

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360063

研究課題名（和文） 国際 X 線天文台用多層膜非球面反射鏡の開発研究

研究課題名（英文） Development of Multi-Layered Aspheric Mirrors for International X-Ray Observatory

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（和文）：2015年に打上げる X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載の口径 450 mm、焦点距離 12 m の硬 X 線多層膜望遠鏡 (HXT) の製作とその結像性能評価を Spring-8 で行い 1 台目を完成させると共に、より結像性能の高い ASTRO-H 以降の多層膜非球面レプリカ反射鏡製作を目指し、超精密非球面金型の加工法の開発を行い、50 nm の形状精度で、表面粗さ 0.3 nm rms 以下の金型製作が自動研磨で可能となることを実証した。

研究成果の概要（英文）：Fabrication of a hard X-ray telescope (HXT) with depth graded Pt/C multilayered conical mirrors has been completed, for the next generation X-ray astronomical satellite ASTRO-H to be launched in 2015. Furthermore, ultra-precision finishing of aspheric replication molds for next generation hard X-ray telescopes after the ASTRO-H project has been demonstrated by a fully automated polishing process chain with 50 nm P-V accuracy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2012年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

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：国際 X 線天文台・非球面金型・硬 X 線多層膜・レプリカ反射鏡・宇宙・国際協力

1. 研究開始当初の背景

1999年に NASA が打ち上げた軟 X 線望遠鏡 Chandra および ESA が打ち上げた軟 X 線望遠鏡 XMM-Newton ならびに ISAS/JAXA が 2005 年に打ち上げた軟 X 線望遠鏡 Suzaku が宇宙を飛行し、観測を続けていた。その次の硬 X 線望遠鏡として 2012 年と 2013 年度打上げの NASA の NuSTAR と ISAS/JAXA の ASTRO-H があった。

その後の硬 X 線望遠鏡として NASA, ESA, JAXA が共同で 2020 年に打上げを目指す国

際 X 線天文台 (International X-ray Observatory、略称 IXO) の計画があり、NASA は薄板ガラスを、ESA はシリコンウエハを円錐に曲げて反射鏡基板とする案を提案し、研究を続けていた。しかし、日本からの提案はなかった。軟 X 線望遠鏡は回転放物面と回転双曲面からなる形状精度の高い非球面反射鏡 (Chandra および XMM-Newton) を使用しているが、計画された硬 X 線望遠鏡 (NuSTAR, ASTRO-H, IXO) は総て、非球面を近似した円錐形状であった。そこで、IXO に対し、よ

り結像性能の高い多層膜非球面反射鏡を日本からの提案とするため研究課題を設定した。

2. 研究の目的

研究課題申請の2009年10月の時点では、2013年度に日米が共同で打上げるX線天文衛星ASTRO-Hの開発研究が開発段階に差し掛かっており(実際には、2010年の宇宙開発委員会事前評価により、開発段階への移行が承認された)、これに搭載される硬X線望遠鏡(HXT)にはガラス円筒金型から成形される擬似円錐のPt/C多層膜スーパーミラーが使用され、その観測感度としての角度分解能は1.7分角(HPD)である。このHXTの開発を支援するのが本研究の一つの目的である。

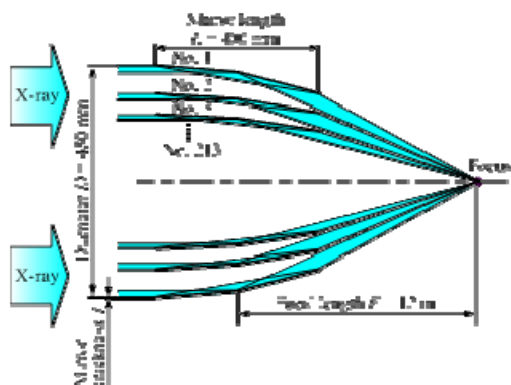


図1 ASTRO-H搭載硬X線望遠鏡(HXT)の原理図

ASTRO-Hの次の硬X線望遠鏡プロジェクトとしては日米欧の3極が共同で2020年頃の実現を目指すIXOがあり、複数の反射鏡の提案がなされ、これから望遠鏡の具体的な設計が行なわれる予定であった。そこで、これまでの日本の研究を発展させ、角度分解能2秒角(HPD)の超精密Pt/C多層膜非球面スーパーミラーを開発し、IXOの最重要反射鏡製作技術としての採択を目指す。これにより、これまでの日本のX線天文学の国際的な優位性を維持するのが当初の目的の一つであった。

3. 研究の方法

当初の計画より2年遅れの2015年に打ち上げが予定されているASTRO-Hには、Pt/C多層膜スーパーミラーを用いた硬X線望遠鏡(HXT)が搭載される。HXTに使用される反射鏡は、本研究で開発を目指す超精密Pt/C多層膜非球面反射鏡と異なり、円錐近似反射鏡であり、図2のように市販のガラス管表面にPt/C多層膜を成膜し、それに厚み0.2mmのアルミニウム箔を接着し、離型するレプリカ法を用いる。

多層膜スーパーミラーとは、単一周期長の

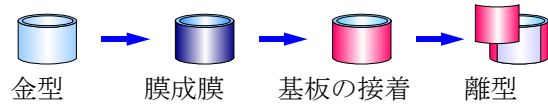


図2 ASTRO-H搭載HXT用反射鏡の製作工程

多層膜によるX線のブラッグ反射を応用したものである。ブラッグ反射は周期長によって決まった波長のX線を反射するが、深さ方向に周期長の異なる多層膜を積層することにより、図3のように広い波長域で比較的高い反射率を実現するものである。図3に置いて、黒実線は単層膜、赤実線は同一周期の多層膜、青実線が多層膜スーパーミラーである。本研究で用いた多層膜は、スパッタ法により重元素(Pt)と軽元素(C)を交互に積層する事によって成膜する。スーパーミラーの成膜には滑らかな物質界面粗さと、緻密な膜厚制御が要求される。

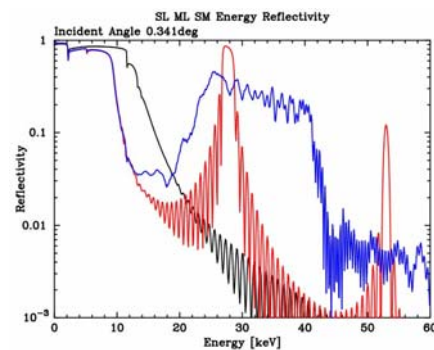


図3 X線反射率と入射エネルギーとの関係

非球面金型の材料としては、無電解ニッケルと合成石英があるが、今回はNASAおよびESAのイタリアのグループと前記IXOに代わる非球面X線望遠鏡を提案するため、合成石英とした。素材をダイヤモンド研削により、円錐形状に加工し、図4に示すZEEKO社製超精密自由曲面研磨ロボットIRP200により、非球面に研磨し、形状計測にはパナソニック社製UA3D-550Hを使用した。



図4 非球面金型研磨に使用した7軸制御の研磨ロボットIRP200

4. 研究成果

(1) 図 2 に示すような工程で ASTRO-H 搭載 HXT 用の Pt/C 多層膜スーパーミラーを製作し、軌道放射光施設 Spring-8 において結像性能測定を行った。初期の頃は、直径が 240 mm を越える反射鏡には仕様を満足しないものがあり、ガラス管の形状測定を厳密に行い、良品のみを金型として使うことにより解決した。図 5 は同心円状に 213 枚の円錐近似の反射鏡が 2 段に組み込まれた HXT1 号機であり、2012 年度に完成させ、JAXA での振動試験も合格した。この望遠鏡は天文衛星搭載品としては日本初の国産硬 X 線望遠鏡であり、図 5 に示すように円周を 3 分割した反射鏡が組み込まれている。現在は 2 号機の製作が行われている。



図 5 完成した ASTRO-H 搭載の HXT1 号機

(2) 上記の HXT1 号機を Spring-8 で有効面積を測定した結果である。実線が理論曲線で、青色の要求値に対し、赤色で示す実測値は要求を十分達成していることが分かる。また、X 線で評価した多層膜の界面粗さは 0.3~0.5 nm rms を達成しており、多層膜の成膜技術は確立できたとと言える。

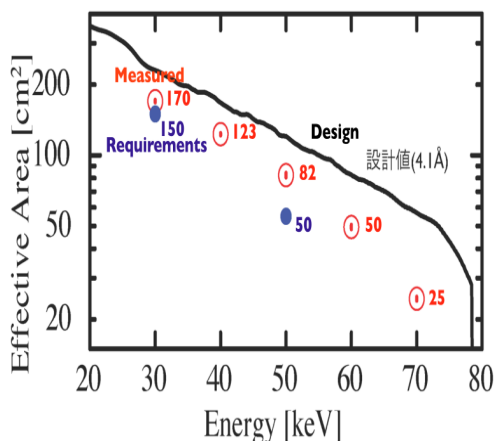


図 6 有効面積と入射エネルギーとの関係

(3) Spring-8 において 30 keV での点光源像を図 7 に示す。点光源が三つ葉のクローバの形をしているが、これは反射鏡が 3 分割して

作成し、組立ているためである。Half Power Diameter はエネルギーに依存するが、1.7~1.9 分角を達成している。

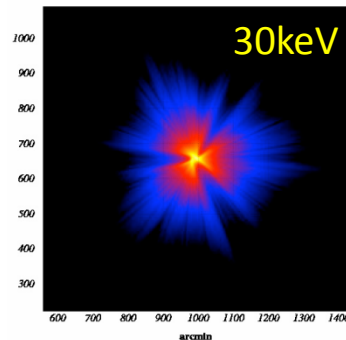


図 7 Spring-8 の 30 keV での点源像

(4) X 線反射鏡の性能に対するガラス管金型の形状誤差の影響を調べるため図 8 の合成石英製円筒金型を製作し、NASA/GSFC で金を成膜し、軟 X 線反射鏡を作成し、結像性能を調べた結果、極めて良好な性能を得ることができ、次世代の X 線望遠鏡には円錐近似の反射鏡であっても高精度な金型を使用すべきであることが判明した。

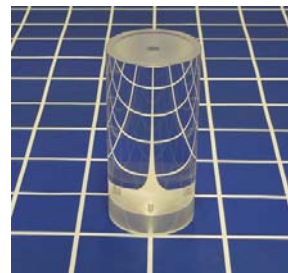


図 7 合成石英製円筒金型

(5) 本研究のために導入した図 4 の研磨装置の形状創成能力を調べるため、形状測定が容易な直径 100 mm の無電解ニッケル製平面金型と 150 mm 角の合成石英製平面金型を研磨し、ZYGO 社のレーザー干渉計 GPI で平面度を測定した結果、前者においては 27.6 nm P-V、4.4 nm rms、後者においては 41.8 nm P-V、6.4 nm rms が得られた。このことから、正確な非球面形状計測ができれば、形状精度 50 nm P-V での研磨が可能であることを実証した。

(6) NASA/GSFC が NuSTAR のために開発した Slumped mirror 用の合成石英製円筒金型ならびに名古屋大学で製造している HXT 用のガラス管金型に後続する合成石英製非球面金型をダイヤモンド研削ならびに IRP200 による研磨と UA3P-550H による形状計測の繰り返しにより、図 8 のような合成石英製回転放物面金型を製作した。この設計上の焦点距離は NASA/GSFC が計画している次世代の X 線望遠鏡の焦点距離と同じ 8.4 m である。回転双曲面金型についても現在、加工中である。

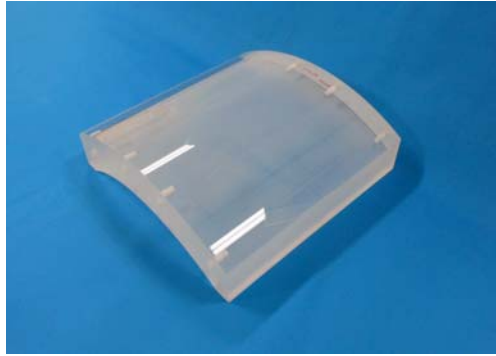


図8 NASA/GSFC用の回転放物面金型

図9は研削後の形状誤差 $36.7 \mu\text{m}$ P-V が修正研磨後に $0.6 \mu\text{m}$ P-V になったことを表している。この修正研磨を繰り返すことにより、測定範囲 200mm 角で形状精度 300nm P-V を達成し、現在、 50nm P-V を目指して研磨を続行している。日本側で目標値達成を確認後に NASA/GSFC に金型を送り、先方で形状測定をした後、液晶ガラスを金型の上に乗せた状態で加熱・変形させて放物面基板を製作し、X線反射膜を成膜後、X線反射特性を測定することになっている。

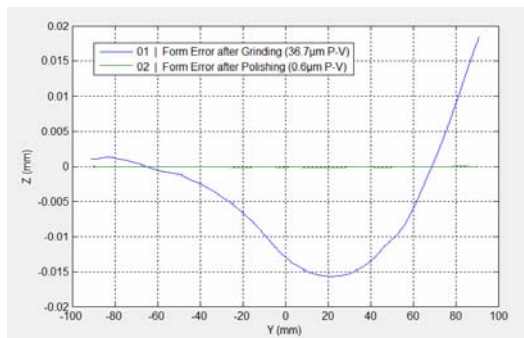


図9 回転放物面金型の母線方向の形状誤差

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 29 件)

- ① A. Beaucamp, Y. Namba: Process Chain for Automated Manufacture of Future Aspheric Hard X-Ray Telescopes, *Annals of the CIRP*, **62**, 1 (2013). 査読有
- ② Y. Yao, H. Kunieda and Z. Wang: The theoretical analysis of the hard X-ray block structure supermirror, *Optics Express*, **21**, 7 (2013)pp.8638-8651. 査読有
- ③ A. Beaucamp, Y. Namba and R. R. Freeman: Automated finishing of diamond turned dies for hard x-ray and EUV optics replication, *Proc. SPIE*, **8502** (2012)pp. 850214-1-850214-8. 査読無
- ④ A. Beaucamp, Y. Namba and R.

Freeman: Dynamic Multiphase Modeling and Optimization of Fluid Jet Polishing Process, *Annals of the CIRP*, **61**, 1 (2012)pp.315-318. 査読有

⑤ 難波義治: 宇宙探査における砥粒加工技術, *砥粒加工学会誌*, **56**, 7 (2012)pp.439-442. 査読有

⑥ Y. Maeda, K. Ichihara, Y. Shionome, T. Sato, T. Hayashi, M. Ishida, H. Kan, Y. Namba, H. Takahashi, T. Miyazawa, K. Ishibashi, M. Sakai, S. Sugita, Y. Haba, H. Matsumoto and H. Mori, and the ASTRO-H HXT team: A Thermal Stress Tests of the Depth-Graded Pt/C Reflectors Used in the ASTRO-H Hard X-ray Telescope (HXT), *Proc. SPIE*, **8443** (2012)pp.844359-1-844359-6. 査読無

⑦ H. Awaki, H. Kunieda, A. Furuzawa, Y. Haba, T. Hayashi, R. Iizuka, K. Ishibashi, M. Ishida, M. Itoh, T. Kosaka, Y. Maeda, H. Matsumoto, T. Miyazawa, H. Mori, H. Nagano, Y. Namba, Y. Ogasaka, K. Ogi, T. Okajima, S. Sugata, Y. Suzuki, K. Tamura, Y. Tawara, K. Uesugi, K. Yamashita and S. Yamauchi: Current status of ASTRO-H Hard X-ray Telescopes (HXTs), *Proc. SPIE*, **8443**, (2012)pp.844324-1-844324-8. 査読無

⑧ T. Miyazawa, N. Ishida, H. Kato, T. Demoto, T. Watanabe, Y. Kuroda, F. Shimasaki, S. Takizawa, Y. Haba, K. Tamura, K. Ishibashi, H. Matsumoto, H. Kunieda, H. Mori, T. Hayashi, K. Tomikawa, Y. Maeda, M. Ishida, D. Kurihara, H. Awaki, K. Uesugi, Y. Suzuki: Recent results of hard x-ray characterization of ASTRO-H/HXT at SPring-8, *Proc. SPIE*, **8443** (2012)pp.84435C-1-84435C-7. 査読無

⑨ S. Sugita, A. Furuzawa, K. Ishibashi, K. Tamura, T. Okajima, Y. Maeda, T. Sato, K. Ichikawa, K. Tomikawa, R. Iizuka, T. Awaya, K. Okada: Measurement of reflectivity of x-ray mirror for soft x-ray telescope onboard ASTRO-H, *Proc. SPIE*, **8443** (2012)pp.844358-1-844358-6. 査読無

⑩ M. Ozaki, H. Odaka, T. Sato, T. Yasuda, M. Asai, K. Hiragi, T. Mizuno, H. Mori, Y. Terada and A. Furuzawa: A Monte Carlo simulation framework to study ASTRO-H in-orbit radiation and detector responses based on Geant4 toolkit, *Proc. SPIE*, **8443** (2012)pp.844356-1-844356-7. 査読無

⑪ T. Yoshimura, T. Kosaka, H. Awaki, K. Ogi, M. Ishida, Y. Maeda, A. Furuzawa, T. Miyazawa, N. Yamane, H. Kato and H. Kunieda: Vibration properties of mirror

foils for hard x-ray telescope onboard satellite, Proc. SPIE, **8443** (2012)pp.84435A-1-84435A-7. 査読無

⑫ T. Takahashi, K. Mitsuda, R. Kelley, H. Aarts, F. Aharonian, H. Akamatsu, F. Akimoto, S. Allen, N. Anabuki, L. Angellini, K. Arnaud, M. Asai, M. Audard, A. Furuzawa (42 番目/59 人): The ASTRO-H X-ray Observatory, Proc. SPIE, **8443** (2012)p.84431Z1-84431Z22. 査読無

⑬ A. Beaucamp, R. Freeman, A. Matsumoto and Y. Namba: Fluid jet and bonnet polishing of optical moulds for applications from visible to x-ray, Proc. SPIE, **8126** (2011)p.81260U-1-81260U-8. 査読無

⑭ A. Beaucamp, Y. Namba, I. Inasaki, H. Combrinck and R. Freeman: Finishing of Optical Moulds to $\lambda/20$ by Automated Corrective Polishing, Annals of the CIRP, **60**, 1 (2011)pp.375-378. 査読有

⑮ D. Spiga, L. Raimondi, A. Furuzawa, S. Basso, R. Binda, G. Borghi, V. Cotroneo, G. Grisoni, H. Kunieda, F. Marioni, H. Matsumoto, H. Mori, T. Miyazawa, B. Negri, A. Orlandi, G. Pareschi, B. Salmaso, G. Tagliaferri, K. Uesugi, G. Valsecchi, D. Vernani: Angular resolution measurements at SPring-8 of a hard x-ray optics for the New Hard X-ray Mission, Proc. SPIE, **8147** (2011)pp.81470A-1-81470A-12. 査読無

⑯ T. Miyazawa, A. Furuzawa, Y. Kanou, K. Matsuda, M. Sakai, N. Yamane, H. Kato, Y. Miyata, K. Sakanobe, Y. Haba, K. Ishibashi, H. Matsumoto, Y. Tawara, H. Kunieda, N. Ishida, A. Suzuki, H. Mori, K. Tamura, Y. Maeda, M. Ishida, H. Awaki, T. Okajima, K. Uesugi, Y. Suzuki: The current status of reflector production and hard x-ray characterization for ASTRO-H/HXT, Proc. SPIE, **8147** (2011)pp.814703-1-814703-8. 査読無

⑰ Y. Miyata, K. Tamura, H. Kunieda: New multilayer design for ASTRO-H/hard x-ray telescope and mission beyond, Proc. SPIE, **8147** (2011)pp.81470V-1-81470V-6. 査読無

⑱ Y. Tawara, S. Sugita, A. Furuzawa, K. Tachibana, H. Awaki, M. Ishida, Y. Maeda and M. Ogawa: Development of ultra-thin thermal shield for ASTRO-H x-ray telescopes, Proc. SPIE, **8147** (2011)pp.814704-1-814704-7. 査読無

⑲ A. Shinozaki and Y. Namba: Diamond Tool Wear in the Ultra-Precision Cutting of Large Electroless Nickel Coated Molding Dies, Int. J. of Automation Technology, **5**, 3 (2011)pp.283-288. 査読有

⑳ 難波義治, 國枝秀世, 高橋忠幸: 次世代硬X線望遠鏡と精密, 精密工学会誌, **77**, 4 (2011)pp.349-353. 査読有

㉑ 難波義治: 斜入射X線反射鏡とその超精密加工技術, 砥粒加工学会誌, **54**, 11 (2010)pp.632-635. 査読有

㉒ K. S. Chon and Y. Namba: Single-point diamond turning of electroless nickel for flat X-ray mirror, Journal of Mechanical Science and Technology, **24**, 8 (2010)pp.1603-1609. 査読有

㉓ H. Kunieda, H. Awaki, A. Furuzawa, Y. Haba, R. Iizuka, K. Ishibashi, M. Ishida, M. Itoh, T. Kosaka, Y. Maeda, H. Matsumoto, T. Miyazawa, H. Mori, Y. Namba, Y. Ogasaka, K. Ogi, T. Okajima, Y. Suzuki, K. Tamura, Y. Tawara, K. Uesugi, K. Yamashita, S. Yamauchi: Hard x-ray telescope to be onboard ASTRO-H, Proc. SPIE **7732** (2010)pp.773214-1-773214-12. 査読無

㉔ A. Furuzawa, T. Miyazawa, Y. Kanou, K. Matsuda, M. Sakai, Y. Ishida, S. Hara, K. Yamane, N. Yamane, Y. Miyata, K. Sakanobe, H. Kato, Y. Yajima, T. Watanabe, Y. Haba, Y. Tawara, H. Kunieda, K. Yamashita, N. Ishida, A. Suzaki, N. Ohtsu, M. Ishida, Y. Maeda, H. Mori, K. Tamura, H. Awaki, Y. Namba, T. Okajima: The current status of the reflector production for ASTRO-H/HXT, Proc. SPIE, **7732** (2010)pp.77323F-1-77323F-8. 査読無

㉕ M. Ozaki, M. Ohno, Y. Terada, S. Watanabe, T. Mizuno, T. Takahashi, M. Kokubun, M. Tsujimoto, H. Odaka, T. Sato, T. Yasuda, M. Asai, K. Hiragi, H. Mori, A. Furuzawa (13 番目/19 人): The Monte Carlo simulation framework of the ASTRO-H Observatory, Proc. SPIE, **7732** (2010)pp.773239-1-773239-7. 査読無

㉖ H. Mori, Y. Haba, T. Miyazawa, A. Furuzawa, Y. Tawara, H. Kunieda, S. Yamauchi, H. Awaki, M. Ishida, Y. Maeda, A. bamba, R. Iizuka, T. Okajima and R. Mushotzky: Current status of the pre-collimator development for the ASTRO-H x-ray telescopes, Proc. SPIE, **7732** (2010)pp.77323E-1-77323E-10. 査読無

㉗ T. Kosaka, T. Igarashi, H. Awaki, K. Ogi, K. Itoh, Y. Maeda, M. Ichida, A. Furuzawa, T. Miyazawa and H. Kunieda: Vibration properties of hard x-ray telescope on board satellite, Proc. SPIE, **7732** (2010)pp.77323G-1-77323G-9. 査読無

㉘ T. Miyazawa, A. Furuzawa, Y. Kanou, K. Matsuda, M. Sakai, N. Yamane, H.

Kunieda(14 番目/27 人): Current status of hard x-ray characterization of ASTRO-H HXT at Spring-8, Proc. SPIE, **7732** (2010)pp.7732I-1-7732I-8. 査読無

㊟ T. Takahashi, K. Mitsuda, R. Kelley, F. Aharonian, F. Akimoto, S. Allen, N. Anabuki, L. Angelini, K. Amaud, H. Awaki, A. Bamba, A. Furuzawa(33 番目/69 人): The ASTRO-H Mission, Proc. SPIE, **7732** (2010)pp.7732Z-1-7732Z-18. 査読無

[学会発表] (計 35 件)

① A. Beaucamp and Y. Namba: Corrective Polishing Process for X-Ray Telescopes after ASTRO-H Projects, 2013 年度精密工学会春季大会シンポジウム, 東京工業大学, 東京 (2013). (2013 年 3 月 14 日)

② A. Beaucamp, A. Matsumoto and Y. Namba: Finishing of Electroless Nickel Plated Dies for Hard X-Ray Mirror Replication, Proc. ASPE 2012 Annual Meeting, San Diego, CA., U.S.A. (2012). (2012 年 10 月 23 日)

③ K. S. Chon and Y. Namba: Deformation Error of Epoxy-Replicated X-Ray Mirror, Proc. ASPE 2012 Annual Meeting, San Diego, CA., U.S.A. (2012). (2012 年 10 月 23 日)

④ Y. Namba: Ultra-Precision Machining and Development of X-Ray Telescopes, Proc. 8th China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining (8th CJUPM), Zhejiang Hotel, Hanzhou, China (2011). [基調講演] (2011 年 11 月 21 日)

⑤ Y. Namba: Fabrication of Pt/C Multilayer-Coated Mirrors for Hard X-Ray Telescopes, The 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, Dalian, China (2010). [基調講演] (2010 年 4 月 26 日)

[図書] (計 1 件)

① L. Yang, Y. Namba, D. D. Walker and S. Li, edited: Advanced Optical Manufacturing Technologies, Proc. SPIE, **7655**, The International Society for Optics and Photonics, (2010)総頁数 868.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

○シンポジウム等開催

① Chair of “International Symposium on

Application of Precision Engineering to Support Next Generation Astronomical Telescopes” in the 2013 JSPE Spring Annual Meeting, Tokyo Institute of Technology, Tokyo. (2013 年 3 月 14 日)

② Chair of the 5th International Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, AOMATT 2010, Dalian, China (2010 年 4 月 26 日～29 日)

○展示

① ブカン アントニー, 松本明大, 難波義治: X線反射鏡用無電解ニッケル金型の自動研磨法の開発, 第 26 回日本国際工作機械見本市, 東京ビッグサイト, 東京 (2012). (2012 年 11 月 1 日～6 日)

② 難波義治: 次世代の X 線望遠鏡を目指して～超精密加工技術～, 中部大学テクノモール in 中濃, シティホテル美濃加茂, 美濃加茂 (2012). (2012 年 7 月 12 日)

③ 難波義治: 次世代硬 X 線望遠鏡用反射鏡製作技術開発, 砥粒加工学会 ABTEC2011 企業展示会, 中部大学, 春日井 (2011). (2011 年 9 月 7 日～9 月 9 日)

④ 難波義治: 超精密加工技術, テクノプラザおかやものづくりフェア 2011, ララオカヤ特設会場, 岡谷 (2011). (2011 年 2 月 18 日～2 月 19 日)

⑤ 難波義治: 次世代硬 X 線望遠鏡用反射鏡の製作技術開発, 第 14 回国際工作機械技術者会議ポスターセッション, 東京ビッグサイト, 東京 (2010). (2010 年 10 月 28 日～11 月 2 日)

⑥ 難波義治: 宇宙 X 線望遠鏡の開発, 中部大学フェアー—産官学連携・人づくり・ものづくり・ゆめづくり—, 中部大学, 春日井 (2010). (2010 年 9 月 18 日)

○ホームページ

http://www3.chubu.ac.jp/faculty/namba_yoshiharu/

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

古澤 彰浩 (FURUZAWA AKIHIRO)

名古屋大学・教養教育院・講師

研究者番号: 20362212

(3) 連携研究者

國枝 秀世 (KUNIEDA HIDEYO)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 00126856