 発表標題: Self-similar Frequency Response and Fractal Dynamics in Relaxor Ferroelectrics, 学会等名: 10th Japan-Korea Conference on Ferroelectrics (招待講演),

発表年月日: 2014 年 8 月 19 日, 発表場所: International Conference Center Hiroshima (広島県広島市)

⑭発表者名: Hironori Sakai, Tomohiro Ogawa, Yasuhiro Fujii, and Akitoshi Koreeda, 発表標題: Optical Control of Coherent Heat Wave in Quantum Paraelectrics, 学会等名: 10th Japan-Korea Conference on Ferroelectrics (招待講演), 発表年月日: 2014 年 8 月 18 日, 発表場所: International Conference Center Hiroshima (広島県広島市)

[その他]

ホームページ等

是枝聡肇のホームページ (仮題)

<http://www.ritsumei.ac.jp/~kore/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

是枝 聡肇 (KOREEDA, Akitoshi )

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 40323878

(2) 研究分担者

藤井 康裕 (FUJII, Yasuhiro)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号: 50432050

野竹 孝志 (NOTAKE, Takashi)

国立研究開発法人 理化学研究所・光量子工学

研究領域・研究員

研究者番号: 70413995

(3) 研究協力者

南出 泰亜 (MINAMIDE, Hiroaki)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学

研究領域・研究員