

令和 4 年 5 月 11 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20604

研究課題名(和文)2色発振X線自由電子レーザーを利用した非線形X線分光法の開発

研究課題名(英文)Nonlinear spectroscopy using two-color x-ray free-electron laser pulses

研究代表者

井上 伊知郎(Inoue, Ichiro)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・研究員

研究者番号：30783401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：X線自由電子レーザー(X-ray free-electron laser: XFEL)の2色ダブルパルス発振技術の開発および応用を行った。まず、単色・準単色の2色XFELビームを作り出す新しいレーザー発振技術を開発した。この開発した新技術は、X線領域のASE分光へと応用されている。また、時間間隔を制御したダブルパルスを利用するX線ポンプX線プローブ法を開発し、様々な試料へ応用した。以下の研究成果の項目にあるように「非熱的な融解過程」や「X線照射後の原子移動の遅れ」などの現象を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでX線レーザーの利用研究では、単一の波長を持つ光が用いられてきた。赤外線・可視光・紫外線領域の非線形分光実験でマルチカラーレーザーや白色レーザーが広く用いられていることを鑑みると、X線レーザーの多色化はX線計測技術の応用範囲を大きく拡大し得る。本研究では、2色ダブルパルスXFELの開発および応用技術の開拓を行った。

開発した技術を利用することで、高強度X線が引き起こす「非熱的な融解過程」や「X線照射後の原子移動の遅れ」などの現象が明らかになったが、これらの発見にとどまらず今後様々な新奇現象の発見や新しい計測技術の開発が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We developed novel schemes for generating the two-color x-ray free-electron laser (XFEL) beams and explored their applications.

In the first year of this project, we developed a new technique to produce two-colour XFEL consisting of broadband and narrowband beams. This novel XFEL beam has been applied to the ASE spectroscopy in the X-ray region.

We also developed an X-ray pump-X-ray probe method using double X-ray pulses with controlled time intervals and applied the method to various samples. As described below, we succeeded in observing new phenomena induced by intense x-ray beams, including "x-ray induced non-thermal melting process" and "delayed onset of the atomic displacements after X-ray irradiation".

研究分野：X線光学

キーワード：X線自由電子レーザー 非線形光学 放射損傷 ポンププローブ

1. 研究開始当初の背景

高いピーク輝度を持つ X 線自由電子レーザー(X-ray free-electron laser; XFEL)の登場によって X 線領域の超光子場科学に端緒が拓かれた。1960 年代の光学レーザーの登場からわずか数年で様々な非線形光学現象が発見されたことを考えると、超光子場 X 線科学が急速に進展していくことは想像に難くない。実際に、これまで和周波発生や 2 次高調波発生などが観測されて X 線非線形光学研究が華々しくスタートしている。しかし、これらの研究で用いられてきた X 線光源はすべて単色の光である。赤外線・可視光・紫外線領域の非線形分光実験でマルチカラーレーザーや白色レーザーが広く用いられていることを鑑みると、X 線レーザーの多色化は X 線非線形光学技術の応用範囲を大きく拡大し得ると考えることができる。

2. 研究の目的

そこで研究代表者らは、XFEL 施設 SACLA において、2 色 X 線レーザーの発振技術の開拓およびその先駆的な利用を目指した。さらに、開発した 2 色 X 線レーザーを SACLA において開発された極限集光装置と組み合わせることで、 10^{18} W/cm^2 を超えるような非常に高い強度のもとでの物質の振る舞いや非線形現象を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、(1) 新奇な 2 色 XFEL 発振技術の開発、および(2)時間間隔を制御した 2 色 XFEL を利用した X 線ポンプ・X 線プローブ法の開発と応用を行った。

(1)については、研究代表者らが開発したセルフシード技術(I. Inoue et al., Nature Photon. 13, 319 (2019))をマルチカラー発振技術と組み合わせることで単色・準単色の 2 色 XFEL ビームを作り出す新しいレーザー発振技術を開発した。

(2)については、2 色 XFEL の発振技術や調整技術を改良することで、波長の離れた 2 色 XFEL を用いたポンププローブ法を実現し、様々な試料に応用した。

4. 研究成果

(1) X 線レーザーが引き起こす非熱的な融解過程の発見 (I. Inoue et al., Phys. Rev. Lett. 126, 117403 (2021).)

時間差をつけた XFEL ダブルパルスを用いた X 線ポンプ・X 線プローブ法によって、ダイヤモンドに高強度 X 線を照射した際に起こる固体から液体への融解過程を測定することを試みた。光子エネルギー 11.5 keV の短波長 XFEL をプローブ光として利用して、5 つの回折ピークを測定することで、X 線照射後の電子密度分布の時間変化を可視化することに成功した (図 1)。

その結果、ポンプ光を照射してからわずか 5 フェムト秒の間に原子間の化学結合が切れて、原子の周りの電子密度がほぼ等方的になることが明らかになった。さらに、原子の移動が化学結合の切断から遅れて起こることが実験によって示された。観測された融解過程では、化学結合の切断と原子の移動の時間的な前後関係が通常の融解過程とは反対になっており、高強度 XFEL が引き起こす物質の融解が非熱的な起源を持つことが明らかになった。

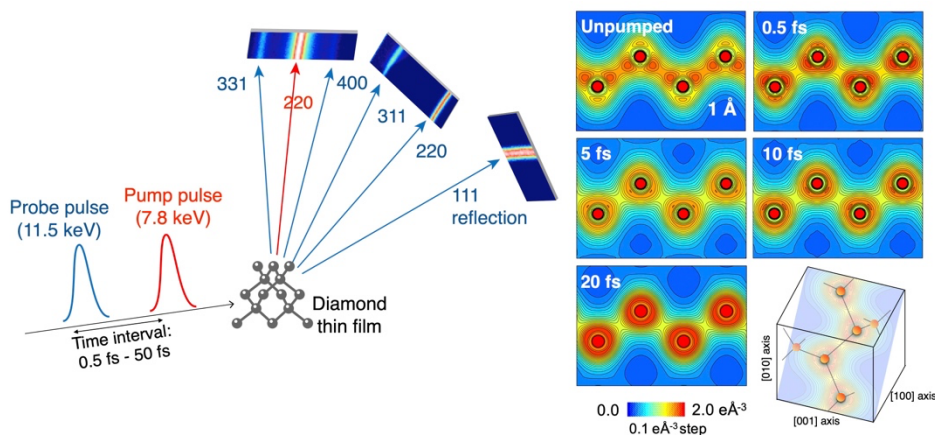


図 1: XFEL 照射後のダイヤモンド(110)面の電子密度の時間変化。

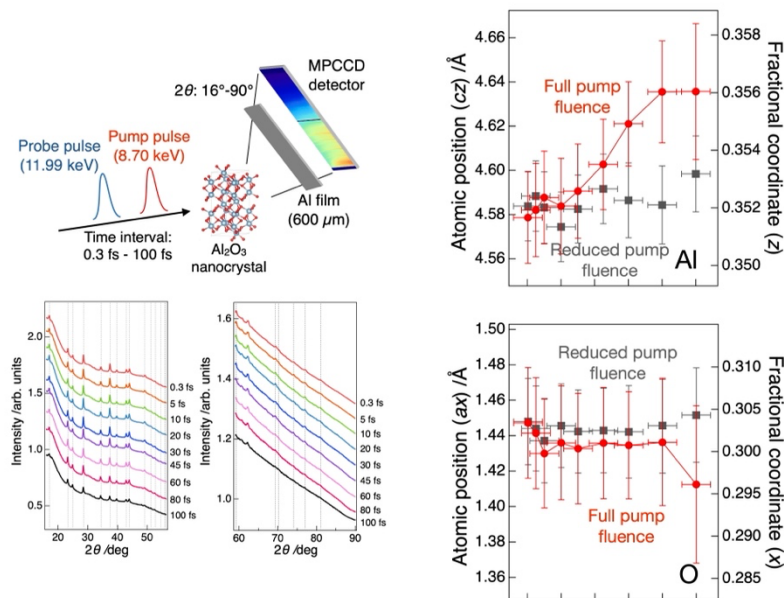


図 2: X 線ポンプ・X 線プローブ実験で明らかになった、 Al_2O_3 における X 線照射後の遅れた原子移動。

(2) X 線レーザー照射後の原子移動の遅れ (I. Inoue et al., Phys. Rev. Lett, in press.)

X 線ポンプ・X 線プローブ法によって、アルミナ(Al_2O_3) に高強度 X 線を照射した際に起こる構造変化を調べた。光子エネルギー 11.99 keV の短波長 XFEL をプローブ光として利用し、測定した回折強度プロファイルから Rietveld 解析によって原子位置の時間変化を評価した(図 2)。その結果、X 線照射後 20 フェムト秒程度は原子の位置はもとの位置から僅か 0.01 Å 程度以下に留まっていることが明らかになった。

現在、SPring-8 を始めとした放射光施設では、物質の構造を 0.01 Å 程度の分解能で決定する、精密 X 線構造解析が盛んに行われている。しかし、試料によっては X 線による損傷のために、その構造を決定することが不可能だという問題がある。本研究は、X 線の時間幅を 20 fs 以下にすることで損傷を気にせずに精密 X 線構造解析ができることを示唆している。すなわち、XFEL を用いれば X 線構造解析の適用範囲を拡大できることが明らかになったと言える。

(3) 単色・準単色の 2 色 XFEL ビームの生成 (I. Inoue et al., J. Synchrotron Rad. 27, 1720 (2020).)

(1), (2) の研究では、2 色 XFEL ビームのそれぞれは広がった波長幅を持つ。これは、XFEL の増幅過程がランダムな自発光から始まっているためである。

赤外線から紫外線にかけてのコヒーレントラマン分光実験などのマルチカラーレーザーを用いた非線形分光実験では、広帯域レーザー光と狭帯域レーザー光を組み合わせることで効率的に測定を行うことがしばしば行われている。

X 線領域においても同様な光源を作るために、研究代表者らが開発したセルフシード技術 (I. Inoue et al., Nature Photon. 13, 319 (2019)) をマルチカラー発振技術と組み合わせた新しい 2 色 XFEL ビームの発振技術を考案した。SACLA において実証実験を行って、単色・準単色の 2 色 XFEL ビームを生成できることを確認している (図 3)。

この開発した新技術は、X 線領域の Amplified Spontaneous Emission (ASE) 分光に応用されており、例えば Mn 系化合物のエネルギー状態を調べるために用いられている。実際に、この分光法を用いることで multiplet structure を詳細に調べることができていることが実証されている。この新しい X 線非線形分光技術に関して近日中に論文投稿予定である。

(4) 高速な電子状態変化を用いた X 線非線形光学素子の実証 (I. Inoue et al., Phys. Rev. Lett. 127, 163903 (2021)).

(1)の研究によって、高強度 X 線を照射した際に、XFEL のパルス幅と同程度のフェムト秒の時間スケールで電子状態が変わっていくことが明らかになった。この高速な電子状態の変化を利用すれば、XFEL のパルス波形を変化させることができるのではないかと着想した。

このアイデアをもとに、研究代表者らは SACLA から出射された 9.000 keV の光子エネルギーの XFEL の時間幅を短くすることを試みた。約 100 ナノメートルに集光した X 線パルスを厚さ 10 マイクロメートルの銅の薄膜に照射し、その透過光の時間幅を測定した。その結果、X 線の強度が十分に大きい場合には(フルエンスが 2×10^5 J/cm² 以上)、内殻に穴があいたホロー原子が生成されることでパルス幅が約 35%短縮されていることが確認された(図 4)。さらに、X 線の透過前と透過後のパルスエネルギーを比較した結果、ピーク強度がほとんど変わらないことが明らかになった。このことは、今回考案した非線形光学素子の効率が非常に高いことを意味している。

この光学素子は物質の厚さや X 線の強度を変えることによって、様々に X 線パルスの時間幅を変化させることができる。この光学素子を利用することで XFEL の時間幅を自在に制御することが可能になるほか、アト秒の時間幅の XFEL を実現することが今後期待できる。

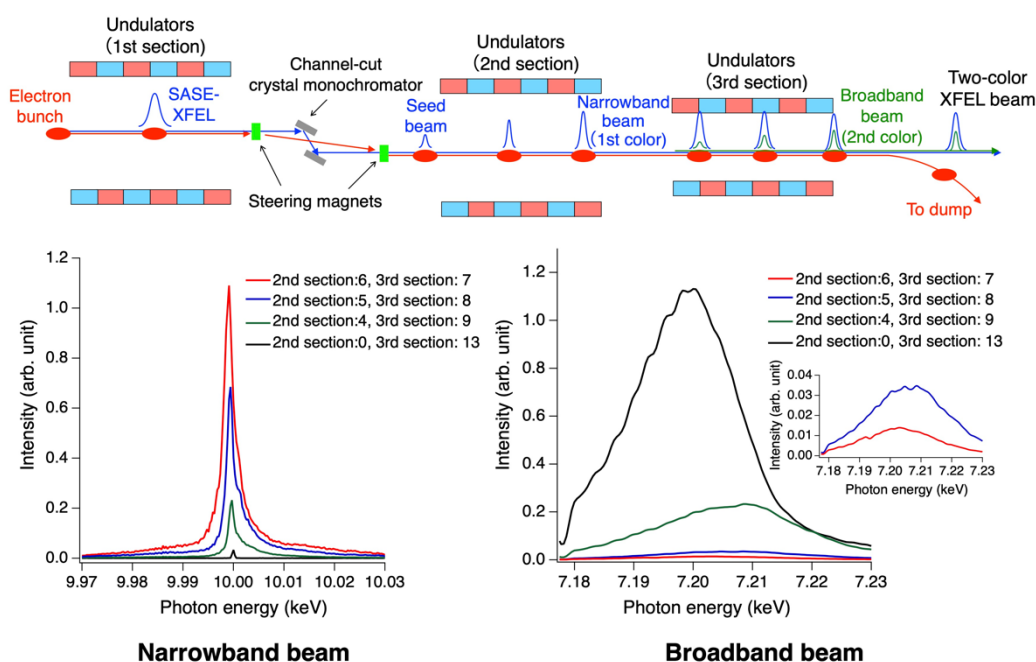


図 3: SACLA において生成された単色・準単色の 2 色 XFEL ビーム。

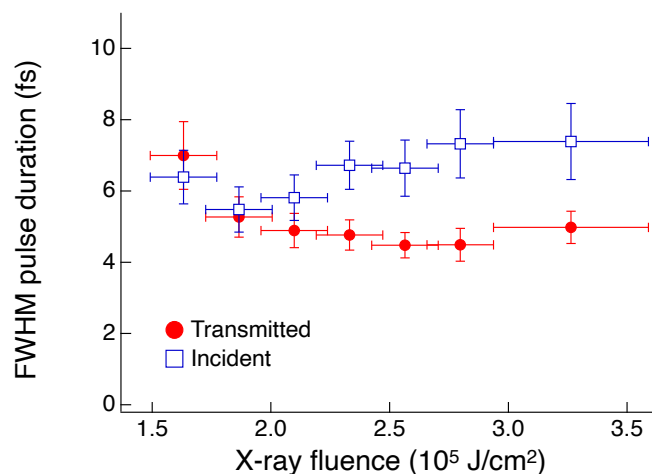


図 4: 10 μ m の銅箔を透過前・透過後の XFEL のパルス幅。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Inoue Ichiro, Inubushi Yuichi, Osaka Taito, Yamada Jumpei, Tamasaku Kenji, Yoneda Hitoki, Yabashi Makina	4. 巻 127
2. 論文標題 Shortening X-Ray Pulse Duration via Saturable Absorption	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 163903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.163903	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 Inoue Ichiro, Iwai Eito, Hara Toru, Inubushi Yuichi, Tono Kensuke, Yabashi Makina	4. 巻 29
2. 論文標題 Single-shot spectrometer using diamond microcrystals for X-ray free-electron laser pulses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 862 ~ 865
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577522001205	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 Ichiro Inoue, Victor Tkachenko, Konrad J. Kapcia, Vladimir Lipp, Beata Ziaja, Yuichi Inubushi, Toru Hara, Makina Yabashi, Eiji Nishibori	4. 巻 -
2. 論文標題 Delayed Onset and Directionality of X-Ray-Induced Atomic Displacements Observed on Subatomic Length Scales (in press)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) なし	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 Zhang Yu, Kroll Thomas, Weninger Clemens et al.	4. 巻 119
2. 論文標題 Generation of intense phase-stable femtosecond hard X-ray pulse pairs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2119616119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2119616119	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 Osaka Taito, Inoue Ichiro, Yamada Jumpei, Inubushi Yuichi, Matsumura Shotaro, Sano Yasuhisa, Tono Kensuke, Yamauchi Kazuto, Tamasaku Kenji, Yabashi Makina	4. 巻 4
2. 論文標題 Hard x-ray intensity autocorrelation using direct two-photon absorption	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L012035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L012035	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 Yamada Jumpei, Inoue Ichiro, Osaka Taito, Inoue Takato, Matsuyama Satoshi, Yamauchi Kazuto, Yabashi Makina	4. 巻 8
2. 論文標題 Hard X-ray nanoprobe scanner	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IUCrJ	6. 最初と最後の頁 713 ~ 718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S2052252521007004	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 Inoue Ichiro, Osaka Taito, Hara Toru, Yabashi Makina	4. 巻 27
2. 論文標題 Two-color X-ray free-electron laser consisting of broadband and narrowband beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 1720 ~ 1724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577520011716	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 Inoue Ichiro, Tamasaku Kenji, Osaka Taito, Inubushi Yuichi, Yabashi Makina	4. 巻 28
2. 論文標題 Determination of X-ray pulse duration via intensity correlation measurement of X-ray fluorescence. Erratum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 372 ~ 372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577520015143	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 Inoue Ichiro, Deguchi Yuka, Ziaja Beata, Osaka Taito, Abdullah Malik?M., Jurek Zoltan, Medvedev Nikita, Tkachenko Victor, Inubushi Yuichi, Kasai Hidetaka, Tamasaku Kenji, Hara Toru, Nishibori Eiji, Yabashi Makina	4. 巻 126
2. 論文標題 Atomic-Scale Visualization of Ultrafast Bond Breaking in X-Ray-Excited Diamond	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 117403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.117403	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 Shinohara Yuya, Osaka Taito, Inoue Ichiro, Iwashita Takuya, Dmowski Wojciech, Ryu Chae Woo, Sarathchandran Yadu, Egami Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Split-pulse X-ray photon correlation spectroscopy with seeded X-rays from X-ray laser to study atomic-level dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 6213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-20036-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 Matsumura Shotaro, Osaka Taito, Inoue Ichiro, Matsuyama Satoshi, Yabashi Makina, Yamauchi Kazuto, Sano Yasuhisa	4. 巻 28
2. 論文標題 High-resolution micro channel-cut crystal monochromator processed by plasma chemical vaporization machining for a reflection self-seeded X-ray free-electron laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 25706 ~ 25706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.398590	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 Yumoto Hirokatsu, Ohashi Haruhiko, Yamazaki Hiroshi, Senba Yasunori, Koyama Takahisa, Tamasaku Kenji, Inoue Ichiro, Osaka Taito, Yamada Jumpei, Yabashi Makina, Goto Shunji	4. 巻 11492
2. 論文標題 A test bench of X-ray optics for next-generation high-energy high-flux X-ray beamlines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1149201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2570154	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 Inoue Takato, Matsuyama Satoshi, Yamada Jumpei, Nakamura Nami, Osaka Taito, Inoue Ichiro, Inubushi Yuichi, Tono Kensuke, Yumoto Hirokatsu, Koyama Takahisa, Ohashi Haruhiko, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 27
2. 論文標題 Generation of an X-ray nanobeam of a free-electron laser using reflective optics with speckle interferometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 883 ~ 889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577520006980	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 Nakamura Nami, Matsuyama Satoshi, Inoue Takato, Inoue Ichiro, Yamada Jumpei, Osaka Taito, Yabashi Makina, Ishikawa Tetsuya, Yamauchi Kazuto	4. 巻 27
2. 論文標題 Focus characterization of an X-ray free-electron laser by intensity correlation measurement of X-ray fluorescence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 1366 ~ 1371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577520009868	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 Inoue Ichiro, Tamasaku Kenji, Osaka Taito, Inubushi Yuichi, Yabashi Makina	4. 巻 26
2. 論文標題 Determination of X-ray pulse duration via intensity correlation measurements of X-ray fluorescence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 2050 ~ 2054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577519011202	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 Osaka Taito, Inoue Ichiro, Kinjo Ryota, Hirano Takashi, Morioka Yuki, Sano Yasuhisa, Yamauchi Kazuto, Yabashi Makina	4. 巻 26
2. 論文標題 A micro channel-cut crystal X-ray monochromator for a self-seeded hard X-ray free-electron laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 1496 ~ 1502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577519008841	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 Yumoto Hirokatsu, Inubushi Yuichi, Osaka Taito, Inoue Ichiro, Koyama Takahisa, Tono Kensuke, Yabashi Makina, Ohashi Haruhiko	4. 巻 10
2. 論文標題 Nanofocusing Optics for an X-Ray Free-Electron Laser Generating an Extreme Intensity of 100 EW/cm ² Using Total Reflection Mirrors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2611 ~ 2611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10072611	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Ichiro Inoue
2. 発表標題 Intensity correlation techniques for spatiotemporal diagnostics of fs X-ray pulses
3. 学会等名 PQE-2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ichiro Inoue
2. 発表標題 Capturing transient x-ray-matter interactions with twin XFEL pulses
3. 学会等名 Synchrotron Radiation Instrumentation 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ichiro Inoue
2. 発表標題 Materials science with X-ray free-electron laser SACLA
3. 学会等名 MRM2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ichiro Inoue, Yuichi Inubushi, Taito Osaka, Toru Hara, Eiji Nishibori, Makina Yabashi
2. 発表標題 Ultrafast structural changes in matter induced by intense X-ray free-electron laser pulses
3. 学会等名 Twenty-Fifth Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上伊知郎, 犬伏雄一、大坂泰斗, Victor Tkachenko, Beata Ziaja, 西堀英治, 矢橋牧名
2. 発表標題 高強度XFELが引き起こす 物質の過渡的な構造変化
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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ichiro Inoue
2. 発表標題 Spatiotemporal diagnostics of XFEL pulses via intensity correlation techniques
3. 学会等名 PhotonDiag 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Ichiro Inoue
2. 発表標題 Measurement and applications of interactions between nanofocused XFEL and matter
3. 学会等名 Max Plank Institute Ringberg meeting on sciences with XFEL (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ichiro Inoue
2. 発表標題 Reflection self-seeding using microchannel cut crystal at SACLA
3. 学会等名 SPIE Optics+Optoelectronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ichiro Inoue
2. 発表標題 Stable and brilliant self-seeded XFEL at SACLA
3. 学会等名 International Particle Accelerator Conference 2019 (IPAC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 伊知郎
2. 発表標題 反射型セルフシード技術による X 線自由電子レーザーの時間コヒーレンスの改善
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会講演 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上伊知郎、玉作賢治、大坂泰斗、犬伏雄一、矢橋牧名
2. 発表標題 可飽和吸収現象を利用した XFEL の短パルス化
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>[プレスリリース] 高強度X線が引き起こす特殊な融解現象 https://www.riken.jp/press/2021/20210320_1/index.html ホロー原子を使ったX線レーザーの短パルス化 https://www.riken.jp/press/2021/20211016_1/index.html [科研費トピックス] 高強度X線と物質との相互作用の解明と応用 https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/37_topics/data/00304-82401-30783401.pdf</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			
ドイツ	Deutsches Elektronen-Synchrotron	Universität Hamburg	European XFEL GmbH	
米国	SLAC National Accelerator Laboratory	University of Wisconsin-Madison	Lawrence Berkeley National Laboratory	他1機関
スウェーデン	Lund University			
ポーランド	Polish Academy of Sciences	Adam Mickiewicz University in Poznan		
ドイツ	Deutsches Elektronen-Synchrotron	European XFEL GmbH		
チェコ	Czech Academy of Sciences			
ポーランド	Polish Academy of Sciences			
米国	Oak Ridge National Laboratory	The University of Tennessee		