

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286095

研究課題名(和文)部分回転楕円面ミラー型光学素子による硬X線自由電子レーザーの高強度集光ビーム形成

研究課題名(英文)Ellipsoidal focusing mirror for intense beam formation of hard-x-ray free electron laser

研究代表者

湯本 博勝 (Yumoto, Hirokatsu)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源・光学系部門・研究員

研究者番号：20423197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：部分回転楕円面集光ミラー型光学素子のための作製基盤技術である「高精度表面加工法」と「高精度表面形状計測法」を構築することで、従来作製できなかった1nm形状精度の高精度部分回転楕円面集光ミラーの開発に成功した。7keVのX線において85nm×125nm(半値幅)の2次元ナノ集光ビームを部分回転楕円面ミラーにより世界に先駆けて達成した。本ミラーとX線自由電子レーザーを組み合わせることで10の20乗(W/cm<sup>2</sup>)の超高光子密度集光ビームの形成が期待できる。

研究成果の概要(英文)：By the development of fabrication techniques of a high-precision surface processing and a high-precision surface profiler, we successfully realized an ultra-precision ellipsoidal focusing mirror with a 1 nm figure accuracy that could not have been achieved by conventional fabrication methods. A two-dimensional nano-focusing beam with a beam size of 85 nm × 125 nm (full width at half maximum) at an x-ray energy of 7 keV was established with the developed ellipsoidal mirror. An extremely intense beam with a power density of 10 to the 20th power (W/cm<sup>2</sup>) can be expected by using the developed ellipsoidal mirror at a hard x-ray free electron laser facility.

研究分野：X線光学

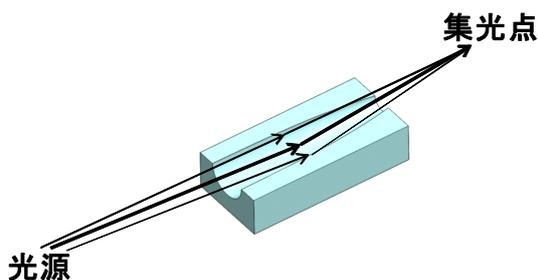
キーワード：部分回転楕円面ミラー X線集光光学素子 X線自由電子レーザー 超精密加工 表面形状計測 非球面放射光

## 1. 研究開始当初の背景

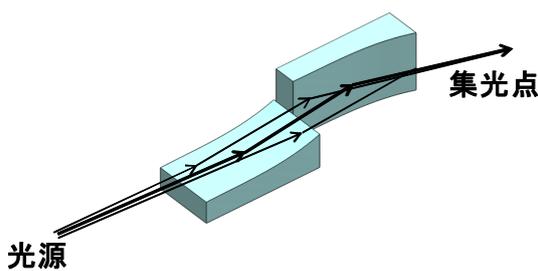
高輝度 X 線源のシンクロトロン放射光施設 SPring-8 や X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA で行われる顕微 X 線分析法において、微小かつ高強度な集光ビームを生み出す X 線集光光学素子は必要不可欠である。全反射現象を利用したミラー型集光光学素子は、色収差が無く、大開口、高集光効率、長焦点距離 (長ワーキングディスタンス) の確保が可能であり非常に利点が多い。

1 枚のミラーにより 2 次元集光が可能な部分回転楕円面形状ミラー (図 1(a)) は、2 次元ナノ集光用光学素子として従来利用されてきた K-B (Kirkpatrick-Baez) ミラー配置 (図 1(b))。2 枚の楕円筒面ミラーにより縦方向と横方向の集光を行う配置よりも、高い集光効率が達成可能である。しかしながら、回転楕円面ミラーは急峻な 2 次元的非球面形状を有することによる作製上の問題により、ナノ集光を達成可能な高精度ミラーは未だ作製することができない。

K-B ミラー光学系による集光は報告者らの研究により 10nm を下回るサイズを達成した。一方で、部分回転楕円面形状ミラーによる集光サイズはミクロン程度であり、高性能ミラーの作製技術は未開拓であった。



(a) 部分回転楕円面ミラー



(b) K-B (Kirkpatrick-Baez) ミラー配置

図 1 ミラー型 X 線集光光学素子

## 2. 研究の目的

部分回転楕円面ミラー型光学素子による硬 X 線ナノ集光の実現を目的とする。このために、部分回転楕円面ミラー型光学素子の作製上の課題である「高精度表面加工法」と「高精度表面形状計測法」を確立する。部分回転楕円面ミラーにより 100nm 集光を実現することで、XFEL の超高光子密度ビーム形成を可能とする光学系を達成する。

## 3. 研究の方法

部分回転楕円面ミラーにより硬 X 線領域において 100nm 集光を達成することを目標とした。開発ターゲットの部分回転楕円面集光ミラーを設計し、本ミラーのための超精密作製プロセスの確立を行った。

### (1) 開発ターゲットとした部分回転楕円面集光ミラー

光学パラメータは次の通りである。入射側焦点距離：50m, 反射側焦点距離：200mm, ミラー中心部での斜入射角：9mrad, ミラー基板のサイズ：100mm (長手方向)。これにより、ミラー開口サイズは長手方向に 0.9mm を持ち、回折限界集光サイズ 35nm (半値幅) が 7keV の X 線エネルギーにおいて期待できる。設計されたミラー表面形状は、短手方向に表面曲率半径 3mm 台、長手方向に 40m 前後などと 4 桁程度の差を持つ。サジタル方向に傾斜角分布は  $\pm 70\text{mrad}$  等であり非常に急峻な形状である。回折限界集光を実現するためには、このような 2 次元的に急峻に変化する非球面形状について 1nm (RMS (root-mean-square)) 精度で作製しなければならないことを、自作の波動光学集光シミュレーターにより見積もった。

### (2) ミラー作製プロセス

見積もった形状精度を満足するミラーを作製するために、以下の順番による高精度部分回転楕円面集光ミラー開発を実施した。

- ①ミラー基板材料として合成石英ガラスを使用する。
- ②高精度研削により 1 $\mu\text{m}$  程度の形状精度を持つ楕円面形状の粗作製を行う。
- ③研削面の表面粗さを除去することで X 線ミラーに適用可能な高精度面に加工する。
- ④数値制御形状修正加工法を利用することで、所定の 1nm (RMS) の形状精度を満足するまで加工する。
- ⑤基板表面を白金コーティングすることで、硬 X 線領域の全反射に対応する。
- ⑥SPring-8 における X 線ミラーの性能評価を行う。

本研究課題では上記のミラー作製プロセスの内、特に部分回転楕円面ミラーに対して従来法の適用が困難であった作製プロセスに関して技術上の課題を克服した。ナノ集光用部分回転楕円面ミラーのための③の“表面粗さ除去加工法”、④の形状修正加工に利用する“高精度表面形状計測法”と“高分解能形状修正加工法”の確立を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

ナノ集光用部分回転楕円面ミラーのための“高精度表面形状計測法”、“表面粗さ除去加工法”、“高分解能形状修正加工法”を開発

した。これらのミラー作製システムを利用して、合成石英製基板上の 93mm×0.45mm の領域に、楕円面形状を 1nm(RMS)の計測再現性と同等の形状精度で作製し、同時に表面粗さ 0.3 nm(RMS)の超高精度表面を達成した。

### ①高精度表面形状計測法

本研究課題で部分回転楕円面ミラー用に開発した表面形状計測法は、走査型白色顕微干涉計を利用した高精度ステッチング干涉法に基づき、ステッチング（つなぎあわせ）前のサブアパーチャー（部分的なミラーの測定形状）内に含まれるシステムエラー（系統誤差）補正法について特徴をもつ。

本計測法では相対角度決定型ステッチング法を応用した。これは取得したサブアパーチャー領域を、隣り合ったサブアパーチャー間の相対角基準でつなぎ合わせることで、部分回転楕円面集光ミラーの全体形状を高精度に算出するものである。これによりステッチング時の角度成分の蓄積誤差の低減が可能である。基準平面ミラーのフィゾー型干涉計の参照面に対する傾き角度成分から、被検面ミラーのサブアパーチャー間の相対角度を  $5 \times 10^{-9}$  rad 以下の精度で決定した。

部分回転楕円面集光ミラーを測定する際には、サブアパーチャー内において被検面が  $\pm 70$  mrad の傾斜角分布を有するため、サブアパーチャーの測定結果には計測装置固有のレンズ系の収差に起因する誤差がシステムエラー形状として含まれる。走査型白色顕微干涉計の対物レンズを含むレンズ群を使用した際に、被測定面が非球面形状を有し場所により局所的に傾斜していることで、コマを含む高次の収差成分が発生する。この収差成分を、平面ミラーを様々な傾斜量で評価した実験結果に基づき、ゼルニケ多項式を利用して表現する手法を開発した。

作製した部分回転楕円面集光ミラーの実際の測定では、評価領域 0.5mm×0.7mm のサブアパーチャー形状を 0.5mm 間隔で 198 枚測定し、これらをつなぎ合わせた。これにより 0.5mm×99mm の領域におけるミラーの全体形状を導出するとともに計測再現性 0.5nm(RMS) (図 2) を達成した。

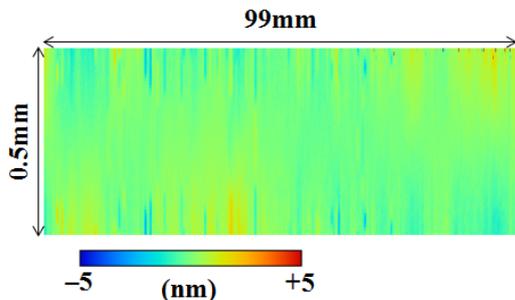


図 2 計測再現性. 0.5nm(RMS)

### ②高精度表面加工システム

表面粗さ除去加工のための「回転型ヘッド

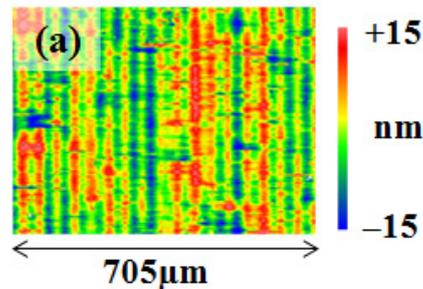
加工装置」と、高分解能形状修正加工のための「ノズル吐出型加工装置」の 2 種類の高精度表面加工装置の開発を行った。開発した上記の 2 種類の加工装置は特殊研磨法に基づいている。

#### i) 回転型ヘッド加工装置

非接触式の回転型加工ヘッドを有する。これにより加工液中に設置した被加工物表面上で弾性流体潤滑状態を発生させ、加工粒子を被加工物の表面に供給する。本装置は、特に表面粗さの除去加工能力に優れている。開発ターゲットの部分回転楕円面集光ミラーは、サジタル方向に曲率半径 3mm 台であり、このような小さな曲率半径に対応しなければならない。

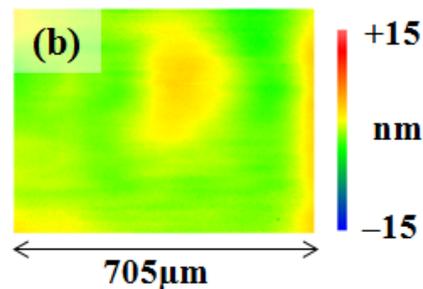
本研究課題では、加工ヘッドの小径化や、従来行っていた被加工物面内の 2 軸制御から、被加工物法線方向を加えた合計 3 軸の高速数値制御化を実施することで、急峻な非球面内で安定した均一な加工条件を達成した。これらの結果、部分回転楕円面ミラーの加工において、約 100 $\mu$ m 以下の空間波長成分の表面粗さの除去に対応可能であることを空間周波数解析結果から示した。

さらに、研削後の表面に形成されたスクラッチ痕やツール痕が残る表面粗さ 4.6nm(RMS)の表面 (図 3(a)) に適用することで、X線ミラーに必要なとされる 0.3nm(RMS)の表面粗さ (図 3(b)) が達成可能であることを実証した。図 3 は加工前後の同一箇所の観察結果である。本面は、図 3 の垂直方向に約 10 $\mu$ m の深さを持つ部分回転楕円面形状をしており、 $\pm 70$  mrad の非常に急峻な傾斜角分布を持つ。



(a) 研削後の表面

100 $\mu$ m 角領域の表面粗さ：4.6nm(RMS)



(b) 表面粗さ除去加工後の表面

100 $\mu$ m 角領域の表面粗さ：0.3nm(RMS)

図 3 部分回転楕円面ミラー上の表面粗さ

## ii) ノズル吐出型加工装置

加工液をノズルから吐出することで、被加工物表面の特定の微小な領域のみ除去加工を行うノズルジェット型の加工装置を新規製作した。ノズル形状や流路の改良により超高分解能な  $100\mu\text{m}$  (半値幅) 以下の単位加工痕 ( $\sim 80\mu\text{m}$  (半値幅)) を利用したリアルタイムオペレーティングシステム制御による数値制御形状修正加工を達成した。

図4に高空間分解能形状修正加工の例を示す。被加工物を搭載したXYZ 3軸並進ステージの各位置を1msecごとに指定することでステージの速度変調が可能である。これによりノズルヘッドの被加工物表面上での滞在時間分布制御型の数値制御加工システムを構築した。空間分解能  $100\mu\text{m}$  以下、高さ分解能  $1\text{nm}$  (Peak-to-Valley) 以下の高空間分解能形状修正加工法により、部分回転楕円面集光ミラーの最終仕上げ加工を実施した。

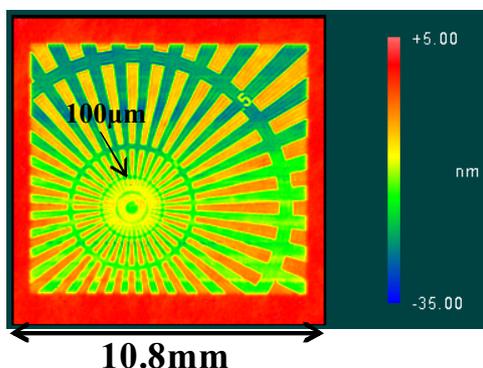


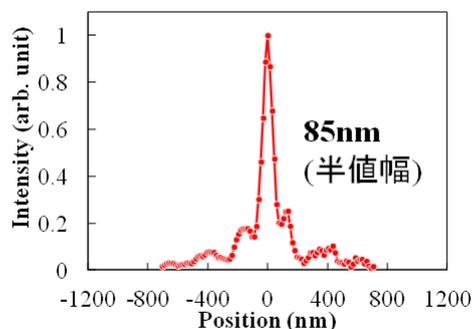
図4 数値制御加工の例.  $100\mu\text{m}$  以下の高空間分解能な形状創成に成功した。

### ③部分回転楕円面ミラーの集光性能評価

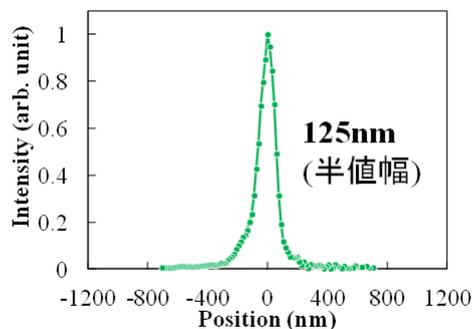
大型放射光施設 SPring-8 (BL29XUL) において集光性能を評価した。部分回転楕円面集光ミラーの精密角度調整の後、ナイフエッジスキャン法によりビームサイズを評価した結果、 $7\text{keV}$  の硬X線において、世界で初めて  $85\text{nm} \times 125\text{nm}$  (半値幅) (図5) の2次元ナノ集光ビームを1枚の部分回転楕円面ミラーにより実現した。本ビームにより走査型X線顕微鏡を構築し、 $100\text{nm}$  を十分下回る Line&Space テストチャートを観察することで2次元集光が同一焦点面内で非点収差無く行われていることを確認した。これらにより、開発したミラー作製プロセスが、ナノ集光用部分回転楕円面ミラーに対応可能であることを示すことができた。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

国内外の研究グループに先駆けて部分回転楕円面ミラーによる  $100\text{nm}$  集光を実現した。さらに、高精度非球面ミラーの作製技術そのものが世界をリードする技術であり、超精密生産技術への大きな貢献となる。



(a) メリジオナル方向



(b) サジタル方向

図5 部分回転楕円面集光ミラーにより実現した集光プロファイル

このような高精度非球面形状作製技術の開発により、放射光ユーザーに安定な高強度ナノビームが提供できるばかりでなく、楕円面ミラーと双曲面ミラーを組み合わせたウォルター型結像光学系の開発にも応用でき、光学系の設計自由度の向上が可能となる。

楕円面集光ミラーは、サジタル方向にメリジオナル方向よりも大きな開口数をとる設計が可能であるため、従来の1次元集光用楕円筒面ミラーを組み合わせたK-B配置では不可能な微小な回折限界集光サイズをもつ光学系の設計が可能であるなど、発展性が非常に高い。

### (3) 今後の展望

開発した部分回転楕円面集光ミラーをX線自由電子レーザー施設 (SACLA) で利用することで、 $10^{20}(\text{W}/\text{cm}^2)$  の超高光子密度集光ビームが期待できる。X線自由電子レーザーの高強度ビーム形成により、X線非線形光学や、タンパク等のナノ粒子の単粒子イメージングにおける研究の発展が期待できる等、革新的なナノスケール分解能X線分析法を提供できる。

さらに、開発した超精密生産技術は、放射光用光学素子に限らず、高精度な2次元非球面形状を要する天体望遠鏡や短波長高出力光源、現在計画中の次世代低エミッタンス放射光施設等の様々な最先端科学技術分野を支える高性能光学素子の開発に応用が可能である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- 1) **Hirokatsu Yumoto**, Takahisa Koyama, Satoshi Matsuyama, Yoshiaki Kohmura, Kazuto Yamauchi, Tetsuya Ishikawa, and Haruhiko Ohashi “Advancement of hard X-ray nano-focusing ellipsoidal mirror at SPring-8”, *Synchrotron Radiation News* (2016). 査読有. Article DOI : 10.1080/08940886.2016.1198671
- 2) **Hirokatsu Yumoto**, Takahisa Koyama, Satoshi Matsuyama, Kazuto Yamauchi, and Haruhiko Ohashi “Stitching interferometry for ellipsoidal x-ray mirrors” *Review of Scientific Instruments* **87** 051905 (2016). 査読有. View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4950714>
- 3) **Hirokatsu Yumoto**, Takahisa Koyama, Satoshi Matsuyama, Kazuto Yamauchi, and Haruhiko Ohashi “Ultra-high-precision surface processing techniques for nanofocusing ellipsoidal mirrors in hard x-ray region” *9206 Proc. of SPIE* 920605-1~11 (2014). 査読無. DOI: 10.1117/12.2063146

[学会発表] (計12件)

- 国際会議・ワークショップにおける発表
- 1) ①**H. Yumoto (invited)** ②Ellipsoidal mirror for two-dimensional nanofocusing in the hard x-ray region ③XOPT2016 (International Conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications 2016) ④XOPT6-4 ⑤Pacifico Yokohama, Japan ⑥18-20, May, 2016 ⑦Oral ⑧査読無
  - 2) ①**H. Yumoto (invited)** ② X-ray Micro-focusing with Ellipsoidal Mirror ③ Microbeam Workshop for Macromolecular Crystallography ④ - ⑤ National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) Hsinchu Taiwan ⑥3rd March 2016 ⑦Oral ⑧査読無
  - 3) ①**H. Yumoto (invited)**, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and H. Ohashi ② Surface profiler for off-axis ellipsoidal mirror ③ IWXM 2015 - International Workshop on X-Ray Optics and Metrology ④ Abstracts: Program p.12 ⑤ Lawrence Berkeley National Laboratory - Berkeley, California USA ⑥13th-16th, July 2015 ⑦Oral ⑧査読無
  - 4) ①**H. Yumoto**, T. Koyama, S. Matsuyama, Y. Kohmura, K. Yamauchi, T. Ishikawa, and H. Ohashi ②X-ray micro-focusing

with off-axis ellipsoidal mirror ③ SRI2015: 12th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation ④Oral Presentation Abstracts p35 ⑤New York City, USA ⑥ 6th-10th, July 2015 ⑦Oral ⑧査読無

- ① Conference Proceedings; ①**H. Yumoto**, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and H. Ohashi ② X-ray micro-focusing with off-axis ellipsoidal mirror ③ 同上 ④AIP Conference Proceedings Accepted ⑤⑥⑦同上 ⑧査読有
- 5) ①**H. Yumoto**, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and H. Ohashi ② Development of fabrication methods for ellipsoidal focusing mirrors ③ XRM2014: The 12th International Conference on X-Ray Microscopy ④ S2-19 Abstracts p245 ⑤ Melbourne Australia ⑥ 26th-31th October 2014 ⑦Poster ⑧査読無  
① Conference Proceedings; ①**H. Yumoto**, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and H. Ohashi ② Wave-optical assessment of alignment tolerances in nano-focusing with ellipsoidal mirror ③ The 12th International Conference on X-Ray Microscopy ④AIP Conference Proceedings 1696, 020033 (2016) ⑤⑥⑦同上 ⑧査読有
  - 6) ① **Hirokatsu Yumoto** ② Deformable Mirror and Stitching Interferometry for Nano-focusing ③ 14th APS-ESRF-SPring-8 Three-way Meeting X-ray Optics Workshop ④--, ⑤Argonne APS USA ⑥July 30-31, 2013 ⑦Oral ⑧ 査読無
- 国内学会・シンポジウムにおける発表
- 1) ①**湯本博勝**, 他6名 ②硬X線用部分回転楕円面集光ミラーの作製と集光評価 ③2016年度精密工学会春季大会学術講演会 ④講演論文集 Q31, p909-910 ⑤東京理科大学 野田キャンパス (千葉県野田市) ⑥2016年3月15日~17日 ⑦口頭 ⑧査読無
  - 2) ①**湯本博勝**, 他6名 ②硬X線用楕円面集光ミラー作製法と集光特性 ③第29回日本放射光学会年会 放射光科学合同シンポジウム ④シンポジウム論文集 2B004, p52 ⑤東京大学 柏の葉キャンパス (千葉県柏市) ⑥2016年1月9日~11日 ⑦口頭 ⑧査読無
  - 3) ①**湯本博勝**, 他4名 ②硬X線用部分回

転楕円面集光ミラーの作製-高精度非球面加工法によるミラー表面の形状修正加工- ③2014 年度精密工学会秋季大会 学術講演会 ④講演論文集 E40, p277-278 ⑤鳥取大学 鳥取キャンパス (鳥取県鳥取市) ⑥2014年9月16日~18日 ⑦口頭 ⑧査読無

- 4) ①湯本博勝, 他 4 名 ②硬X線用部分回転楕円面集光ミラーのための表面加工プロセスの開発 ③2014 年度精密工学会春季大会学術講演会 ④講演論文集 R44, p1281-1282 ⑤東京大学 本郷キャンパス (東京都文京区) ⑥2014 年 3 月 18 日~20 日 ⑦口頭 ⑧無
- 5) ①湯本博勝, 他 4 名 ②高精度形状計測法と非球面加工法を利用した硬X線楕円面集光ミラーの形状修正 ③第27回日本放射光学会年会 放射光科学合同シンポジウム ④シンポジウム論文集 11P088 ⑤広島国際会議場 (広島県広島市) ⑥2014 年 1 月 11 日~13 日 ⑦ポスター ⑧査読無
- 6) ①湯本博勝, 他 4 名 ②硬X線用部分回転楕円面集光ミラーの開発-高精度形状修正加工法と高精度ステッチング表面形状計測法を利用したミラー作製- ③2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会 ④講演論文集 L39, p661-662 ⑤関西大学 千里山キャンパス (大阪府吹田市) ⑥2013年9月12日~14日 ⑦口頭 ⑧査読無

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

湯本 博勝 (YUMOTO, Hirokatsu)  
公益財団法人高輝度光科学研究センター・  
光源・光学系部門・研究員  
研究者番号：20423197