

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：84502

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18944

研究課題名(和文) X線自由電子レーザーの特性を生かしたフェムト秒構造化学の開拓

研究課題名(英文) Pioneering femtosecond structural chemistry using X-ray Free Electron Laser

研究代表者

片山 哲夫 (Katayama, Tetsuo)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用研究推進室・主幹研究員

研究者番号：90648073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、X線自由電子レーザーの特性を生かして溶液中のポリピリジン銅(I)錯体分子の光誘起擬ヤーン・テラー構造変化を原子分解能で直接観測し、励起された分子がポテンシャルエネルギー面上を移動する軌跡を実験的にマッピングした。逆格子空間に投影された系の構造変化を直接観察する時間分解X線溶液散乱を活用することで錯体(溶質)と第一配位圏に存在する周囲の溶媒分子(アセトニトリル)の構造変化をサブオングストロームの分解能で追跡することができた。これにより、溶質分子と周囲の溶媒分子が互いにどのような影響を及ぼし合いながら構造変化が進行するのか、そのメカニズムを原子レベルで解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶液中では、反応物となる溶質だけでなく周囲に存在する溶媒が光反応に顕著な影響を及ぼすことは溶媒和効果として良く知られた現象である。しかし、原子レベルの動きとして溶質の構造変化が周囲にある溶媒分子をどのように動かすのか、また動いた溶媒分子が逆に溶質のダイナミクスにどのような影響を及ぼすのかについてはこれまでほとんど分かっていなかった。本研究の成果は時間分解X線溶液散乱がこの学術的な問いに答える有力な手法であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have directly observed photo-induced pseudo-Jahn-Teller conformational changes of polypyridine copper(I) complex molecules in solution at atomic resolution by exploiting the uniqueness of the X-ray free electron laser, and experimentally mapped the trajectory of the excited molecules traversing on the potential energy surface. By utilizing time-resolved X-ray solution scattering, which directly observes the structural changes of the system projected in reciprocal lattice space, we tracked the structural changes of the complex (solute) and the surrounding solvent molecules (acetonitrile) in the first coordination sphere with sub-angstrom resolution. This elucidates the atomic-level mechanism of how the solute and surrounding solvent molecules interact with each other and structural changes proceed.

研究分野：光化学

キーワード：核波束 X線溶液散乱 X線発光分光 X線自由電子レーザー 分子動画 溶媒和 ダイナミクス 光反応

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

超高速の光反応をスナップショット観測するポンプ・プローブ法は、光励起状態のダイナミクスの研究において広く用いられてきた。この手法における時間分解能は光の閃光時間に律速されるため、「原子の動き」を捉えるためには核運動の時間スケールに対応したフェムト秒の閃光時間を持つパルス光源が必要となる。現在、この条件を満たし、かつ最も普及しているポンプ・プローブ法の光源は、紫外～赤外領域のレーザー光である。しかし、紫外～赤外領域の光は、回折限界によって空間分解能がナノメートルオーダーに制限されるため、分子構造（結合長、結合角度）の変化に関しては間接的な情報を与えるにとどまる。この限界を突破し、光励起状態のダイナミクスを分子構造の時間変化として直接観測するには、原子間の結合長と同程度のX線領域までプローブ光の波長を短くすることが求められる。

このニーズに応える光源として近年、フェムト秒の閃光時間を持つX線自由電子レーザー (XFEL) が開発された。プローブ光としてのXFELの利点は、高時間分解能 (fs) ・高空間分解能 (sub-Å) を併せ持つことであり、XFELを使った計測手法の開拓とともに超高速X線科学という新しい分野が開化しつつある。しかし、計測手法ごとに観測しやすい「原子の動き」のタイプが異なるため、複数の反応座標が入り組んでいる系を一つの計測手法で完全に追跡することは難しい。例えば、光触媒や太陽電池における光増感剤として注目されてきた  $[\text{Cu}(\text{dmphen})_2]^+$  (dmphen=2,9-ジメチル-1,10-フェナントロリン) 錯体分子は、光を吸収するとコヒーレントな振動（核波束振動）を介して正四面体型から平面型へと構造変化をおこす（擬ヤーン・テラー歪み、Fig. 1）。申請者らは、X線吸収分光法によってこの核波束振動を捉えることに成功し、その振幅を $\pm 0.1\text{\AA}$ と評価したが、2つのフェナントロリン配位子間の二面角が $90^\circ$ から $\sim 70^\circ$ へと変化する様を直接観測することはできなかった[Nat. Commun. 10, 3606, (2019)]。これは、X線吸収分光法がX線を吸収するCu原子とその近接にある4つのN原子の位置にのみ敏感であることが主な理由であり、ダイナミクスの包括的な理解には様々なX線計測手法の相補的な利用が重要となることを示唆している。

## 2. 研究の目的

本研究では、XFELを使った時間分解X線溶液散乱法によってアセトニトリルに溶解した $[\text{Cu}(\text{dmphen})_2]^+$ 錯体分子の光励起状態のダイナミクスを追跡し、分子構造の変化を決定する。具体的には、2つのフェナントロリン配位子間の二面角の変化とCu-N原子間の平均結合長の変化を定量的に（それぞれ $0.1^\circ$ 、 $0.01\text{\AA}$ のオーダーで）観測して、電荷移動状態における核波束の軌跡をマッピングすることを目的に実験を行った。

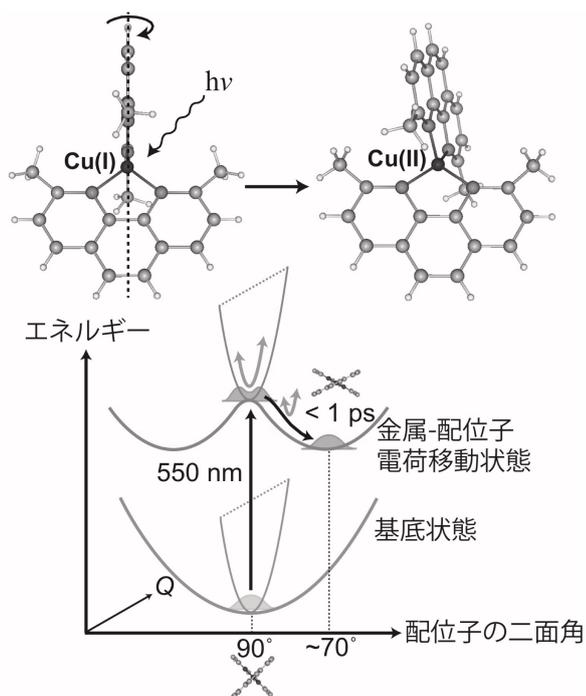


Fig. 1  $[\text{Cu}(\text{dmphen})_2]^+$ の擬ヤーン・テラー歪み

### 3. 研究の方法

#### i. SACLA における実験 [Katayama *et al.*, *Chem. Sci.* **14**, 2572–2584 (2023).]

本研究課題の目的を実現するため、日本の XFEL 施設 SACLA において時間分解 X 線溶液散乱および時間分解 X 線発光分光の同時測定を実施した。時間分解 X 線発光分光では光励起状態の Cu の価数が 1 価から 2 価へと変化することに対応して、Cu K $\alpha$  発光スペクトルのシフトを観測した(Fig. 2)。観測された差分スペクトルを、参照データ（基底状態でそれぞれ 1 価と 2 価の価数をとる銅錯体の発光スペクトルの差分スペクトル）でスケールリングすることにより、光で励起された分子の割合を 20.2%と見積もった。時間分解 X 線溶液散乱では、0–20 ps の遅延時間のデータを計測した。X 線溶液散乱の差分曲線は、

- ① [Cu(dmphen)<sub>2</sub>]<sup>+</sup> 錯体分子の構造変化
- ② 溶媒（アセトニトリル）の加熱膨張によって生じる構造変化
- ③ 錯体–溶媒間の構造変化（溶媒和）

の 3 種の寄与によって説明できる。①の寄与は、4 つの Cu–N の原子間結合長が同じ位相で伸縮する動き（フェナントロリン配位子が呼吸するように動く breathing motion）とフェナントロリン配位子間の二面角の変化（擬ヤーン・テラー歪み）の 2 種類の構造自由度でモデル化した。②の寄与は別の実験で、色素を使った時間分解 X 線溶液散乱によって実測した。③の寄与は QM/MM MD シミュレーションから散乱曲線を計算した。①–③のそれぞれの寄与をモデル化することにより、

- $\Delta\theta(t)$  : 2 つのフェナントロリン配位子間の二面角の変化
- $\Delta r(t)$  : 4 つの Cu–N の原子間結合長の変化の平均
- $\alpha(t)$  : MD シミュレーションで求めた溶媒和構造の変化のスケールリングパラメーター
- $\Delta T(t)$  : 溶媒温度の変化

の 4 つの構造パラメーターが設定できる。X 線散乱の差分曲線をこれら 4 つのパラメーターを用いてフィッティングすることにより構造変化の定量化を行った。

#### ii. European XFEL における実験 [*under preparation*]

SACLA の実験では励起された分子の割合は分かっていたものの、電子スピンの変化 ( $S_1 \rightarrow T_1$ ) については不明なままだった。この間に挑戦するために European XFEL に赴き、より価電子状態の変化に敏感な Cu K $\beta_{2,5}$  発光スペクトルを計測した。差分スペクトルの計測には成功したが、解析では  $S_1$  から  $T_1$  への変化とそれぞれの割合を評価するには至らなかった。しかし、得られた差分スペクトルを理論シミュレーションと比較することにより、溶媒であるアセトニトリル分子の錯体への配位（exciplex の生成）に関して時間分解 X 線溶液散乱の結果を補強する知見が得られると考

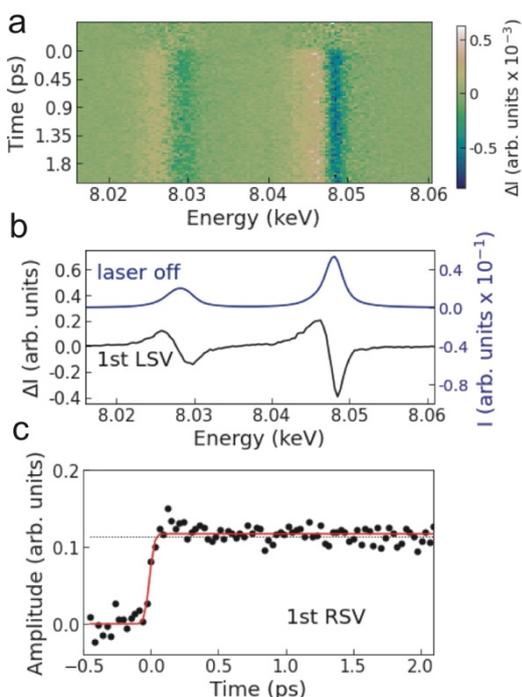


Fig. 2 時間分解 Cu K $\alpha$  発光スペクトル

えて解析を進めている。

【研究を遂行する上で生じた問題点およびその解決方法】

該当なし

【当初に予定していた研究経費の使用計画を変更して行なった研究計画・研究方法】

該当なし

#### 4. 研究成果

Fig. 3 に X 線散乱の差分曲線とフィッティングの結果を示す。概ね良好なフィッティング結果が得られ、構築したモデルが計測結果を良く説明できることがわかる。

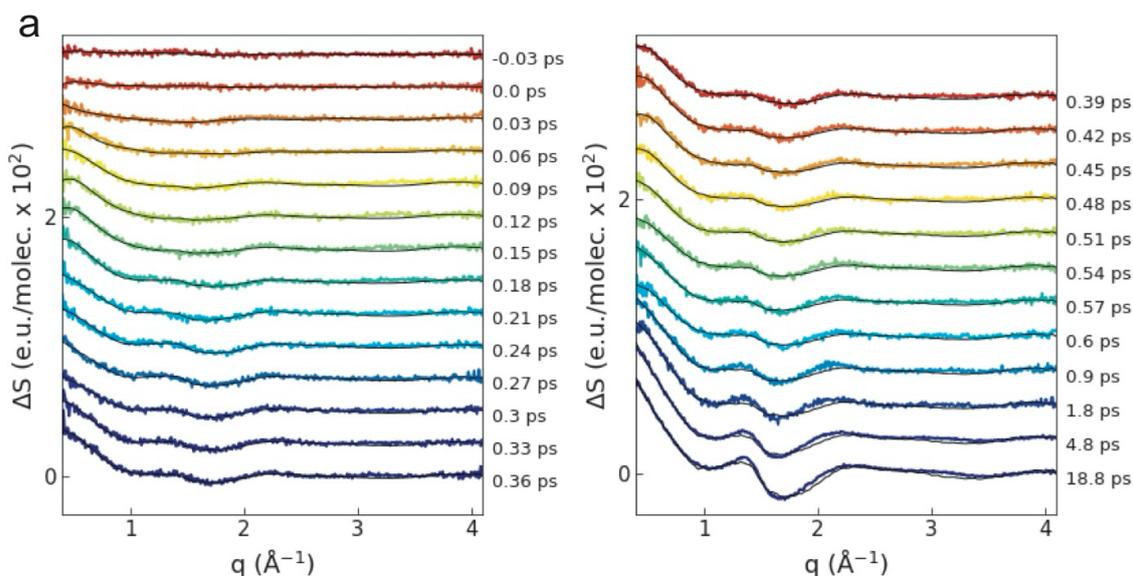


Fig. 3 X 線散乱の差分曲線。色付き線: 実測データ、黒線: フィッティング

Fig. 4 にフィッティングの結果得られた $\Delta\theta(t)$ 、 $\alpha(t)$ 、 $\Delta r(t)$ の時間変化を示す。

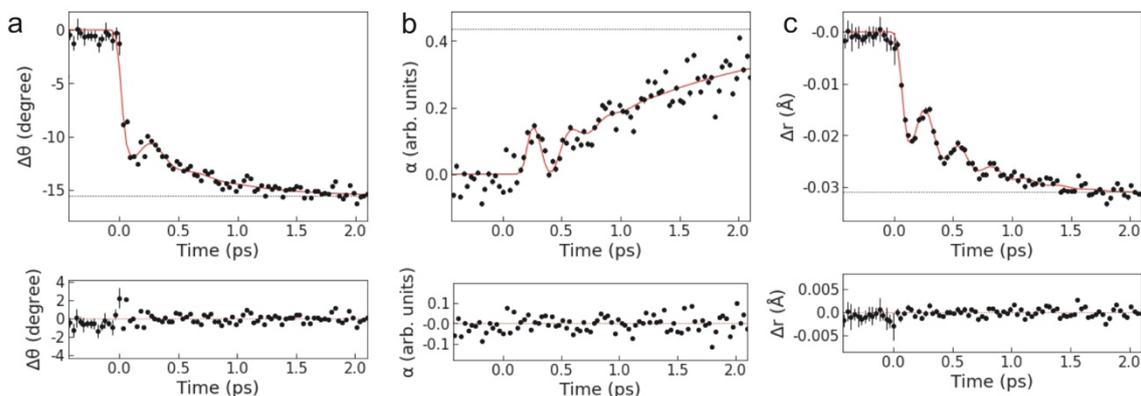


Fig. 4 (a)  $\Delta\theta(t)$ 、(b)  $\alpha(t)$ 、(c)  $\Delta r(t)$ の時間変化

$\Delta\theta(t)$ は、光吸収直後に大きく減少した後、1周期分の振動を経て徐々に-16 [deg]へと近づいていくことがわかる。 $\alpha(t)$ は、少しの遅延をおいて $\Delta\theta(t)$ と逆の動きをしており、フェナントロリン配位子間の二面角の変化と溶媒和の構造変化が関連していることを強く示唆している。 $\Delta r(t)$ は $\sim 4$ 周期分の減衰振動を示しており、過去の時間分解 X 線吸収分光の研究成果[Nat. Commun. **10**, 3606, (2019)]との整合が確認された。

溶媒和構造まで含めたダイナミクスを理解する上で、 $\alpha(t)$ のもつ物理的な意味合いは重要である。MD シミュレーションで得られた溶媒和構造の変化における支配的な寄与はフェナントロリン配位子間の二面角の変化によって開いたスペースにアセトニトリル分子が入り込む動きであ

った(Fig. 5)。すなわち $\alpha(t)$ は、アセトニトリル分子がこのスペースにどの程度入り込むかの指標と見做すことができる。

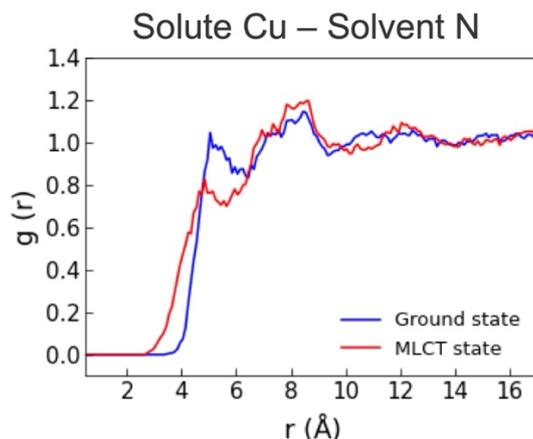


Fig. 5 MD シミュレーションによる Cu 原子(錯体)と N 原子 (溶媒) の間の動径分布関数

この事実を基に、溶媒和構造まで含めたダイナミクスの全体像を以下のように描いた (Fig. 6)。

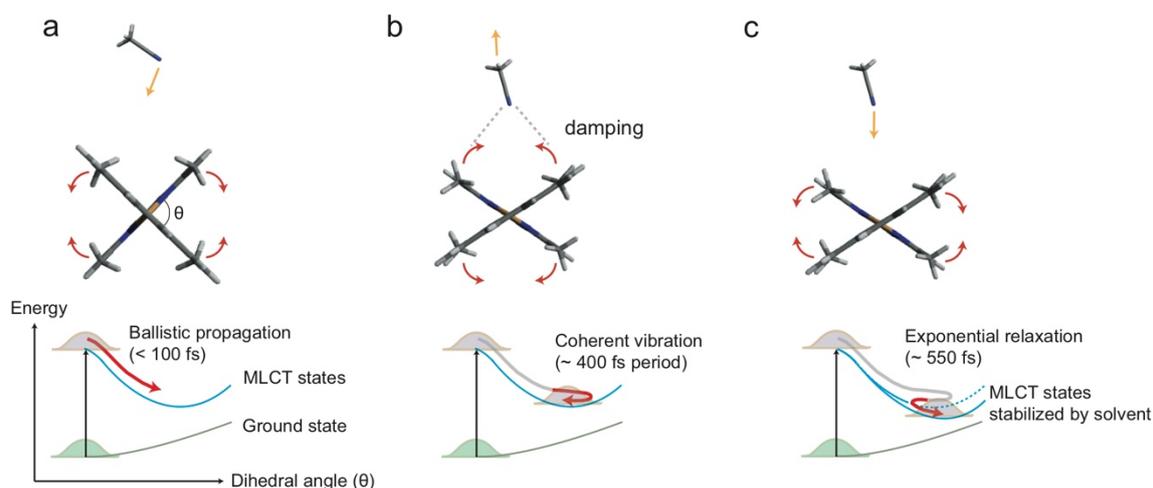


Fig. 6 擬ヤーン・テラー歪みの構造ダイナミクスとそのメカニズム

光吸収の直後、錯体はポテンシャルエネルギー曲線に沿って急速に平坦化する (Fig. 6a)。この時、少しの遅延を置いて広がったスペースにアセトニトリル分子が入り込む動きが生じる。錯体がポテンシャルエネルギー曲線の谷に近づくとコヒーレント振動をするが、二面角が  $90$  [deg] に戻ろうと動く際にちょうどアセトニトリル分子が最も近づく配置となる (Fig. 6b)。この時、溶質-溶媒間の相互作用を通してエネルギーの授受が起こり、錯体のコヒーレント振動は強く減衰すると同時に近づいたアセトニトリル分子は錯体から離れる方向へリバウンドする。その後、配位子の平坦化とアセトニトリル分子の割り込みが相乗的に進んで安定化する (Fig. 6c)。

本研究の成果の最大の特徴は、溶質と周囲の溶媒の動きの両方を sub-Å の分解能で可視化し、お互いの影響を解明した点である。これは研究開始当初は予見していなかった望外の成果といえる。溶液中では、反応物となる溶質だけでなく周囲に存在する溶媒が光反応に顕著な影響を及ぼすことは溶媒和効果として良く知られた現象である。しかし、原子レベルの動きとして溶質の構造変化が周囲にある溶媒分子をどのように動かすのか、また動いた溶媒分子が逆に溶質のダイナミクスにどのような影響を及ぼすのかについてはこれまで観測する手段がなかった。本研究は、時間分解 X 線散乱がこの学術的な問いに答える有力な手法であることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件/うち国際共著 11件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Katayama Tetsuo, Choi Tae-Kyu, Khakhulin Dmitry, Dohn Asmus O., Milne Christopher J., Vanko Gyorgy, Nemeth Zoltan, Lima Frederico A., Szlachetko Jakub, Sato Tokushi, Nozawa Shunsuke, Adachi Shin-ichi, Yabashi Makina, Penfold Thomas J., Gawelda Wojciech, Levi Gianluca	4. 巻 14
2. 論文標題 Atomic-scale observation of solvent reorganization influencing photoinduced structural dynamics in a copper complex photosensitizer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 2572 ~ 2584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2SC06600A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamanaka Ken-ichi, Sato Kosuke, Sato Shunsuke, Nozawa Shunsuke, Lee Sunghee, Fukaya Ryo, Fukuzawa Hironobu, You Daehyun, Saito Shu, Takanashi Tsukasa, Katayama Tetsuo, Togashi Tadashi, Nonaka Takamasa, Dohmae Kazuhiko, Adachi Shin-ichi, Ueda Kiyoshi, Yabashi Makina, Morikawa Takeshi, Asahi Ryoji	4. 巻 435
2. 論文標題 Ultrafast charge-transfer dynamics in a visible-light-excited iridium(III) terpyridine 2-phenylpyridine complex studied by femtosecond X-ray absorption spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry	6. 最初と最後の頁 114267 ~ 114267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochem.2022.114267	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Giorgianni Flavio, Burian Max, Gurung Namrata, Kubli Martin, Esposito Vincent, Staub Urs, Beaud Paul, Johnson Steven L., Windsor Yoav William, Rettig Laurenz, Ozerov Dmitry, Lemke Henrik, Saha Susmita, Pressacco Federico, Collins Stephen Patrick, Togashi Tadashi, Katayama Tetsuo, 他5名	4. 巻 105
2. 論文標題 Melting of magnetic order in NaOsO <sub>3</sub> by femtosecond laser pulses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.155147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fuller Franklin D., Loukianov Anton, Takanashi Tsukasa, You Daehyun, Li Yiwen, Ueda Kiyoshi, Fransson Thomas, Yabashi Makina, Katayama Tetsuo, Weng Tsu-Chien, Alonso-Mori Roberto, Bergmann Uwe, Jan Kern, Yachandra Vittal K., Wernet Philippe, Yano Junko	4. 巻 4
2. 論文標題 Resonant X-ray emission spectroscopy from broadband stochastic pulses at an X-ray free electron laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Chemistry	6. 最初と最後の頁 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42004-021-00512-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Niozu Akinobu, Kumagai Yoshiaki, Fukuzawa Hironobu, Yokono Naomichi, You Daehyun, Saito Shu, Luo Yu, Kukk Edwin, Cirelli Claudio, Rist Jonas, Vela-Perez Isabel, Kameshima Takashi, Joti Yasumasa, Motomura Koji, Togashi Tadashi, Owada Shigeki, Katayama Tetsuo, 他7名	4. 巻 11
2. 論文標題 Relation between Inner Structural Dynamics and Ion Dynamics of Laser-Heated Nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 31046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.031046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mara Michael W., Phelan Brian T., Xie Zhu-Lin, Kim Tae Wu, Hsu Darren J., Liu Xiaolin, Valentine Andrew J. S., Kim Pyosang, Li Xiaosong, Adachi Shin-ichi, Katayama Tetsuo, Mulfort Karen L., Chen Lin X.	4. 巻 13
2. 論文標題 Unveiling ultrafast dynamics in bridged bimetallic complexes using optical and X-ray transient absorption spectroscopies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 1715 ~ 1724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sc05034f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mazzone Daniel G., Meyers Derek, Cao Yue, Vale James G., Dashwood Cameron D., Shi Youguo, James Andrew J. A., Robinson Neil J., Lin Jiaqi, Thampy Vivek, Tanaka Yoshikazu, Johnson Allan S., Miao Hu, Wang Ruitang, Assefa Tadesse A., Kim Jungho, Casa Diego, Katayama Tetsuo, 他18名	4. 巻 118
2. 論文標題 Laser-induced transient magnons in Sr3Ir2O7 throughout the Brillouin zone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2103696118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2103696118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 de la Pena Munoz Gilberto A., Correa Alfredo A., Yang Shan, Delaire Olivier, Huang Yijing, Johnson Allan S., Katayama Tetsuo, Krapivin Viktor, Pastor Ernest, Reis David A., Teitelbaum Samuel, Vidas Luciana, Wall Simon, Trigo Mariano	4. 巻 19
2. 論文標題 Ultrafast lattice disordering can be accelerated by electronic collisional forces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1489 ~ 1494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-023-02118-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nimmrich Amke, Panman Matthijs R., Berntsson Oskar, Biasin Elisa, Niebling Stephan, Petersson Jonas, Hoernke Maria, Bjorling Alexander, Gustavsson Emil, van Driel Tim B., Dohn Asmus O., Laursen Mads, Zederkof Diana B., Tono Kensuke, Katayama Tetsuo, 他7名	4. 巻 145
2. 論文標題 Solvent-Dependent Structural Dynamics in the Ultrafast Photodissociation Reaction of Triiodide Observed with Time-Resolved X-ray Solution Scattering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 15754 ~ 15765
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.3c00484	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Huang Yijing, Querales-Flores Jose D., Teitelbaum Samuel W., Cao Jiang, Henighan Thomas, Liu Hanzhe, Jiang Mason, De la Pena Gilberto, Krapivin Viktor, Haber Johann, Sato Takahiro, Chollet Matthieu, Zhu Diling, Katayama Tetsuo, 他13名	4. 巻 13
2. 論文標題 Ultrafast Measurements of Mode-Specific Deformation Potentials of Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> and Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 41050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.13.041050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Milne Christopher J., Nagornova Natalia, Pope Thomas, Chen Hui-Yuan, Rossi Thomas, Szlachetko Jakub, Gawelda Wojciech, Britz Alexander, van Driel Tim B., Sala Leonardo, Ebner Simon, Katayama Tetsuo, 他18名	4. 巻 10
2. 論文標題 Disentangling the evolution of electrons and holes in photoexcited ZnO nanoparticles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 64501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/4.0000204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 片山 哲夫
2. 発表標題 X線自由電子レーザーを利用したフェムト秒時間分解X線計測とその応用
3. 学会等名 日本物理学会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片山 哲夫
2. 発表標題 X線自由電子レーザーによる超高速構造ダイナミクスの研究
3. 学会等名 NanospecFY2021mini（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山 哲夫
2. 発表標題 SACLA分光分析による構造ダイナミクス研究
3. 学会等名 第35回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tetsuo Katayama
2. 発表標題 Ultrafast structural dynamics of Cu(I) complex probed by XFEL
3. 学会等名 EuXFEL chemical dynamics workshop（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片山 哲夫
2. 発表標題 金属錯体の構造ダイナミクスにおける溶媒和の影響
3. 学会等名 第37回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tetsuo Katayama
2. 発表標題 Instrumental development and data analysis of X-ray emission spectroscopy supporting SFX at SACLA
3. 学会等名 UK-Japan meeting on dynamic and time-resolved crystallography（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
アイスランド	University of Iceland			
英国	Newcatsle University			
韓国	Pohang Accelerator Laboratory			
スペイン	IMDEA-Nanociencia	Universidad Autonoma de Madrid		
米国	SLAC National Accelerator Laboratory	University of Wisconsin	Lawrence Berkeley National Laboratory	他4機関

共同研究相手国	相手方研究機関			
スウェーデン	Uppsala University			
中国	ShanghaiTech University			
スイス	Paul Scherrer Institute	EPFL	ETH Zurich	他1機関
ドイツ	Goethe University Frankfurt	Fritz Haber Institute	European XFEL GmbH	