

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 10 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540426

研究課題名(和文) 分子性導体の外場誘起非線形現象における階層間結合効果の理論

研究課題名(英文) Theory of Interactions between Different Scales in Field-Induced Nonlinear Phenomena in Molecular Conductors

研究代表者

米満 賢治 (YONEMITSU, Kenji)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：60270823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：分子性導体に強い光を照射した後の電子物性変化の仕組みを、異なる階層における電子とフォノンの絡み合いを通して、理論的に明らかにした。二量体の強い分子性導体が二量体間の電荷不均化による秩序をもつ場合、励起光が二量体内の電子遷移を引き起こしたあと、二量体内で格子を変位させ、元々異なる価数の二量体の構造が近づいてから、一気に二量体間の電荷移動を起こして相転移する。連続波照射では二量体間の電荷移動を抑制できるが、パルス光照射では二量体内の電子遷移を抑制できることがわかった。より一般の遍歴電子モデルでは、負温度状態の生成や相互作用の反転が、対称的単一サイクル・パルスによってさえも起きることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Mechanisms for photoinduced modulation of electronic properties of molecular conductors are theoretically clarified by disentangling the hierarchical structures of electrons and phonons on different scales. In the case of charge disproportionation between dimers in strongly dimerized molecular conductors, photoexcitation induces intradimer electronic transitions, and then the structures of different-valent dimers are slowly changed into those of averaged-valent dimers. Finally, the electronic energy levels of these dimers resonate with each other and a large charge transfer occurs between them. Interdimer charge transfers can be directly controlled by continuous-wave lasers through dynamical localization, while they can be indirectly controlled by pulsed lasers of energy resonant with an intradimer transition. In general, a negative-temperature state and inversion of interactions are rather easily realized even by a symmetric monocycle pulse.

研究分野：物性理論

キーワード：分子性固体 有機導体 光誘起相転移 電荷秩序 絶縁体金属転移 負温度状態

1. 研究開始当初の背景

(1) 光誘起相転移のダイナミクスは平衡状態から大きく離れた電子格子状態で進むため、たとえば平衡状態において経験的に知られている、分子性導体の分子の価数と分子振動数との関係は成り立っていない。しかし、その知見がないという理由で、平衡状態における経験則を使って実験の解釈が行われてきた。そのために、電子状態に敏感なプローブと、振動状態に敏感なプローブでは、実験結果の解釈が異なっていた。そこで、分子内の電子自由度や振動自由度を取り入れることで、分子の価数と分子振動数の間に平衡状態で成り立つ関係を再現したあとで、光誘起相転移ダイナミクスを計算する必要があった。

(2) 実験技術の進歩により、パルス光が短く強くなり、時間分解能が向上するだけでなく、振動電場の振幅が大きくなることで、描像の変化が起きていた。すなわち、高エネルギーのバンドへの電子遷移が光励起によりインコヒーレントに起きる描像から、多数の電子が振動電場によりコヒーレントに揺さぶられる描像へと、変化してきた。電子をコヒーレントに動かすとき、独立電子系に対しては動的局在などの現象が知られている。しかし、相互作用する電子の集団を大振幅の振動電場で揺さぶったときに起きる、非線形現象についてはほとんど知られていなかった。

2. 研究の目的

(1) 分子性導体をもつ特徴的な階層構造における電子とフォノンが絡み合って、外場のもとで、特に振動電場で表現される光照射によって現れる時間発展を明らかにする。非平衡特有の絡み合いを理論的に記述することで、実験で観測されたマルチ時間スケールで変化する電子フォノン状態を再現し、電子フォノン状態の制御が可能か検討する。

(2) 光誘起相転移は多数の電子とフォノンが絡み合うことで達成する非線形現象であるが、特に振動電場の振幅が大きいとき、電子集団がコヒーレントに振動することで初めて現れる現象について予測する。理論計算の結果と実験で観測されるデータを比較することにより、多電子状態のコヒーレント制御に向けて、提言を行う。

3. 研究の方法

(1) 分子性導体の中で、分子や二量体の価数によって敏感に変化する分子振動数をもつ物質に焦点をあてる。その分子および二量体の内側と外側の電子とフォノンの自由度が絡み合った階層構造のもとで、平衡状態だけでなく、光誘起ダイナミクスを再現するように多階層の遍歴電子モデルを構築する。関わる自由度が多くなるため、時間依存ハートリー・フォック法を使って、短い時間スケールから長い時間スケールへの時間発展挙動の

変化を追う。

(2) 振動電場の振幅が大きいとき、強く二量化した分子性導体に限っては、時間発展の初期は二準位系におけるラビ振動に近いことが予想される。まず強く二量化した分子性導体に対して、連続波照射およびパルス光照射のあとで見せる電子状態の変化を解析する。連続波照射の場合に知られている動的局在の概念が、パルス光照射後にどの程度適用できるかを検証する。また、二準位系において古くから知られている負温度状態が、遍歴電子モデルでどれほど一般的に現れるか、負温度状態に伴って相互作用がどれほど有効的に変調するかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 二量体内外で電子とフォノンが階層構造をもつ $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ のモデル構築
光誘起相転移は非平衡環境で進むので、過渡的な電子状態と振動状態の関係は平衡状態におけるものと異なっている。平衡状態において、分子内の C=C 伸縮振動の振動数は、分子の価数によって変化する。その関係は、光照射後の過渡的な非平衡状態では、一般にずれる。このずれ具合を解析すれば、光照射により吸収されたエネルギーの伝達経路について知見を得られる。そのため、分子内の軌道自由度、分子間の電荷移動自由度、分子振動および格子振動を取り入れた遍歴電子モデルを構築する。対象物質として、電子格子相互作用が効いて、二量体を単位とした電荷秩序相になる $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ を考えた。ハートリー・フォック近似の範囲内で、電荷秩序パターンおよび価数に依存して変化する分子振動と格子振動の振動数を再現することができた。分子および二量体をもつ対称性のために、それぞれの振動は分子内電子励起と選択的に結合している。

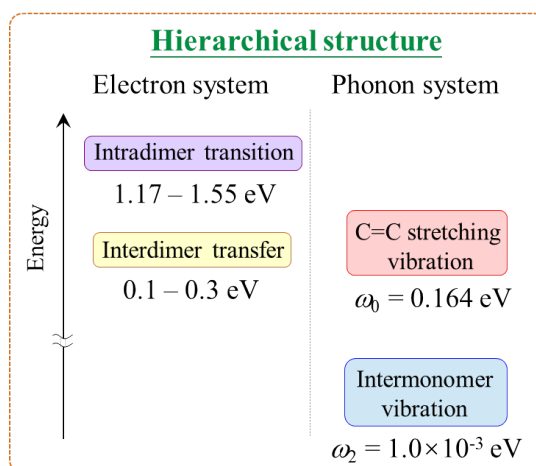


図1 $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の階層構造

(2) $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の電荷秩序融解に対する電子フォノン協奏機構
 $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の電荷秩序相とモット・ハバード相における振動状態とその光誘

起時間変化を調べた。電子相によって異なる分子振動数を説明するには、分子内の軌道自由度に由来した分子振動のソフト化を考える必要がある。様々な分子振動がそれぞれ異なる分子内電子正孔励起と結合し、異なった強さでソフト化することを導いた。ここまでは断熱近似の範囲内で得られる。光誘起過渡状態において、断熱描像で予想されるソフト化とは異なった振動数で分子振動が起こる。これは、光励起密度が高いとき、および分子振動数が高いときであることを明らかにした。また光励起エネルギーが二量体間トランスファー積分より大きいとき、電荷秩序の融解は光励起密度の単調増加関数とならない。強励起では逆に電荷秩序の融解が抑制されるが、これについては後で詳しく述べる。

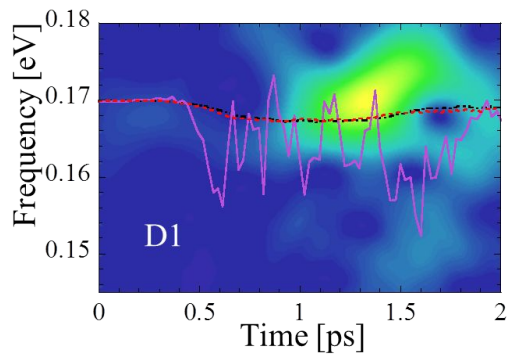


図2 C=C 伸縮振動の時間変化例と非断熱フロッピング

(3) パルス光および連続波の照射による二量体内外のトランスファー積分の有効変調
物質中で競合する相互作用が、光照射で直接変調できれば、光誘起相転移の制御に向けて大きく前進する。この可能性を探る観点から、電荷秩序相にある $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ のモデルに対して、実験でまだ実現していない大振幅の振動電場を印加して、電子状態の時間変化を理論的に計算した。基底状態の電荷分離は二量体間で起きているので、相転移に関わるパラメタは複数の二量体間のトランスファー積分である。光誘起融解を実現するのに使われたレーザー光は、二量体内の電子遷移にほぼ共鳴しているため、光励起に関わるパラメタは二量体内のトランスファー積分である。これら二種類のパラメタを、光照射のしかた次第で独立に変調できることがわかった。連続波照射中は二量体間の有効トランスファー積分が減少して動的局在が起こり、光誘起融解を抑制できる。パルス光励起の場合、短い照射時間中に、二量体間の小さいトランスファー積分を変調することができない。しかし、二量体内の大きいトランスファー積分を有効的に減少させ、光誘起融解を抑制できることがわかった。この二量体内の電子遷移の制御は、ベッセル関数を使って表現することができる。

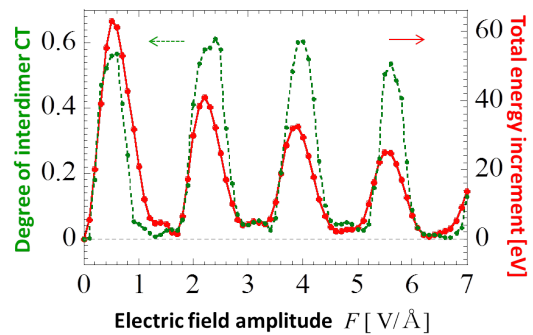


図3 パルス励起後の二量体間電荷移動(緑)と全エネルギー増加(赤)

(4) 対称的単一サイクル・パルスによる負温度状態の生成と有効相互作用の反転

最近パルス光照射でも、負温度状態の生成が可能なのが他の理論グループにより示唆されていた。ただし、パルス光はハーフ・サイクルなど、電場の時間積分が有限になるか、電場の時間変化が非対称なことが必要だと考えられていた。それは、トランスファー積分の符号が有効的に変わること、つまり動的位相シフトが大きいことが、必須と思われたからで、実験では達成が困難な条件だった。そこで、対称的な単一サイクルの振動電場により、負温度状態が形成されないか、それに付随して相互作用が反転しないかを調べた。上記の(1)-(3)で使ったモデルを単純化した1次元3/4フィールドで強く二量化した拡張ハバード・モデルに電子フォノン相互作用を加え、基底状態がバンド絶縁相になる系を扱った。すると負温度状態が単一サイクル電場によって形成され、オンサイト、サイト間の電子間相互作用も、電荷密度変調型、ボンド密度変調型の電子フォノン相互作用も有効的に反転することがわかった。つまり、有効トランスファー積分が照射前後で同一でも、負温度状態が形成できること、エントロピーをあまり大きくせずに、全エネルギーを極大化することが必須であることを、明らかにした。

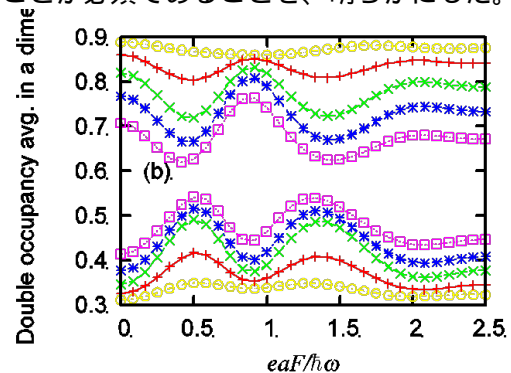


図4 二量体内で平均、パルス励起後で時間平均をとった二重占有率の電場振幅依存性

(5) パルス光照射によるサイト間相互作用の斥力引力変換と相分離

パルス光励起による負温度状態の生成と有効相互作用の反転については、オンサイト斥力だけをもつ Hubbard・モデルに対して、オンサイト引力に変換することによる超伝導生成の可能性が知られていた。しかし現実の物質にはサイト間にも斥力があり、これを反転させてサイト間引力に変換すると、超伝導よりも相分離のほうを生成しやすいことが予想される。そこで 1 次元格子と 2 次元正方格子における 1/2 フィールドの拡張 Hubbard・モデルに対して、小さい系に対しては厳密対角化、大きい系に対しては時空間依存ハートレー・フォック近似を用いて、時間発展を計算した。負温度状態が現れると古くから知られている二準位系から遠く離れた、二量化のまったくない上記の規則格子系においても、負温度状態の生成と斥力引力変換を示した。サイト間斥力相互作用がとても弱い限り、パルス光照射によって変換された有効引力相互作用により、電荷密度の高い領域と低い領域への相分離が起きることを数値的に示した。

(c) 10×10 , $t=80$

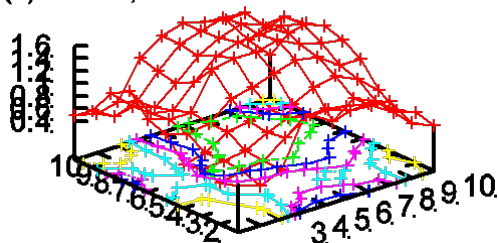


図5 パルス励起後の電子密度の空間依存性 (中央付近は高密度、周辺は低密度)

(6) 国内外における位置づけとインパクト、今後の展望など

現在は、その発現機構が議論されないまま、パルス光照射による電荷密度波の振幅の増大、超伝導の転移温度の上昇などが、国際的に様々な実験で示唆されている。それに符合するような計算結果をこの理論研究で示すことができた。つまり、パルス光照射がそれまで考えられたよりもずっと容易にトランスファー積分を抑制し、有効相互作用を変調することを示した。また共同研究により、光誘起電荷秩序 (融解でなく) 凍結や光誘起有効質量 (減少でなく) 増大を実験で得ることに成功した。今後は理想的な単一サイクル・パルスでなく、より現実的なパルス波形で、励起光の偏光方向を選んで、どのような電子状態を生成することが可能か、理論研究が進むことになるだろう。

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26件)

1. H. Yanagiya, Y. Tanaka, and K. Yonemitsu, Phase Separation Induced by Symmetric Monocycle Optical Pulse in Extended Hubbard Models, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 84 (2015) 094705 (9 pages) 10.7566/JPSJ.84.094705.
2. K. Yonemitsu and K. Nishioka, Negative-Temperature State Formed and Interactions Inverted by Symmetric Monocycle Optical Pulse Excitation, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 84 (2015) 054702 (10 pages) 10.7566/JPSJ.84.054702.
3. 米満賢治, 光誘起電荷秩序融解のしくみ, パリティ (Parity), 査読有, 29 (2014) 55-59.
4. 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, Nat. Commun., 査読有, 5 (2014) 5528 (6 pages) 10.1038/ncomms6528.
5. 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 (4 pages) 10.7566/JPSJ.83.124704.
6. Y. Matsubara, S. Ogihara, J. Itatani, N. Maeshima, K. Yonemitsu, T. Ishikawa, Y. Okimoto, S. Koshihara, T. Hiramatsu, Y. Nakano, H. Yamochi, G. Saito, and K. Onda, Coherent Dynamics of Photoinduced Phase Formation in a Strongly Correlated Organic Crystal, Phys. Rev. B, 査読有, 89 (2014) 161102(R) (5 pages) 10.1103/PhysRevB.89.161102.
7. K. Nishioka and K. Yonemitsu, Intramolecular Orbital Excitations and Frequency Modulation of Molecular Vibrations during Photoinduced Charge-Order Melting in $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$, JPS Conf. Proc., 査読有, 1 (2014) 012044 (4 pages) 10.7566/JPSCP.1.012044.
8. 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 (9 pages) 10.7566/JPSJ.83.024706.
9. 米満賢治, 相関電子系を有する分子性結晶の光誘起相転移 理論的アプローチ, 固体物理, 査読有, 48 (2013) 1-12.

10. Y. Tanaka and K. Yonemitsu, Charge Order and Possible Bias-Induced Metastable State in Organic Conductor β -(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆: Effects of Structural Distortion, *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有, 25 (2013) 465603 (6 pages) 10.1088/0953-8984/25/46/465603.
 11. K. Nishioka and K. Yonemitsu, Intra- and Interdimer Electron-Phonon Concerted Mechanism of Photoinduced Charge-Order Melting in Metal Complex Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, 82 (2013) 094716 (10 pages) 10.7566/JPSJ.82.094716, "Paper of Editors' Choice."
 12. Y. Tanaka and K. Yonemitsu, Current-Voltage Characteristics and Breakdown Mechanism in One-Dimensional Band and Mott Insulators Attached to Electrodes, *J. Kor. Phys. Soc.*, 査読有, 62 (2013) 2164-2167, 10.3938/jkps.62.2164.
 13. K. Nishioka and K. Yonemitsu, Normal-Mode Analysis for Intra- and Intermolecular Electron-Phonon Coupled Systems with Charge-Ordered and Dimer-Mott Ground States, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, 82 (2013) 024701 (11 pages) 10.7566/JPSJ.82.024701.
 14. K. Nishioka and K. Yonemitsu, Theory of Photoinduced Melting of Charge Order in Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂, *Phys. Status Solidi C*, 査読有, 9 (2012) 1213-1215, 10.1002/pssc.201100602.
 15. Y. Tanaka and K. Yonemitsu, Theory of Nonlinear Conduction for Charge-Ordered States in Quasi-Two-Dimensional Organic Conductors, *Phys. Status Solidi C*, 査読有, 9 (2012) 1186-1188, 10.1002/pssc.201100642.
 16. K. Yonemitsu, N. Maeshima and Y. Tanaka, Interplay between Correlated Electrons and Quantum Phonons in Charge-Ordered and Mott-Insulating Organic Compounds, *Acta Physica Polonica A*, 査読有, 121 (2012) 372-374.
 17. K. Nishioka, K. Nasu and K. Yonemitsu, Two-Pulse Excitation for Efficient Formation of an sp³ Nanodomain with Frozen Shear in a Graphite Crystal, *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有, 24 (2012) 205402 (6 pages) 10.1088/0953-8984/24/20/205402.
 18. K. Yonemitsu, Roles of Molecular Vibrations in Photoinduced Insulator-to-Metal and Neutral-to-Ionic Transitions, *Phys. Status Solidi B*, 査読有, 249 (2012) 975-978, 10.1002/pssb.201100533.
 19. 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 (7 pages) 10.1103/PhysRevB.85.125112.
 20. 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, 10.3390/cryst2010056.
 21. N. Maeshima, K. Hino and K. Yonemitsu, Photoinduced Dynamics of the Multi-Orbital Hubbard Model, *Phys. Status Solidi C*, 査読有, 8 (2011) 213-216, 10.1002/pssc.201000648.
 22. Y. Tanaka and K. Yonemitsu, Nonlinear Conduction by Melting of Stripe-Type Charge Order in Organic Conductors with Triangular Lattices, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, 80 (2011) 103702 (4pages) 10.1143/JPSJ.80.103702.
 23. 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 (5pages) 10.1143/JPSJ.80.084710.
 24. 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 (7pages) 10.1143/JPSJ.80.084707.
 25. Y. Tanaka and K. Yonemitsu, Crossover from Bias-Induced to Field-Induced Breakdown in One-Dimensional Band and Mott Insulators Attached to Electrodes, *Phys. Rev. B*, 査読有, 83 (2011) 085113 (11pages) 10.1103/PhysRevB.83.085113.
 26. K. Yonemitsu, Y. Tanaka, S. Miyashita and N. Maeshima, Photoinduced Insulator-to-Metal Transition Dynamics in Models for Quasi-Two-Dimensional Organic Conductors, *Phys. Status Solidi B*, 査読有, 248 (2011) 486-490, 10.1002/pssb.201000567.
- 〔学会発表〕(計41件)
1. 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(招待講演), 2015年9月17日, 関西大学(吹田市).
2. K. Yonemitsu, Y. Tanaka, H. Yanagiya, Negative-Temperature State and Phase Separation Induced by Symmetric Monocycle Optical Pulse in Extended Hubbard Models, The 11th International Symposium on Crystalline Organic Metals Superconductors and Magnets (ISCOM2015), 2015年9月8日, Bad Gögging (Germany).
 3. K. Yonemitsu, 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 (招待講演), 2014年9月26日, Tomakomai (Japan).
 4. K. Yonemitsu and K. Nishioka, Optical Control of Charge Transfers Using Molecular Hierarchy and Photoinduced Charge-Order Melting, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2014 (ICSM 2014), 2014年7月4日, Turku (Finland).
 5. 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) (招待講演), 2014年6月9日, Bled (Slovenia).
 6. K. Yonemitsu and K. Nishioka, Photoinduced Dynamics during Charge-Order Melting: Nonequilibrium Phonon-Frequency Modulation, The 11th China-Japan Joint Symposium on Conduction and Photoconduction in Organic Solids and Related Phenomena (招待講演), 2013年9月3日, Changchun (China).
 7. K. Yonemitsu and K. Nishioka, Intramolecular Orbital Excitations and Frequency Modulation of Molecular Vibrations during Photoinduced Charge-Order Melting, The 10th International Symposium on Crystalline Organic Metals Superconductors and Magnets (ISCOM2013), 2013年7月16日, Montreal (Canada).
 8. 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) (招待講演), 2012年9月10日, Orsay (France).
 9. K. Yonemitsu and K. Nishioka, Photoinduced Electron-Phonon Interference in Charge-Ordered Molecular Conductors, The 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012), 2012年7月5日, Groningen (the Netherlands).
 10. 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, 日本物理学会第67回年次大会(招待講演), 2012年3月25日, 関西学院大学(西宮市).
 11. K. Yonemitsu, Interplay between Correlated Electrons and Quantum Phonons in Photoinduced Insulator-to-Metal Transitions, 14th Korea-Japan Molecular Science Symposium on New Visions for Spectroscopy and Computation: Temporal and Spatial Adventures of Molecular Sciences (招待講演), 2011年7月7日, Busan (Korea).
 12. K. Yonemitsu, Interplay between Correlated Electrons and Quantum Phonons in Organic Compounds, 4th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (招待講演), 2011年6月29日, Wroclaw (Poland).
- 〔その他〕
報道関連
日経産業新聞 2014年12月1日第10面
「電子の動き 光で止める」
科学新聞 2014年12月12日第4面
「レーザー光照射で電子の動きを凍結・秩序化」
- ホームページ等
<http://ir.c.chuo-u.ac.jp/researcher/profile/00015330.html>
<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/labs/yonemitsu/>
<http://www.yomiuri.co.jp/adv/chuo/opinion/20130927.html>
6. 研究組織
(1)研究代表者
米満 賢治 (YONEMITSU Kenji)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号: 60270823
- (3)連携研究者
田中 康寛 (TANAKA Yasuhiro)
中央大学・理工学部・助教
研究者番号: 50541801