

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20525

研究課題名（和文）高精度微細加工によるX線光学系による時間領域天文学の革新

研究課題名（英文）Innovation in time-domain astronomy by X-ray optics with high-precision microfabrication

研究代表者

米徳 大輔 (Yonetoku, Daisuke)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：40345608

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,600,000円

研究成果の概要（和文）：従来のロブスターアイ光学系(LEO)の製造上の問題であった素性変形による結像性能の悪化を回避することを目指して、3次元レーザー微細加工および磁気流体研磨により、ガラス平板にLEOを構築した。従来のLEOと同等の10分角程度のX線結像性能を得ることができたが、それ以上の高精度化へは、レーザー加工による表面粗さを1桁以上小さくする必要があることが課題となる。複数のLEOを配列して広視野化する技術は大きく進展した。コリメータ光を用いることでLEOの実効的な焦点距離を測定し、数10ミクロンの機械調整を行うことでLEO単体の結像性能と遜色ない性能で広視野化できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙物理学・天文学では、「広い視野を持った観測装置による広域探査・モニター」と「狭い視野で高感度な大型望遠鏡による詳細観測」が協調することで宇宙の観測可能領域を拡大し、真理を追求している。とりわけ、高エネルギー宇宙物理学における広視野観測では、全天の1/10以上にもおよぶ広域をモニターすることで突発天体の発見に貢献してきた。本研究により、最先端の観測を実現するために必要な約1.5桁の観測感度の改善が見込める基盤技術が得られ、同時にさらなる課題を確認した。この技術は、トンネル・橋・建造物などの非破壊検査を圧倒的に高効率化することにも寄与でき、産業界においてもインパクトのある開発である。

研究成果の概要（英文）：Aiming to avoid deterioration of imaging performance due to elementary deformation, which has been a manufacturing problem of conventional lobster-eye optics (LEO), we constructed an LEO on a glass flat plate by 3D laser micro-machining and magnetohydrodynamic polishing. We were able to obtain X-ray imaging performance of about 10 arcmin squared, which is equivalent to that of conventional LEOs. However, to achieve higher precision, the surface roughness by laser processing needs to be reduced by one order of magnitude or more. The technology to array multiple LEOs to achieve a wide field of view has made great progress. Using collimator light, the effective focal length of LEOs was measured, and making a mechanical adjustment of several 10 microns, we successfully constructed wide-field imaging optics which can be achieved with performance comparable to one of single LEO.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：X線光学系 微細加工 ガンマ線バースト X線天文学

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙物理学・天文学では、「広い視野を持った観測装置による広域探査・モニター」と、「狭い視野で高感度な大型望遠鏡による詳細観測」が協調することで、宇宙の観測可能領域を拡大し、真理を追求している。とりわけ、高エネルギー宇宙物理学における広視野観測では、全天の 1/10 以上にもおよぶ広域をモニターすることで突発天体の発見に貢献してきた。

【1】約 200 メガパーセク(6 億光年)離れた重力波源からの微弱な X 線放射

【2】赤方偏移  $z > 10$  (132 億光年以上) という極めて遠方のガンマ線バースト

【3】超高エネルギーニュートリノを生成する活動的な銀河や相対論的ジェット

【4】銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールが星を吸い込む際の潮汐破壊現象

などが挙げられる。これらの最先端の観測を実現するためには、現状と比較して約 2 桁程度の感度向上を実現しなくてはならない。

### 2. 研究の目的

高感度な広視野観測を実現するためには結像光学系を利用するしか方法は無い。1990 年代から「ロブスターアイ光学系 (以下、LEO)」と呼ばれる X 線反射光学系が開発されてきた。本研究は LEO を高精度化することで、高エネルギー突発天体現象の観測感度を約 2 桁も改善し、時間領域天文学に革命を起こすことを目指すものである。そのために必要となる超微細加工技術を駆使した X 線結像光学素子の製造技術・量産体制を確立することが目的である。

### 3. 研究の方法

現在の LEO 製造方法は、直方体の細いガラスチューブを束ねて一体化した上で薄く切り出し、力学的に変形させて目標とする形状に近づけるという手法である。しかし、この製造法には以下の問題がある。

・チューブを束ねる際にアラインメント不整合が発生する

・最後の力学的負荷により必ず光学特性に歪みが生じ、形状の曲率を十分に制御できない

これらの工程が、性能向上を妨げ、低い歩留まりの要因となっている

#### (1) 平板基板材料に対して 3 次元レーザー加工で穴をあける

基板の中心から外周に向けて徐々に角度が付くように穴を開けることで、球殻状の配列と同等の穴を形成する。この段階では内壁の鏡面精度は数 10 ナノメートル程度である。

#### (2) 磁性流体研磨により穴の内部の平滑化を実現する

磁性流体と研磨剤が混合した溶液中に穴をあけた基板を浸し、制御された交流磁場の下で、内壁を研磨する。ここで 1 ナノメートル程度の鏡面精度を実現する。

この手法では、問題となる「アラインメント不整合」と「曲げ加工」という工程がそもそも存在しないため、理論的に得られる性能に近づく上、歩留まり率の向上・量産化を実現できるようになる。

また、LEO のアラインメントを調整して配置することで広視野観測を実現するための手法も検討課題となる。以上のような LEO の製造およびアラインメント技術の確立を行う。

### 4. 研究成果

#### ロブスターアイ光学系の製造

3 次元レーザー微細加工および磁性流体研磨により、ガラス平板に LEO を構築した。研究期間内で様々な設計パラメータを模索した結果として、1 次元の溝切削を施した物を 2 枚作成し、直交させて貼り合わせる方法を選択した。また、長い 1 次元切削に対する構造の脆弱性を緩和するために、定期的にリブ構造を設けることで対応させた。

以上の設計で製造した LEO の写真を図 1 に示す。製造時の加工パラメータを探求したが、最初のレーザー切削による表面粗さが大きいことが顕在化したため、高温アニーリングを 1 ヶ月程度の長期間にわたって実施することで初期の粗さを低減し、その上で磁性流体研磨を行う方針を選択した。これにより、従来の LEO と同等の 10 分角程度の X 線結像性能を得ることができた。

しかしながら、それ以上の高精度化を見込むためには、レーザー加工の表面粗さを 1 桁以上も小さくしなくてはならないという課題が明確になった。現在の加工技術では困難であると判断している。アニーリング時間が長いことも量産化を行う際の問題となる。

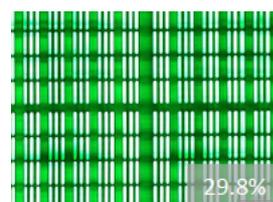
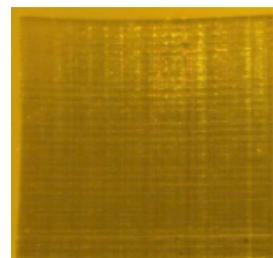


図 1.(上)製造した LEO、  
(下) 光学顕微鏡写真

## ロブスターアイ光学系のアラインメント技術

LEO を配列してひとつの焦点を結ばせるための光学調整（アラインメント調整）も重要な課題となる。本研究では以下のような順序で調整する方法を確立した。

### (1) コリメータ光を用いて LEO の焦点距離を測定する

図 2(左)のように、コリメータ光が当たる領域を 2 つに区切るためのスリットを配置し、片方に光を透過させた状態で LEO とイメージセンサ間の距離を変化させながら像を取得した。図 2(右)のように、焦点距離が変化するにつれ LEO による集光像の位置が移動する。双方のスリットの情報が一致するまでの距離が焦点距離となる。X 線で測定した焦点距離と誤差 0.5mm 程度で一致することを確認している

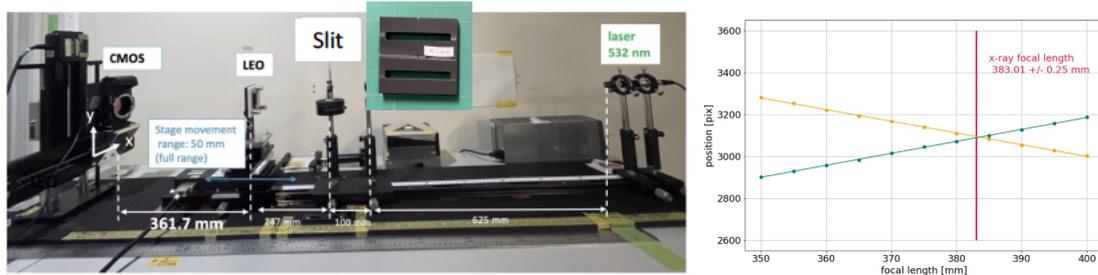


図 2. (左) コリメータ光を利用した焦点距離測定装置、(右) 測定結果

### (2) 光学フレームへの配置と調整

チタン合金製のフレームに 2 枚の LEO を配置する際に、(1) で測定した焦点距離に応じて数 10 ミクロンのシムを挟むことで LEO の傾き角を調整した。調整量は焦点距離に応じて算出した値で粗調整を行い、その後の計測により微調整量を算出する。

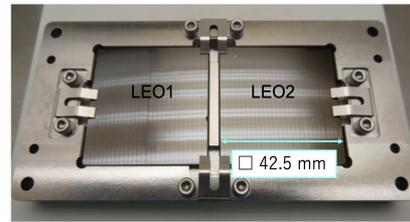


図 3. LEO を 2 枚配置した状態

### (3) X 線による測定

X 線ビームラインを用いて調整前後の結像性能を測定した。図 4 (上) に示すように、調整する前は 2 枚の LEO の結像が分離している状態であるが、(2) に示した調整を行うことで図 4 (下) に示すような同一結像が得られるようになる。

結像性能は十字に伸びる部分の幅（太さ）で評価できる。LEO 単体の測定で得られる結像性能 (10 分角) に対して、2 枚のアラインメント調整後の結像性能は 10.2 分角となり、遜色の無い結果が得られた。この手法で約 2 分角の精度で両 LEO の結像位置を調整できたこととなる。

以上のような流れで、2 枚の LEO を調整する技術を獲得できたことから、今後の大規模なアレイ化の道筋が得られた。

本研究では 3 次元レーザー加工と磁性流体研磨により、従来の LEO と同等の性能の製品を作ることができたが、現時点でのレーザー加工の技術的限界により、さらなる高精度化までは実現できなかった。一方で、アラインメント調整を十分な精度で実施する方法を確立できたことから、将来の突発天体现象を観測する時間領域天文学に資する成果を得ることができた。

また、LEO を用いた広視野観測装置は、非破壊検査に応用できるため、天文学のみならず広い応用範囲がある技術と言える。

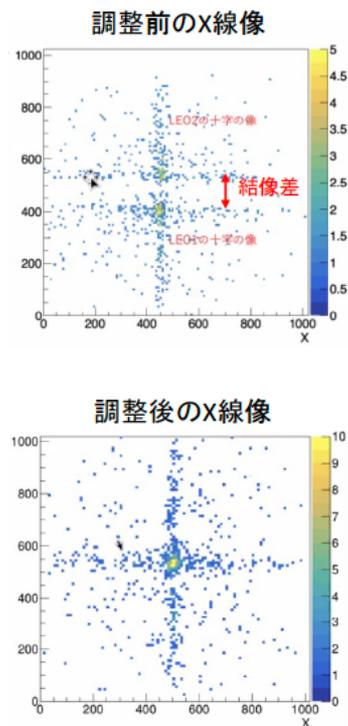


図 4. 調整前後の結像性能

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yonetoku Daisuke, Mihara Tatehiro, Doi Akihiro, Sakamoto Takanori, Tsumura Kohji, Ioka Kunihito, et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 High-z gamma-ray bursts unraveling the dark ages and extreme space-time mission: HiZ-GUNDAM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE, Volume 11444, id. 114442Z 13 pp. (2020).	6. 最初と最後の頁 114442Z 13 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560603	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jin Li, Sakamoto Takanori, Serino Motoko, Yonetoku Daisuke, Sawano Tatsuya, Mitsuish Ikuyuki, Mihara Tatehiro	4. 巻 11444
2. 論文標題 X-ray performance and simulation study of lobster eye optics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE, Volume 11444, id. 114447C 12 pp. (2020).	6. 最初と最後の頁 114447C 12 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560121	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ogino Naoki, Arimoto Makoto, Sawano Tatsuya, Yonetoku Daisuke, Goto Hatsune, Hyeonsoon Wang, Hiraga Junko, Sakamoto Takanori, Sei Kensyo, Yatsu Yoichi	4. 巻 11444
2. 論文標題 Development of a fast readout system of a CMOS image sensor for the time-domain astronomy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE, Volume 11444, id. 114445L 7 pp. (2020).	6. 最初と最後の頁 114445L 7 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560605	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sawano Tatsuya, Yonetoku Daisuke, Arimoto Makoto, Li Jin, Mihara Tatehiro, Ogino Naoki, Sakamoto Takanori, Serino Motoko	4. 巻 11444
2. 論文標題 A detection algorithm for faint sources based on 1-d projection for a lobster-eye x-ray imaging system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE, Volume 11444, id. 114445K 7 pp. (2020).	6. 最初と最後の頁 114445K 7 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560604	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 後藤初音
2. 発表標題 X線ビームラインによる Lobster Eye Optics の性能評価
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 後藤初音
2. 発表標題 軟X線ビームラインによる Lobster Eye Optics の結像性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会（2022年）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理連絡会研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 光赤外線天文学連絡会将来計画シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 HiZ-GUNDAMとGREX-PLUSのシナジー
3. 学会等名 GREX-PLUSサイエンス会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Yonetoku
2. 発表標題 High-z Gamma-ray Burst Unraveling the Dark Age and Extreme Space Time Mission: HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 THESEUS Conference 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米徳大輔
2. 発表標題 High-z Gamma-ray Burst Unraveling the Dark Age and Extreme Space Time Mission: HiZ-GUNDAM の進捗
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Yonetoku
2. 発表標題 High-z Gamma-ray Burst Unraveling the Dark Age and Extreme Space Time Mission: HiZ-GUNDAM
3. 学会等名 SPIE Conference (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------