

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03890

研究課題名（和文）重力波イベント電磁波対応天体の早期観測を目指した全天X線モニタ用光学系の開発

研究課題名（英文）Development of X-ray optics for all-sky monitor to observe electromagnetic candidates of gravitational events

研究代表者

杉田 聡司 (Sugita, Satoshi)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：30573563

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：重力波対応電磁波天体からの早期X線放射の観測を目指して、X線全天モニタの検出感度を向上することが可能になる広視野X線光学系の基礎開発を行った。

X線反射鏡をレプリカ法とシリコンウエハの二つの方法で製作した。Geant 4による光学シミュレーションを用いて二回反射によるX線集光となる光学系のデザインを検討し、ガンマ線バーストに対して明るさが10の-10乗 $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$ 程度の検出感度を持つ設計を行うことに成功した。この設計をもとに一部テストモデルを作成し、宇宙科学研究所の30m X線ビームラインでX線撮像実験を行い、X線集光像を取得することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のX線全天モニタに一次元方向のみの広視野光学系を搭載することで検出感度を上げるという設計の検討を始めて行った。

広視野X線光学系を搭載することで従来の全天モニタより一桁程度感度を上昇できることをGeant 4を用いたシミュレーションで示すことができた。広視野X線光学系を構成するX線反射鏡の基礎的な製作工程を確立した。

研究成果の概要（英文）：We developed a wide-field X-ray optics that improve the detection sensitivity of X-ray all-sky monitors. It aims to observe X-ray emissions in early phase from electromagnetic candidates of gravitational-wave events.

We fabricated X-ray mirrors by two methods, a replica method and a silicon wafer method. The design of a double-reflection X-ray focusing optics was investigated using X-ray optical simulations with Geant 4. Based on the simulations, we succeeded in a design with a detection sensitivity of about 10<sup>-10</sup>th power  $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$  brightness in gamma-ray bursts. We made a partial test model of the X-ray optics and performed X-ray imaging experiments at the 30 m X-ray beamline of ISAS, and X-ray focused images of the test model were successfully obtained.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：重力波源電磁波対応天体 X線光学 高エネルギー宇宙物理学 ガンマ線バースト

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2017年8月17日にアメリカ及びヨーロッパの重力波望遠鏡 Advanced LIGO と Virgo によって検出された重力波源 GW170817 では初めて電磁波対応天体が発見され、世界中で多波長の追観測が行われた。GW170817 の重力波信号は中性子星同士の合体によって発生した特徴を示しており、重力波信号とほぼ同時にガンマ線が観測された。これは中性子星合体時に発生すると理論的に示唆されている短いガンマ線バースト (GRB170817A) と考えられ、短いガンマ線バーストの発生天体が中性子星連星であることの直接的証拠となる初の観測であった。

(2) 一方で、GRB170817A の残光を含めてX線の明るさはこれまで観測されてきた短いガンマ線バーストに比べ非常に暗く、従来のガンマ線バーストとは大きく異なる観測結果であった。ガンマ線バーストの放射源は、中性子星が合体しブラックホールが誕生する際回転軸上に発生する相対論的ジェットと考えられているが、GW170817 に付随した GRB170817A が特異である原因について様々なモデルが提唱されているが今回の観測だけでは決定することはできていない。

### 2. 研究の目的

(1) 国際宇宙ステーション搭載日本の全天 X 線監視装置 MAXI/GSC は 92 分で全天の 85% を走査するため重力波源の早期 X 線放射観測に力を発揮するが、MAXI の感度では GRB170817A は検出できなかったと考えられ、より高い検出感度の装置が必要である

(2) X線モニターに光学系を組み込むことでX線を集光することによって、検出器が小さくても受光量を増やし、全天走査モニタの検出感度を上げる方法を試みる。本研究の目的は X 線全天モニタ用の X 線光学系の基礎開発を行い、重力波イベント早期 X 線放射を検出可能な X 線全天モニタの設計を確立することである。全天モニタの走査方向にのみ一次元集光系を加えることによって受光量を増やしても 1 周回分の視野は落ちない。

### 3. 研究の方法

(1) 平板 X 線反射鏡の開発工程の確立: X 線は屈折率が 1 より小さいためレンズ光学系では集光できず、非常に小さい角度 (~1 度) の全反射によって集光が可能となる。フォイルレプリカ法を用いて X 線反射鏡を作成し、検出器 1 枚分をカバーするハウジングに反射鏡を配置したテストモデルを製作する。テストモデルの性能評価を宇宙科学研究所の X 線ビームラインで行う。

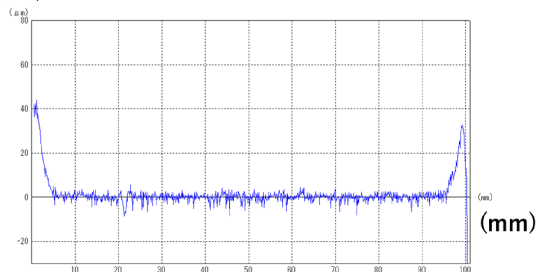
(2) 科学的要求を達成する性能の光学系の設計: 要求する性能を満たす性能(集光面積・結像性能・視野など)を持つ光学系を設計するために光学シミュレーション(レイトレーシング)を行う。設計の自由度や将来的に検出器も含めた全体のシミュレータに取り組むことも想定して Geant4 に全反射の物理プロセスを追加したシミュレータを用いる。MAXI/GSC で行なっていた観測シミュレーションを基に机上環境を取り込んだ検出感度の評価を行う。

### 4. 研究成果

(1) 平滑なフロートガラス上に DC マグネトロンスパッタ装置で 100 nm 厚程度のタングステン薄膜を成膜し、X 線反射面を製作した。宇宙科学研究所の X 線ビームラインを用いて角度反射率を測定し、測定データを X 線反射率の nevet-croce モデルとモデルフィッティングすることで、表面粗さ 1 nm 以下の反射面を実現できている結果が得られた。低エネルギー X 線に用いる反射面であれば十分な平滑面が達成できた。厚さ 130 mm のアルミ平板にフォイルレプリカ法を用いてタングステン鏡面を転写する。このレプリカ法の工程にスピコートを導入した。スピコートとは平滑な基材を高速回転させる事により遠心力で薄膜を構成する装置であり、本研究ではアルミ基板に反射鏡面を転写するための接着剤を均質に塗布するために使用した。スピ

コーターを用いることにより X 線反射鏡の表面の歪みを数  $\mu\text{m}$  に抑えることに成功した。

( $\mu\text{m}$ ) 2次元断面測定結果



3次元形状測定結果

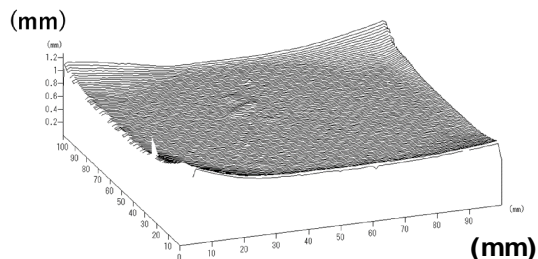


図 1 X 線反射鏡の表面形状測定結果

(2) Geant 4 による光学シミュレーションを用いて二回反射による X 線集光となる反射鏡のデザインを検討した。実際の天体観測における性能を評価できるようにするため、天体観測時の主なバックグラウンド源である宇宙 X 線背景放射をシミュレーションに取り込んだ。バックグラウンドを宇宙 X 線背景放射とした時、重力波イベントの電磁波対応天体の X 線放射がどの程度の明るさであれば検出可能であるかのシミュレーションを行った。その結果現在運用されている全天モニタ MAXI の検出感度に対して一桁低い  $10^{-10} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$  程度の検出感度を持つ設計を行うことに成功した。

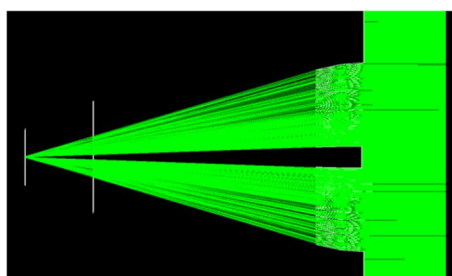


図 2 Geant4 による X 線反射のシミュレーション例

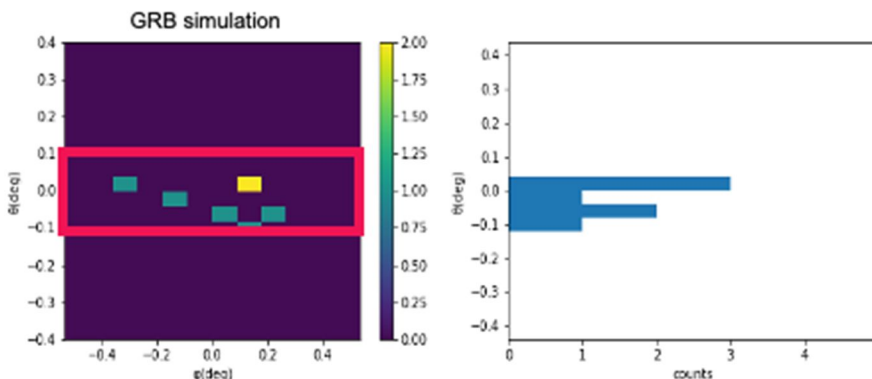
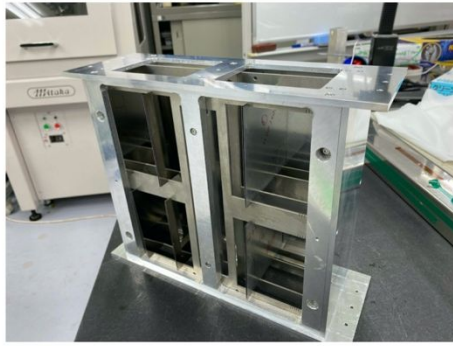
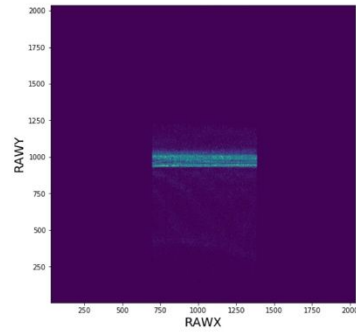


図 3 GRB 放射のシミュレーション結果。7 photon が検出された。

(3) 光学系の設計に関して、(2) で進めた Geant 4 による光学シミュレーションを元にし、二回反射によって 1500 mm の焦点距離で集光するデザインのテスト筐体を製作した。レプリカ反射鏡とシリコン反射鏡もテスト筐体に組み込み、宇宙科学研究所の 30 m X 線ビームラインで X 線撮像実験を行い、X 線集光像を取得することに成功した。



X線集光系テストモデル



X線2回反射像

図 4 X線ビームラインで測定したテスト筐体とX線集光像

(4) X線反射鏡に関してレプリカ法による製作の他にシリコンウエハを応用したシリコン基板によるX線反射鏡の開発を行った。シリコンウエハは厚さ $\sim 100\text{mm}$ のシリコン結晶を $\sim \text{nm}$ の粗さまで平滑に研磨したものであるため、低エネルギーのX線を反射することができる。シリコンウエハをダイシングカットすることでX線反射鏡として成形した。それぞれのX線反射率を測定した結果、 $1\sim 10\text{ nm}$ の反射率モデルの値と一致し設計値通りの反射率を持ったX線反射鏡の製作に成功した。

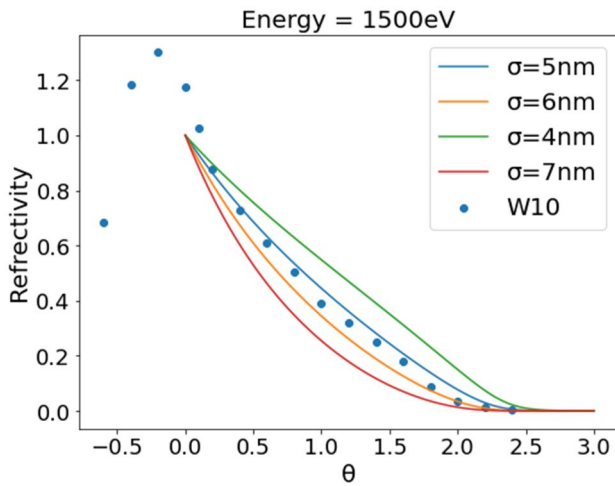


図 5 シリコンウエハ反射鏡の反射率測定結果(青点が測定データで色線が各粗さのモデル)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 杉田聡司
2. 発表標題 広視野X線集光系の光跡シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清田力
2. 発表標題 広視野 X 線集光系のための X 線ミラーの開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉田聡司
2. 発表標題 全天X線モニタ用光学系の開発
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原健也
2. 発表標題 Development of X-Ray Optical System for All-Sky Monitor
3. 学会等名 Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------