

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360073

研究課題名 (和文) 次世代硬 X 線望遠鏡用非球面レプリカ反射鏡の開発と光学特性評価

研究課題名 (英文) Development of replicated aspherical mirrors for next-generation hard X-ray telescopes and evaluation of optical properties

研究代表者

難波 義治 (NAMBA YOSHIHARU)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：40029129

研究成果の概要：

本研究は、次世代の硬 X 線望遠鏡用非球面レプリカ反射鏡を製作する基盤加工技術を開発することが主目的であり、最大径 600mm の非球面金型が製作可能な超精密非球面加工装置を開発し、超精密ダイヤモンド切削により直径 300mm の無電解ニッケル製非球面金型を製作した。金型の表面粗さ 0.3nm rms 以下を得るため、研磨法の開発を行い、直径 300mm、ミラー長 210mm の回転放物面・回転双曲面からなる大型金型を表面粗さ 0.23nm rms に仕上げることに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2007 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学(生産工学・加工学)

キーワード：X 線天文学、精密研磨、精密部品加工、人工衛星、光学特性

1. 研究開始当初の背景

平成 14 年のノーベル物理学賞はニュートリノ天文物理学で小柴昌俊博士と Raymond Davis Jr. 博士が、宇宙 X 線源の発見で Riccardo Giacconi 博士が授賞した。後者は昭和 37 年 6 月の X 線天文ロケットで初めて観測されたものである。その後の 47 年間に X 線天文学が発達したが、21 世紀は軟 X 線から硬 X 線の時代へと変遷する。従来の X 線望遠鏡は、表面すれすれに入射した X 線が円筒内面で全反射する現象を利用し、軟 X 線を集光・結像するもので、米国は零熱膨張ガラスセラミックス(口径 1.2m)を光学研磨したも

の (Chandra 衛星、平成 11 年打上げ) で結像性能の高さを誇り、欧州はニッケル電鍍基板で大有効面積と結像性能を誇り (XMM-Newton 衛星、平成 11 年打上げ)、日本(すざく衛星、平成 17 年 7 月打上げ) は結像性能を犠牲にして高分解能分光を目指している。反射面にはいずれも Au もしくは Ir がコートされている。現在は、日米欧の 3 機の軟 X 線望遠鏡が宇宙にある。

より波長の短い透過力の高い硬 X 線を検出して新しい天文物理学を確立するため、名古屋大学大学院理学研究科では、重元素 Pt と軽元素 C を一定の厚さで交互に、超平滑な

基板上に周期長を可変にして多数積層した準周期的な層状構造を持ち、X線を分光・集光・結像させる多層膜スーパーミラーを開発した。この場合、2種類の物質の界面粗さを小さくすることが高い反射率を得るために重要であり、高い結像性能と広い有効反射面積を得るためには高精度なX線多層膜非球面レプリカ反射鏡が必要である。現状の日本の硬X線望遠鏡はガラス円筒にPt/C多層膜を成膜し、円錐状のアルミニウム板をエポキシ樹脂で貼り付けてから離型する工程で製作されており、反射面の形状誤差が大きい欠点を有している。次世代のX線望遠鏡(NeXT衛星計画)はニッケル電鍍より軽量の多層膜非球面レプリカ反射鏡が主流になり、その反射鏡は形状精度100nm以下、表面粗さ0.3nm rms以下が要求される。その打上げは平成25年を目標にしているの、遅くとも平成21年にはその反射鏡の製作法を確立することが必須である。このような世界で最も進んだX線望遠鏡を製作する技術を最適なタイミングで開発することが本研究課題の目標である。

2. 研究の目的

Pt/C多層膜スーパーミラーから構成される次世代の硬X線望遠鏡(NeXT衛星)ならびにそれ以降の硬X線望遠鏡に使用する非球面レプリカ反射鏡を製作する基盤加工技術を開発することが主目的である。この望遠鏡は、図1のように回転放物面と回転双曲面からなる多数の反射鏡からなり、反射鏡は100nm以下の形状精度と0.3nm rms以下の表面粗さを必要とし、軽量化のため厚みは0.22mmであり、表面はPt/C多層膜が成膜される。実際のX線望遠鏡では上記の反射鏡は直径の異なるものが200個以上必要であり、反射鏡基板の薄さと要求される形状精度の高さから、反射鏡は超精密非球面金型から成形で製作することになる。また、金型の種類が200個以上となるため、超高精度で能率的な金型加工技術の開発が必須となる。10keV~80keVの硬X線領域では、軟X線望遠鏡のような金単層膜での全反射が使えないため、

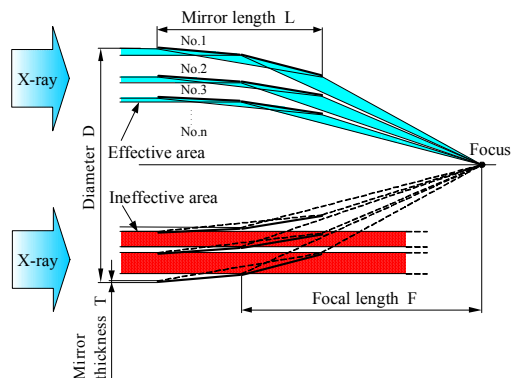


図1 硬X線望遠鏡の結像系

数nmピッチでPtとCを交互に重ね合わせた多層膜が必要である。この多層膜を非球面金型に成膜し、その無電解ニッケル金型からPt/C多層膜を離型した例は皆無であり、この離型法を開発することも目的の一つである。また、このような工程で製作した反射鏡の光学特性を測定し、製作法の妥当性を検証することも研究目的に含まれる。

3. 研究の方法

1) 超精密大型非球面加工装置の改良と非球面金型の超精密形状計測法の開発

零熱膨張ガラスセラミックス製平面原器を開発し、これを加工装置上に取り付けた超高感度センサーで形状計測することにより、加工装置の運動精度並びに運動の再現性を測定し、運動誤差の削減を行なう。この結果を元に修正加工を施すと共に非球面金型の形状を機上計測する。

2) 無電解ニッケル非球面金型の超精密ダイヤモンド切削ならびに超精密研磨

形状精度 $\pm 50\text{nm}$ 、表面粗さ0.3nm rms以下を目指し、超精密ダイヤモンド切削ならびに超精密研磨の最適化を図る。また、大型非球面金型の研磨のため、超精密非球面研磨装置を開発し、超精密大型非球面加工装置に設置する。

3) Pt/C多層膜成膜法の改良と無電解ニッケル非球面金型からのPt/C多層膜の離型法の開発

観測したい広いエネルギー領域の硬X線を反射させるためにはPtとCの膜厚をサブnmで制御し、ピッチを可変にした成膜が必要であり、無電解ニッケル金型からの離型には特殊な離型材の開発が必要であり、この離型膜は超平滑で、数nm厚の連続膜を必要とする。

4) Pt/C多層膜スーパーミラー非球面レプリカ反射鏡の製作

実際に硬X線望遠鏡に搭載する1/3円周の厚み0.22mmのAl基板の非球面レプリカ反射鏡を製作すると共に、組立誤差を排除してこの加工工程の妥当性をX線結像特性の測定から検証するため、全周の小型レプリカ反射鏡を製作する。

4. 研究成果

1) アルミニウム合金に無電解ニッケルを成膜し、これを超精密ダイヤモンド切削と超精密研磨を施すことにより、回転放物面と回転双曲面から成る小型のWolter I型の望遠鏡用非球面金型を形状精度 $\pm 50\text{nm}$ 以下、表面粗さ0.2nm rms以下に仕上げることに成功した。この非球面金型に数nm厚の離型膜を成膜後、Pt/C多層膜スーパーミラーを成膜し、厚さ5mmの基板を接着した後、冷水中で離型し、全周のWolter I型非球面反射鏡を作ることに

成功した。これは、世界最初の快挙である。図2に上記の非球面金型と反射鏡を示す。この反射鏡は将来、放射光施設でその結像性能を測定する予定である。

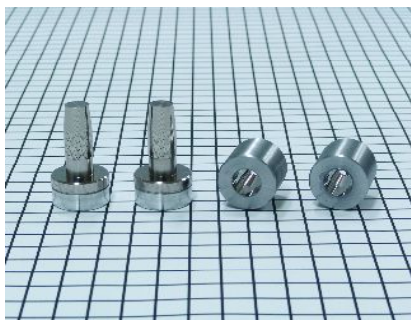


図2 超精密小型非球面金型と離型したPt/C多層膜スーパーミラー反射鏡

2) 超精密大型非球面加工装置の摺動精度測定ならびに機上での非球面金型の超精密形状計測のため、零熱膨張ガラスセラミックス製平面原器を開発した。長さ400mmでの真直度は $\pm 5.5\text{nm}$ である。真直度 $\pm 6.9\text{nm}/400\text{mm}$ の原器を用いて、y軸およびz軸の運動補正を行なった結果、前者では $\pm 30\text{nm P-V}$ (7 nm rms)/400 mm、後者では $\pm 24\text{nm P-V}$ (6 nm rms)/300 mmの真直度であることが判明した。また、直径300mm、ミラー長400mmの円筒ならびに非球面金型の修正加工と機上での形状計測を行なった結果、円筒では $\pm 54\text{nm P-V}$ (19 nm rms)、Wolter I型の非球面では $\pm 92\text{nm P-V}$ (33 nm rms)の形状精度が得られた。

3) 直径300mm、ミラー長210mmの無電解ニッケル製非球面金型の超精密加工を行ない、形状精度を $\pm 150\text{nm}$ 以内、表面粗さを0.3nm rms以下に仕上げることに成功した。図3の左はアルミニウム合金に無電解ニッケルを成膜した金型、中央は超精密ダイヤモンド切削した金型であり、右端が超精密研磨を施したものである。超精密研磨面の表面粗さは図4に示すように0.23nm rmsである。なお、平面については0.11nm rmsが得られている。

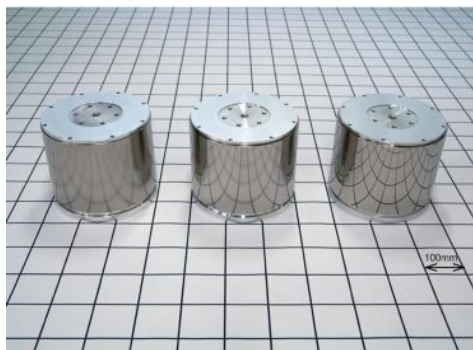


図3 直径300mm、ミラー長210mmの無電解ニッケル製超精密非球面金型(上部10mmが回転双曲面、下部200mmは回転放物面)

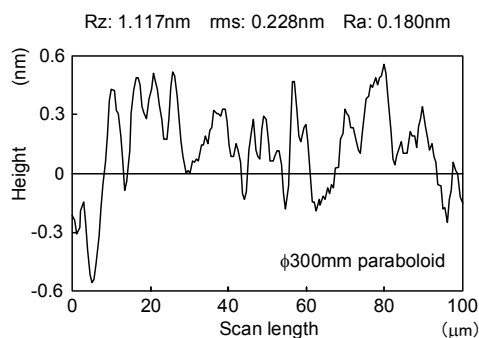


図4 大型非球面金型の表面粗さ

4) 図3の無電解ニッケル超精密非球面金型に離型材としてCを成膜後、Pt/C多層膜スーパーミラーを成膜し、厚み0.22mmのアルミニウム基板を接着し、離型することにより、図5に示す1/3円周でミラー長130mmの非球面反射鏡を製作することに成功した。



図5 硬X線望遠鏡用Pt/C多層膜非球面レプリカスーパーミラー反射鏡

5) 超精密ダイヤモンド切削で形状精度を出した無電解ニッケル超精密非球面金型を機上で研磨するため、図6に示す超精密非球面研磨装置を開発し、超精密大型非球面加工装置に設置した。

6) 図7に示すように、ASTRO-H以降の国際硬X線望遠鏡を指向した焦点距離60m、直径500mmのアルミニウム合金製Wolter I型超精密非球面金型の鏡面加工に成功した。

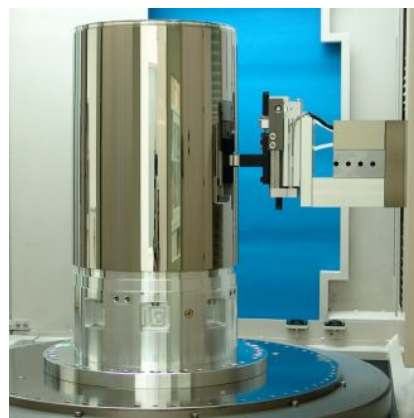


図6 機上に設置した新開発の超精密非球面研磨装置

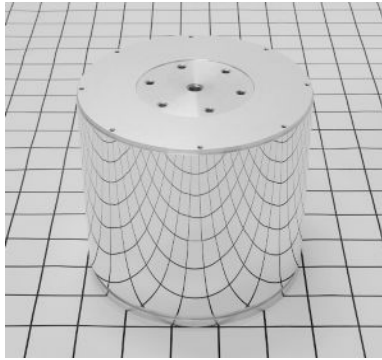


図7 直径500mm、ミラー長400mmの非球面金型

7) NeXTプロジェクトとして研究開発を進めていた結果が、2008年10月1日から正式に発足したASTRO-H衛星プロジェクト(2013年にH-IIAロケットで打上げ予定)に繋がった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

- 1) 難波義治: 研磨加工, 精密工学会誌, **75**, 1 (2009)p.74-75. 【査読有】
- 2) G. Cao and Y. Namba: Straightness Error Compensation for Ultra-Precision Machining Based on a Straightness Gauge, Key Engineering Materials, **381-382** (2008)p.105-108. 【査読有】
- 3) Y. Ogasaka, H. Kunieda, Takuya Miyazawa, Peter Serlemitsos, Y. Namba(12番目14名省略): The NeXT x-ray telescope system: status update, Proc. SPIE, **7011** (2008)p.70110P-1-70110P-8. 【査読なし】
- 4) Y. Namba, T. Shimomura, A. Fushiki, A. Beaucamp, I. Inasaki, H. Kunieda, Y. Ogasaka and K. Yamashita: Ultra-Precision Polishing of Electroless Nickel Molding Dies for Shorter Wavelength Applications, Annals of the CIRP, **57**, 1 (2008)p.337-340. 【査読有】
- 5) K. S. Chon, Y. Namba and K. H. Yoon: Single-point diamond turning of aspheric mirror with inner reflecting surfaces, J. Key Engineering Materials, **364-366** (2008)p.39-42. 【査読有】
- 6) K. S. Chon, Y. Namba, K. W. Kim, S. Kang and K. H. Yoon: Fabrication of soft X-ray microscope mirror using epoxy replication method, Opt. Eng., **47**, 1 (2008) p.013401-1-013401-6. 【査読有】
- 7) Y. Ogasaka, H. Kunieda, J. Tueller, Y. Soong, Y. Namba (23番目18名省略): Thin-

foil multilayer-supermirror hard x-ray telescope for InFOCUS/SUMIT balloon experiments and NeXT satellite program, Proc. SPIE, **6688** (2007)p.668803-1-668803-8. 【査読なし】

8) K. S. Chon, Y. Namba and K. H. Yoon: Figure tolerance of a Wolter type I mirror for the soft X-ray microscope, Appl. Opt., **46**, 14 (2007)p.2663-2669. 【査読有】

9) K. S. Chon, Y. Namba and K. H. Yoon: Wolter type I x-ray focusing mirror using multilayer coatings, Appl. Opt., **45**, 19 (2006) p.4609-4616. 【査読有】

10) K. S. Chon, Y. Namba and K. H. Yoon: Fabrication of Condenser Mirror for a Soft X-ray Microscope, Proc. 8th International Conference on X-ray Microscopy, IPAP Conf. Series, **7**, The Institute of Pure and Applied Physics, Tokyo (2006)p.121-123.

【査読有】

11) Takuya Miyazawa, Ryo Shibata, Yasushi Ogasaka, Yoshihiro Fukaya, Yoshiharu Namba(15番目10名省略): Development and performance of the advanced hard x-ray telescope for the balloon experiment, Proc. SPIE, **6266** (2006)p.62663C-1-62663C-8. 【査読なし】

12) K. S. Chon, Y. Namba and K. H. Yoon: Optimization of a Wolter type I mirror for a soft X-ray microscope, Prec. Eng., **30**, 2 (2006)p.223-230. 【査読有】

[学会発表] (計24件)

1) 難波義治:次世代X線望遠鏡用非球面金型の加工と計測, 超精密加工と超高精度計測の融合シンポジウム, 中部大学名古屋キャンパス, 名古屋 (2009)3-15. (2009年3月6日)

2) Guohui Cao and Yoshiharu Namba: Precision Shape Measurement of Large Aspheric Optics Based on Error Compensation, Proc. the 6th China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining, Hunan University, Changsha, China (2008)p.114-118. (2008年11月24日)

3) 鈴木聖広, 難波義治, 小川大介:テーブルトップ硬X線望遠鏡用非球面反射鏡の超精密加工, 日本機械学会第7回生産加工・工作機械部門講演会, 長良川国際会議場, 岐阜 (2008)p.311-312. (2008年11月22日)

4) 曹国輝, 難波義治:誤差補正による非球面光学素子の超精密形状計測, 日本機械学会第7回生産加工・工作機械部門講演会, 長良川国際会議場, 岐阜 (2008)p.273-274. (2008年11月22日)

5) Yoshiharu Namba: Fabrication

Technology for Next-Generation Hard X-Ray Mirrors Using Ultra-Precision Aspherical Molding Dies, Proc. the 13th International Machine Tool Engineers' Conference, Tokyo Big Sight, Tokyo (2008)p.201. (2008年10月30日)

6) 難波義治: 非球面斜入射反射鏡の製作, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 中部大学, 春日井 (2008)p.75. (2008年9月4日)

7) 曹国輝, 難波義治: 非球面光学素子の形状計測, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 中部大学, 春日井 (2008)p.68. (2008年9月4日)

8) Yasuhiro Okamoto, Yoshiyuki Uno, Zazuli Mohid and Yoshiharu Namba: Influence of Irradiation Method on Laser Forming Characteristics of Plastics, Proc. of International Workshop on Thermal Forming and Welding Distortion, Bremen, Germany (2008)p.385-393. (2008年4月23日)

9) Litao Qi and Yoshiharu Namba: Precision Laser Adjustment Using CW Diode Laser, Proc. of International Workshop on Thermal Forming and Welding Distortion, Bremen, Germany (2008)p.119-131. (2008年4月22日)

10) 小川大介, 難波義治: 硬 X 線顕微鏡用非球面反射鏡の製作技術の開発, 日本機械学会東海支部第57期講演会講演論文集, 名古屋大学, 名古屋 (2008)p.135-136. (2008年3月11日)

11) Yoshiharu Namba: Manufacturing X-ray Optics by Molding Technology, The 3rd International Symposium on X-ray Imaging Science, Wonkwang University, Iksan, Korea (2008)p.143-149. (2008年1月25日)

12) 難波義治: 硬 X 線望遠鏡用非球面金型の製作, 第9回X線結像光学シンポジウム講演予稿集, 中部大学名古屋キャンパス, 名古屋 (2007)p.29-30. (2007年11月3日)

13) 小川大介, 難波義治, Kwon Su Chon and Kwon-Ha Yoon: X 線顕微鏡用無電解ニッケル非球面金型の超精密ダイヤモンド切削, 第9回X線結像光学シンポジウム講演予稿集, 中部大学名古屋キャンパス, 名古屋 (2007)p.113-114. (2007年11月2日)

14) Yoshiharu Namba, Takuji Shimomura, Toshiyuki Shimizu, Hideyo Kunieda, Yasushi Ogasaka, Yuzuru Tawara, Koujun Yamashita: Development of Large Ultra-Precision Diamond Turning Machine for Making Next Generation Hard X-Ray Telescopes, Proc. ASPE 2007 Annual Meeting, Dallas, TX., U. S. A. (2007)p.65-68. (2007年10月17日)

15) Guohui Cao and Yoshiharu Namba: Straightness Error Compensation for Ultra-Precision Machining Based on a Straightness Gauge, Proc. 8th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2007), Sendai, Japan (2007)p.605-608. (2007年9月25日)

16) Yoshiharu Namba: Manufacturing of Replicated Optics for Extremely Short Wavelength Applications, Proc. of the 3rd SPIE International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology (AOMAT07), Chengdu, China (2007). (2007年7月9日)

17) Y. Namba: Ultra-Precision Machining of Electroless Nickel Molding Dies for Aspheric Hard X-Ray Telescope Mirrors, The 2nd Korea-Japan Conference on Nano Biomedical Imaging and X-ray Microscopy, Jeju, Korea (2007). (2007年3月2日)

18) K. S. Chon, Y. Namba and K. H. Yoon: Single-point diamond turning of aspheric mirror with inner reflecting surfaces, Asia Pacific Conference on Optics Manufacture 2007 (APCOM2007), Hong Kong (2007)p.24. (2007年1月11日)

19) Y. Namba and S. Kitagawa: Trends of Optics Manufacturing, Proc. Asia Pacific Conference on Optics Manufacture 2007 (APCOM 2007), Hong Kong (2007)p.4. (2007年1月11日)

20) 難波義治, 下村拓路, 清水敏之: 硬 X 線望遠鏡用非球面反射鏡製作法の提案, 日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会, 生産性国際交流センター, 葉山 (2006)p.251-252. (2006年11月25日)

21) Y. Namba, A. Fushiki, H. Kunieda, Y. Ogasaka, Y. Tawara and K. Yamashita: Manufacturing of Replicated Pt/C Multilayer Mirrors for Hard X-Ray Telescopes, Proc. ASPE 2006 Annual Meeting, Monterey, CA., U. S. A. (2006)p.407-410. (2006年10月17日)

22) Kwon Su Chon, Yoshiharu Namba and Kwon-Ha Yoon: Direct Machining of Inner Reflecting Surfaces for a Soft X-ray Microscope, Proc. ASPE 2006 Annual Meeting, Monterey, CA., U. S. A. (2006)p.399-402. (2006年10月17日)

23) 下村拓路, 難波義治: X線望遠鏡用無電解ニッケル金型の超精密研磨法, 2006年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 宇都宮大学, 宇都宮 (2006)p.799-800. (2006年9月22日)

24) Kwon Su Chon, Yoshiharu Namba and Kwon-Ha Yoon: Fabrication of a Condenser

Mirror for a Soft X-ray Microscope, Proc. 8th Int. Conf. X-ray Microscopy, Himeji, Japan (2006)p. 121-123. (2006年7月26日)

〔図書〕(計 1件)

1) 難波義治: 超精密研削加工, 機械工学便覧デザイン編β3, 加工学・加工機器, 日本機械学会, 東京 (2006)p. β3-243-β3-244.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

〔その他〕

○シンポジウム開催

- 1) 実行委員長: 超精密加工と超高精度計測の融合シンポジウム, 中部大学名古屋キャンパス, 名古屋 (2009). (2009年3月6日)
- 2) Conference Chair, 6th China Japan International Conference on Ultra-Precision Machining, Changsha, China (2008). (2008年11月24日-25日)
- 3) Conference Chair, Advanced Optical Manufacturing Technologies, AOMATT 2008, Chengdu, China (2008). (2008年11月19日-21日)
- 4) 主催: 精密工学会秋季大会学術講演会シンポジウム「実用化を目指したナノレベルでの極限光学素子の加工, 計測, 評価」, 東北大学, 仙台 (2008). (2008年9月18日)
- 5) Conference Chair: The 3rd International Symposium on X-ray Imaging Science, Wonkwang University, Iksan, Korea (2008). (2008年1月25日)
- 6) 実行委員長: 第9回 X線結像光学シンポジウム, 中部大学名古屋キャンパス, 名古屋 (2007). (2007年11月2日-3日)
- 7) Conference Chair: Japan-Korea Optics Manufacturing Symposium, Chubu University, Nagoya (2007). (2007年8月8日)
- 8) 主催: 平成18年度中部大学生産技術開発センター研究発表会, 「次世代硬X線望遠鏡の開発と課題」, 中部大学名古屋キャンパス, 名古屋 (2007). (2007年3月16日)
- 9) Conference Chair: The 2nd Korea-Japan Conference on Nano Biomedical Imaging and X-ray Microscopy, Jeju, Korea (2007). (2007年3月2日)

○展示

- 1) 難波義治: 超精密非球面金型を使用する次世代 X線反射鏡の製作技術開発, 第13回国際工作機械技術者会議論文集, 東京ビッグサイト, 東京 (2008)p. 38. (2008年10月30日~11月4日)
- 2) 難波義治: 超精密非球面金型を用いた

X線反射鏡の製作技術開発, 中部大学フェア—産官学連携・人づくり・ものづくり—, 中部大学, 春日井 (2008). (2008年9月19日)

3) 難波義治: 生産技術開発センター, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会展示会, 中部大学, 春日井 (2008). (2008年9月2-5日)

4) 難波義治: 次世代超精密加工技術, 砥粒加工学会「賛助会員会テクノフェア2008」, 大田区産業プラザ, 東京 (2008). (2008年2月14日~16日)

5) 難波義治: 次世代超精密加工技術, 砥粒加工学会, 大田区産業プラザ, 東京 (2007). (2007年2月16日)

6) 難波義治: X線レプリカ反射鏡の製作技術, JIMTOF2006工作機械関連のニューテクノロジーポスター展, 東京ビッグサイト, 東京 (2006). (2006年11月1日~8日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

難波 義治 (NAMBA YOSHIHARU)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 40029129

(2) 研究分担者

曹 国輝 (CAO GUOHUI)

中部大学・先進計測研究センター・研究員

研究者番号: 80424927

(3) 連携研究者

なし