

平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな（ローマ字）		YAMAUCHI KAZUTO					
①研究代表者氏名		山内 和人		②所属研究機関・部局・職 大阪大学・大学院工学研究科・教授			
③研究課題名	和文	超高精度 X 線ミラー作製による高分解能硬 X 線顕微鏡の開発					
	英文	Development of hard X-ray nanoscopy/spectroscopy system with probe beam size of 10nm order					
④研究経費		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
17年度以降は内約額 金額単位：千円		25,000	20,700	14,400	9,700	13,900	83,700
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
山内 和人	大阪大学・大学院工学研究科・教授	X 線光学・超精密加工	研究全体の統括				
山村 和也	大阪大学・大学院工学研究科・助教授	X 線光学・超精密加工	X線ミラーの作製、集光システムの開発				
佐野 泰久	大阪大学・大学院工学研究科・助教授	超精密加工	X線ミラーの作製				
稲垣 耕司	大阪大学・大学院工学研究科・助手	超精密加工	X線ミラーの作製、蒸着システムの開発				
三村 秀和	大阪大学・大学院工学研究科・助手	X 線光学・形状計測	X線ミラー表面の形状計測、X線集光特性の評価				
森 勇藏	大阪大学・大学院工学研究科・客員教授	超精密加工・形状計測	X線ミラーの作製と表面形状計測				
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>SPRING-8等の第3世代放射光源では、高輝度かつ高干渉性を有する硬X線を扱うことができる。こうした光源を利用すれば、色収差のないミラー光学系により、X線をナノスケールで波動光学的な回折限界にまで集光することが、原理的に可能である。しかし、このためのX線ミラー光学素子を製作するためには、原子レベルで平滑な表面を、100mm以上の大きさの領域に、0.1nm (RMS)レベルの形状精度で作成する超精密加工・計測技術が必要である。</p> <p>当該研究者等は、本研究の申請の以前より、任意の形状をもつ表面に対して原子レベルの平滑性とナノメートルレベルの形状精度を実現する超精密加工・計測技術の開発を推進し、EEM (Elastic Emission Machining)加工システム、PCVM (Plasma Chemical Vaporization Machining)加工システム、ならびにMSI (Micro-stitching Interferometry)形状計測システムを完成させ、これらを統合した超精密形状創成システムを構築した。そして、これを硬X線斜入射ミラーの製作に応用展開し、その時点（2001年）での硬X線(15keV)集光における世界最小記録となる180nm×120nm集光に成功している。</p> <p>本研究の目的は、上記成果の発展的な活用と、新たな開発項目の設定により、さらに高輝度かつ微小な集光が可能な大開口数（NA: Number of Aperture）の非球面 X 線ミラー光学素子の開発に挑戦し、波動光学的な回折限界における集光径が 30nm×50nm の硬 X 線集光ユニットを完成させることにより、例えば創薬研究等から強く要請されている細胞小器官内部を空間分解した元素分布観察が可能な走査型蛍光 X 線顕微鏡およびプロジェクション型 X 線顕微鏡システムを世界に先駆けて構築することにある。</p>							

⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

X線顕微鏡への応用展開に必要な30nm×50nm集光ビームの形成が、平成15、16、17年度の目標である。その達成のために計画したミラー光学素子の開発における研究項目は以下の通りである。

- (1) 硬X線の30nm×50nm集光を可能にする非球面ミラーの設計および許容形状誤差の検討
- (2) 空間波長10 μ m以上の全波長域において精度2nm(P-V)の形状評価が可能な計測システムの開発
- (3) 空間波長0.1mm以上の分解能を有する形状創成加工システムの開発
- (4) 大NAミラーにおける高反射率を実現するPt（白金）成膜装置の開発（必要膜厚均一度2nm(P-V)）
- (5) ミラーの高精度マニピュレータの開発による30nm×50nm集光ビームの実現

これまでの研究の経過および成果を年度ごとに、上記項目(1)～(5)に分けて示す。

平成15年度：

(1) 独自に開発した波動光学ベースの集光プロファイルシミュレーターを用い、形状誤差の空間波長と振幅をパラメータに、集光プロファイルの劣化との関係を求め、(2)において開発する形状評価装置の中・長空間波長域の目標測定精度を2nm(P-V)と決定した。また、高周波数領域の目標測定精度は、プロジェクション顕微鏡の性能の観点から、0.2mm～2mm周期においてSub-1nm(P-V)を目標とした。

(2) (1)で得たクライテリアを基に、中・長空間波長域における形状精度2nm(P-V)を実現するため、ステッチング干渉計のサブアパーチャ間の相対角度を、10⁻⁸radレベルでその場計測が可能なRAD (Relative Angle Determinable) ステッチング干渉計を開発した。図1に示す構成により、大曲率ミラーの一部を測定する際に、レファレンス平面ミラーを被験ミラーと同一の傾斜ステージにより同角度傾斜させ、レファレンス平面ミラーの傾斜角を測定することにより、サブアパーチャ間の相対角度を求める。ミラー全域を10から20のサブアパーチャに分割し、レファレンス平面ミラーの傾きをインチワーム法によって繰り返し計測する。本システムを独自開発したMSI形状計測システムに組み込み、空間波長0.03mm以上の全波長領域において、所定精度での形状評価を可能にした。

(3) 数値制御EEM(Elastic Emission Machining)において、微小開口ノズルの開発と、微粒子の表面モフォロジー制御を行い、0.1mmを上回る加工の空間分解能と従来の約100倍の加工能率を実現した。

平成16年度

(2),(3) 15年度の成果を基に、具体的なミラー製作を実施し、形状計測と形状誤差修正加工を繰り返し、その整合性からシステムの再現性を確認した。その結果、図2に示すように、ミラー全域において、3回の形状修正により、所定精度の形状創成が可能であることを示した。

(4) Pt薄膜形成装置を立ち上げ、(2)(3)の実施により製作したミラー基板上へのPt成膜を実施し、所定の膜厚均一性を有する非球面集光ミラーの製作を完了した。

(5) X線の入射角やミラーの姿勢制御に必要なアライメント精度を検討し、ミラーマニピュレータ（図3(次項参照)）を設計・製作した。本マニピュレータにミラーを搭載し、SPring-8のBL29-XUL（1km長尺ビームライン）において、15keVのX線により集光性能の評価を行った。実測された集光ビームのプロファイルを図4(次項参照)に示す。X線エネルギー15keVにおいて、ライバルであるESRFグループの記録(90nm)を遥かに凌ぐ36nm×48nm集光を実現し、本研究の前半部分の目標を所定通り達成した。(1)において、目的の集光特性を得るためには、ミラー形状の絶対精度が2nm(P-V)以上必要であることを示しており、目的とした集光の達成は、開発した計測・加工システムにおいて所定性能が達成されていることを意味する。また、当初の計画外であるが、開発したRADステッチング干渉計の性能から、より急峻な形状の計測が必要な22nm×30nm集光ミラーの製作にも適用が可能であることが分かり、その製作にも挑戦したところ、30nm集光用ミラーの製作によって、所定どおり30nmに一次元集光できることを確認した。22nm集光用のミラー製作を17年度中に実施することにより、22nm×30nmの二次元集光が達成できる可能性がある。

以上のように、17年度現在において、所期の目標を上回る成果を得た。本年度以降、計画通り顕微鏡の構築とその応用展開へと研究を進展させる。

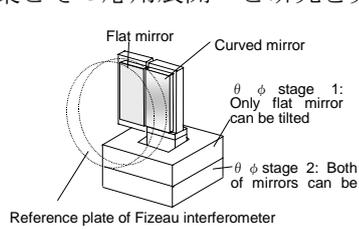


図1 開発したRADSIの構成（左：構成、右：測定時の干渉縞）

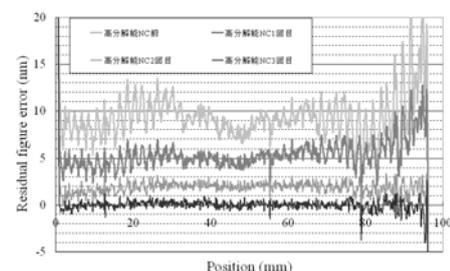
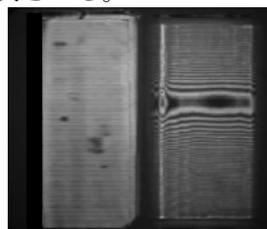


図2 形状修正過程の一例

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

- (1) 製作した 2 枚の非球面 (楕円体) ミラーによる Kirkpatrick-Baez 光学系を構築し、回折限界の集光を達成するとともに、硬 X 線の世界最小集光を実現した。ミラーのアライメント精度を詳細に検討して設計・開発した Kirkpatrick-Baez 光学ユニットならびに集光プロファイルを図 3、図 4 に示す。本成果は、これまでの常識を覆す集光性能を達成したものであり、X 線光学のみならず X 線顕微鏡開発やその応用領域を含む広範な学術分野において、世界的に大きなインパクトを与えた。2005 年 SPIE の Annual meeting において、今後 5~10 年の硬 X 線集光における研究戦略について講演依頼を受けるなど、世界の硬 X 線オプティクス開発をリードする状況となった。(平成 17 年 2 月以降に招待講演 2 件 (国内 1、米 1))



図 3 開発した Kirkpatrick-Baez 光学系用のマニピュレータ写真

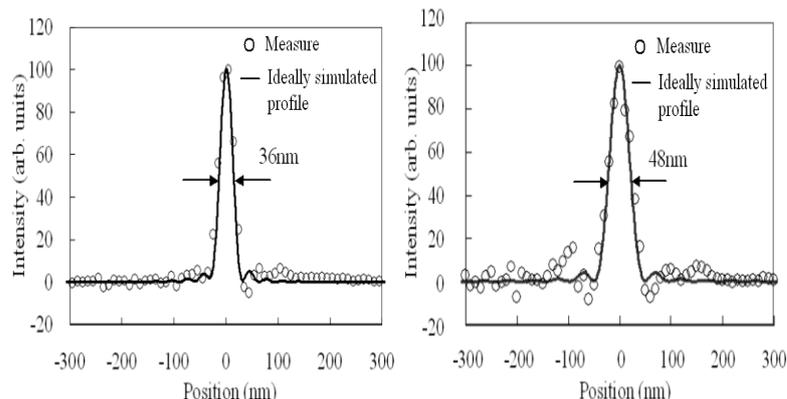


図 4 2次元集光プロファイル (X 線エネルギー15keV)
SPring-8 の BL29-XUL にて計測

- (2) 集光ビームプロファイルの観察において、ビームウエストの構造を詳細に調査した。その結果、硬 X 線ナノビームにおいて、ビームウエスト近傍での波動光学的な干渉現象を確認した。その結果は、Fresnel-Kirchhoff 回折積分によって予測される結果と極めて良い一致を示した。従来、幾何光学的評価で十分であった硬 X 線領域の集光性能の評価において、高精度光学素子の開発に伴う波動光学的なアプローチの必要性を世界に印象付けた。ビームウエスト近傍のプロファイルの測定結果と計算結果の比較を図 5 に示す。

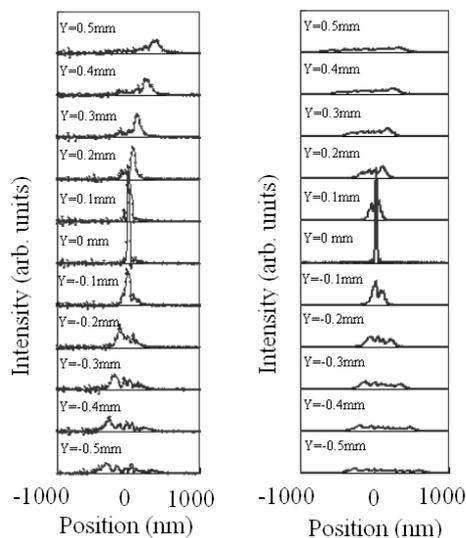


図 5 集光幅 36nm におけるビームウエスト近傍のビームプロファイル (左: 実測結果、右: 計算結果)

ビームウエスト近傍での波の干渉による干渉縞構造が観測され、ミラー形状を基に Fresnel-Kirchhoff 回折積分によって得られた結果と良い一致を見た。ミラー光学素子を用いた硬 X 線の集光において世界で始めて観察されたものである。(可視光域のレーザー等のコヒーレント光源を用いた結果は、光学の教科書等で紹介されている。なお、実験を行った BL29-XUL では、世界最高のコヒーレンシーを有する X 線を利用できる。)

- (3) 大面積の形状計測において、X 線斜入射ミラーの計測技術は、その重要性が指摘されながら、十分な精度を有する計測装置の開発が進んでいなかった。本研究において、全く新しい RAD ステッチング干渉計測システムを考案・開発し (平成 15 年度)、その性能を硬 X 線集光の達成によって証明した (平成 16 年度)。本成果は、世界の放射光施設のオプティクス評価グループから高い評価を得ている。(平成 16 年 4 月以降に招待講演 3 件 (仏 1、独 1、米 1))

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

学術論文

1. ○H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, H. Hara, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Fabrication of elliptically figured mirror for focusing hard X-rays to size less than 50 nm, Review of Scientific Instruments, to be published (2005).
2. ○H. Mimura, S. Matsuyama, H. Yumoto, H. Hara, K. Yamamura, Y. Sano, M. Shibahara, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Hard X-ray Diffraction-Limited Nanofocusing with Kirkpatrick-Baez Mirrors, Japanese Journal of Applied Physics Part 2, **44** (18), L539-L542 (2005).
3. ○H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Relative angle determinable stitching interferometry for hard x-ray reflective optics, Review of Scientific Instruments, **76**, 045102 (2005).
4. K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, A. Souvorov, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, Y. Mori, Wave-optical evaluation of interference fringes and wavefront phase in hard X-ray beam totally reflected by mirror optics, Applied Optics, accepted (2005).
5. S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, K. Yamamura, Y. Sano, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku T. Ishikawa, M. Yabashi and K. Yamauchi, Diffraction-limited two-dimensional hard-X-ray focusing at 100nm level using Kirkpatrick-Baez mirror arrangement, Review of Scientific Instruments, accepted (2005).
6. A. Kubota, H. Mimura, K. Inagaki, H. Yumoto, Y. Mori and K. Yamauchi, Morphological Stability of Si (001) Surface in Mixture Fluid of Ultrapure Water and Silica Powder Particles in Elastic Emission Machining, Japanese Journal of Applied Physics, accepted (2005).
7. 久保田章亀, 三村秀和, 湯本博勝, 森 勇藏, 山内和人, EEM (Elastic Emission Machining)プロセスにおける加工液がSi(001)表面のラフネスに及ぼす影響, 精密工学会誌論文集, to be published (2005).
8. 久保田章亀, 三村秀和, 稲垣耕司, 森 勇藏, 山内和人, EEM (Elastic Emission Machining)プロセスにおける微粒子表面の形態が加工表面に及ぼす影響, 精密工学会誌論文集, to be published (2005).
9. A. Kubota, H. Mimura, K. Inagaki, K. Arima, Y. Mori and K. Yamauchi, Preparation of Ultrasmooth and Defect-Free 4H-SiC(0001) Surfaces by Elastic Emission Machining, Journal of Electronic Material, **34**(4), 439-443 (2005).
10. H. Mimura, K. Yamauchi, K. Yamamura, A. Kubota, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and Y. Mori, Image quality improvement in hard X-ray projection microscope using total reflection mirror optics, Journal of Synchrotron Radiation, **11**, 343-346 (2004).
11. K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori, Two-dimensional Submicron Focusing of Hard X-rays by Two Elliptical Mirrors Fabricated by Plasma Chemical Vaporization Machining and Elastic Emission Machining, Japanese Journal of Applied Physics Part 1, **42** (11), 7129-7134 (2003).
12. K. Yamamura, K. Yamauchi, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and Y. Mori, Fabrication of elliptical mirror at nanometer-level accuracy for hard x-ray focusing by numerically controlled plasma chemical vaporization machining, Review of Scientific Instruments, **74** (10), 4549-4553 (2003).

国際会議

1. K. Yamauchi, H. Mimura, K. Yamamura, Y. Sano, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Endo, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and Y. Mori, Development of Elliptical Kirkpatrick-Baez Mirrors for Hard X-Ray Nanofocusing, OSA Annual Meeting Frontiers in Optics, Tuscon, USA (2005). (招待講演：2005年10月)
2. K. Yamauchi, H. Mimura, S. Matsuyama, H. Yumoto, K. Yamamura, Y. Sano, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, An strategy to fabricate KB mirrors for 10 nm hard X-rays focusing, Optics & Photonics 2005, San Diego, USA (2005). (招待講演：2005年8月)
3. K. Yamauchi, H. Mimura, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, S. Matsuyama, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, Fabrication of ultraprecisely figured and ultrasmooth elliptical mirrors for hard X-ray nanofocusing, 2nd International Symposium on Technologies and Applications of Photoelectron Micro-Spectroscopy with Laser-based VUV Sources, Tsukuba, Japan (2004). (招待講演)
4. H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamamura, Y. Sano, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Development of surface figuring and smoothing technologies for ultraprecise X-ray mirror Fabrication, 2nd International Symposium on Technologies and Applications of Photoelectron Micro-Spectroscopy with Laser-based VUV Sources, Tsukuba, Japan (2004).
5. K. Yamauchi, Surface figure metrology of X-ray mirrors using optical interferometry, Production Metrology for Precision Surface, Braunschweig, Germany (2004). (招待講演)
6. H. Mimura and K. Yamauchi, Development of hard X-ray nanofocusing system using ultraprecisely figured mirrors at SPring-8, The 9th SPring-8, ESRF, APS Workshop, SPring-8, Japan (2004).
7. H. Mimura and K. Yamauchi, Development of surface figuring and smoothing technologies for ultraprecise X-ray mirror fabrication at Osaka university, The 9th SPring-8, ESRF, APS Workshop, SPring-8, Japan (2004).
8. K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, S. Matsuyama, H. Yumoto, K. Ueno, M. Shibahara, K. Endo, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa and Y. Mori, Fabrication technology of ultraprecise mirror optics to realize hard X-ray nanobeam, SPIE Annual Meeting 2004, Proceedings of SPIE, **5533**, 116-123, Denver, USA (2004).
9. H. Mimura, H. Yumoto, K. Yamamura, Y. Sano, S. Matsuyama, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Microstitching Interferometry for hard X-ray nanofocusing mirrors, SPIE Annual Meeting 2004, Proceedings of SPIE, **5533**, 171-180, Denver, USA (2004).
10. S. Matsuyama, H. Mimura, K. Yamamura, H. Yumoto, Y. Sano, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Wave-optical and ray-tracing analysis to establish a two dimensional focusing unit using K-B arrangement, SPIE Annual Meeting 2004, Proceedings of SPIE, **5533**, 181-191, Denver, USA (2004).
11. K. Yamauchi, H. Mimura, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, S. Matsuyama, K. Endo, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, Surface figure metrology of total reflection X-ray mirror using optical interferometry at Osaka Univ. and SPring-8, Second International Workshop on Metrology for X-ray Optics, Grenoble, France (2004). (招待講演)
12. Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Endo, Y. Nishino, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, Fabrication technology for hard X-ray reflective optics, Second International Workshop on Metrology for X-ray Optics, Grenoble, France (2004).
13. Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, A. Saito, Y. Sano, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa, M. Shimura, Y. Ishizaka, Fabrication technology of hard X-ray aspherical mirror optics and application to nanospectroscopy, SPIE Annual Meeting 2003, Proceedings of SPIE, **5193**, 11-17, San Diego, USA (2003).
14. Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa, Development of figure correction method having spatial resolution close to 0.1mm, SPIE Annual Meeting 2003, Proceedings of SPIE, **5193**, 105-111, San Diego, USA (2003).

学会発表

1. 三村秀和, 松山智至, 湯本博勝, 原 英之, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 森 勇藏, 西野吉則, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人, 超高精度X線集光ミラーの作製と集光特性の評価, 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 1272-1273 (2005).
2. 久保田章亀, 三村秀和, 稲垣耕司, 佐野泰久, 山村和也, 山内和人, 森 勇藏, EEMによるSiC表面の平坦化, 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 1265-1266 (2005).
3. 松山智至, 三村秀和, 湯本博勝, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 森 勇藏, 西野吉則, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人, ミラー集光光学系を用いた高分解能硬X線CT顕微鏡の開発, 第18回日本放射光学会シンポジウム予稿集, 106 (2005).
4. 三村秀和, 松山智至, 湯本博勝, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 森 勇藏, 西野吉則, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人, 高精度非球面全反射ミラーによる硬X線の回折限界集光, 第18回日本放射光学会シンポジウム予稿集, 143 (2005).
5. 湯本博勝, 三村秀和, 松山智至, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 森 勇藏, 西野吉則, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人, 干渉計を用いた高精度表面形状計測法の開発と硬X線集光ミラーへの適応, 第18回日本放射光学会シンポジウム予稿集, 209 (2005).
6. 久保田章亀, 三村秀和, 山内和人, 森 勇藏, EEMプロセスにおいてシリカ分散超純水がSi(001)表面のマイクロラフネスに及ぼす影響, 2004年度精密工学会秋季大会学術講演会学術論文集, 641-642 (2004).
7. 松山智至, 山内和人, 三村秀和, 湯本博勝, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 西野吉則, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 森 勇藏, ミラー集光系を用いたX線顕微鏡(ナノスコーピー)の開発, 第65回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 605 (2004).
8. 湯本博勝, 山内和人, 三村秀和, 松山智至, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 西野吉則, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 森 勇藏, 硬X線ナノ集光のための高精度楕円体ミラーの作製と集光特性の評価, 第65回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 602 (2004).
9. 湯本博勝, 山内和人, 三村秀和, 松山智至, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 石川哲也, 森 勇藏, 干渉計を用いた楕円体ミラーの形状計測 -高精度ステッチング法の開発-, 2004年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 185-186 (2004).
10. 湯本博勝, 山内和人, 三村秀和, 松山智至, 山村和也, 佐野泰久, 遠藤勝義, 石川哲也, 森 勇藏, 高精度X線ミラーのための干渉計を利用した形状計測システムの開発, 精密工学会2004年度関西地方定期学術講演会講演論文集, 95-96 (2004).
11. 松山智至, 山内和人, 山村和也, 三村秀和, 佐野泰久, 湯本博勝, 遠藤勝義, 玉作賢治, 矢橋牧名, 西野吉則, 石川哲也, 森 勇藏, 走査型X線顕微鏡のための楕円体ミラーを用いた二次元集光ユニットの開発, 第51回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 747 (2004).