

令和元年6月13日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05397

研究課題名(和文) 分子性結晶薄膜試料における物性制御の光学的研究

研究課題名(英文) Optical study of the thin film of molecular crystal in the view point of the control of physical properties by light

研究代表者

石川 忠彦 (Ishikawa, Tadahiko)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：70313327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：特に分子性結晶固体の薄片試料を用い、外場を制御した基での光誘起状態変化の様子を調べる事で光機能性物質の探索設計を目指し、メカニズムの解明と共に物性評価方法の確立を試みた。金属絶縁体相転移を示す分子性導体結晶の電子及び分子内振動スペクトル測定をバルクおよび薄片試料で比較した。両者は定性的に良く一致し、薄片を用いる事で簡便かつ正確な物性評価が可能だとわかった。薄片試料を用いる事で時間分解分光の定量的な解析が容易になりダイナミクスを詳細に報告する事が出来た。また、励起波長に依存した光誘起状態という新しい光誘起状態変化がスピנקロスオーバー錯体複合試料で起こる事を光学的手法で確認する事に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の成果により、分子性結晶固体の薄片試料の物性評価手法が確立し、今後様々な類似の結晶試料に適用していただける事が分かった。これまでバルク試料を用いる事でしか物性評価をする事が出来なかったが、今後は透過配置での簡便な分光測定を行う事が出来る事になる為、物性評価の期間短縮かつより高度な測定に挑戦する事が出来るようになると思われる。また、新規な光誘起現象を確認出来た事から、今後はそのメカニズム解明を続ける事で、新規光機能性物質の開発指針の確立に繋がると考える。

研究成果の概要(英文)：By using thin crystals of molecular solids and examining the change of the state by photo-excitation under the control of an external field, we have tried to establish the method of evaluating the physical properties of thin crystals and to understand the mechanism of photoinduced dynamics. We measured the electronic and intramolecular vibrational spectra of molecular conductor crystals exhibiting metal-insulator phase transition and compared the spectra of bulk and thin crystal samples. Both were in good qualitative agreement, and it was found that simple and accurate evaluation of physical properties is possible by using thin crystals. By using thin crystals, quantitative analysis of time-resolved spectroscopy could be done easily and the dynamics could be reported in detail. In addition, we succeeded in confirming a new photo-induced state change depending on the wavelength of the excitation light occurs in the spin crossover hybrid system.

研究分野：固体物性

キーワード：光誘起状態変化 光誘起相転移 分子性結晶 薄片試料 光誘起ダイナミクス 時間分解分光

1. 研究開始当初の背景

分子性導体研究は、化学合成で人工的に金属や超伝導体まで作り出せる魅力ある学問分野である。構造的“柔らかさ”から、“曲がる電子回路”や環境に優しい機能性材料など、現在のシリコン基盤の情報化社会の革新に必須の物質群として期待を集める。また、強い電子-格子、電子-電子相関等、内在する協力的相互作用間の競合/協奏で多様な物質相が発現し、伝導、磁性、誘電、光学特性の巨大な変化を伴う相転移(金属絶縁体、電荷整列、強磁性、強誘電、中性イオン性相転移 *etc.*)が存在する。その微妙なバランスを外場(圧力、温度、光励起等)で崩せば、相転移挙動を制御し高効率な物性制御が可能である。単なる電気伝導性の変化で無い、他自由度(スピンや構造変形等)も絡めた、革新的な相転移デバイス材料の創出が期待出来る。

研究代表者は、分子性導体の相転移挙動を、特に光励起で制御する事による次世代光機能素子(光スイッチングや光メモリ、光ピエゾ素子など)の実現可能性に着目し、バルク結晶を対象とした光励起ダイナミクス研究に従事してきた。電子系や分子内分子間振動の時間域(0.1-1 ps, ps = 10^{-12} 秒)での光励起ダイナミクスを、サブ ps 時間分解能を持つ時間分解スペクトル測定で調べ、物質相制御の可能性 [1]や組成依存性を議論した [2]。また、分子格子変形の実空間ダイナミクスの直接観測(分子性導体結晶における“分子動画”の作成)に成功した [3]。これらは、個別試料だけでなく、系統的に揃えた試料間の光応答の違いに着目する重要性や、光学応答だけの単眼的な研究で無く構造解析も合わせた複合的視点で見る事の重要性を示す。

これら成果を踏まえ、各個別試料のダイナミクス測定結果を整理し、その駆動メカニズムを普遍的に理解する事が求められるが、従来のバルク固体試料を用いた研究では、励起光の影響が試料表面に限られ、測定手段も表面敏感な反射率測定に限られる為に、測定に熟練した技術や経験を必要とし、多角的な視点で研究成果を取りまとめる事に困難を伴う状況があった。

一方、分子性導体の相転移現象を制御し実用化する試みとして、分子性導体の薄膜化及びその薄膜物性研究が端緒についている [4]。100 nm から 1 μ m 程度の厚さの薄片状結晶によるデバイス構造作成により、電界ドーピングキャリア生成による相転移現象観測 [4]のみならず、基板変形を用いた相転移制御 [5]など、実用面でも興味深い物性制御が報告されている。これらは伝導特性測定の報告だが、薄片試料でしか出来ない透過光測定配置での光学スペクトル測定に応用すれば、上記外場制御を見据えた新しい光誘起過渡状態研究が出来ると考えた。この為、分子性導体結晶の薄片試料を作成し光誘起過渡状態の観測により、分子性結晶薄膜試料における物性制御の光学的研究を行う事が新規光機能性材料開発に不可欠で喫緊の課題であった。

2. 研究の目的

光励起による相転移制御を基盤とした光機能素子の開発を目標に見据え、分子性導体薄片試料を対象とし、電子構造変化ダイナミクスの観測および、そのメカニズムの解明を目指した。これまで分子性導体試料でのこのような薄膜を用いた分光スペクトル評価は、定常状態、光誘起過渡状態を含め殆どその報告が無く、その実用性を示す事から開始し、実際の試料について、これまでのバルクによる評価法の限界を打破する事を目指した。

3. 研究の方法

研究対象である分子性導体試料は、新規な物性を示す物質探索という本研究の方針もあり、結晶の大きさは 1mm 以下と非常に小さい事が多い。従って、顕微分光システムの開発に取り組んでおり、本課題の予算で、特に薄片試料を扱うのに便利な改良作業をおこなった。この装置で、単結晶試料並びに本学所有の共同利用設備であるウルトラマイクロトーム(UMT)を用いて切り出した 100 nm 厚程度の大面积(mm スケール)薄片試料を対象とした定常分光スペクトル測定による電子状態および分子(結晶)構造の観測を行い、光照射過渡状態の期待できる試料について、時間分解的手法を用いた光誘起ダイナミクスの観測及び光誘起過渡状態の同定を試みた。また、期間終盤において光照射下の結晶構造解析にも挑戦した。

4. 研究成果

本課題における重要な成果として、主に 2 種類の成果が挙げられる。一つ目は、分子性導体の薄片試料を用いた定常光及び時間分解分光手法を実際に用いる事の出来る手法として確立出来た。という点である。また二つ目には試料探索の過程で、スピントロスオーバー複合体試料において、励起波長依存した非平衡状態特有の新規の光誘起物質相が存在する事の光学スペクトルの証拠を示す事が出来た点である。以下これら二つに絞り、本課題の研究成果を述べる。

1) 分子性導体の薄片試料を用いた定常光及び時間分解分光手法の確立

研究代表者の現有の分光測定装置は自作したものであり、主にバルク単結晶試料を用いた測定を行い易いよう設計されていた。これを薄片試料の透過率測定用に改良した。まず試料ホルダー作成から行った。上記 UMT を用いて切り出された薄片試料は大面积かつ薄いため、機械的強度は無く、自律膜として存在する事は出来ない場合が多い、そこで透過型電子顕微鏡(TEM)観測用の銅グリッドを試料保持用に用いる事を試み、各種規格を試す事でこれに成功した。こうして測定した薄片試料を用いた分光スペクトルの例を図 1 として挙げる。

図1(a)は、200meshのTEM用銅グリッドに載せた300nm厚の分子性導体試料の透過率スペクトルから計算した光学密度(Optical density:OD)スペクトルである。直線偏光を用いる事で、スペクトルの顕著な異方性を観測する事にも成功している。図1(b)に挙げたのは、同一組成の分子性導体のバルク単結晶試料(切り出し前)の反射率測定の結果をKramers-Kronig(KK)変

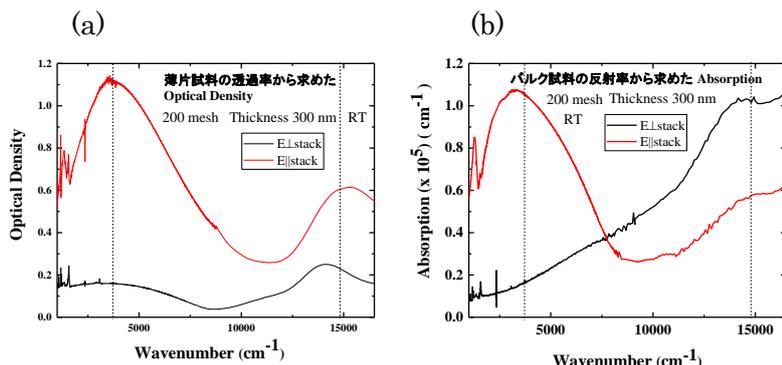


図1. (a)薄片試料を用いた分光スペクトルと(b)バルク試料を用いたものの比較。

換を行う事で計算した吸収強度スペクトルである。透過率から計算したODとKK変換から計算した吸収強度スペクトルでは、反射率補正の分だけスペクトル形状が異なる事を考えると直接比較する事は出来ないが、吸収ピークの位置や概形などよく一致しており、薄片試料の光学

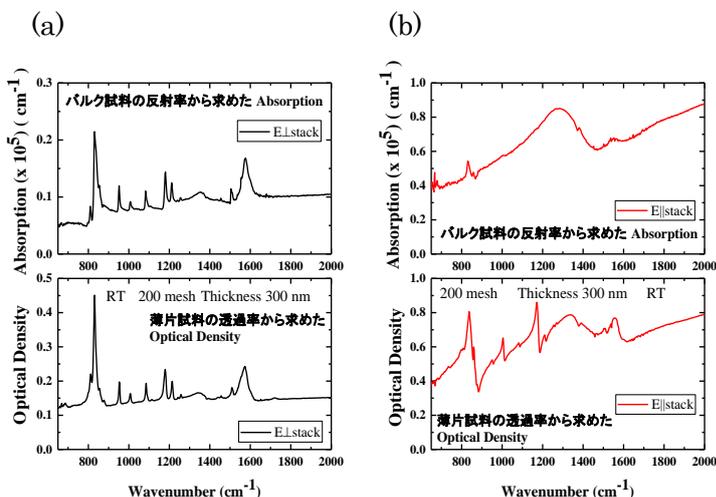


図2. 分子内振動領域の吸収スペクトルの比較(a)E||stack 偏光(b)E⊥stack 偏光

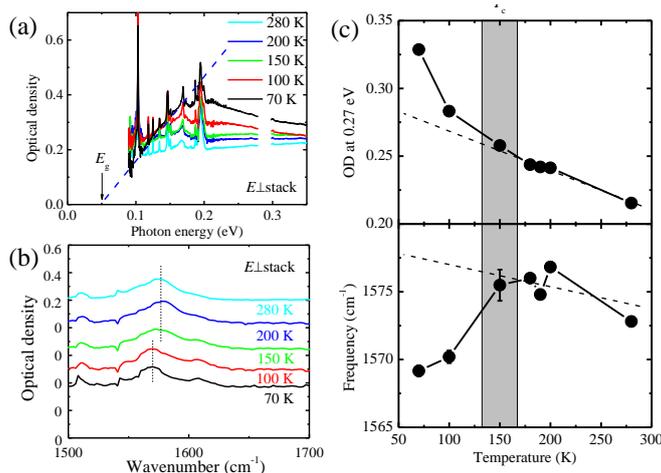


図3. 薄片試料を用いた低温分光測定の実例(a)金属絶縁体相転移の観測図中の E_g は、低温絶縁体相での電荷ギャップの評価。(b)分子内振動領域のスペクトル変化。(c)0.4 eVでの光学密度(上段)とC=C伸縮振動モードの周波数(下段)の温度依存性。成果リストの雑誌論文1.より

スペクトル測定を行う事で、非常に技術を要する反射率測定の手段を取る事無く、比較的簡便に試料の電子状態の評価を行う事が出来たと言える。

同様の比較を低エネルギー域の分子内振動領域のスペクトル測定でも試みた(図2)。電気伝導性の高い分子スタック軸方向の偏光(E||stack)では、反射率のKK変換から求めた吸収スペクトルよりも薄片試料の方がよりシャープなピーク構造を示す。特に弱い吸収モード観測において、威力を発揮する事がわかった。対象試料が金属絶縁体相転移の近傍に居る事から、この

違いは、反射率スペクトルでは金属的キャリアの応答で遮蔽された分子内振動モードの観測が難しく **KK** 変換を行ってもハッキリと識別する事が難しい、という事情によると考えられる。

また、薄片試料の光学スペクトルの温度依存性の測定にも成功している (図3、成果リスト雑誌論文 1.) 反射率スペクトルと違い、**KK** 変換特有の測定範囲外の外挿の問題が無く、ピーク位置自体が共鳴周波数を示す事から、より簡便かつ正確な解析評価が可能である事がわかる。

更に、時間分解分光を行った。図4 a)から予想される光励起によるスペクトル変化図 4d)の形状と、図4b)の測定結果をフィッティング解析して求めた光誘起スペクトル変化の様子図4c)のスペクトル形状が非常に似通っている事がわかる。分子内振動領域の反射率変化は分散型をしており、スペクトル変化が状態変化の大きさに対して線形に変化する事は無いのだが、薄片試料を用いて透過配置で直接光学密度スペクトルを測定する事により、このような定量的な解析が非常に上手く行く事がわかった事は、本課題の重要な成果であると言える。これらの内容は、本課題の最終年度である昨年度末に投稿論文にまとめて掲載されている。

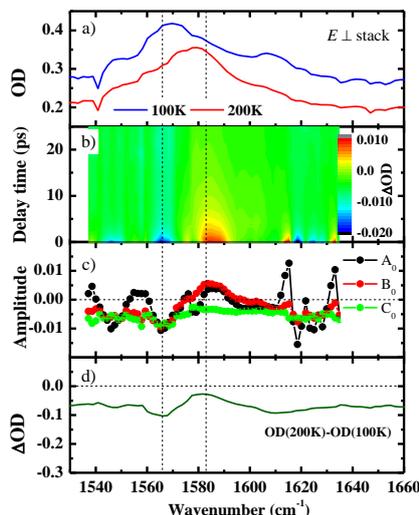


図4. 薄片試料を用いた時間分解分光測定例。a)定常状態である高温相及び低温相の分子内振動領域の吸収スペクトル、b) 時間分解分光の結果を等高線プロットしたもの。c) フィッティング解析結果。d)予想されるスペクトル変化。成果リストの雑誌論文 1.より

2) スピントロニクスオーバー複合体試料の励起波長依存した新規光誘起物質相の観測

薄片試料を用いた応力変調スペクトル測定を目的にして、微小圧力印加で物性変化が期待される試料探索を行っていたところ、光励起による体積変化を伴う状態変化が起こるスピントロニクスオーバー複合体試料に辿り着いた。この物質は、光誘起磁性変化を起こす Fe イオンを中心とした金属錯体分子と他の機能性を担う分子を組み合わせた結晶であり、体積変化を伴う光スイッチを内蔵した新規光機能性物質の候補として考えていた。研究代表者が本申請課題で改良した分光測定装置を用いて、バルク結晶の反射率測定と薄片試料の透過率測定を行い、温度変化に伴う相転移の観測に成功した。観測した電子構造変化は、複合体試料として、スピントロニクスオーバー錯体分子の磁性変化に伴う体積変化が、単なる結晶体積の増加では無く、結晶構造自体 (分子同士の重なり方) の変化と強く結合している事を実験的に支持する結果となっていた。この事は、光励起によるスピントロニクスオーバー錯体分子の構造変化を起こせば、それが即ち結晶全体の物性を制御できるという事を強く示唆しており、組み合わせる分子を選ぶことにより様々な光機能性物質を設計するという強力な設計指針を得る事が期待出来る結果である。特に薄片試料を用いた透過配置の測定において、これらの事実が明確になった事を付記しておく。これらの結果は、国内学会において報告した (主な発表論文等の学会発表 [7])。

次に、光誘起過渡状態及びその状態変化ダイナミクスの観測を狙い、時間分解分光測定を行った。高温高スピン相において光誘起反射率変化の観測に成功した。その結果は光誘起特有の相の発現を示唆しているが、変化自体は大きくは無く、相転移と言えるマクロな物性変化には繋がら無いかもしれない。一方で、低温低スピン相においては、我々の Pump-Probe 測定系の繰り返し周期である 1ms を遥かに超える長い寿命を持つ安定な光誘起相の存在が明らかとなった。この光誘起相の存在自体は既に帯磁率の測定において見出され報告されている [6]が、相転移温度近傍の高温までも 長い寿命を持っている事は、想定していなかった事態であった。

ここで、Pump-Probe 型の時間分解分光を低温相において行う事はあきらめ、定常光励起下および励起後の光誘起準安定相の定常スペクトル測定を行う事にした。この際に、実験室の照明程度の非常に微弱な光励起ですら低温では試料のスペクトルを根本的に変えてしまうほど光応答性が高い試料である事が明らかとなり、照明を一切使わずに光学スペクトルを測定する必要に迫られたため、自動ステージの導入などの測定系の改造に予算をつぎ込む事となった。これにより、特に分子内振動領域の反射スペクトル形状が、光励起前後で大きく変化する事が判明した。また、未だ再現性のチェックをしている最中だが、励起光波長を変える事で、そのスペクトル変化が異なるだろう事も明らかとなってきた。そのスペクトル変化からは、光誘起準

安定状態は、熱平衡状態で観測される高温高スピン相及び低温低スピン相とは異なる分子周辺環境にある事を示唆する結果となっており、光励起で新しい物質相を作り出し、その切り替えを励起光の波長を変える事で行う事が出来るという、従来に無い新しい特徴を持った光機能的物質である可能性が出てきた事だと理解している。そこで、研究期間終盤である昨年度末において、光照射下での結晶構造解析を行ったところ、光誘起準安定状態の結晶構造は、確かに熱平衡状態と異なっている事が明らかとなったが、こちらは現在解析中である。

以上のように、分子性導体薄片試料を用いる事で、比較的簡便な方法であるにも関わらず正確に電子状態や分子格子構造の詳細を明らかにする事が出来る事、およびその方法の確立を行う事に本課題は成功したと言える。計画当初に目指していた温度変化以外の応力効果のようなより高度な測定技術の確立には残念ながらまだ至っていないが、薄膜試料を用いる分光測定により、これまで明確に出来なかった様々な物性評価が出来るようになった事で、後半に述べたような新規の光機能的物質の研究に大幅な進展を見る事が出来た事は、本課題の成果と言えるだろう。今後は、はじめたばかりの光照射下の精密構造解析の測定結果の集積を進め、あわせて考察する事を進めていきたい。また、温度以外のパラメータ変化を切っ掛けとした物性制御の探索手法の開発も進めていきたい。

[References]

- [1] T. Ishikawa, *et al.*, Phys. Rev. B **80**, 115108 (2009).
- [2] T. Ishikawa, *et al.*, J. Physics. Condens. Matter **24**, 195501 (2012).
- [3] T. Ishikawa, *et al.*, in *Photo Induc. Phase Transit.* **5** (2014).
- [4] Y. Kawasugi, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 243508 (2008).
- [5] M. Suda, *et al.*, Adv. Mater. **26**, 3490 (2014).
- [6] K. Fukuroi, *et al.*, Angew. Chemie - Int. Ed. **53**, 1983 (2014).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1. T. Ishikawa, Y. Urasawa, T. Shindo, Y. Okimoto, S. Koshihara, S. Tanaka, K. Onda, K. T. Hiramatsu, Y. Nakano, K. Tanaka, and H. Yamochi, "Optical Study of Electronic Structure and Photoinduced Dynamics in the Organic Alloy System [(EDO-TTF)_{0.89}(MeEDO-TTF)_{0.11}]₂PF₆", Applied Sciences, **9**, 1174 (2019), 査読有り
2. Tsugumi Umanodan, Keisuke Kaneshima, Kengo Takeuchi, Nobuhisa Ishii, Jiro Itani, Hideki Hirori, Yasuyuki Sanari, Koichiro Tanaka, Yoshihiko Kanemitsu, Tadahiko Ishikawa, Shin-ya Koshihara, Sachio Horiuchi, and Yoichi Okimoto, "Ultrafast Control of Ferroelectricity with Dynamical Repositioning of Protons in a Supramolecular Cocrystal Studied by Femtosecond Nonlinear Spectroscopy", Journal of the Physical Society of Japan, **88**, 13705 (2019), 査読有り
3. Y. Okimoto, S. Naruse, R. Fukaya, T. Ishikawa, S. Koshihara, K. Oka, M. Azuma, K. Tanaka and H. Hirori, "Ultrafast Control of the Polarity of BiCoO₃ by Orbital Excitation as Investigated by Femtosecond Spectroscopy", PHYSICAL REVIEW APPLIED, **7**, 064016 (2017), 査読有り.
4. M. Hada, K. Norimatsu, S. Tanaka, S. Keskin, T. Tsuruta, K. Igarashi, T. Ishikawa, Y. Kayanuma, R.J.D. Miller, K. Onda, T. Sasagawa, S. Koshihara, and K.G. Nakamura, "Bandgap modulation in photoexcited topological insulator Bi₂Te₃ via atomic displacements", J. Chem. Phys. **145**, 024504 (2016), 査読有り.
5. Tadahiko Ishikawa, Stuart A Hayes, R J Dwayne Miller, Masaki Hada and Shinya Koshihara, "The photoinduced dynamics of X[M(dmit)₂]₂ salts", Physica Scripta, **92**, 034005(2017), 査読有り.
6. 石川 忠彦, 腰原 伸也, 羽田 真毅 「「分子動画」で見る分子性導体の光誘起ダイナミクス」日本物理学会誌、Vol. 73, No. 12, p. 864 (2018).
7. 石川忠彦、腰原伸也、羽田真毅「分子の瞬間の動きをコマドリ撮影できた！-光機能的物質の動作メカニズム解明に進展-」、化学、72、No.6、45 (2017)。
8. 石川忠彦、腰原伸也、羽田真毅「分子の変形を2兆分の1秒刻みで撮影；光機能的物質の動作メカニズム解明」、自動車技術、70、No. 4、98-99 (2016)。

[学会発表] (計 14 件)

- [1] T. Ishikawa, T. Okazaki, D. Nishida, Y. Sudo, Y. Okimoto, S. Koshihara, M. Hada, A. Miyawaki, K. Takahashi, "The Optical Study of Photoinduced Structural change in the Spin-crossover Hybrid System", Sixth Banff Meeting on Structural Dynamics, Banff center, Canada, Feb. 9-13, 2019 (ポスター発表)
- [2] Tadahiko Ishikawa, T. Okazaki and S. Koshihara, K. Takahashi, "Photoinduced phenomena of the spin-crossover molecular hybrid system", Conductivity and Magnetism in Molecular Materials, Gordon Research Conference, Bryant University, Smithfield, RI, August 12-17, 2018 (ポスター発表, 80件中8件に選ばれた事により口頭発表も行った。)
- [3] Tadahiko Ishikawa, Ken Onda, Yoichi Okimoto, Shin-ya Koshihara, Reizo Kato, and Reiji

Kumai, "Observation of the photoinduced structural dynamics in molecular crystals with Structure-Charge-Spin coupling" the 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018), Sendai International Conference Center in Sendai, Japan during July 30 - August 4, 2018 (口頭発表、with invitation letter)

- [4] T. Ishikawa, The 12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, "Photo-Induced Dynamics of $\text{Me}_4\text{P}[\text{Pt}(\text{dmit})_2]_2$ Studied by the Time-Resolved Structural Analysis and Optical Spectroscopy", Superconductors and Magnets (ISCOM2017), Zao, Miyagi, Japan, 24-29 Sept. 2017, (口頭発表、招待講演)
- [5] T. Ishikawa, "Photo-induced dynamics of $\text{Me}_4\text{P}[\text{Pt}(\text{dmit})_2]_2$ ", PIPT6, Sendai international center, Sendai, Japan, 5-9 June. 2017, (口頭発表)
- [6] T. Ishikawa, S. Hayes, S. Keskin, G. Corthey, M. Hada, K. Pichugin, A. Marx, K. Shionuma, S. Koshihara, M. Nomura, R. Kato, and R.J.D. Miller, "photo-induced dynamics of $\text{Pt}(\text{dmit})_2$ salts "Molecular movie"", The 15th International Conference on Molecule-Based Magnets, Sendai international center, Sendai, Japan, 4-8 Sept., 2016. (ポスター発表)
- [7] 岡崎俊樹、石川忠彦、沖本洋一、腰原伸也、堀内佐智雄、田中誠一、恩田健、高橋一志、磁性-非磁性相転移とスピントロニクスオーバー転移が結合した複合分子系の電子構造及び光誘起ダイナミクス, 日本物理学会、2017年秋季大会 岩手大学上田キャンパス、2017年9月21-24日、ポスター
- [8] 石川忠彦、岡崎俊樹、西田大介、敷土雄也、沖本洋一、腰原伸也、羽田真毅、宮脇敦大、高橋一志、"複合機能性スピントロニクスオーバー錯体における光誘起状態の光学的研究", 第28回日本MRS年次大会、北九州国際会議場・西日本国際展示場、2018年12月18-20日、(口頭、招待講演)
- [9] 石川忠彦、"「分子動画」で見る分子性導体の光誘起ダイナミクス", 平成27年度「分子システム研究」研究報告会、理化学研究所、和光、2016年2月4日(口頭、招待講演)
- [10] 横山景祐、馬ノ段月果、石川忠彦、腰原伸也、沖本洋一、藤原孝将、池田直、電子強誘電体 YbFe_2O_4 の非線形光学測定と励起状態、日本物理学会、2018年秋季大会、同志社大学、京田辺キャンパス、2018年9月9-12日、口頭
- [11] 石川忠彦、岡崎俊樹、沖本洋一、腰原伸也、羽田真毅、宮脇敦大、高橋一志、スピントロニクスオーバー相転移を起こす複合磁性材料における光誘起状態の研究、日本物理学会2018年秋季大会 同志社大学 京田辺キャンパス 2018年9月9-12日 口頭
- [12] 石川忠彦、岡崎俊樹、西田大介、敷土雄也、沖本洋一、腰原伸也、羽田真毅、宮脇敦大、高橋一志、複合機能性スピントロニクスオーバー錯体における光誘起状態の光学的研究、中性イオン性相転移を示す新しい配位高分子鎖における光誘起ダイナミクス、第28回日本MRS年次大会、北九州国際会議場・西日本国際展示場、2018年12月18-20日、口頭
- [13] 佐野史弥、後藤崇臣、石川忠彦、沖本洋一、腰原伸也、高橋優介、杜毅楠、高坂亘、宮坂等、"中性イオン性相転移を示す新しい配位高分子鎖における光誘起ダイナミクス", 第28回日本MRS年次大会、北九州国際会議場・西日本国際展示場、2018年12月18-20日、口頭
- [14] 佐野史弥、後藤崇臣、石川忠彦、沖本洋一、腰原伸也、杜毅楠、高橋優介、高坂亘、宮坂等、中性イオン性相転移を示す新規一次元鎖状高分子における光誘起電荷移動ダイナミクス、日本物理学会第74回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019年3月14-17日、口頭

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.pipt.sci.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

研究代表者氏名：石川 忠彦

ローマ字氏名：ISHIKAWA Tadahiko

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：理学院化学系

職名：助教

研究者番号：70313327

※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。