

令和元年5月30日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02100

研究課題名(和文)5フェムト秒極超短赤外パルス光による強相関電子系の動的局在と秩序形成の研究

研究課題名(英文) Dynamical localization and photoinduced construction of electronic orders in strongly correlated system

研究代表者

岩井 伸一郎 (Iwai, Shinichiro)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：60356524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：世界最先端の近赤外極短パルス(パルス幅6 fs, 1.3 サイクル)を用いた、ポンププローブ実験により強相関電子系の光強電場効果を調べた。有機伝導体( (BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>, (TMTTF)<sub>2</sub>AsF<sub>6</sub>)において、光の振動強電場による電荷の局在の機構を、量子多対理論を用いた解析による考察した。また有機超伝導体( (BEDT-TTF)<sub>2</sub>(Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br)において強励起下のみに観測される誘導放出(光増幅)を初めて観測した。この誘導放出の温度依存性と時間プロファイルから、この物質における超伝導の微視的機構にクーロン反発が寄与していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子多対系である、強相関物質における非平衡現象は国際的には高い注目を集め、研究の潮流が形成されている。このことは、光による(超)伝導、磁性、強誘電性などのデバイスを高速に駆動するための基本原理として必然的な流れである。特に近年のフェムト秒(千兆分の一)～アト秒(百京分の一)技術や量子多体理論による解析手法の発展により、ナノ空間において、「電子はいったいどれくらい速く動けるのか」という疑問にアクセスできるようになってきた。電子のペタヘルツ動作を目指した研究が盛んになっている中で、強相関電子系のもつ超高速デバイスとしての潜在能力を生かす戦略のため、重要な基礎情報を与えるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)： Pump-probe optical measurements utilizing cutting-edge near infrared light-source (pulse width =6 fs, 1.3 cycle) have been performed for investigating strong light field effects in strongly correlated materials. i) Charge localization induced by a light field is observed in organic conductors ( (BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>, (TMTTF)<sub>2</sub>AsF<sub>6</sub>) and the mechanism is clarified by using many-body quantum mechanical analyses. ii) In an organic superconductor( (BEDT-TTF)<sub>2</sub>(Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br), a stimulated emission is observed under strong excitation of 10 MV/cm<sup>2</sup>. It is noteworthy the temperature dependence of the intensity of this stimulated emission at 10 fs shows anomalous increase near the superconducting temperature. This fact indicates that the microscopic mechanism is related to the Coulomb repulsion (or charge fluctuation), considering that the time scale of 10 fs corresponds to 0.4 eV. We theoretically clarified that the origin of the stimulated emission is a synchronized nonlinear charge motion.

研究分野：超高速分光、非線形光学、光物性

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

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

絶縁体 金属転移、強誘電性、強磁性、超伝導などの多彩な物性を示す強相関電子系の光応答としては、これまで光キャリアドープや光誘起構造変化によっておこる光誘起相転移現象が、内外で広く議論されてきた。一方、フェムト秒レーザーの高強度波、波形整形技術、位相制御技術の発展により、光強電場物理は、原子分子から固体へと展開をはじめた。すでに半導体における高次高調波発生や、トポロジカル絶縁体において、フロケ状態（光と電子が強く結合した状態）の生成などが確認されている。そのような中で、研究代表者らは、強相関電子系における光強電場効果として、動的局在（振動強電場によるサイト間の移動積分の抑制）と呼ばれる過去の理論に着想を得て、光の振動強電場によって電子状態が、金属から絶縁体への過渡的变化を示す「電子の運動の凍結」を発見した（Nature commun. 2014）。これは通常の光誘起相転移において観測される光誘起絶縁体 金属転移とは逆のプロセスであり、光による固体の電子状態の双方向制御への重要な一歩といえる。しかし、その詳細な機構はわかっていなかった。

### 2. 研究の目的

研究代表者らが開発した、光の電場振動を一周期しか含まない究極の短パルス赤外光（パルス幅 ~5 フェムト (fs=10-15 秒) の衝撃強電場 (10 - 100 MV/cm)）は、多体電子系（強相関電子系）を極端な非平衡状態（衝撃場非平衡）へと導くことができる。本研究では、原子の振動が熱となって物質の温度を上げる以前に、高周波強電場によるバンド幅の減少（動的局在）や、それに伴う金属 - 絶縁体転移、超伝導や強誘電性、（反）強磁性などの秩序形成を実現する。電子状態の変化を検出する過渡反射測定だけでなく、第二高調波発生（反転対称性の破れ）、ダブルパルス励起（電子コヒーレンス）、テラヘルツ分光（低エネルギー素励起）などあらゆる光測定を駆使して超伝導や強誘電性など非平衡秩序形成に至る道筋を拓く。関連する非平衡時間発展に対する量子多体理論をフロケ理論や時間依存シュレディンガー方程式の異なる手法での数値解から築く。こうして得た、量子多体理論と大規模数値計算を用いた解析により、詳細な機構解明とさらに新規な現象を予測する。光キャリア注入や秩序融解など従来の「光と物質の相互作用」の枠を超えた、多電子系の瞬時強電場による非平衡の理解と機能の開拓を目的とする。特に多電子系の強相関効果、多自由度効果と強電場効果との新規協奏現象について実験に即した理論構築を目指す。

### 3. 研究の方法

光の電場振動を一周期しか含まない究極の短パルス赤外光の衝撃強電場 (10 - 100 MV/cm) を発生させ、さらにそのキャリアーエンベロープ位相 (CEP) を制御することによって光の先導電場による電子を非摂動的に駆動させ、物性を変化させる。極短時間を捉えるための検出法としては、反射率や透過率測定のほか、高調波、テラヘルツ発生やダブルパルス励起による干渉測定、テラヘルツ分光など、あらゆる超高速分光法を駆使する。また理論解析法としては、フロケ理論による解析的な表式を用いるほか、厳密対角化や平均場近似による時間依存シュレディンガー方程式の数値解を、相補的に用いる。

### 4. 研究成果

#### (1) 動的局在の機構解明

ポンププローブ過渡反射測定において、ポンプ光と、プローブ光の偏光選択制とその理論解析から、電荷の短距離秩序が形成される詳細な機構を明らかにした。

二次元有機伝導体  $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$  は、転移温度 150 K で金属（高温）から電荷秩序絶縁体（低温）を示す。電荷秩序相においては、二次元面（a-b 面）内の a 軸（a<sub>2</sub>-a<sub>3</sub> ボンド）方向に電子間反発の効果によって 1010 型の電荷の疎密を生じることが知られている。これまでの測定から、金属相を強励起することによって電荷の短距離秩序ができることが分かっていた。本研究では、電荷秩序の疎密の方向と直交する向きの偏光方向の励起を行った場合に、電荷秩序の形成効率が最大になることを明らかにした。これは一見直感に反する結果であるが、a<sub>2</sub>-a<sub>3</sub> ボンドに沿った電荷秩序が、b ボンド上の電荷のホッピングや、サイト間のクーロン反発の異方性に起因していることを考えれば理解できる。これらのことを考慮した理論解析によって実験結果を再現することに成功した（Phys. Rev. B2017）。

擬二次元有機伝導体  $(\text{TMTTF})_2\text{AsF}_6$  は転移温度 100 K で電荷秩序絶縁体（低温）を示す物質である。しかし、この物質の電荷秩序状態における、電荷の疎密形成は比較的弱く、上記の  $-(\text{ET})_2\text{I}_3$  に比べて、クーロン反発の効果（電荷秩序の性質）は、低エネルギーの物理量にしか現れない（絶縁体の電荷ギャップ < 0.1 eV）。我々はこの特徴を利用し光強電場効果による移動積分の抑制を、ポンププローブ過渡反射スペクトルのプラズマ端のシフトを介して、実験的に明らかにすることに成功した。有効質量を含むプラズマ端シフトとブロードニングから、約 6% の移動積分の減少が 20 fs 以内に、電子温度の上昇は約 50 fs を要して起こることが明らかとなった。（Phys. Rev. B 2016、J. Phys. B）

(2)  $-(\text{BEDT-TTF})$  塩は、化学圧力印加（バンド幅制御）による絶縁体 - 金属転移や超伝導転移を示す有機伝導体である。我々はこの物質の超伝導状態に注目し、超伝導揺らぎ（超伝導に近い転移温度近傍における短距離相関）に関係した、光強電場効果の探索を行った。過渡反射

測定の結果、その結果、基底状態を特徴づけるダイマールバンドの高エネルギー側に、新たな反射ピークが現れることが明らかになった。薄膜(分子科学研究所、山本浩史教授との共同研究)による過渡透過測定と併せて行った結果、この反射増加は、光学利得、すなわち誘導放出であることが明らかになった。この誘導放出の励起強度依存性(0.001~1mJ/cm<sup>2</sup>)と温度依存性(6-60K)を詳細に調べた結果、i)誘導誘導放出は、強励起において超高速成分(立ち上がり<5 fs、減衰70 fs)が主成分となること、この高速成分は、励起後10 fsにおいてももっとも転移の臨界終点と超伝導の転移温度で異常増大を示す。特に、超伝導の転移温度に向かって高温側から増大し、転移温度で極大を示す性質は極めて特徴的である。

この結果、下記の理由により極めて重要である。超伝導の転移温度は、巨視的な秩序状態を特徴づけるものであり、定性的にはそのエネルギースケール(~meV)を示している。

つまり超伝導を定義(観測)するにはこのエネルギーの逆数であるピコ秒の時間が必要というのが常識である。一方、我々の得た結果によれば、励起後10 fsの応答が超伝導の転移温度において異常を示しており、この超高速応答が、超伝導に関係していることを意味する。この物質の超伝導の機構は、スピンや電荷の揺らぎなどによって異論されてきたが、今回の結果は、>0.4 eVの高エネルギー相互作用が、超伝導の微視的なメカニズムに参与している可能性を強く示唆しており、この物質で>0.4 eVの(電子的)相互作用は、電子間のクーロン反発以外にはない。従って、-BEDTTF塩における超伝導の微視的機構には、電子間反発が重要な寄与を果たしていると考えられる。(Nature Photonics 2018)

- (BEDT-TTF)塩において強い光電場を印加した後にのみ観測された、反射率増加とその起源となる誘導放出に特徴的な非線形電荷振動が、どの条件で起きるかを理論的に調べた。二量体を含み、さらにブリージング型の電荷移動が可能になる構造をもつ様々な模型を扱った。これらに共通して得られたのは以下のとおりである。光電場が弱いときには線形応答の光学伝導度の多数のピークに相当する様々な電荷振動が現れる。光電場が強いときにはこの光学伝導度に現れないブリージング型の電荷振動が優勢になる。後者が現れるためには、二量体内の電荷移動と二量体間の異なる電荷移動が同期する必要がある。実際にクーロン相互作用がこの同期現象を可能にしていた。ここまでは厳密対角化を用いたが、実験で観測されている、非線形電荷振動と超伝導秩序との競合を調べるため、二量体構造と引力相互作用を持つ模型に対する平均場近似の計算を行った。一般に、電子のブリージングによる非線形電荷振動は超伝導秩序と競合し、後者が発達するにつれ、前者の振幅が小さくなる。さらに引力を強くすると電子のブリージング以外にも、電荷移動の同期による非線形電荷振動が現れることがわかった。

我々は、さらに新規な光強電場効果として、高次高調波の発生に関する研究をスタートさせた。当初は、反転対称性を持つ物質において観測されている奇数次の高次高調波の探索を行う予定であったが、その矢先、偶数次の非線形分極の効果である第二高調波の発生を見出した。詳細な偏光、温度依存性から、表面SHGの効果ではないことを確認した。6 fsパルスの照射間では、電子の散乱過程が十分な回数起こらないため(この物質の散乱時間~50 fs)、光電場によって電荷が初期位相に応じて弾道的に加速され電流を誘起するためと考えられる。非摂動論効果によって偶数次の高調波が出たことを示す結果であり、画期的といえる。今後詳細な調査を行う。

### (3)電子強誘電体のテラヘルツ透過、発生分光

擬一次元有機伝導体(TM<sub>2</sub>TF)2X(X=PF<sub>2</sub>, AsF<sub>6</sub>, SbF<sub>6</sub>, ReO<sub>4</sub>, BF<sub>4</sub>)は、電子型強誘電体(電子間相互作用によって生じた電荷の偏りが、空間反転対称の破れの起源である強誘電体)として初めに提案された物質である。我々は、電子強誘電体の光強電場効果を調べている(上記1-b)が、その過程で、この物質では、強いテラヘルツ光は発生することを見出した。さらに、強励起においては、テラヘルツ発生と光誘起絶縁体-金属転移が競合、協奏することによって発生するテラヘルツ電磁場の波形が顕著に変化することを明らかにした(Appl.Phys.Lett. 2018)。

強誘電体の特徴づける重要な概念であるドメイン、ドメイン壁の様子を明らかにするために、テラヘルツ発生顕微分光を行った。その結果、物質ごとに異なるドメインとドメイン壁の振る舞いが明らかになった。すなわち、対称性の高い八面体アニオン(X=PF<sub>6</sub>, AsF<sub>6</sub>, SbF<sub>6</sub>)の物質では、強誘電ドメインの大きさは、100 μmを超える巨視的なものであり、また、ドメイン壁に関しては、分極が揃う方向に向くドメイン壁の幅は、5 μm(~分解能)、それに直交する方向の幅は、50 μmと、約一桁も異なることが分かった。このことは、後者の場合にはドメイン壁に必然的に電荷が存在することになるために、エネルギーが高くなり、それを空間的に緩和させるためと考えられる。また、温度サイクル(転移温度をまたいだ温度の上げ下げ)を繰り返しても100 μmスケール上の同一形状を持つ巨視的ドメインが観測された。これは、試料作成時や初回冷却時に生じたひずみの履歴によるものと考えられる。

一方、対称性の低い四面体アニオン(X=ReO<sub>4</sub>, BF<sub>4</sub>)を持つ物質では全く異なる結果が得られた。すなわち、これらの物質では、低温で通常の電荷秩序による強誘電相が掲載されたのち、さらに温度を下げると、アニオン秩序と呼ばれる相が生じることがわかっている。(誘電測定や赤外分光振動分光の結果からは、強誘電ではないことが示唆されていたが、本研究において、アニオン秩序相においてテラヘルツ発生が抑制されることが分かった。これは、アニオン秩序において巨視的な反転対称の破れがないことを示した初めての結果である。)

強誘電相に高温(無秩序相)から入った場合には、八面体アニオンと同様に、いつも同様の巨

視的ドメインが生じるが、低温(アニオン秩序相)から入った場合、ドメインは細かく分割し、しかも毎回異なるドメイン形状が観測された。このことは、格子ひずみを伴うアニオン秩序転移によって、結晶の履歴の効果がキャンセルされ、電子強誘電体本来の性質が現れたものと考えられることができる。今後の光強電場効果の対象として期待できることが分かった。

#### (4) 強相関遍歴磁性体における強電場効果

典型的な強磁性相互作用として半世紀以上以前から知られている二重交換相互作用について、強電場下の光照射効果について理論的解析を実施した。下記の多角的な解析から、本強磁性相互作用が光照射下では反強磁性相互作用に転化することが初めて明らかにした。二重交換模型の実時間解析を実施した。初期状態の強磁性金属状態に高強度光を照射することにより、ほぼ完全な反強磁性秩序状態に転移することを見出した。その初期状態においては動的局在現象によるバンド幅の減少が切っ掛けとなることをスケーリング解析により示した。また強磁性から反強磁性に転移する過渡状態ではスピカイラリティなどのトポロジカルなスピン構造が出現することを見出した。これらの光誘起スピン転移の微視的起源は、光により実現する強い非平衡状態が大きな役割を果たし、これに起因して反強磁性波数に相当するストナー励起が増強することが原因であることを明らかにした。これら総合的な理論解析により、これまで実現していた反強磁性から強磁性への磁気転移と合わせて、光による双方向の転移の基礎原理を提唱した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計44件)

Atsushi Ono, Sumio Ishihara, Photoinduced topological spin texture in a metallic ferromagnet, *J. Phys. Soc. Jpn.* 88, 023703 (2019) 査読有

DOI: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.023703>

Y. Kawakami, T. Amano, Y. Yoneyama, Y. Akamine, H. Itoh, G. Kawaguchi, H. M. Yamamoto, H. Kishida, K. Itoh, T. Sasaki, S. Ishihara, Y. Tanaka, K. Yonemitsu, and S. Iwai, "Nonlinear charge oscillation driven by a single-cycle light field in an organic superconductor", *Nature Photonics*. 12, 474 (2018). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0194-4>

Yohei Kawakami, Hirotake Itoh, Kenji Yonemitsu, and Shinichiro Iwai, "Strong light-field effects driven by nearly single-cycle 7-fs light field in correlated organic conductors", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 51, 174005 (2018). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aad40a>

Hirotake Itoh, Rina Fujiwara, Yohei Kawakami, Kaoru Yamamoto, Yuto Nakamura, Hideo Kishida, and Shinichiro Iwai, "Modulation of terahertz emission in time-domain waveform via a photoinduced phase transition in a charge ordered organic ferroelectric", *Appl. Phys. Lett.* 112, 093302 (2018). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4995798>

Atsushi Ono and Sumio Ishihara, Photocontrol of magnetic structure in an itinerant magnet, *Phys. Rev. B* 98, 214408 (2018). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.214408>

Hitoshi Seo, Yasuhiro Tanaka, and Sumio Ishihara, Photoinduced collective mode, inhomogeneity, and melting in a charge-order system, *Phys. Rev. B* 98, 235150 (2018). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.235150>

K. Yonemitsu, Charge Oscillations Emerging after Application of an Intense Light Field to Superconductors on a Dimer Lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.* 87 (2018) 124703 (9 pages), 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ.87.124703

K. Yonemitsu, Photoinduced High-Frequency Charge Oscillations in Dimerized Systems *J. Phys. Soc. Jpn.* 87 (2018) 044708 (8 pages), 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ.87.044708

Y. Tanaka, M. Daira, and K. Yonemitsu, Photoinduced enhancement of excitonic order in the two-orbital Hubbard model, *Phys. Rev. B* 97 (2018) 115105 (9 pages), 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.97.115105

Hiroshi Hashimoto and Sumio Ishihara, Photoinduced charge-order melting dynamics in a one-dimensional interacting Holstein model, *Phys. Rev. B* 96, 035154-1-11 (2017). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.035154>

Y. Hattori, S. Iguchi, T. Sasaki, S. Iwai, H. Taniguchi, and H. Kishida, "Electric-field-induced intradimer charge disproportionation in the dimer-Mott insulator  $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{ICl}_2$ ", *Phys. Rev. B* 95, 085149-1-5 (2017). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.95.085149

Y. Kawakami, Y. Yoneyama, T. Amano, H. Itoh, K. Yamamoto, Y. Nakamura, H. Kishida, T. Sasaki, S. Ishihara, Y. Tanaka, K. Yonemitsu, and S. Iwai, "Polarization selectivity of charge localization induced by 7-fs nearly single-cycle light-field in an organic metal", Phys. Rev. B95, 201105(R)-1-5(2017). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.201105>

Atsushi Ono and Sumio Ishihara, Double-Exchange Interaction in Optically Induced Nonequilibrium State: A Conversion from Ferromagnetic to Antiferromagnetic Structure, Physical Review Letters 119, 207202-1-5 (2017). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.207202>

K. Yonemitsu, High-Frequency Analysis of Effective Interactions and Bandwidth for Transient States after Monocycle Pulse Excitation of Extended Hubbard Model, J. Phys. Soc. Jpn. 86 (2017) 064702 (8 pages), 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ.86.064702

K. Yonemitsu, Photoinduced Enhancement of Anisotropic Charge Correlations on Triangular Lattices with Trimers, J. Phys. Soc. Jpn. 86 (2017) 024711 (8 pages), 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ.86.024711

Y. Naitoh, Y. Kawakami, T. Ishikawa, Y. Sagae, H. Itoh, K. Yamamoto, T. Sasaki, M. Dressel, S. Ishihara, Y. Tanaka, K. Yonemitsu, and S. Iwai, "Ultrafast response of plasmalike reflectivity edge in (TMTTF)<sub>2</sub>AsF<sub>6</sub> driven by a 7-fs 1.5-cycle strong-light field", Phys. Rev. B93, 165126-1-5 (2016). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.165126>

A. Ono, H. Hashimoto and S. Ishihara, "Pulse excitation to continuous-wave excitation in a low-dimensional interacting quantum system", Phys. Rev. B 94, 115152-1-8 (2016). 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.115152>

Hiroki Yanagiya, Yasuhiro Tanaka, and Kenji Yonemitsu, Phase Separation Induced by Symmetric Monocycle Optical Pulse in Extended Hubbard Models, Journal of the Physical Society of Japan 84, 094705 (9 pages) (2015). 査読有

DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.094705>

#### [学会発表](計 117 件)

岩井伸一郎 (招待講演), 「6-fs 単一サイクル近赤外光強電場で操る強相関電子系の世界」第3回フォトニクス研究会(応用物理学会フォトニクス分科会)光の可能性を追求する!!」, 2018

Sumio Ishihara and Atsushi Ono, "Optical Manipulation of Magnetism in a Correlated Electron System", New Frontier of Strongly Correlated Electron Materials, 2018, 招待講演

S. Iwai (invited), "Strong-light-field effect in an organic superconductor", The 12 International conference on excitonic and photonic processes in condensed matter and nano materials (EXCON2018), 2018.

Sumio Ishihara, "Equilibrium and non-equilibrium states in multi-orbital systems with electron correlation -Phase competition and beyond-", International School and Symposium on Ultrafast Control of Materials, 2018, 招待講演

S. Iwai (invited), "Ultrafast photonics in correlated metal and superconductor", International school and symposium on Ultrafast control of materials (UCM2018), 2018.

Sumio Ishihara and Atsushi Ono, "Optical Manipulation of Magnetism in a Correlated Electron System", Exotic Interaction in Quantum Correlated Materials, 2018, 招待講演

Sumio Ishihara, "Dielectrics and magnetodielectrics in molecular solids as electron-molecular correlated systems", The 14th Russian-CIS-Baltic-Japanese Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF2018), 2018, 招待講演

S. Iwai (Invited), "Ultrafast Dressed Charge State with Driving Field of Light in Organic Conductors", 12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017), 2017.

K. Yonemitsu, Conditions for Photoinduced Enhancement/Suppression of Orders: Charge Order and Excitonic Condensation, International School and Workshop on Electronic Crystals (ECRYS-2017), 2017, 招待講演

S. Iwai (Invited), "Ultrafast excitation of Mott-Hubbard system by nearly single-cycle infrared pulse", International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS-2017, 2017.

岩井伸一郎 (招待講演), 「単一サイクル赤外強電場が拓く超高速電子相転移」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 シンポジウム「光が切り開く新しい時空間観測技術」, 2016.

K. Yonemitsu, Photoinduced Charge Localization and Ordering in Organic Conductors with Anisotropic Transfers/Interactions, The 12th Japan-China Joint Symposium on Conduction and Photoconduction in Organic Solids and Related Phenomena, 2016, 招待講演  
米満賢治, 負温度状態、相互作用反転と動的局在について, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015, 招待講演

〔図書〕(計2件)

Y. Murakami and S. Ishihara (Editor), Springer, Resonant X-ray Scattering in Correlated Systems, 2017, 241pages

岩井伸一郎、共立出版、基本法則から読み解く物理学最前線12、2016、148

〔その他〕

ホームページ等

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 超高速分光研究室(岩井研究室)

<http://femto.phys.tohoku.ac.jp/>

東北大学大学院理学研究科物理学専攻(石原研究室)

<http://cmpt-www.phys.tohoku.ac.jp/%7Eishihara/index.htm>

中央大学理工学部米満研究室

<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/labs/yonemitsu/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 石原 純夫

ローマ字氏名: (ISHIHARA, Sumio)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 大学院理学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30292262

研究分担者氏名: 米満 賢治

ローマ字氏名: (YONEMITSU, Kenji)

所属研究機関名: 中央大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 60270823

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。