

平成28年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書
〔追跡評価用〕

平成28年4月22日現在

研究代表者 氏名	山内 和人	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	大阪大学・工学（系）研究科（研究 院）・教授
研究課題名	硬X線Sub-10nmビーム形成と顕微鏡システムの構築		
課題番号	18002009		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 山内 和人（大阪大学・工学（系）研究科（研究院）・教授） 研究分担者 三村 秀和（東京大学・工学系研究科・准教授）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成18年度	36,000 千円
平成19年度	47,000 千円
平成20年度	34,100 千円
平成21年度	63,900 千円
平成22年度	21,200 千円
総計	202,200 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

SPring-8 を始めとする第3世代放射光の稼動により、X線顕微鏡技術の高度化に大きな注目が集っていた。このため、高性能なX線光学系の開発競争が世界中で展開されていたが、本研究では、精密に計測された集光強度のプロファイルから位相回復法によってミラー上での波面誤差を知る「At-wavelength 波面計測」と、これに基づく「in-situ 波面補正」など、従来にはない概念に基づく補償光学システムを構築して、世界最小の7nmサイズの硬X線ナノビームを実現し、様々な物質を分子スケールで分析可能なSub-10nm分解能硬X線顕微鏡システムを実現した。

本研究の中で確立された主な手法や技術的成果は以下の様になる。

- (1) 100mmレベルの領域において、PV1~2nm精度のデタミニスティックな形状創成法を確立
- (2) 集光ビームの集光点近傍でのビーム強度からの位相回復にもとづくAt-wavelength波面計測法の提案と実証
- (3) 0.5%精度の精密X線ビームプロファイル計測法の確立(上記(2)のための強度分布計測に不可欠)
- (4) 精密位相補償用の形状可変ミラーの設計と開発

本研究の終了後、(1)の製造技術は、更に500mmレベルの領域での形状創成技術へと発展しており、民間企業への技術移転にも成功している。本手法によって作られるX線ミラーは、“Osaka Mirror”と呼ばれ、世界の主要な放射光施設の先端的ナノビームラインにおいて広く利用されている(例えばESRF(European Synchrotron Radiation Facility)のID16)。X線自由電子レーザーで用いる場合は更なる高精度化が求められ、空間波長で50 μ mから10mmレベルの短波長領域の凹凸において、その高さが1nm以下であっても大きなスペckル発生の原因となることを明らかにした。この改善のため、加工プロセスの空間制御性を高めることに成功し、すでに、XFEL集光に必要な形状精度を実現する目処を得ている。

(2)のAt-wavelength波面計測法は、本研究において、世界で初めて提案し、性能の実証を行ったものである。しかし、その精度は、ビームプロファイル(強度分布情報)の精度に依存することや、逆問題の性質上、真の解が得られているかの判断が、この解にもとづいた波面補正の際に、予想する結果が得られたかどうかでしか検証できないなどの問題があった。そこで、新たにグレーチング型の差分干渉計を提案し、上記問題が効果的に解決できることを実証した。本手法は集光点後方にグレーチングを配し、この自己像が観測される位置において、自己像の強度分布から直接波面誤差を算出するものである。原型はTalbot干渉計であり、自己像形成位置に吸収型のグレーチングをさらに配することによって形成されるモアレ縞から、位相分布を求めるものである。様々な試料のX線位相像の取得に用いられ、低被爆の乳がん診断などに応用されつつある。本研究では、この差分干渉計をビーム拡大系において用い、その結果、モアレ縞を介することなく、直接CCDカメラで観察した自己像から位相が求められることを示した。これによって、一枚の自己像からフーリエ変換法による位相情報の抽出が可能になり、ショットバイショットでの計測が必要なSACLAでのAt-wavelength波面計測において必要不可欠な手法と成っている。

(3)については、本研究において、 $\Delta I/I$ (ビーム強度をI、その計測の確からしさを ΔI)が1/100に迫る精密なビームプロファイル計測を可能にした。この計測には、比較的長時間を要することから、ショットバイショット計測が必要なXFELの計測には応用できないが、位相計測の結果から予想されるビームプロファイルとの整合性の検証のために不可欠な手法となっている。現在は、更にその測定精度を数倍に高めることにも成功している。

(4)では、ピエゾアクチュエータ駆動のナノ精度形状可変ミラーを実現し、波面誤差の補正に用いることに成功した。本研究の終了後は、X線光学系における光学パラメーターのアダプティブ制御へと発展させつつあり、回折限界性能を有するビームサイズ可変光学系などが実現しつつある。

以上の様な、X線光学系の高度化を目標に、個々の技術の高度化研究を継続的に進めており、その結果具現化した光学システムや、現在研究開発中の光学システムについて以下に列挙する。

- (1) 日本のXFELであるSACLAの1 μ m、50nm集光の実現(完全コヒーレント、超高ピーク強度ビームへの対応)
- (2) (1)の成果を基盤に、可飽和吸収、2光子吸収、内殻励起レーザー発振などのX非線形光学現象を探索
- (3) X線顕微鏡の高機能化のための、ビームサイズ可変光学系の提案とテーブルトップでの実証
- (4) 正弦条件を満たす複数ミラー光学系の実現とX線結像型顕微鏡への展開
- (5) (4)の成果を基盤とするイメージングXAFS顕微鏡の開発と応用
- (6) SACLAの5nm集光による超強光子場形成の研究

一部の研究は現在進行中であるが、すべて世界を先導するものであり、大阪大学は放射光X線光学の研究のメッカとして、世界的に認知されている。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

前項に示したように、放射光をベースとする X 線光学システムの研究において、当該グループの研究室はそのメッカと認識されており、数多くの招待講演を行っている。当該グループの研究手法や方向性は、本分野の研究の流れに大きな影響力をもち続けている。

以下、招待講演の例を示す。

1. “Mirror-based optical system for the 3rd and 4th generation synchrotron radiation sources” ,
23rd International Congress on X-ray Optics and Microanalysis (ICXOM 23),
Brookhaven National Laboratory, NY, USA, Sep. 2015.
2. “Mirror optics of beam delivery & spectrometers” ,
European XFEL Users’ Meeting, DESY, Hamburg, Germany, 22-25 Jan. 2013.
3. “Nanofocusing and single shot wavefront diagnosis of SACLA” ,
SPIE Optics+Optoelectronics, Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic, 17-18 Apr. 2013.
4. “Nanofocusing of X-ray free electron laser for coherent X-ray science” ,
X-ray lasers in biology, The Royal Society, London, UK, 14-15 Oct. 2013.
5. “Recent progress on mirror-based optical systems for coherent hard-x-ray science” ,
11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2012),
Lyon, France, Jul. 2012.
6. “Current status of mirror-based optics for coherent x-ray science” ,
3rd Ringberg Workshop on Science with FELs, Bavaria, Germany, Feb. 2012.
7. “Hard X-ray nanofocusing and wavefront diagnosis” ,
4th international workshop on Metrology for X-ray Optics, Mirror Design, and Fabrication,
International Workshop on X-ray Mirror and related devices, Barcelona, Spain, 4-6 Jul. 2012.
8. “Single-nanometer focusing of hard x-rays using novel adaptive optical system” ,
ACTOP11, Diamond Light Source, Oxfordshire, UK, 15-20 Apr. 2011.
9. “Current status of precision mirror development for coherent X-rays” ,
SPIE Optics+Optoelectronics, Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic, 18-21 Apr. 2011.

本研究の終了後、米国の LCLS (Linac Coherent Light Source) と日本の SACLA で XFEL が発振し、その他、ヨーロッパの Euro-XFEL やスイス、韓国でも XFEL 施設の建設が進みつつある。このような状況の下、XFEL に特化した多くの会議が開催されており、そのほとんどで、光学系開発に関する講演を依頼されている。

また、アメリカの SPIE の年会 (Optics & Photonics) において、Adaptive-Mirror や先端的形状計測、X 線顕微鏡などの会議で、Co-chair や Program committee を勤めており、本分野への情報発信と本分野の発展に大きく貢献している、2015 年度には SPIE の Senior Member となっており、平成 28 年度には、「放射光 X 線の微小ビーム形成」で、文部科学大臣表彰を受賞している。

以下に、本研究終了後の SPIE でのアクティビティーについてその一部を示す。

- 2015 Program Committee Member, SPIE Conference on Advances in Metrology for X-Ray and EUV Optics I-V, SPIE Optics and Photonics, San Diego, CA.
- 2014 Co-Chair, SPIE Conference on Adaptive X-Ray Optics III, SPIE Optics and Photonics, San Diego, CA.
- 2013 Program Committee Member, SPIE Conference on X-Ray Nano-imaging, Instruments and Methods, SPIE Optics and Photonics, San Diego, CA.
- 2012 Scientific Advisory Committee Member, 4th International Workshop on X-ray Mirror Design, Fabrication, and Metrology (IWXM), Barcelona, Spain.
- 2012 Co-Chair, SPIE Conference on Adaptive X-Ray Optics II, SPIE Optics and Photonics, San Diego, CA.

など

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

① 科学研究費助成事業・基盤研究（S）

研究課題名： 補償光学系を駆使した多段光学系による X 線自由電子レーザーのナノメートル集光
 研究期間： 平成 23 年 5 月 31 日～平成 28 年 3 月 31 日
 研究期間全体の配分額： 215,930 千円

② 戦略的創造研究推進事業・CREST

制度担当府省： 科学技術振興機構
 研究課題名： コヒーレント X 線による走査透過 X 線顕微鏡システムの構築と分析科学への応用
 研究期間： 平成 22 年 10 月 1 日～平成 28 年 3 月 31 日
 研究期間全体の配分額： 108,730 千円

③ 革新的ものづくり産業創出連携促進事業（プロジェクト委託型）

制度担当府省： 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）
 研究課題名： SiC・GaN の臨界性能に挑む超平坦化 CARE 技術の開発
 研究期間： 平成 27 年 11 月 27 日～平成 30 年 3 月 31 日
 研究期間全体の配分額： 68,900 千円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

以下に、項目ごとにまとめる。

- 本研究の成果である X 線光学系への波動光学的アプローチによって、世界で初めて色収差の無い結像光学系を実現している。正弦定理を満たす 4 枚ミラー光学系を波動光学にもとづいて評価し、空間分解能 50nm、回折限界の分解能が実現できる視野 20 μm が可能であることを明らかにするとともに、これを具現化した。（例えば期間後に発表した論文の 7 に対応）
- XFEL の 50nm 集光の達成により、X 線領域における非線形光学現象が観察され、新たな学問領域を開拓した。観察された事例は以下の通り。①Fe の K 吸収端における可飽和吸収現象の観察、②Ge の K 殻への 2 光子吸収によるホール形成、③Cu の K 殻反転分布形成による硬 X 線レーザー発振の観察（期間後に発表した論文の 4, 6, 9 に対応）
- XFEL 照射による吸収 X 線とミラー表面のアブレーションダメージの関係を実測データに基づいて明らかにし、XFEL 集光ミラーにおいて、Pt 等の重元素や Pt/C 等の多層膜が利用可能であることを明らかにした。特別推進研究では、回折限界性能を目指した斜入射 X 線集光ミラーに初めて多層膜を適用し、所期性能を実現していた。XFEL 集光においても多層膜は光学系の高度化に有効であるが、これまで X 線吸収によるアブレーションダメージに関する知見が無く、本成果は極めて有効な知見であると認識されている。
 Damage threshold of platinum/carbon multilayers under hard X-ray free-electron laser irradiation, J. Kim, A. Nagahira, T. Koyama, S. Matsuyama, Y. Sano, M. Yabashi, H. Ohashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Optics Express, 23(22) (2015) 29032-29037.
- X 線集光波面の計測において、Talbot 干渉計が有効であることを見出し、集光光学系の波面観察に特化したシステムを提案し、その性能を実証している。
 Wavefront measurement for a hard-X-ray nanobeam using single-grating interferometry, S. Matsuyama, H. Yokoyama, R. Fukui, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, W. Yashiro, A. Momose, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Optics Express 20, 24977-24986, 2012.

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

以下、学術研究等への貢献状況について主な成果を示す。

- 本研究で開発した高精度ミラー作製技術を日本の民間企業に技術移転し、世界の放射光施設における先端的なノビームラインにインストールされ、利用されている。Osaka-Mirror と呼ばれている。
(移転先企業の情報：<http://www.j-tec.co.jp/>)
- SSRF (Shanghai Synchrotron Radiation Facility) の次期ノビームラインにおいて、本研究で構築した補償光学に基づく Sub-10nm 集光光学系が採用され、技術移転先の企業が中心になり、光学系開発を担当している。本プロジェクトでは、技術アドバイザーとして、当該グループが参加している。
(以下のペーパーで公表されている)
XRM2014 Session 2-Poster 2
X-RAY MICROSCOPY RELATED STUDIES IN SSRF: THE CURRENT AND THE FUTURE
Renzhong Tai, Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 239 Zhangheng Road, Pudong District, Shanghai 201204, China
- 日本の X 線自由電子レーザー施設 SACLA における $1\mu\text{m}$ と 50nm 集光光学系を当該グループが中心となって完成させ、すでに、一般ユーザーの利用に供されている。数多くの成果に貢献している。
(期間後に発表した論文の, 1, 5 に対応)
- 上記項目に関連するが、SACLA の大きな学術的目標の一つが X 線非線形光学現象の探索である。本分野の研究者との連携により、世界で初めての観察例として、①Fe の K 吸収端における可飽和吸収現象の観察、②Ge の K 殻への 2 光子吸収によるホール形成、③Cu の K 殻反転分布形成による硬 X 線レーザー発振などを行い、最先端の X 線科学に大きく貢献している。
(期間後に発表した論文の, 4, 6, 9 に対応)
- 本研究で開発した At-wavelength 波面評価技術をベースに、JAXA の次期太陽観測衛星用 X 線望遠鏡の性能評価を行い、望遠鏡光学系の高性能化に関する知見獲得に貢献した。
(以下のペーパーで成果の一部が発表されている)
Development of precision Wolter mirrors for future solar x-ray observations,
Taro Sakao ; Satoshi Matsuyama ; Ayumi Kime ; Takumi Goto ; Akihiko Nishihara ; Hiroki Nakamori ; Kazuto Yamauchi ; Yoshiki Kohmura ; Akira Miyake ; Hirokazu Hashizume ; Tadakazu Maezawa ; Yoshinori Suematsu ; Noriyuki Narukage,
Proc. SPIE 9603, Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy VII, 96030U (September 4, 2015); doi:10.1117/12.2188905
- Argonne National Laboratory との共同研究として、X 線用アダプティブミラーの開発に関し、共同研究を開始している。本研究所の APS (Advanced Photon Source)での利用が視野に入っている。
(共同研究実施が確定 (エビデンスなし))
- 光学加工技術の継続的開発の中で、新たな加工技術として、触媒表面基準エッチング法を開発し、光学材料の最終表面処理法へと展開している。多くの国内光学メーカーとの共同研究が開始されている。本方法は、パワーデバイス基板の加工においても有望視され、NEDO の支援の下に実用化研究が始まっている。
(例えば、研究費取得状況の③に対応)

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名・著者名・発行年・ページ数等	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Breaking the 10nm barrier in hard-X-ray focusing, H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa & K. Yamauchi, Nature Physics 6, 122-125, 2010.	世界で初めてX線集光において10nm以下を実現したもの。本研究の最も重要な成果	174
2	Efficient focusing of hard x-rays to 25nm by a total reflection mirror, H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, K. Yamauchi, Applied Physics Letters 90, 051903, 2007.	ミラー作製技術の高度化により、世界最小（当時）の25nm集光を実現	131
3	Development of scanning X-ray fluorescence microscope with spatial resolution of 30nm using K-B mirrors optics, S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, K. Yamamura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Review of Scientific Instruments 77, 093107, 2006.	ミラー作製技術とミラー姿勢制御技術の高度化により、Sub-30nm分解能の走査型X線顕微鏡を実現	48
4	Atomic-scale flattening of SiC surfaces by electroless chemical etching in HF solution with Pt catalyst, K. Arima, H. Hara, J. Murata, T. Ishida, R. Okamoto, K. Yagi, Y. Sano, H. Mimura, and K. Yamauchi, Applied Physics Letters 90, 202106 1-3, 2007.	新規開発を続けていた表面プロセスによって原子スケールで平坦な単結晶SiC表面を実現	41
5	At-wavelength figure metrology of hard x-ray focusing mirrors, H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, S. Handa, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, K. Yamauchi, Review of Scientific Instruments 77,063712, 2006.	世界で初めて、放射光X線光学系の評価法にAt-wavelength位相回復を提案し、その方法を公開	41
6	Direct Determination of the Wave Field of an X-ray Nanobeam, H.Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, S. Handa, T. Kimura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, K. Yamauchi, Physical Review A 77, 015812, 2008.	位相回復法に利用可能な高精度ビームプロファイル計測法を提案し、性能実証	34
7	Elemental mapping of frozen hydrated cells with cryo-scanning X-ray fluorescence microscopy, S. Matsuyama, M. Shimura, M. Fujii, K. Maeshima, H. Yumoto, H. Mimura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, Y. Ishizaka, T. Ishikawa and K. Yamauchi, X-Ray Spectrometry 39,260, 2010.	開発した走査型X線顕微鏡によって人がん細胞を観察し、抗がん剤シスプラチン耐性の発生メカニズムに関する知見を獲得	26
8	Trace element mapping of a single cell using a hard x-ray nanobeam focused by a Kirkpatrick-Baez mirror system, S. Matsuyama, M. Shimura, H. Mimura, M. Fujii, H. Yumoto, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi, X-ray Spectrometry 38, 89-94, 2009.	開発した光学系をベースに、生命科学分野への応用を目指した顕微鏡システムを構築し、その性能を実証	20
9	Stitching-angle measurable microscopic-interferometer: surface-figure metrology tool for hard X-ray nanofocusing mirrors with large curvature, H. Yumoto, H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, S. Matsuyama, Y. Sano, H. Ohashi, K. Yamauchi, and T. Ishikawa, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 616, 203-206, 2010.	極めて大きな曲率（ $1/10\text{m}^{-1}$ ）を有する多層膜ミラー基板のための高精度形状計測法を提案し、性能実証	11
10	Highly accurate differential deposition for X-ray reflective optics, S. Handa, H. Mimura, H. Yumoto, T. Kimura, S. Matsuyama, Y. Sano, and K. Yamauchi, Surface and Interface Analysis 40,1019-1022, 2008.	At-wavelength波面計測によって求めたミラー形状誤差を補正し、その後の性能評価により、計測法が所期性能を有することを実証	10

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Focusing of X-ray free-electron laser pulses with reflective optics, H. Yumoto, H. Mimura, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Tono, T. Togashi, Y. Inubushi, T. Sato, T. Tanaka, T. Kimura, H. Yokoyama, J. Kim, Y. Sano, Y. Hachisu, M. Yabashi, H. Ohashi, H. Ohmori, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Nature Photonics 7, 43-47, 2012.	SACLA の 1 μ m 集光を達成	68
2	Single-nanometer focusing of hard x-rays by Kirkpatrick-Baez mirrors, K. Yamauchi, H. Mimura, T. Kimura, H. Yumoto, S. Handa, S. Matsuyama, K. Arima, Y. Sano, K. Yamamura, K. Inagaki, H. Nakamori, J. Kim, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi and T. Ishikawa, Journal of Physics: Condensed Matter 23, 394206 1-9, 2011.	硬 X 線の sub-10nm 集光に関する技術をまとめた review 論文	34
3	Towards High-Resolution Ptychographic X-ray Diffraction Microscopy, Y. Takahashi, A. Suzuki, N. Zetsu, Y. Kohmura, Y. Senba, H. Ohashi, K. Yamauchi, T. Ishikawa, Physical Review B 83, 214109, 2011.	ミラー集光によって実現した高強度照明系を用いた高性能レンズレスイメージングシステムの提案	31
4	X-ray two-photon absorption competing against single and sequential multiphoton processes, K. Tamasaku, E. Shigemasa, Y. Inubushi, T. Katayama, K. Sawada, H. Yumoto, H. Ohashi, H. Mimura, M. Yabashi, K. Yamauchi, and T. Ishikawa, Nature Photonics 8, 313-316, 2014.	SACLA の 50nm 集光により, Ge 内殻電子の 2 光子吸収による真空放出に成功	28
5	Generation of 10 ²⁰ W/cm ² Hard X-ray Laser Pulses with Two-Stage Reflective Focusing System, H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, T. Koyama, K. Tono, Y. Inubushi, T. Togashi, T. Sato, J. Kim, R. Fukui, Y. Sano, M. Yabashi, H. Ohashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Nature Communications 5, 3539, 2014.	SACLA の 50nm 集光の達成	23
6	Saturable absorption of intense hard X-rays in iron, H. Yoneda, Y. Inubushi, M. Yabashi, T. Katayama, T. Ishikawa, H. Ohashi, H. Yumoto, K. Yamauchi, H. Mimura, and H. Kitamura, Nature Communications 5, 5080, 2014.	SACLA の 50nm 集光ビームによる Fe の K 吸収端における可飽和吸収の観察	16
7	Hard-X-ray imaging optics based on four aspherical mirrors with 50 nm resolution, S. Matsuyama, N. Kidani, H. Mimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, Optics Express 20, 10310-10319, 2012.	全反射ミラーによる結像光学系の開発と性能実証	13
8	A Bragg beam splitter for hard x-ray free-electron lasers, T. Osaka, M. Yabashi, Y. Sano, K. Tono, Y. Inubushi, T. Sato, S. Matsuyama, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Optics Express 21, 2823-2831, 2013.	表面創成法の高度化により, Si 極薄結晶を作製し, XFEL 用のビームスプリッターを実現	11
9	Atomic inner-shell laser at 1.5- \AA wavelength pumped by an X-ray free-electron laser, H. Yoneda, Y. Inubushi, K. Nagamine, Y. Michine, H. Ohashi, H. Yumoto, K. Yamauchi, H. Mimura, H. Kitamura, T. Katayama, T. Ishikawa and M. Yabashi, Nature, 524, 446-449, 2015.	Cu の K 殻励起による世界初の X 線レーザー発振	3
10	Nanofocusing of X-ray free-electron lasers by grazing-incidence reflective optics, K. Yamauchi, M. Yabashi, H. Ohashi, T. Koyama, and T. Ishikawa, Journal of Synchrotron Radiation, 22 (3), 592-598, 2015.	XFEL 集光技術に関する研究成果をまとめた review 論文	2

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

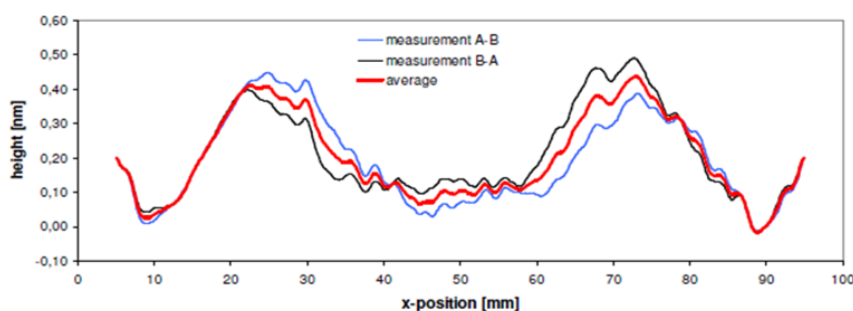
次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

○ 実用化を通じた成果の社会への還元

国内外の放射光施設の研究者からの強い要望から、高精度 X ミラーの製造技術を国内の企業に技術移転し、商業ベースでの高性能ミラーの供給がすでに可能になっている。国内では SPring-8, 国外では, ESRF (フランス), DIAMOND (イギリス), DESY (ドイツ), PETRAIII (ドイツ), SLS (スイス), NSLS II (アメリカ), LCLS (アメリカ), APS (アメリカ) などに、すでにインストールされており, "Osaka-Mirror" と呼ばれ、極めて高い評価を得ている。

特に PETRAIII への SHIPPING では、ミラー評価をドイツの計量技術研究所である PTB が行い、我々の計測との相対差が 100mm 長のミラーにおいて僅か 0.5nmPV であることが示された。世界が、双方のミラー形状評価技術の精度を認知するきっかけとなっている。以下のグラフは、ドイツから示された形状誤差である。なお、PTB の評価では、径 3mm の走査プローブが用いられており、3mm φ の領域の平均値で評価されている。このため、相対差 0.5nm の議論は原理的に可能である。



Residual Figure Error: 0.13 nm rms / < 0.5 nm pv
(this profiles are obtained by integration of the residual slope data)

○ 雑誌「子供の科学」(22/2/9 付の冊子) で X 線ナノビーム形成技術とその応用について紹介されている。

学術誌での発表にとどまらず、可能な限り、一般に向けた新聞等による情報発信や科学教育への貢献を心がけている。また、以下に新聞発表の例を示す。

- ・ X 線光子同時吸収 理研など 1つの原子に当て成功, 日経産業新聞, 2014年02月
- ・ 最高強度の X 線レーザー 高輝度センター米の 1.5 倍実現, 日刊工業新聞, 2012年12月
- ・ 大視野で高分解能 阪大などが X 線顕微鏡, 日刊工業新聞, 2011年10月
- ・ X 線顕微鏡 観察精度 10 ナノ以下, 日経産業新聞, 2010年04月
- ・ エックス線ビーム世界最小レベル成功, 毎日新聞, 2009年12月

他多数

○ 国際会議開催による情報発信とコミュニティー形成にも積極的である。

(開催国際会議など 1 (2) に記載)

○ 放射光科学アジアオセアニアフォーラムの一環として, SPring-8 にて行われる若手研究者教育のための Cheiron school において、下記レクチャーにおける教材提供と実習支援を行っている。

EUV, Soft and Hard X-Ray Optics and Beamlines

David Attwood University of California, Berkeley

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

本研究には、博士課程以上の学生などの若手研究者が参加し、以下のように新しいキャリアを獲得している状況にある。

- H.M 氏（助教）（平成 17 年から 21 年）現在、東京大学大学院工学研究科精密工学専攻 準教授
- S.M 氏（博士課程学生，助教）（平成 17 年から 21 年）現在、大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 助教
- H.Y 氏（博士課程学生）（平成 17 年から 19 年）現在、高輝度光科学研究センター 研究員
- S.H 氏（博士課程学生）（平成 18 年から 20 年）現在、キヤノン株式会社
- T.K 氏（博士課程学生）（平成 19 年から 21 年）現在、北海道大学 電子科学研究所 助教

博士課程学生が、研究期間内に書いたトップオーサーの論文は以下の通りである。三村秀和，松山智至が助教として発表したものは除く。

T. Kimura et al., Wavefield characterization of nearly diffraction-limited focused hard x-ray beam with size less than 10 nm, Review of Science Instruments 81,123704, 2010.

T. Kimura et al., A Stitching Figure Profiler of Large X-ray Mirrors Using RADSI for Subaperture Data Acquisition, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 616, 229-232, 2010.

H. Yumoto et al., Stitching-angle measurable microscopic-interferometer: surface-figure metrology tool for hard X-ray nanofocusing mirrors with large curvature, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 616, 203-206, 2010.

S. Handa et al., Novel Scheme of Figure-Error Correction for X-ray Nanofocusing Mirror, Japanese Journal of Applied Physics 48, 096507-1_4, 2009.

T. Kimura et al., Development of adaptive mirror for wavefront correction of hard x-ray nanobeam, Proc. SPIE 7077, 707709, 2008.

H. Yumoto et al., Stitching interferometric metrology for steeply curved x-ray mirrors, Surface and Interface Analysis 40, 1023-1027, 2008.

S. Handa et al., Highly accurate differential deposition for X-ray reflective optics, Surface and Interface Analysis 40, 1019-1022, 2008.（期間中に発表した論文 10 に対応）

H. Yumoto et al., At-wavelength figure metrology of total reflection mirrors in hard x-ray region, Proc. SPIE 6317, 631709, 2006.

H. Yumoto et al., At-wavelength figure metrology of hard x-ray focusing mirrors, Review of Scientific Instruments 77,063712, 2006.（期間中に発表した論文 6 に対応）

上記の若手研究者の現在の状況を以下に示す。

H.M 氏は、軟 X 線顕微鏡の高度化を目指した研究において、JST の研究成果展開事業【先端計測分析技術・機器開発プログラム】「ラボベース軟 X 線光源用大開口・回転 体集光ミラーの開発」を実施中である。S.M 氏は、同じく、JST の研究成果展開事業【先端計測分析技術・機器開発プログラム】「4 枚の非球面ミラーを用いた結像型硬 X 線顕微鏡の開発」を成功裏に実施した。H.Y 氏は、SPring-8 のオプティクス開発の中心で活躍しており、SPring-8 におけるナノビームラインのほぼすべての開発の責任者となっている。SACLA の集光光学系の開発では、当該グループと緊密に連携し、成果のユーザー提供によるフィージビリティスタディーにも大きく貢献している。T.K 氏は、現在、X 線レンズレスイメージングの研究に携わっており、2015 年には、世界で初めての生きた細菌の X 線撮影に成功している。Nature Communication から論文をトップオーサーで発表しており、この成果は NHK のサイエンスゼロでも取り上げられている。なお、本研究に従事したポスドクはいない。