

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 5 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04407

研究課題名(和文) フェムト秒時間分解X線吸収分光法による核波束振動の構造追跡

研究課題名(英文) Structural tracking of nuclear wavepacket dynamics using femtosecond time-resolved X-ray absorption spectroscopy

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) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、溶液中で光励起された金属錯体分子が緩和する際に生じるコヒーレントな振動の局所的な構造変化を時間分解X線吸収分光によって原子分解能で観測することを目的とした。この目的に沿って時間分解能を半値幅で70フェムト秒まで高め、光励起直後から銅(Ⅰ)錯体が振動していく様子を追跡することに成功した。また、入射X線の波長によって観測可能な振動が変化すること、すなわち各々の振動に対する感度が内殻電子の双極子遷移モーメントの大きさに関連することが分かった。この発見は予想していなかった本研究の独自性であり、超高速X線科学の発展に向けた基礎的な知識として重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、溶液中の光反応において分子構造の変化をフェムト秒の時間分解能で観測するX線分光を確立した。また、どのような動きに対してX線分光が感度を発揮するのか？という基礎的な問いに対して明瞭な指針が得られた。このような成果は世界的にも類のない本研究独自のものであり、今後の超高速X線科学の発展に資するものである。また、本研究で確立した時間分解X線分光は様々な系に应用可能であり、光化学分野で期待が高まっている人工光合成の実現や、高効率太陽エネルギー変換材料の構築において設計上の指針を与える分析手法として重要である。

研究成果の概要(英文)： This research aimed to observe local structural changes, with atomic resolution, during coherent nuclear vibration of a photo-excited transition metal complex in solution by time-resolved X-ray absorption spectroscopy. For this purpose, we achieved the time resolution of 70 fs in full width at half maximum, and tracked a multitude of vibrations of a Cu(I) complex after photo-excitation. Observable vibrational modes are highly dependent on the wavelength of incident X-ray beam, meaning that the sensitivity to individual vibrational component is directly associated with the magnitude of the transition dipole moment of core electrons. This finding is an original and surprising point of the project, which will be a cornerstone for future developments of ultrafast X-ray science.

研究分野：物理化学

キーワード：X線自由電子レーザー 時間分解 反応ダイナミクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまで溶液中における超高速化学反応を観察するには、時間幅の短いパルス光によるポンプ・プローブ分光法が広く用いられてきた。この手法における時間分解能はパルス光の時間幅に律速されるため、主にレーザー光源が利用される。紫外~赤外領域のレーザー光によるポンプ・プローブ分光は価電子帯の電子状態を実時間で観察できる一方、溶液中の分子の構造（結合長、結合角度）の変化に関しては、空間分解能がナノメートルオーダーであるため間接的な情報しか得られない。より直接的に構造変化をとらえるには、結合長と同程度の波長を持つX線をプローブ光として利用することにより、高い時間・空間分解能を両立させるアプローチが有力である。

近年、フェムト秒の時間幅を持つX線自由電子レーザー (XFEL) が開発され、フェムト秒領域の超高速X線サイエンスが急速に発展している。数多あるX線計測手法の中でも時間分解X線吸収分光法 (XAS) は、元素選択的に電子状態と局所構造を決定できるため、液相中でランダムに分布する分子の構造変化を追跡するのに適している。ただし、紫外~赤外領域のレーザー光 (ポンプ光) とXFEL (プローブ光) を使うポンプ・プローブ計測では、不完全な同期によって2つのパルス光のタイミングがランダムに揺らいでしまい (ジッター)、時間分解能が光源性能に比べて大幅に劣化してしまう。この問題を解決するには、ジッターをパルス毎に計測してデータを補正しなければならない。申請者はこれまで、この補正のための光診断法 (アライバルタイミングモニター) を開発してきた。その結果、ジッターの影響を300フェムト秒から7.0フェムト秒に抑えることに成功している [Katayama *et al.*, *Struct. Dyn.* **3**, 034301 (2016).]。

基盤となる光診断技術の確立に伴い、XFELを使った時間分解XASによってフェムト秒化学にどのような進化をもたらされ、どのようなサイエンスが可能になるのか、は開拓すべき重要なテーマである。これは、超高速X線サイエンスという一学術分野の発展に関する本質的な「問い」といえる。

### 2. 研究の目的

超高速X線サイエンスの飛躍的な発展に必要な技術基盤が整いつつあった研究開始当初の背景を基に溶液中で光励起された分子が緩和する際に生じるコヒーレントな振動 (核波束振動、図1) の局所的な構造変化を時間分解XASにより原子分解能で観測することを目指して研究を行った。

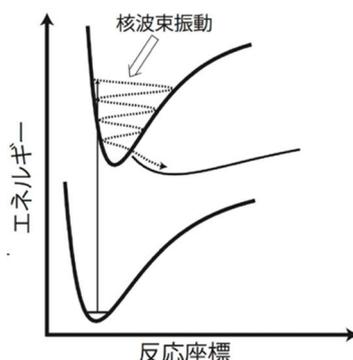


図 1. ポテンシャルエネルギー曲線と核波束振動の模式図

### 3. 研究の方法

研究期間全体における研究項目を以下にリストアップする。

- i. 時間分解 X 線計測全般に応用可能な実験プラットフォーム SPINETT の構築[Katayama *et al.*, *Struct. Dyn.* **6**, 054302 (2019).]

本研究課題の目的を実現するため、様々な時間分解 X 線計測に対応可能な実験プラットフォーム (SPINETT、図 2) の整備を行なった。SPINETT は時間分解 XAS だけでなく、時間分解 X 線発光分光 (XES) や時間分解 X 線溶液散乱 (XSS) を実施できる汎用的なプラットフォームとして研究代表者の片山が開発したシステムであるが、精度の高い計測のために必要な X 線用コリメータや溶液を安定なジェット状に噴射するための液体循環システムの整備が不十分であった。そこで、本課題の予算によりこれらの実験機器の整備を行なった。

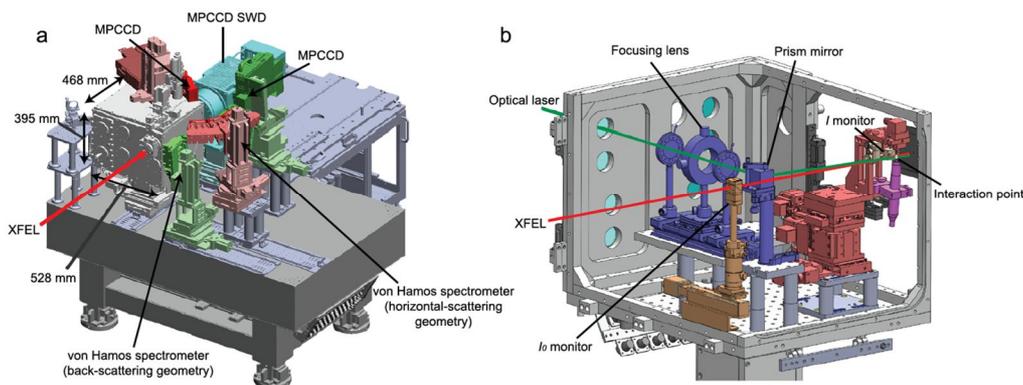


図 2. SPINETT システムの概観

- ii. 100 フェムト秒未満の時間分解能の達成

100 フェムト秒未満の時間分解能を達成するため、以下の 2 つの方策を採った。

- 研究代表者の片山が開発したアライバルタイミングモニターで得られるパルス毎のジッターを利用して、計測後のデータを補正する。
- 溶液ジェットの直径を 50  $\mu\text{m}$  まで小さくする。

アライバルタイミングモニターはポンプ光とプローブ光が試料へ到達するタイミングのゆらぎの効果を補正することができる。一方、計測の時間分解能は、可視光と X 線の溶液中における屈折率の違いから生じる群速度のミスマッチ (GVM) にも影響を受ける。GVM を抑制するためには媒質中の光路長を短くすれば良いが、その代償として XAS の S/N 比も低くなってしまふ。可視光レーザーのパルス幅が 45 フェムト秒であること、また溶媒として使用したアセトニトリル中では GVM が  $\sim 1 \text{ fs}/\mu\text{m}$  であることを考慮し、光路長を 50  $\mu\text{m}$  に設定した。その結果、計測全体の時間分解能は半値幅で 70 フェムト秒に達した。

【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

【本研究課題による研究成果】

本研究では、光触媒や太陽電池における低コストな光増感剤として注目されているポリピリジン銅 (I) 錯体群の中でも特に重点的に研究されてきた  $[\text{Cu}(\text{dmphen})_2]^+$  (dmphen=2,9-dimethyl-1,10-phenanthroline) 分子のアセトニトリル溶液を対象に時間分解 XAS を計測した。

[Cu(dmphen)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>は、可視光を吸収すると~800 フェムト秒程度で Cu(I)錯体によく見られる正四面体型から Cu(II)錯体に多い平面型へと構造変化（擬ヤーン・テラー歪み、図 3）することが可視領域のレーザー光を用いた過渡吸収・発光分光法により報告されている。研究代表者の片山は、この構造変化が進行する最中に発生する様々なタイプのコヒーレントな核波束振動をどの程度詳細に時間分解 XAS で観測できるのか、という問いに答えることが時間分解 XAS の有用性や将来の発展性を示す良い指標になると考え、実験を行なった。

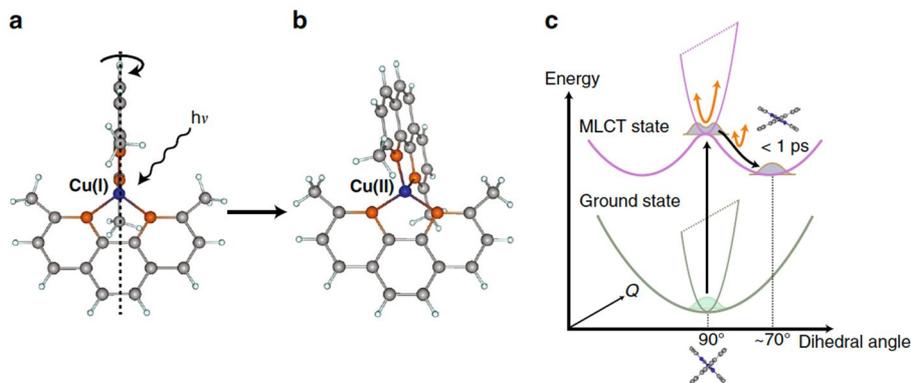


図 3. [Cu(dmphen)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>の擬ヤーン・テラー歪みとポテンシャルエネルギー曲線

図 4(a)は可視光レーザー（550 nm）を照射しない時（Laser off）と照射した後 10 ピコ秒後（Laser on）に計測した X 線吸収スペクトルおよびその差分スペクトルである。

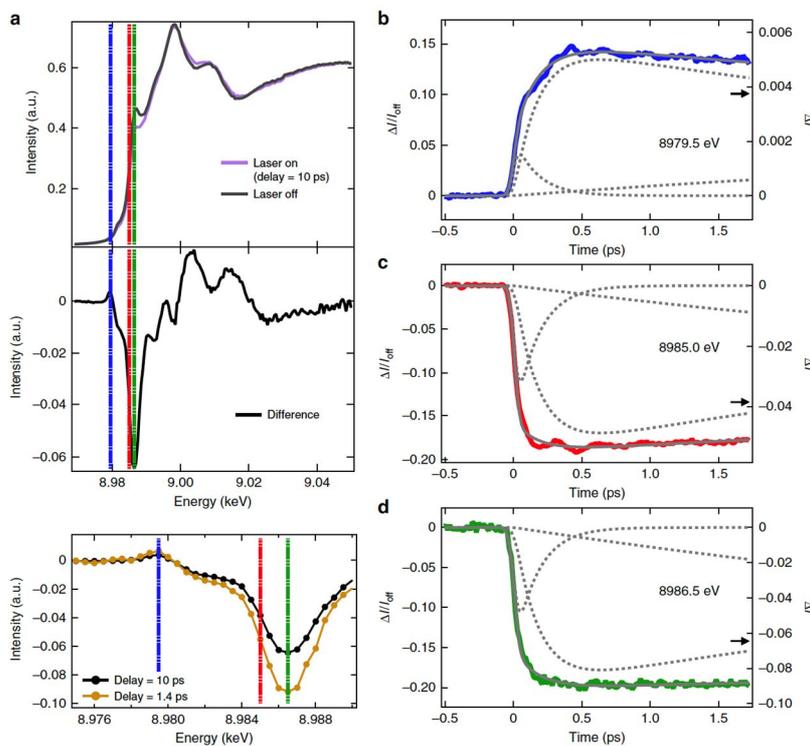


図 4. [Cu(dmphen)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>のフェムト秒時間分解 XAS

放射光を利用した先行研究との比較から、差分スペクトルの形状は中心の Cu 原子が金属-配位子間電荷移動（metal-to-ligand charge transfer; MLCT 遷移）によって 1 価（d<sup>10</sup>）から 2 価（d<sup>9</sup>）へと電子構造が変化したことに対応する。すなわち、差分スペクトルには Cu 原子の価数変化が主要な成分としてあらわれている。差分スペクトルに含まれるコヒーレントな分子振動に由来する成分は価数変化のそれと比して微弱であると予想されたため、3 つの入射 X 線エネルギー

(8979.5 eV, 8985.0 eV, 8986.5 eV) に絞って差分 X 線吸光度の時間依存性を 70 フェムト秒の時間分解能で追跡した (図 4(b-d))。その結果、8979.5 eV と 8985.0 eV の 2 つの入射 X 線エネルギーにおいて核波束振動に伴う微弱な振動構造が観測された。一方、8986.5 eV では振動構造は観測されなかった。この結果は、時間分解 XAS で核波束振動を観測しようとする場合、選択する入射 X 線エネルギーを慎重に選択する必要があることを示唆している。理論計算 (共同研究者 T. J. Penfold による) でも実験と同様の傾向が再現され、入射 X 線エネルギーを変えると振動に伴う構造変化に対する感度が変化することが判明した。差分 X 線吸光度の時間依存性に対して 3 つの指数関数の和を装置関数で畳み込んだモデルによるフィッティング解析 (図 4(b-d) の灰色線) を行い、その残差をとる手法で核波束振動の成分を抽出した (図 5)。フーリエ解析を適用したところ 8979.5 eV のデータには 3 つの振動数が含まれているのに対し、8985.0 eV では 1 つの振動数のみが検出された。

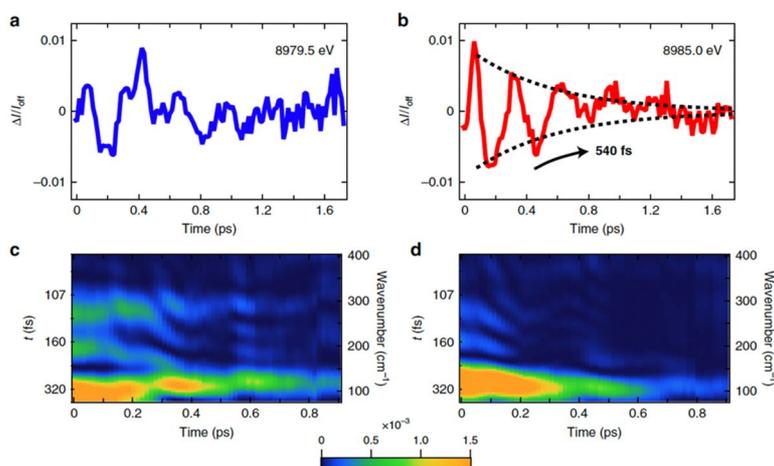


図 5. フィッティング後の残差とそのフーリエ変換

理論計算との対比により、 $100\text{--}122\text{cm}^{-1}$  の振動は分子の対称伸縮振動、 $165\text{--}195\text{cm}^{-1}$  と  $269\text{--}287\text{cm}^{-1}$  の振動は分子の対称性を歪ませる変角振動と帰属した。2 種類の変角振動が 8979.5 eV でのみ観測されたのは、この X 線エネルギー ( $1s \rightarrow 3d$ ) における電気双極子遷移の成分が配位子の  $p$  軌道と Cu 原子の  $3d$  軌道の混成に強く依存し、その結果として分子構造の対称性に敏感な応答を示すためであることが分かった。

本研究の特徴的な成果として、原子分解能で核波束振動を捉えたという第一義の成果に加えて時間分解 XAS がどのようなタイプの構造変化に対して感度を有するのかという問いに対して明瞭な指針が得られたことが挙げられる [Katayama *et al.*, *Nature Comm.*, **10**, 3606 (2019)]。この点は研究開始当初は予見していなかった成果であり、世界的に例がない本研究の独自性である。この成果をマイルストーンとして、時間分解 XAS が既存のレーザー分光の相補的な役割を果たし、基礎的な光反応機構解明の基盤技術になるよう他の様々な系へと研究を展開している。また、本研究を通して原理の異なる他の X 線計測手法を用いれば時間分解 XAS では感度が低くて観測できない構造変化を捉えることが可能かもしれない、という発想を得た。このアイデアを検証するため、令和 3 年度から時間分解 X 線溶液散乱法を含めた相補的な X 線計測手法によるフェムト秒 “構造” 化学の開拓を目指した挑戦的研究 (萌芽) を実施中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 9件）

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 -
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 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 -
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 Niozu Akinobu, Kumagai Yoshiaki, Hiraki Toshiyuki Nishiyama, Fukuzawa Hironobu, Motomura Koji, Bucher Maximilian, Asa Kazuki, Sato Yuhiro, Ito Yuta, You Daehyun, Ono Taishi, Li Yiwen, Kukk Edwin, Miron Catalin, Neagu Liviu, Callegari Carlo, Di Fraia Michele, Rossi Giorgio, Katayama Tetsuo、他13名	4. 巻 118
2. 論文標題 Crystallization kinetics of atomic crystals revealed by a single-shot and single-particle X-ray diffraction experiment	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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2111747118	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 Kinschel Dominik, Bacellar Camila, Cannelli Oliviero, Sorokin Boris, Katayama Tetsuo、他24名	4. 巻 11
2. 論文標題 Femtosecond X-ray emission study of the spin cross-over dynamics in haem proteins	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-17923-w	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 Kim Jong Goo, Nozawa Shunsuke, Kim Hanui, Choi Eun Hyuk, Sato Tokushi, Kim Tae Wu, Kim Kyung Hwan, Ki Hosung, Kim Jungmin, Choi Minseo, Lee Yunbeom, Heo Jun, Oang Key Young, Ichianagi Kouhei, Fukaya Ryo, Lee Jae Hyuk, Park Jaeku, Eom Intae, Chun Sae Hwan, Kim Sunam, Kim Minseok, Katayama Tetsuo、他14名	4. 巻 582
2. 論文標題 Mapping the emergence of molecular vibrations mediating bond formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 520 ~ 524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2417-3	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 Uemura Yohei, Yokoyama Toshihiko, Katayama Tetsuo, Nozawa Shunsuke, Asakura Kiyotaka	4. 巻 10
2. 論文標題 Tracking the Local Structure Change during the Photoabsorption Processes of Photocatalysts by the Ultrafast Pump-Probe XAFS Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 7818 ~ 7818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10217818	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 Sato Kosuke, Yamanaka Ken-ichi, Nozawa Shunsuke, Fukuzawa Hironobu, Katayama Tetsuo, Morikawa Takeshi, Nonaka Takamasa, Dohmae Kazuhiko, Ueda Kiyoshi, Yabashi Makina, Asahi Ryoji	4. 巻 59
2. 論文標題 Charge Trapping Process in Photoexcited Nitrogen-Doped Titanium Oxides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 10439 ~ 10449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.0c00696	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 -

1. 著者名 Togashi Tadashi, Owada Shigeki, Kubota Yuya, Sueda Keiichi, Katayama Tetsuo, Tomizawa Hiromitsu, Yabuuchi Toshinori, Tono Kensuke, Yabashi Makina	4. 巻 10
2. 論文標題 Femtosecond Optical Laser System with Spatiotemporal Stabilization for Pump-Probe Experiments at SACLA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 7934 ~ 7934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10217934	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 -

1. 著者名 Panman Matthijs R., Biasin Elisa, Berntsson Oskar, Hermann Markus, Niebling Stephan, Hughes Ashley J., Kubel Joachim, Atkovska Kalina, Gustavsson Emil, Nimmrich Amke, Dohn Asmus O., Laursen Mads, Zederkof Diana B., Honarfar Alireza, Tono Kensuke, Katayama Tetsuo, 他9名	4. 巻 125
2. 論文標題 Observing the Structural Evolution in the Photodissociation of Diiodomethane with Femtosecond Solution X-Ray Scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 226001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.226001	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 Kim Kyung Hwan, Spah Alexander, Pathak Harshad, Yang Cheolhee, Bonetti Stefano, Amann-Winkel Katrin, Mariedahl Daniel, Schlesinger Daniel, Sellberg Jonas A., Mendez Derek, van der Schot Gijs, Hwang Harold Y., Clark Jesse, Shigeki Owada, Tadashi Togashi, Harada Yoshihisa, Ogasawara Hirohito, Katayama Tetsuo, 他2名	4. 巻 125
2. 論文標題 Anisotropic X-Ray Scattering of Transiently Oriented Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 76022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.076002	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 Katayama Tetsuo, Northey Thomas, Gawelda Wojciech, Milne Christopher J., Vank? Gy?rgy, Lima Frederico A., Bohinc Rok, N?meth Zolt?n, Nozawa Shunsuke, Sato Tokushi, Khakhulin Dmitry, Szlachetko Jakub, Togashi Tadashi, Owada Shigeki, Adachi Shin-ichi, Bressler Christian, Yabashi Makina, Penfold Thomas J.	4. 巻 10
2. 論文標題 Tracking multiple components of a nuclear wavepacket in photoexcited Cu(I)-phenanthroline complex using ultrafast X-ray spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3606-3606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-11499-w	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 Katayama Tetsuo, Hirano Takashi, Morioka Yuki, Sano Yasuhisa, Osaka Taito, Owada Shigeki, Togashi Tadashi, Yabashi Makina	4. 巻 26
2. 論文標題 X-ray optics for advanced ultrafast pump?probe X-ray experiments at SACLA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 333 ~ 338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577518018362	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 -

1. 著者名 Katayama Tetsuo, Nozawa Shunsuke, Umena Yasufumi, Lee SungHee, Togashi Tadashi, Owada Shigeki, Yabashi Makina	4. 巻 6
2. 論文標題 A versatile experimental system for tracking ultrafast chemical reactions with X-ray free-electron lasers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 054302 ~ 054302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5111795	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 4件 / うち国際学会 4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 Tetsuo Katayama
2. 発表標題 Ultrafast time-resolved X-ray experiments at SACLA
3. 学会等名 QCrOM2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020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で捉える動的過程
3. 学会等名 JpGU2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuo Katayama
2. 発表標題 Overview and perspective of ultrafast time-resolved X-ray spectroscopies at SACLA
3. 学会等名 CONEX conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>光反応中の分子はどのように動く？ - 超高速X線科学のフロンティア  <a href="https://academist-cf.com/journal/?p=11841">https://academist-cf.com/journal/?p=11841</a>          超高速X線分光が拓く原子レベルの分子動画観測  <a href="https://www.chem-station.com/blog/2019/10/ultrafastxray.html">https://www.chem-station.com/blog/2019/10/ultrafastxray.html</a></p>
--

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			
米国	SLAC National Accelerator Laboratory	University of Wisconsin	Lawrence Berkeley National Laboratory	他4機関
スウェーデン	Uppsala University	University of Gothenburg	Lund University	
中国	ShanghaiTech University			
スイス	Paul Scherrer Institute	EPFL	ETH Zurich	他2機関
ドイツ	Goethe University Frankfurt	Fritz Haber Institute	European XFEL	他2機関

共同研究相手国	相手方研究機関			
デンマーク	Technical University of Denmark			
英国	Newcastle University			
ハンガリー	Hungarian Academy of Sciences			
ポーランド	Adam Mickiewicz University	Polish Academy of Sciences		