

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244062

研究課題名(和文)赤外10フェムト秒パルス列による強相関電子系の電子-フォノンコヒーレント制御

研究課題名(英文)Ultrafast Coherent control of electro-lattice by 10 fs infrared pulse

研究代表者

岩井 伸一郎 (IWAI, Shinichiro)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60356524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,900,000円

研究成果の概要(和文)：赤外12 fs(2.5サイクル)および7 fs(1.5サイクル, CEP安定化)の極超短パルスを開発し、有機伝導体(BEDT-TTF錯体)を主要な対象として、光誘起相転移の初期過程を調べた。電荷秩序の融解が、電子のコヒーレント振動によって開始する様子や、ダイマーモット絶縁体が、励起状態と分子内、分子間振動の相互作用を介して金属へと転移にする様子を明らかにした。また、 >10 MV/cmに及ぶ瞬時強電場により、金属から電荷秩序への転移に初めて成功した。また、分子内と分子間自由度を考慮した理論解析により、連続電場、パルス電場による強電場効果として電荷の局在や相互作用反転が起きる条件を詳細に検討した。

研究成果の概要(英文)：12 fs(2.5-cycle) and 7 fs (1.5-cycle, CEP stabilized) pulses in near infrared region have been developed. Those ultrashort pulses were utilized to clarify the initial dynamics of photoinduced phase transitions mainly in organic conductors(BEDT-TTF salts). We captured the snapshots of i) Photoinduced melting of charge ordering begins with the coherent charge gap oscillation and ii) Photoinduced insulator to metal transition in dimer Mott insulator is driven by the interactions between intra-dimer exciton and the intra-dimer and inter-dimer vibrations. iii) Moreover, by applying strong 1.5-cycle light electric field of > 10 MV/cm, photoinduced charge ordering in organic metal was succeeded to realized. iv) Theoretical analysis considering the intra- and inter molecular degrees of freedom has been made; Conditions for charge localization and the repulsive-attractive conversion of interactions driven by strong light field were investigated for CW and pulsed light.

研究分野：超高速レーザー分光、強相関電子系

キーワード：強相関電子系 光誘起相転移 超高速現象 有機伝導体 遷移金属酸化物

1. 研究開始当初の背景

強相関電子系では、光励起が、電子間相互作用を介して、絶縁体-金属(I-M)転移や磁気転移などの電子相転移へと繋がるのが実験、理論の両面から注目されている。しかし、その初期過程は、複雑である上に極めて速く(< 100 fs)、機構の解明には至っていなかった。我々は、赤外光領域(1-2 μm)の極短パルス(パルス幅 12 fs、光の搬送周波数 2-3 周期に相当)光源を開発し、電子のコヒーレント振動や電子と格子振動の始まる瞬間をとらえられるようになった。このような最先端の光測定技術と、多電子系の光励起後のダイナミクスに対する理論計算技術の発展を背景として、相転移を駆動する電子や振動の“相互作用モード”の理解、および電荷、格子(分子)のコヒーレンスに基づく、光による新秩序の形成の実現に向けて機が熟したといえる。

2. 研究の目的

電場の振動を 2-3 周期しか含まない、近赤外 7-13 fs、テラヘルツパルスなどの最先端光パルスを自ら開発し、強相関電子系の光誘起相転移を支配する、電荷や格子(分子)振動のコヒーレンスの役割を実験と理論の両面から明らかにする。その理解に基づいて、光による新たな秩序の形成などの方法を、探索し、強相関電子系における光誘起相転移の研究を新たなフェーズへと移行させる。また、分子性物質のもつ階層を反映した電子格子模型に対し、相関関数の非平衡時間発展を理論計算で追うことによって、実験結果の解釈のみならず、新現象の予測を行う。具体的な研究対象物質としては、絶縁体-金属転移やスピン転移、強誘電性などの物性を示す低次元有機分子結晶(BEDT-TTF(ET)錯体)、遷移金属(コバルト、鉄)酸化物を用いる。

3. 研究の方法

(1) 我々の研究グループで開発した赤外 12 fs パルスを用いたポンププローブ過渡反射測定によって、様々な有機電荷移動錯体(α -(ET) $_2$ I $_3$ 、 θ -(ET) $_2$ (RbZn)(SCN) $_4$ 、 κ (ET) $_2$ Cu[N(CN) $_2$]Br)や遷移金属酸化物(LaCoO $_3$)における、光誘起相転移の初期過程の様々なダイナミクスを明らかにする。特に電荷や格子、分子振動のコヒーレンスの役割を明らかにする。

(2) 複数の秩序が競合することによって強固な長距離が成長しない系を用いて、光による秩序の成長や形成をおこなう。短距離秩序のプローブするために光励起-テラヘルツプローブ分光を行う。

(3) より短い高強度の< 10 fs のキャリアエンベロープ位相(CEP)安定化パルス(< 2 サイクルパルス)を開発し、それを用いた過渡反射測定を行う。~ MV/cm の瞬時強電場に対するコヒーレントな電子駆動による物性制御を実現する。

(4) 理論解析

上記の実験に対応する状況を、数値計算により再現し、実験では見られない物理量の解析

から、観測された現象の発現機構を解明する。また、現在の実験では不可能な条件における数値計算の解析から、単に実験結果の再現にとどまらない新奇現象の予測を行う。

4. 研究成果

(1) 赤外 12 fs (3 サイクル) パルスによる光誘起相転移初期過程の電荷-格子コヒーレントダイナミクスの解明

ダイマーマット絶縁体(κ -(ET) $_2$ Cu[N(CN) $_2$]Br)における光誘起絶縁体-金属転移の初期過程を調べた。図 1-1(a)(b)は、反射率変化の時間発展から振動成分とそのフーリエ変換であり、点線は赤外吸収スペクトルで観測される C=C 伸縮振動(ν_3 モード)である。図 1-1 の結果は、絶縁体-金属転移による応答(~ 2 ps)が立ち上がるはるか以前(< 50 fs)において、周期 25 fs(1300 cm^{-1})の C=C 伸縮振動(ν_3 モード)が激しく励振されることを示している。この時間軸上の C=C 振動は、わずか 2 周期程度(~ 50 fs)以内にほぼ消滅するように見えるが、その後もわずかに揺れ続けている。50 fs 以降も残る振動構造のスペクトログラムを図 1-2 に示す。図 1-2(a)(b)はそれぞれ早い時間領域(< 800 fs)と遅い時間領域(< 5.5 ps)における振動成分のウェーブレット変換を示す。励起直後に観測される 1300 cm^{-1} の大振幅の振

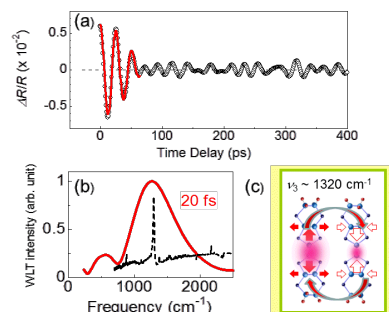


図 1-1 (a) 12 fs パルスを用いて行った過渡反射の時間発展(0.65 eV)の振動成分(b)振動成分のフーリエ変換(赤) 黒点線は、定常赤外スペクトル、(c) C=C 伸縮振動(ν_3 の模式図)

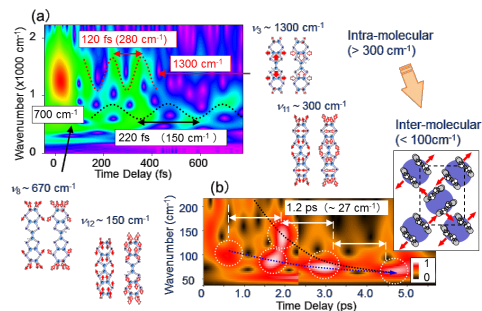


図 1-2 振動成分のスペクトログラムと、分子内、分子間振動の振動数と模式図。(a) 早い時間領域(< 800 fs)(b)遅い(< 5.5 ps)時間領域

動成分（時間原点附近の大きな赤い楕円）が消滅した後、わずかに残った 1300 cm^{-1} の振動の周波数が周期 120 fs (280 cm^{-1}) で揺動している。同様に、励起後 100 fs 以内に現れる、 $\sim 700\text{ cm}^{-1}$ の振動成分も、 150 cm^{-1} で周波数変調を受けているように見える。より遅い時間領域（図 1-2(b)）を見ると、これらの変調周波数に対応するコヒーレント振動が観測されており、さらにその変調周波数として観測される $< 100\text{ cm}^{-1}$ のモードが最終的に分子の変位を駆動している。

図 1-3 は、赤外 12 fs パルスを用いて測定した光誘起相転移の初期過程における高周波振動をまとめたものである。いずれの振動も、その相転移に本質的に関係した電子や分子/格子の時間軸振動であり、しかも、わずか $1\sim 2$ 周期（時間にしてわずか $100\text{ fs}\sim 200\text{ fs}$ ）以内に消滅する。このことは、これらの振動が、ほかのモードと強く相互作用しており、相転移の主な駆動力になっていることを反映しているとも言える。通常の半導体におけるコヒーレントフォノンが数～数十ピコ秒も持続するのは大きく異なる。

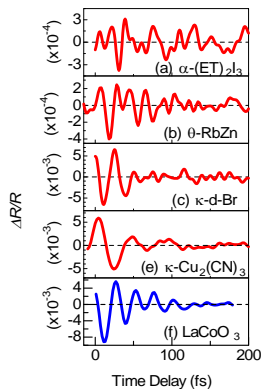


図 1-3 いろいろな物質における反射率変化の振動成分(a) $\alpha\text{-(ET)}_2\text{I}_3$ (電荷秩序絶縁体; 絶縁体 - 金属転移) (b) $\theta\text{-(ET)}_2\text{RbZn(SCN)}_4$ (同上)、(c) $\kappa\text{-(d-ET)}_2\text{Cu}[\text{N(CN)}_2]\text{Br}$ (ダイマーモット絶縁体; 絶縁体 - 金属転移)、(d) $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ (ダイマーモット絶縁体; 強誘電クラスター成長) (e) LaCoO_3 (高効率スピン転移) (f) LuFe_2O_4 (強磁性 - 反強磁性転移)

(2) 光励起 - テラヘルツ分光による短距離秩序の成長の探索

有機三角格子ダイマーモット絶縁体 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ は、リラクサー的な誘電異常を示す。この現象は、低温でダイマー内の電荷の不均化によりダイマー双極子が生じ、その短距離秩序により、分極クラスターが形成されることによると考えられている。図 2-1(a)(b)に、THz 時間領域分光によって得られた、 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ の定常光学伝導度スペクトルを示す。図 2-1(c)に E//c スペ

クトルの 30 cm^{-1} 付近を拡大したスペクトルを示す。 $\sim 31\text{ cm}^{-1}$ のブロードなピークの強度は、(d)に示すように $< 30\text{ K}$ で急激に増大し、 $\sim 6\text{ K}$ に異常を示す。このような異常は、このブロードなピークが、低周波誘電率の測定で観測された、リラクサー的な誘電異常 (Jawad, Sasaki, Terasaki, Hotta et al., PRB82, 125119(2010)) に関係したものであることを示す。このピークの偏光依存性や、理論的な考察 (Naka, Ishihara, JPSJ79, 063707(2010), Hotta, Phys. Rev. B82, 241104(R)(2010)) を考え合わせると、 $\sim 1\text{ THz}$ (30 cm^{-1}) のピークはダイマー内の微視的双極子の集団励起によると考えられる。

さらに、この電子相関によって形成された強誘電クラスターの光応答を調べるために、

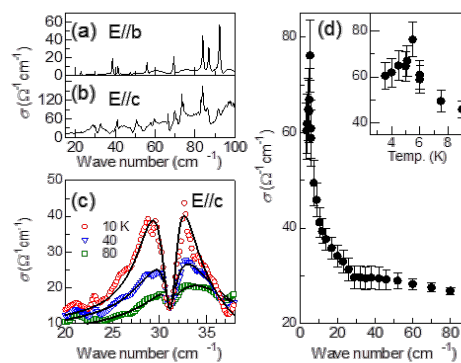


図 2-1 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ の定常光学伝導度スペクトル

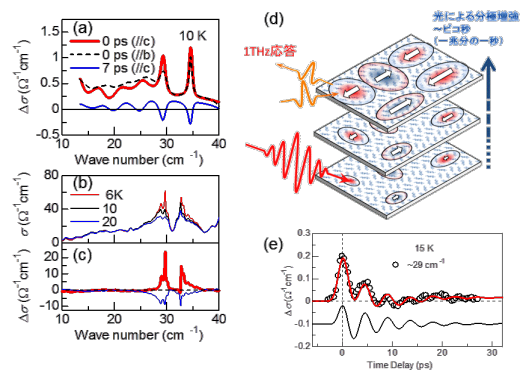


図 2-2 (a) 光励起 THz プロブ測定によって得られた光学伝導度の差分 ($\Delta\sigma_1$) スペクトル、(b) 1 THz のピークの温度依存性と(c)その差分スペクトル、(d) 分極クラスターの光成長の模式図、(e) の時間プロファイル

近赤外光励起-テラヘルツプロブ分光を行った(励起エネルギー 0.89 eV)。図 2-2(a)は、光励起に伴う光学伝導度スペクトルの過渡変化 ($\Delta\sigma_1$) である。励起直後に観測される $\Delta\sigma_1$ の形状 (図 2-2(b)赤太線) は、高温から低温への変化 (分極クラスターの生成) を反映する光学伝導度の増加 (図 2-2(c)赤太線) によく対応している。このことは、光励起に

より分極クラスターの増殖が起きている事を明確に示している。

(3) 7 fs (1.5 サイクルパルス) 発生とそれを用いたコヒーレント瞬時強電場効果の探索

図 3-1 に示すように、パラメトリック増幅 (OPA) のアイドラ光 (1.7 μm) をクリプトンガス中に設置した中空ファイバーに伝播させることによって、自己位相変調効果を介した赤外光の広帯域化を行った。この広帯域赤外パルスをチャープミラーと形状可変鏡を組み合わせたパルスコンプレッサーにより 7 fs (1.5 サイクル) まで圧縮することに成功した。また、試料表面における瞬時電場強度は、10 MV/cm にも及ぶ

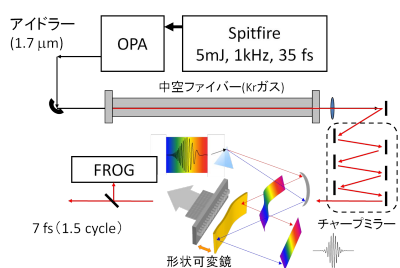


図 3-1 7 fs パルス発生の様式図

図 3-2 にこのパルスを用いて測定した $\alpha\text{-(ET)}_2\text{I}_3$ (138 K、金属相) における過渡反射スペクトルの時間発展を示す。過渡反射スペクトルの形状は、励起後 ~50 fs の間のみ低温の電荷秩序相への変化を示し、その後は温度上昇を示した。しかもこのような”冷却”的な振る舞いは、~10 MV/cm の強電場下でのみ観測された。また、反射率の時間発展には、電荷秩序のギャップの形成を示す時間軸振動が観測された。これらの結果は、金属相中に光励起によって局在した電子状態が生成したことを示している。この光励起による電荷の局在は、動的局在と呼ばれる、高周波強電場下での移動積分の減少によって説明できる。動的局在は、30 年以上前に提案された理論であるが、実験的にその効果を観測したのは初めてのことである。

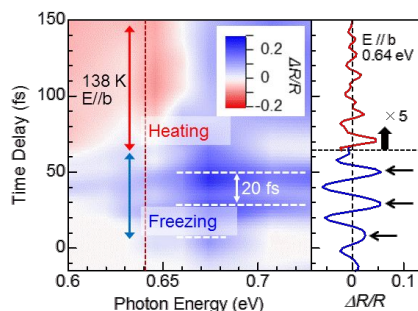


図 3-2 $\alpha\text{-(ET)}_2\text{I}_3$ における過渡反射スペクトルの時間発展と、金属相中に電荷ギャップが開いたことを示す実時間振動成分

(4) 分子内外の自由度が絡み合う電子格子模型に対する光誘起ダイナミクス理論

大きな電場振幅をもつ光を照射すると、通常の光誘起相転移とは異なり、電子の移動を抑制しうることが知られている。動的平均場による解析 (Tsuji et al. PRL **106**, 236401 (2011), PRB **85**, 155124 (2012)) では、単純な電子模型の場合、連続波励起でもパルス励起でも、同様な抑制が起きることがわかっている。しかし、現実の分子性物質では、分子内の電子遷移と分子間の電荷移動、分子内の振動と分子間の振動などが絡み合うことで、それぞれの物質に特有な電子状態や光誘起ダイナミクスをもつ。分子内の電子遷移は分子内の電子移動積分が、分子間の電荷移動は分子間の電子移動積分が、それぞれ支配してい

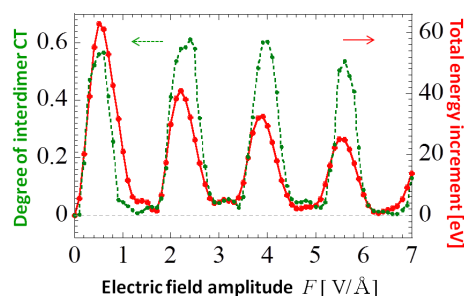


図 4-1 電荷秩序相の Pd(dmit)_2 ダイマー系を大きな電場振幅で光励起した後の、ダイマー間電荷移動 (緑) と全エネルギー増加量 (赤) の励起光電場振幅依存性

るので、これらのどちらかを光によって制御できるかは重要な問題である。そこで、ダイマー間で電荷不均化を起こし、電荷秩序を有する Pd(dmit)_2 ダイマー系を、ダイマー内の電子遷移で光誘起秩序融解するダイナミクスに注目した。連続波励起の場合は、ダイマー間の電子移動積分を制御し、ある条件の下では動的局在を起こすことを示した。しかし、パルス励起の場合、そもそも振動電場の周期よりも長い時間スケールに適用する動的局在の概念が適用できない。ダイマー内の電子移動積分がダイマー間の電子移動積分より一桁大きいため、ダイマー内の電子遷移に共鳴させた数サイクルのパルス励起が終わっても、まだダイマー間の電子移動自体が起きていないからである。それにもかかわらず、ダイマー内の電子移動積分を繰り返すことによって、結果的にダイマー間の電荷移動を制御することを示した。図 4-1 では、ダイマー間の電荷移動の励起光電場振幅依存性が、全エネルギー増加量の励起光電場振幅依存性とほぼ一致することを示している。全エネルギー増加はダイマー内の電子遷移によって起こるので、ダイマー内の電子移動積分の繰り返すことによって説明できることを、解析的に示した。増加し

た全エネルギーは、結果的にダイマー間の電荷移動を通じて電荷秩序を融解することに使われるので、ダイマー間の電荷移動を支配している。この一見矛盾した光誘起ダイナミクス制御は、分子性物質の階層性を利用したものであり、今後の発展が期待できる。

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 37 件)

T. Ishikawa, Y. Sagae, Y. Naitoh, Y. Kawakami, H. Itoh, K. Yamamoto, K. Yakushi, H. Kishida, T. Sasaki, S. Ishihara, Y. Tanaka, K. Yonemitsu and S. Iwai, “Optical freezing of charge motion in an organic conductor”, *Nature Commun.*, 査読有, **5**, 2014, 5528.

DOI: 10.1038/ncomms6528

H. Itoh, K. Itoh, K. Goto, K. Yamamoto, K. Yakushi and S. Iwai, “Efficient terahertz-wave generation and its ultrafast optical modulation in charge ordered organic ferroelectrics”, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, **104**, 2014, 173302.

DOI: 10.1063/1.4871735

K. Nishioka and K. Yonemitsu, “Intra- and Interdimer Transfer Integrals Effectively Modified by Pulsed and Continuous-Wave Lasers for Controlling Charge Transfers in Molecular Crystals”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, **83**, 2014, 024706.

DOI: 10.7566/JPSJ.83.024706

Y. Tanaka and K. Yonemitsu, “Roles of Potential Gradient and Electrode Bandwidth on Negative Differential Resistance in One-Dimensional Band Insulator”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, **83**, 2014, 124704.

DOI: 10.7566/JPSJ.83.124704

K. Itoh, H. Itoh, M. Naka, S. Saito, I. Hosako, N. Yoneyama, S. Ishihara, T. Sasaki and S. Iwai, “Collective Excitation of an Electric Dipole on a Molecular Dimer in an Organic Dimer-Mott Insulator”, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, **110**, 2013, 106401.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.106401

K. Itoh, H. Itoh, S. Saito, I. Hosako, Y. Nakamura, H. Kishida, N. Yoneyama, T. Sasaki, S. Ishihara, and S. Iwai, “Narrowing of phonon spectrum induced by ultrafast charge fluctuations in an organic dimer Mott insulator”, *Phys. Rev. B*, 査読有, **88**, 2013, 125101.

DOI: 10.1103/PhysRevB.88.125101

K. Nishioka and K. Yonemitsu, “Normal-Mode Analysis for Intra- and Inter- molecular Electron-Phonon Coupled Systems with Charge-Ordered and Dimer-Mott Ground States”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, **82**, 2013, 024701.

DOI: 10.7566/JPSJ.82.024701

K. Nishioka and K. Yonemitsu, “Intra- and Interdimer Electron-Phonon Concerted Mechanism of Photoinduced Charge-Order Melting in Metal Complex $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, **82**, 2013, 094716.

DOI: 10.7566/JPSJ.82.094716

S. Iwai, “Photoinduced Phase Transitions in α , θ , κ -type ET Salts: Ultrafast Melting of the Electronic Ordering”, *Crystals*, 査読有, **2**, 2012, 590-617.

DOI: 10.3390/cryst2020590

K. Yonemitsu, “Theory of Photoinduced Phase Transitions in Molecular Conductors: Interplay between Correlated Electrons, Lattice Phonons and Molecular Vibrations”, *Crystals*, 査読有, **2**, 2012, 56-77.

DOI: 10.3390/cryst2010056

H. Uemura, N. Maeshima, K. Yonemitsu and H. Okamoto, “Dimerization- Induced Spin-Charge Coupling in One-Dimensional Mott Insulators Revealed by Femtosecond Reflection Spectroscopy of *Rb-tetracyanoquinodimethane Salts*”, *Phys. Rev. B*, 査読有, **85**, 2012, 125112.

DOI: 10.1103/PhysRevB.85.125112

S. Iwai, “Ultrafast IR and THz spectroscopy of photoinduced insulator to metal transition in highly correlated organic system”, *J. Lumin.*, 査読有, **131**, 2011, 409-414.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022231310005338#>

K. Yonemitsu, “Effects of Lattice and Molecular Phonons on Photoinduced Neutral-to-Ionic Transition Dynamics in Tetrathiafulvalene-*p*-Chloranil”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, **80**, 2011, 084707.

DOI: 10.1143/JPSJ.80.084707

K. Yonemitsu, “S. Miyashita and N. Maeshima, Photoexcitation-Energy-Dependent Transition Pathways from a Dimer Mott Insulator to a Metal”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, **80**, 2011, 084710.

DOI: 10.1143/JPSJ.80.084710

[学会発表](計 104 件)

S. Iwai, “Capturing and Driving Correlated Electrons by 1.5-Cycle Strong Light Field”, Asian Academic Seminar 2015, The Indian Association for the Cultivation of Science (IACS), Kolkata (India), 2015/3/6-10. (招待講演)

K. Yonemitsu and K. Nishioka, “Pulsed vs. CW Laser Excitations: Different Controlling Mechanisms of Photoinduced Charge Transfers in Molecular Crystals”, Fujihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Grand Hotel New Oji (Hokkaido・Tomakomai), 2014/9/24-27. (招待講演)

S. Iwai, “Optical control of correlated charge driven by 10 MV/cm ac field of 1.5-cycle infrared pulse in organic conductor”, The 5th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT5), Bled (Slovenia), 2014/6/8-13. (招待講演)

K. Yonemitsu and K. Nishioka, “Pulsed vs. CW Laser Excitations: Different Controlling Mechanisms of Photoinduced Charge-Order Melting in Molecular Crystals”, The 5th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT5), Bled (Slovenia), 2014/6/8-13. (招待講演)

S. Iwai, “Capturing Electron and Lattice Dynamics of Photoinduced Phase Transitions by 7 fs (1.5 Cycle) Infrared Pulse”, The Fourth Asian Spectroscopy Conference (ASC2013), Nanyang (Singapore), 2013/12/15-18. (招待講演)

S. Iwai, “Capturing ultrafast dynamics of photoinduced phase transitions in organic and transition metal materials”, The Fourth International Workshop on Advanced Spectroscopy and Optical Materials (IWASOM'2013), Gdansk (Poland), 2013/7/14-19. (招待講演)

K. Yonemitsu, “Out-of-Equilibrium Electron-Phonon Correlations during Photoinduced Melting of Charge Order in Molecular Conductors”, International Conference on Electronic States and Phases Induced by Electric or Optical Impacts (IMPACT2012), Orsay (France), 2012/9/10-14. (招待講演)

S. Iwai, “Correlated electron dynamics in 10 fs time scale in the early dynamics of photoinduced phase

transitions”, The 10th Int. Conf. on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012), Groningen (Netherlands), 2012/7/2-6. (招待講演)

岩井伸一郎, 「強相関電子系における光誘起相転移」、日本物理学会 67 回年次大会シンポジウム「凝縮系における超高速現象とコヒーレント物質制御」、関西学院大学(兵庫県・西宮市)、2012/3/24-27. (招待講演)

米満賢治, 「光誘起相転移における多電子フォノン相関の理論」、日本物理学会 67 回年次大会シンポジウム「凝縮系における超高速現象とコヒーレント物質制御」、関西学院大学(兵庫県・西宮市)、2012/3/24-27. (招待講演)

K. Yonemitsu, “Interplay between Correlated Electrons and Quantum Phonons in Organic Compounds”, 4th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena, Wroclaw (Poland), 2011/6/28-7/2. (招待講演)

S. Iwai, “Early-Stage Dynamics of Light-matter Interaction Leading to the Insulator to Metal Transition In Organic Correlated Systems”, 16th International Conference on Luminescence (ICL'2011), Michigan (USA), 2011/6/26-7/1. (招待講演)

[図書](計 1 件)

岩井伸一郎, 朝倉書店、現代物理学[展開シリーズ]7 「超高速分光と光誘起相転移」、2014、214 頁。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩井 伸一郎 (Iwai, Shinichiro)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：6 0 3 5 6 5 2 4

(2) 研究分担者

米満 賢治 (YONEMITSU, Kenji)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号：6 0 2 7 0 8 2 3

(3) 連携研究者

伊藤 弘毅 (ITO, Hirotake)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：7 0 5 6 5 9 7 8

山本 薫 (YAMAMOTO, Kaoru)
岡山理科大学・理学部・准教授
研究者番号：9 0 3 2 1 6 0 3

佐々木 孝彦 (SASAKI, Takahiko)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：2 0 2 4 1 5 6 5

齋藤 伸吾 (SAITO, Shingo)
(独)情報通信研究機構・未来 ICT 研究所・主任研究員

研究者番号：8 0 2 7 2 5 3 2