

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19021

研究課題名(和文) 軟 X線発光における誘導放出抑制現象を利用した超高分解能顕微鏡の開発

研究課題名(英文) Development of super-resolving microscope using stimulated emission suppression phenomenon in soft X-ray emission

研究代表者

江島 丈雄 (Ejima, Takeo)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：80261478

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではまず軟X線領域で動作するシンチレーターを探索を行い、300eVから1.3keVの軟X線領域において高い発光強度を示すシンチレーターを調べた。その中からCe:LSOを選択し、X線励起による蛍光においてSTED現象を示すこと、ベクトル偏光した光を用いてその蛍光領域の制限が可能であることの2つを確認した。その確認のために、高繰り返し波長可変レーザー、波長非依存性のベクトル偏光光学系、それらの光源と光学系と軟X線励起シンチレーターを組み合わせた超解像顕微鏡の開発を行った。開発した顕微鏡は、軟X線領域において高い解像度を持つ2次元検出器やレントゲン方式の顕微鏡として応用が可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回得られた成果は、生物試料の蛍光染色試料に応用されたSTED顕微鏡と同様に、発光点を掃引することによりX線の2次元検出が可能であることを示している。またシンチレーター自体に試料を載せて軟X線照射することで、いわゆるレントゲン写真と同様に動作する顕微鏡としても働く。シンチレーターは目的と動作する光子エネルギーに応じてさまざまな種類があり、数eVから数十keVの光で発光する。本成果では軟X線領域の光だけを強調しているが、紫外線領域から線領域まで動作する高い解像度を持つ2次元検出器として動作することが期待できる。また動作波長を変える事により、広く軽元素素材、生物などのナノ構造体に応用できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated scintillators that show high luminescence intensity in the soft X-ray (SX) region from 300 eV to 1.3 keV because luminosities of the scintillators were unknown in the SX region. One of the scintillators, Ce:LSO, was used for the experiments because of the high luminosity. The scintillator irradiated by SX lights exhibited a STED phenomenon. The luminescence area was narrowed as the increase of the intensity ratio of the STED light to the luminescence one when the STED light used was a vector-polarized light. For the experiments, we also developed a tunable laser with high repetition, an achromatic vector polarization optical system, and a super-resolution microscope that combines these instruments. The developed microscope can be applied as a radiographic X-ray microscope or as a two-dimensional detector with high resolution in the SX region.

研究分野：軟X線光学

キーワード：誘導放出抑制 軟X線 シンチレーター STED 超解像 ナノ 高空間分解能

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電池開発、有機化学合成物質開発、医薬品開発などの高度化・効率化を推進するには、軽元素のナノ構造分布とその電子構造の知見が必要である。使用波長が短い軟 X 線顕微鏡は高空間分解能の観察が可能であるが、線用の特殊光源や nm 精度の光学系が必要で、低コスト化が重要な課題である。

本研究で提案する軟 X 線 (SX) 顕微鏡は、シンチレーターによる SX - 可視変換像を経由して STED 顕微鏡により SX 像を読み出す (図 1)。この「SX-STED」顕微鏡では、軟 X 線で励起さ

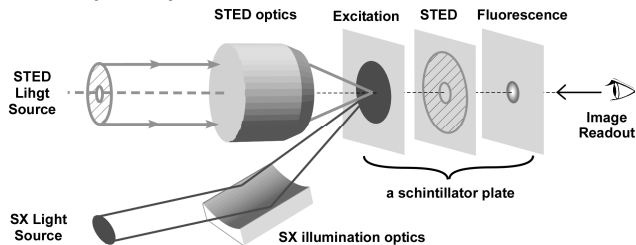


図 1: 軟 X 線発光領域を誘導放出抑制現象 (STED) を用いて読み出す軟 X 線顕微鏡の概念図

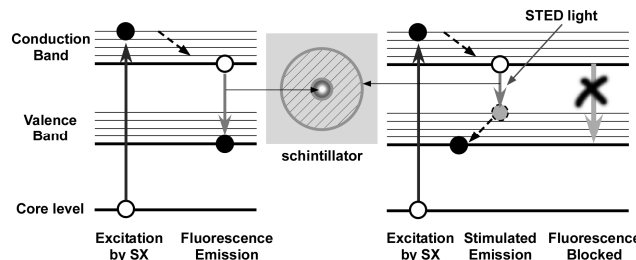


図 2: STED による軟 X 線蛍光領域制限機構

れた発光領域がベクトル偏光を持つ「誘導放出光」により制限され (図 2)、そのときの発光領域の大きさ (空間分解能)  $\delta d$  は、対物レンズの空間分解能  $\delta D$ 、STED 光強度  $I$ 、蛍光体の飽和発光強度  $I_s$  を用いて、

$$\delta d = \delta D / \sqrt{1 + I/I_s} \quad (1)$$

と表される。ここで  $I/I_s$  項を「光強度比」と呼ぶとき、式 (1) から空間分解能  $\delta d$  は、光強度比の平方根の逆数に比例して小さくなる。シンチレーターの Depletion 比は 100 を超えることから、対物レンズ  $\delta D$  の 1/10 以下の nm 台の空間分解能が期待される。

以上から、レーザー光源、ベクトル偏光子を組み合わせた軽元素ナノ物質の形状と空間分布を高い空間分解能で明らかにする顕微鏡を発想した。

### 2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では、溶液中の軽元素ナノ物質を、低コストかつ超高空間分解能の SX-STED 顕微鏡により観察するために、その要素技術開発と顕微鏡本体開発を行う。具体的には

- (1) SX-STED 顕微法に最適なシンチレーターの探索とその光強度比の評価、
- (2) アクロマティック波長板を用いたアジマス偏光子の開発と評価、
- (3) 超高分解能 SX-STED 顕微鏡の開発・評価

を目的とする。

### 3. 研究の方法

- (1) SX-STED 顕微法に最適なシンチレーターの探索とその光強度比の評価

STED 現象を顕著に示すシンチレーター探索のためにシンチレーターの全発光強度スペクトル測定を行った。測定は Photon Factory BL11D に計測システムを持ち込んで行った (図 3)。蛍光強度は、光学窓を通して取り出した光をフォトダイオードに集光し測定した。試料後方のフォトダイオードは軟 X 線強度を測定し、発光強度の規格化に用いた。シンチレーターの光強度比測定は、(3) で開発した SX-STED 顕微鏡を用いて行った。シンチレーターの励起は紫外光源と軟 X 線光源の二つを用いた。紫外光源には市販の LED 光源を用い、長波長側の光をカットするためにショートパスミラーで反射させた後に石英レンズで集光した。照射光の波長は 365nm となった。軟 X 線光源には全発光強度スペクトル測定と同じ Photon Factory BL11D ビーム

ラインを用いた。全発光強度スペクトルの結果から試料として Ce:LSO を選択し、紫外線励起、軟 X 線励起のそれぞれの場合について光強度比を変えながら顕微鏡スポット径に対する暗黒点の大きさを測定した。

## (2) アクロマティック波長板を用いたアジマス偏光素子の開発と評価

シンチレーターの発光領域を波長に依存せず制限するために、光源として波長可変レーザー、入射光をアジマス偏光ビームとするための光学系を新たに開発した。

誘導放出光の光源には、Yb:YAG 薄ディスクによる高繰り返し再生増幅器、回折格子によるパルス圧縮および SiO<sub>2</sub> 結晶による波長変換を組み合わせた波長可変レーザーを自作した。薄ディスク再生増幅器の繰り返し周波数を 1 kHz とし、出力を 0.8 W とした。チャープミラー圧縮器を通過したあとのパルス幅は 500 fs であった。つぎに発振したレーザー光を SiO<sub>2</sub> 結晶の非線形応答を用いて超広帯域光に変換した。軟 X 線励起発光の際の誘導放出光光源には、波長 532nm、40mW の DPSS レーザーダイオードを用いた。

開発したベクトル光学系を図4に示す。ベクトル光学系は、偏光状態を整えるための偏光子、光渦生成器、ベクトル渦光生成器の3つから構成される。波長フィルター及び偏光子により単色化された直線偏光ビームは、1/4 波長板を通過し円偏光に変換された後、空間可変波長板により光渦を持つようになる。更に 1/4 波長板により位相が整えられ、偏光子を通過することでドーナツ状直線偏光ビームとなる。次にこのビームは 1/4 波長板を通過することで左廻り円偏光ビームに変換され、ラジアル偏光子によって放射状の直線偏光に変換される。最後に 2 つの半波長板で構成される偏光子により均一な 1/4 位相を持つアジマス偏光ビームとなり、誘導放出光として顕微鏡部に導入される。

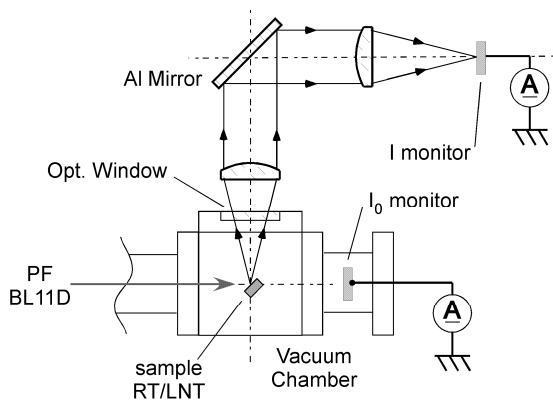


図3: 全発光強度スペクトル測定のための光学系概略。試料および軟 X 線検出器は真空槽の中に、発光強度測定光学系は真空外に設置されている。

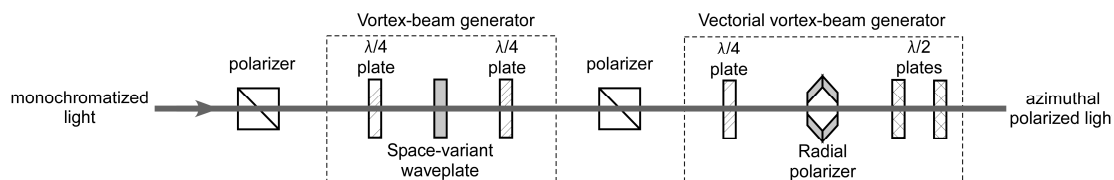


図4: 波長依存性のないアジマス偏光生成光学系

## (3) 超高分解能 SX-STED 顕微鏡の開発・評価

式(1)に従う、励起光強度と誘導放出光の光強度の比である「光強度比」を変えながら顕微鏡スポット径に対する暗黒点の大きさを計測するために新たに「SX-STED 顕微鏡」を作製した(図5)。無限遠補正された NA=0.2 の対物レンズと結像レンズとの間に、誘導放出光とシンチレーターの蛍光を分離するためのダイクロイックミラーおよび光学フィルターを挿入した。像の検出には市販の顕

微鏡用カメラヘッドを用いた。カメラの光学フィルターは、透過率0.3を境界条件として、B(390~510nm)、G(480~600nm)、R(580~680nm)の波長範囲で動作するため、光学フィルターを通過し原稿された励起光とシンチレ

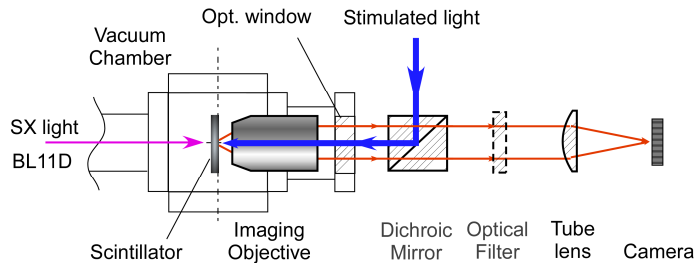


図5: Depletion 比を測定するための光学系

ーターからの蛍光を分離することができる。対物レンズへ入射した誘導放出光の実測ビーム径から換算した対物レンズの実効 NA は、それぞれ 0.067 と 0.044 であった。

#### 4. 研究成果

##### (1) SX-STED 顕微法に最適なシンチレーターの探索とその光強度比の評価

室温と窒素温度での全蛍光収量スペクトルを計測した結果、光強度の絶対値は異なるものの同じ相対強度変化を示した。図6は液体窒素温度(85 K)での測定結果。試料表面での軟 X 線反射率は光学計算によりどの物質でもおおよそ  $1.0E-8$  以下であったため、反射による軟 X 線光量の減少は無視できるほど小さいと考えられる。また試料を透過した蛍光を、試料背面に設置した軟 X 線フォトダイオードで測定した結果、図6とコンシステントな結果が得られたため、試料および試料ホルダーからの裏面反射の影響は十分に小さいと考えられる。また得られた蛍光収量強度は、高光子エネルギー領域で知られている結果とは異なる結果を示した。この違いは、軟 X 線励起に伴う 2 次電子による蛍光収量モデルに基づいて考えると、ほぼ軟 X 線励起による光電子生成確率とその緩和に伴う 2 次電子生成確率により説明が可能である。

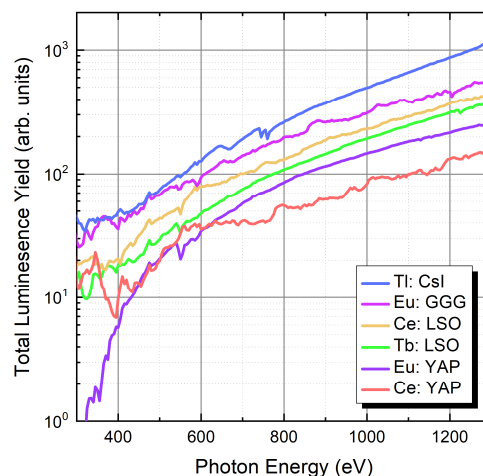


図6: 液体窒素温度での各シンチレーターの全発光強度スペクトル

##### (2) アクロマティック波長板を用いたアジマス偏光素子の開発と評価

開発した波長可変レーザーからのビームをベクトル光生成光学系に導入し、偏光解析によって得られたアジマス偏光ビームの評価結果を図7に示す。得られた光の楕円分布は 0.3 以下であり、長軸方向の偏光分布は光がアジマス偏光されていることを示した。測定値と理想値の相関率は 90% 以上であった。

##### (3) 超高分解能 SX-STED 顕微鏡の開発・評価

光子エネルギー 2.58 eV (波長 480 nm) から 1.97 eV (630 nm) のベクトル光を用いて、紫外光で励起したシンチレーターのひとつ Ce:LSO の蛍光が誘導放出抑制されるかどうかを検証した結果、この波長域で誘導放出抑制されたことが確認された。発光点径/ビーム強度比を式(1)式に従ってプロットしたところ、光強度比  $I_{STED}/I_{sat}$  の値に応じて減少することが確認された。さらに、励起光を光子エネルギー 800 eV (波長 1.55 nm) の軟 X 線に変えて照射したところ、同様に可視ベクトル光によってシンチレーターの発光領域が制限されることが確認できた(図8(a)&(b))。照射領域の大き

さと発光領域の大きさの比 $\delta d_{\text{STED}}/\delta d_N$ は、紫外線励起の場合と同様に光強度比 $I_{\text{STED}}/I_{\text{sat}}$ の値が大きくなるにつれて減少し(図8(c))、修正されたアッペの回折限界式(1)(図1(c)中の実線)によって説明された。

以上の結果は、X線領域の光を数十 nm 程度の高い解像度で検出できることを示しており、制限された発光点を掃引することにより高い解像度を持つ 2 次元検出器並びにレントゲン方式の顕微鏡として応用が可能であることを示している。

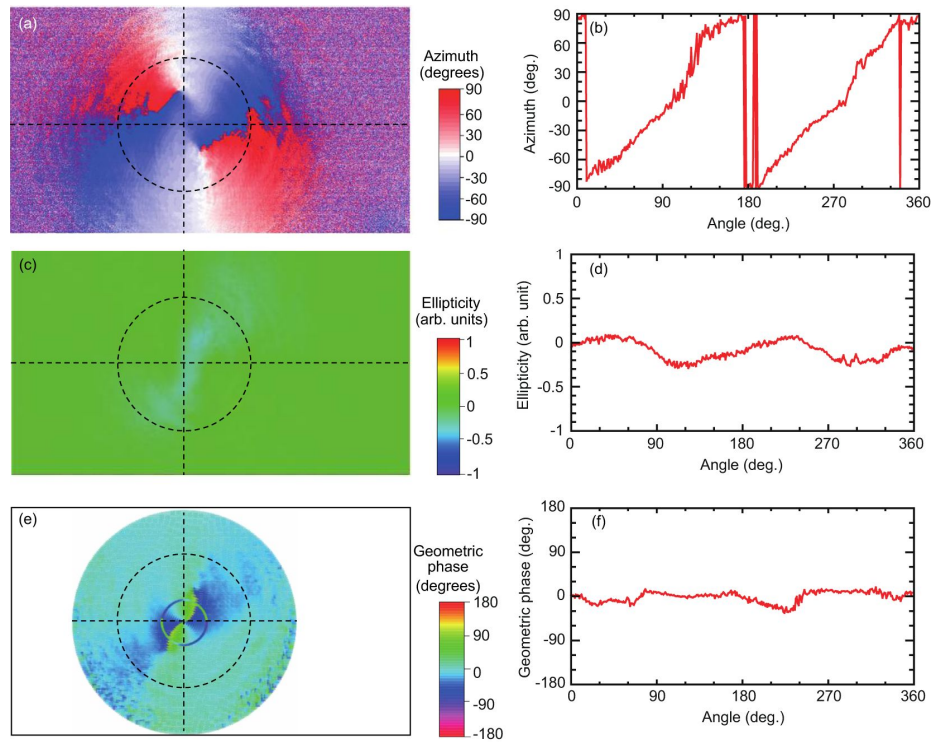


図7: 偏光解析によるアジマス偏光ビームの評価結果。(a)、(c): 生成されたアジマス偏光ビームの方位角と楕円率を示す。(b)、(d): (a)、(c)の破線の断面の値。(e): アジマス偏光の幾何位相。(f): (e)の断面プロファイル。生成されたアジマス偏光ビームの位相が均一であることを示す。

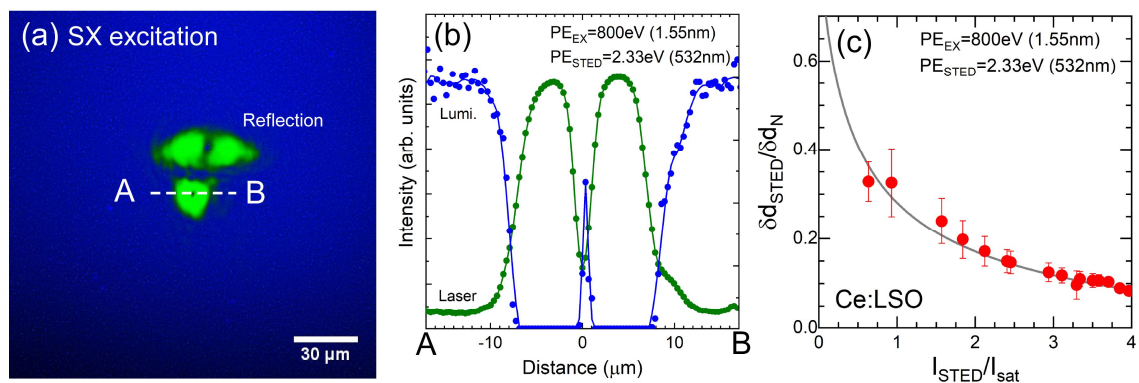


図8: (a) 軟X線(800 eV)で励起した Ce:LSO の発光(青)と STED レーザー(緑)。図中「Reflection」と示した部分はシンチレーター裏面からの反射像、(b) 図(a)中の破線 AB 間での光強度プロファイル。照射したレーザー光により Ce:LSO の発光が抑制され中央の発光点のみが残ったことを示している。(c) 発光点径/ビーム径比の光強度比変化。光強度比の増加によりシンチレーター発光点の直径が減少する。結果は、アッペの回折条件によるスポット径の 1/10 まで小さくできたことを示している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Ejima Takeo, Wakayama Toshitaka, Shinozaki Natsumi, Shoji Misaki, Hatayama Genta, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Demonstration of stimulated emission depletion phenomenon in luminescence of solid-state scintillator excited by soft X-rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-62100-0	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 Ejima Takeo, Kurosawa Shunsuke, Yamaji Akihiro, Hatano Tadashi, Wakayama Toshitaka, Higashiguchi Takeshi, Kitaura Mamoru	4. 巻 219
2. 論文標題 Luminescence properties of scintillators in soft X-ray region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Luminescence	6. 最初と最後の頁 116850 ~ 116850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jlumin.2019.116850	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 T. EJIMA, S. KUROSAWA, A. YAMAJI, T. HATANO, T. WAKAYAMA, T. HIGASHIGUCHI, , M. KITAURA	4. 巻 36
2. 論文標題 Total luminescence yield of some scintillators in the photon energy region from 300 eV to 1.3 keV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2018	6. 最初と最後の頁 69-1, 69-2
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 無
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 Tadashi HATANO, Takeo EJIMA, Yuichi ONO, Thanh-Hung DINH, Toshiki TAMURA, Keigo MAEDA, Hiroyuki HARA, Takeshi HIGASHIGUCHI	4. 巻 36
2. 論文標題 Fabrication of Cr/Sc/Mo multilayer illuminator for water window soft X-ray microscopes with Bi plasma sources	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2018	6. 最初と最後の頁 244-1, 244-2
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 無
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 Lokasani Ragava, Kawasaki Hiromu, Shimada Yuta, Shoji Misaki, Anraku Kyoya, Ejima Takeo, Hatano Tadashi, Jiang Weihua, Namba Shinichi, Nikl Jan, Zeman Michal, O'Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi, Limpouch Jiri	4. 巻 27
2. 論文標題 Soft X-ray spectral analysis of laser produced molybdenum plasmas using the fundamental and second harmonics of a Nd:YAG laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 33351 ~ 33351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.033351	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 Wakayama Toshitaka, Shinozaki Natsumi, Shoji Misaki, Ishiyama Takayuki, Sakaue Kazuyuki, Miura Taisuke, Ejima Takeo, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 114
2. 論文標題 Supercontinuum vector beam generation by independent manipulations of angular polarization and geometric phase	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 231101 ~ 231101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5093189	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 John Christian, Kishimoto Maki, Johzaki Tomoyuki, Higashiguchi Takeshi, Kakunaka Noboru, Matsumoto Yasuhiro, Hasegawa Noboru, Nishikino Masaharu, Ejima Takeo, Sunahara Atsushi, Endo Takuma, Namba Shinichi	4. 巻 44
2. 論文標題 Enhancement of water-window soft x-ray emission from laser-produced Au plasma under low-pressure nitrogen atmosphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1439 ~ 1439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.44.001439	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 Shinohara Kunio, Tone Shigenobu, Ejima Takeo, Ohigashi Takuji, Ito Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Quantitative Distribution of DNA, RNA, Histone and Proteins Other than Histone in Mammalian Cells, Nuclei and a Chromosome at High Resolution Observed by Scanning Transmission Soft X-Ray Microscopy (STXM)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cells	6. 最初と最後の頁 164 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cells8020164	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 Ejima Takeo, Ono Yuichi, Ito Keisuke, Kawasaki Hiromu, Higashiguchi Takeshi, Tone Shigenobu, Hatano Tadashi	4. 巻 24
2. 論文標題 Development of laboratory-type soft X-ray microscope, CXRM, in Water-window using LPP light source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 214 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618013417	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 Ejima Takeo, Hatano Tadashi	4. 巻 24
2. 論文標題 Quantum Efficiency of Back-illuminated CMOS Sensor with 1.4×1.4 μm <sup>2</sup> Pixel Size	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 322 ~ 323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618013922	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 Amano Reiho, Dinh Thang-Hung, Sasanuma Atsushi, Arai Goki, Hara Hiroyuki, Fujii Yusuke, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Sunahara Atsushi, Takahashi Akihiko, Nakamura Daisuke, Okada Tatsuo, Sakaue Kazuyuki, Miura Taisuke, O'Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 57
2. 論文標題 Influence of short pulse duration of carbon dioxide lasers on extreme ultraviolet emission from laser-produced plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 070311 ~ 070311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.070311	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 Barte Ellie Floyd, Hara Hiroyuki, Tamura Toshiki, Gisuji Takuya, Chen When-Bo, Lokasani Ragava, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Suzuki Chihiro, Li Bowen, Dunne Padraig, O'Sullivan Gerry, Sasaki Akira, Higashiguchi Takeshi, Limpouch Ji??	4. 巻 123
2. 論文標題 Characteristics of soft x-ray and extreme ultraviolet (XUV) emission from laser-produced highly charged rhodium ions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 183301 ~ 183301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5024344	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 Tamura Toshiki, Arai Goki, Kondo Yoshiki, Hara Hiroyuki, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Suzuki Chihiro, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 43
2. 論文標題 Selection of target elements for laser-produced plasma soft x-ray sources	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2042 ~ 2042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.43.002042	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 Ejima T., Kondo Y., Ono Y., Dinh T. -H., Higashiguchi T., Hatano T.	4. 巻 2016
2. 論文標題 Development of Soft X-Ray Microscope in Water Window Using Laser-Produced Plasma Light Source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ICXRL 2016: X-Ray Lasers 2016	6. 最初と最後の頁 395 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-73025-7_59	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 Kondo Y., Dinh T.-H., Tamura T., Ohta S., Kitano K., Ejima T., Hatano T., Higashiguchi T.	4. 巻 2016
2. 論文標題 Evaluation of a Flat-Field Grazing Incidence Spectrometer for Highly Charged Ion Plasma Emission in 1-10 nm	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ICXRL 2016: X-Ray Lasers 2016	6. 最初と最後の頁 409 ~ 412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-73025-7_62	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 Ejima Takeo, Ono Yuichi, Ito Keisuke, Kawasaki Hiromu, Higashiguchi Takeshi, Tone Shigenobu, Hatano Tadashi	4. 巻 24
2. 論文標題 Development of laboratory-type soft X-ray microscope, CXRM, in Water-window using LPP light source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 214 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618013417	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 Ejima Takeo, Hatano Tadashi	4. 巻 24
2. 論文標題 Quantum Efficiency of Back-illuminated CMOS Sensor with 1.4×1.4 μm <sup>2</sup> Pixel Size	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 322 ~ 323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618013922	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 Amano Reiho, Dinh Thang-Hung, Sasanuma Atsushi, Arai Goki, Hara Hiroyuki, Fujii Yusuke, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Sunahara Atsushi, Takahashi Akihiko, Nakamura Daisuke, Okada Tatsuo, Sakaue Kazuyuki, Miura Taisuke, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 57
2. 論文標題 Influence of short pulse duration of carbon dioxide lasers on extreme ultraviolet emission from laser-produced plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 070311 ~ 070311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.070311	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 Barte Ellie Floyd, Hara Hiroyuki, Tamura Toshiki, Gisuji Takuya, Chen When-Bo, Lokasani Ragava, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Suzuki Chihiro, Li Bowen, Dunne Padraig, O'Sullivan Gerry, Sasaki Akira, Higashiguchi Takeshi, Limpouch Ji??	4. 巻 123
2. 論文標題 Characteristics of soft x-ray and extreme ultraviolet (XUV) emission from laser-produced highly charged rhodium ions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 183301 ~ 183301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5024344	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 Tamura Toshiki, Arai Goki, Kondo Yoshiki, Hara Hiroyuki, Hatano Tadashi, Ejima Takeo, Jiang Weihua, Suzuki Chihiro, O' Sullivan Gerry, Higashiguchi Takeshi	4. 巻 43
2. 論文標題 Selection of target elements for laser-produced plasma soft x-ray sources	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2042 ~ 2042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.43.002042	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 T. Hatano, T. Ejima, T. Tsuru	4. 巻 220
2. 論文標題 Cr/Sc/Mo multilayer for condenser optics in water window microscopes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.	6. 最初と最後の頁 14-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elspec.2016.12.010	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 T. Ejima, M. Kado, M. Aoyama, K. Yasuda, and S. Tamotsu	4. 巻 849
2. 論文標題 Organelle Distribution in a Hydrated Bio-cell by Correlation between Soft X-ray and Fluorescence Images	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Series	6. 最初と最後の頁 012009-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/849/1/012009	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 M. Kado, M. Kishimoto, K. Shinohara, and T. Ejima	4. 巻 111
2. 論文標題 Increase of the emission of laser-produced plasmas under N2 gas atmosphere in the 2.9-6 nm region	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 054102-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4996890	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 M. Kado, T. Ejima, T. Tone, K. Shinohara	4. 巻 5
2. 論文標題 Analysis of Apoptotic Nuclei with Infrared Spectra-Microscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 SPRING-8 Section A: Scientific Research Report	6. 最初と最後の頁 35-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18957/rr.6.1.35	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 Toshitaka Wakayama, Takeshi Higashiguchi, and Yukitoshi Otani	4. 巻 24
2. 論文標題 Generation of the determined vectorial vortex beams by use of an achromatic axially symmetric waveplate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 449-461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-017-0315-1	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 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 江島 文雄、若山 俊隆、石山 貴之、安楽 響哉、金田 凌祐、ロイ ショミット、津田 準一、坂上 和之、東口 武史
2. 発表標題 軟X線励起蛍光におけるSX-STEDイメージング
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎 太夢、島田 悠太、難波 慎一、佐々木 明、錦野 将元、羽多野 忠、江島 文雄、東口 武史
2. 発表標題 ビスマスプラズマ水の窓軟X線源の開発
3. 学会等名 電気学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎 太夢、島田 悠太、難波 慎一、佐々木 明、錦野 将元、羽多野 忠、江島 文雄、東口 武史
2. 発表標題 ビスマスプラズマ水の窓軟X線源の開発
3. 学会等名 電気学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江島 丈雄
2. 発表標題 生物細胞観測のための軟X線相關顕微法の開発と現状
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江島 丈雄、若山 俊隆、篠崎 夏美、庄司 美咲、石山 貴之、坂上 和之、東口 武史
2. 発表標題 Ce:LSOの軟X線励起蛍光におけるSTED現象
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江島丈雄, 篠崎夏美, 庄司美咲, 石山貴之, 畑山元太, 坂上和之, 若山俊隆, 東口武史
2. 発表標題 シンチレーターCe:LSOにおけるSTED現象の検証
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠崎夏美, 庄司美咲, 坂上和之, 若山俊隆, 江島丈雄, 東口武史
2. 発表標題 シンチレータにSTED効果を誘起するための超広帯域光源の開発
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 若山俊隆, 篠崎夏美, 庄司美咲, 石山貴之, 坂上和之, 江島丈雄, 東口武史
2. 発表標題 広帯域ベクトルビームの幾何学的位相の制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江島丈雄, 小野祐一, 伊藤圭祐, 川崎大夢, 羽多野忠, 刀祢重信, 東口武史
2. 発表標題 BiターゲットLPP光源を用いた軟X線顕微鏡CXRM
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江島丈雄, 黒澤駿介, 山路晃広, 羽多野忠, 若山俊隆, 東口武史, 北浦守
2. 発表標題 SX-STED用シンチレーターの探索
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江島丈雄, 羽多野 忠
2. 発表標題 ピクセルサイズ $1.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ の背面照射型軟 線撮像素子の量子効率
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeo EJIMA and Tadashi HATANO
2. 発表標題 Quantum efficiency of back-illuminated CMOS sensor with $1.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ pixel size
3. 学会等名 14th International conference on x-ray microscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeo Ejima, Yuichi Ono, Keisuke Ito, Hiromu Kawasaki, Takeshi Higashiguchi, Shigenobu Tone and Tadashi Hatano
2. 発表標題 Development of laboratory-type soft X-ray microscope, CXRM, in Water-window using LPP light source
3. 学会等名 14th International conference on x-ray microscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽多野忠、江島丈雄、小野祐一、陳文博、近藤芳希、Thanh-Hung Dinh、田村賢紀、宜寿次拓弥、原広行、荒居剛己、東口武史
2. 発表標題 Bi プラズマ光源水の窓軟X線顕微鏡のための Cr/Sc/Mo 多層膜コンデンサーミラーの開発
3. 学会等名 線結像光学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江島丈雄、羽多野忠
2. 発表標題 ピクセルサイズ $1.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ の軟 X 線撮像素子の開発
3. 学会等名 線結像光学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江島丈雄
2. 発表標題 軟X線発光における誘導放出現象を用いた軟X線STED顕微鏡
3. 学会等名 広島大学第513回物性セミナー（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江島丈雄
2. 発表標題 軟X線発光における誘導放出現象を用いた軟X線STED顕微鏡の可能性
3. 学会等名 第26回バイオイメージング学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江島丈雄、羽多野忠
2. 発表標題 ピクセルサイズ 1.4×1.4 μm <sup>2</sup> の軟 X 線撮像素子の開発
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江島丈雄、白川仁、原田昌彦
2. 発表標題 企画説明 - テンダー 線領域と微量元素
3. 学会等名 第28回日本微量元素学会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 江島丈雄、山木賢一
2. 発表標題 Heガス中レーザー生成プラズマからの8-30nm軟 線発光強度
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江島丈雄、岸本牧、篠原邦夫、加道雅孝、小田切誠、角中昇、難波慎一
2. 発表標題 N2ガス中レーザー生成プラズマからの「水の窓」軟 線発光強度
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江島丈雄
2. 発表標題 ピクセルサイズ 1.4×1.4 μm <sup>2</sup> の軟 X 線撮像素子の開発
3. 学会等名 第30回日本放射光学会年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 T. Ejima, Y. Kondo, Y. Ono, T.-H. Dinh, T. Higashiguchi, and T. Hatano	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Springer-Verlag	5. 総ページ数 412-415
3. 書名 X-Ray Lasers 2016, Chap. 59	

〔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
研究分担者	東口 武史  (Higashiguchi Takeshi)  (80336289)	宇都宮大学・工学部・教授    (12201)	
研究分担者	若山 俊隆  (Wakayama Toshitaka)  (90438862)	埼玉医科大学・保健医療学部・教授    (32409)	