

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01915

研究課題名(和文) 超高エネルギー宇宙線観測用宇宙望遠鏡K-EUSOの補正レンズの製作

研究課題名(英文) Development of a corrector lens of the K-EUSO space telescope for UHECR observation

研究代表者

滝澤 慶之 (Takizawa, Yoshiyuki)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・専任研究員

研究者番号：70312246

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：超高エネルギー宇宙線の起源と加速機構は未だ謎で物理学において解明すべきテーマの一つである。地上観測(Telescope Array, Auger)では、起源天体の特定には至っていない。統計不足の主な理由である。日本は、ロシアが計画中の宇宙線観測の宇宙ミッションに、補正レンズの導入を提案した。Augerの約4倍の露出量で全天観測が可能となる。本研究の開始時(2019年4月)、その製作を予定していたが、2019年6月に、ROSCOSMOSから概念設計結果が出され、宇宙飛行士の船外組立てを考慮した設計を要望された。本研究では、ロシアチームと共同で条件を満たす光学系設計とそのレンズの製作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高エネルギー宇宙線の起源と加速機構のため、地上観測が進められているが、未だ統計不足で解明には至っていない。この解決方法として、広い面積を監視する「広角望遠鏡による宇宙からの観測」がある。日本チームは、EUSO計画で日本が担当した大型レンズの設計・製造技術と国際JEM-EUSOコラボレーションで開発した焦点面検出器ユニットの導入で、観測性能を向上させることを提案し、ロシアと日本のJEM-EUSOチームを核としたK-EUSO (KLYPVE-EUSO)ミッションが立ち上がった。K-EUSOは、Augerの年間露出量の4倍に達し、複数の起源天体の同定が期待でき「荷電粒子天文学」を創始を行う。

研究成果の概要(英文)：The origin and nature of Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECRs, $> 6 \times 10^{19}$ eV) is one of mysteries of physics to be solved. Two grand observatories (Telescope Array and Auger) are observing UHECRs. However, two observatories have not found an origin of UHECRs due to low statistics. Japanese team proposed to use a corrector lens for a Russian UHECRs mission to the EUSO Russian team. With this change, this mission is able to observe all sky with 4 times larger annual exposure than Auger. At the beginning of this research (April 2019), the main task was corrector lens manufacturing. However, in June 2019, ROSCOSMOS reported a result of a conceptual design analysis of this mission. ROSCOSMOS required to re-design the telescope structure that Astronaut can easily assemble by their extravehicular activity. In this research, we and the Russian team designed an optical system that satisfies the ROSCOSMOS requirement and we manufacture two lenses for the new optics.

研究分野：高エネルギー宇宙線

キーワード：超高エネルギー宇宙線 宇宙望遠鏡 大型プラスチックレンズ フレネルレンズ 大型レンズ製造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超高エネルギー宇宙線 ($> 6 \times 10^{19}$ eV) の起源と加速機構は、未だ謎であり物理学において解明すべき大きなテーマの一つである。このような高いエネルギーの荷電粒子では、銀河中の磁場によるローレンツ力での偏向は小さく、その起源の特定が可能となり「粒子による天文学」が開始できる。超高エネルギー宇宙線による粒子天文学は、Multi-messenger Astrophysics を構成する重要なプロブの1つとなる。地上での観測(北半球の Telescope Array (TA)、南半球の Auger)で、超高エネルギー宇宙線が宇宙背景放射と相互作用するために生じるエネルギースペクトルの折れ曲がり(GZK カットオフ)が観測されている。このため、超高エネルギー宇宙線による粒子天文学では、100Mpc の距離の限定された範囲を観測すると考えられる。2007年、南天観測の Auger は、 5.7×10^{19} eV 以上で、近傍の活動銀河核と宇宙線到来方向の相関を報告したが、観測するにつれそれは弱まっている。2014年、北天観測の TA は、 5.7×10^{19} eV 以上で半径 20 度の範囲からの宇宙線の超過(ホットスポット)を報告し、以後もその存在が確認されているが、起源天体の特定までには至っていない。この様に、起源の特定が困難な主原因は、超高エネルギー宇宙線のフラックスの少なさ (~ 1 粒子 / km² / 100 年、 $> 6 \times 10^{19}$ eV) にあり、現状の地上観測ではまだ統計不足となっているためである。さらに巨大な観測装置が必要であるが、地上の装置では難しく、またそのような計画も現在のところ立案されていない。

2. 研究の目的

本研究の最終的なゴールは、未だ謎となっている超高エネルギー宇宙線の起源と加速機構の解明である。その手段は、宇宙から広角望遠鏡を用いて既存の地上の観測装置(北半球の Telescope Array、南半球の Auger)を超える観測性能を実現することである。日本は、ロシアが計画中の宇宙線観測ミッション(KLYPVE)に、補正レンズを導入することを提案した(以後、K-EUSO と呼称)。当初の年間露出量は、Auger の 0.5 倍であったが、補正レンズにより Auger の約 4 倍となる世界最大の年間露出量で、全天球観測が可能となる。本研究を開始する時点(2019年4月)で、K-EUSO は、2019年5月頃、ロシア(ROSCOSMOS)にて概念設計が完了し、その後、詳細設計・製造と進み、2022年初頭に打上げる計画で、2019年度から直ちに補正レンズ製造を開始する必要がある。本研究で補正レンズの製作を分担する予定であった。その後、2019年6月に、ROSCOSMOS からの概念設計の結果が報告され、条件付きで次のステップに進む許可を得た。条件とは、宇宙飛行士による船外での望遠鏡の組み立てを考慮した望遠鏡の設計にすることである。本研究では、この結果を受けロシアの光学設計チームと共同でこの条件を満たす光学系の設計とそのレンズの製作を行った。

3. 研究の方法

本研究では2つのテーマを実施した。テーマ1では、前章で述べた ROSCOSMOS から提示された条件を満たす光学系の設計を行う。ROSCOSMOS から具体的な数値条件は示されなかったため、日露の光学チームは、次のように光学パーツの設置精度を定義した。光軸に対して、位置精度 0.5mm 以下で、設置角度 1 度以下である。光学設計は、ZEMAX を用いて行った。その後、その光学系デザインに対して、K-EUSO 用に開発した光線追跡シミュレーションを用いてレンズの製造による光量ロスの評価と観測性能の評価を行い、製造精度要求値(表面粗さ)を決定する。表面粗さは、レンズ表面で光の散乱によるロスを作る。

テーマ2では、レンズの製造(大型旋盤による形状加工と表面研磨処理)を行うが、テーマ1で求めた製造精度要求値を満たすレンズ基板の保持方法を検討し実施する。大型旋盤による加工時に、メートルサイズのレンズ基板は 60RPM で回転され、ダイヤモンドバイトで表面を加工して光学面を製作する。この際、レンズ基板は回転運動による遠心力で形状変形がおこる。これを考慮したレンズ治具を設計する。遠心力による形状変形と治具の設計は、有限要素法による構造解析を行って決定した。その際、治具へのレンズ基板固定に使うネジ穴は、レンズフレームでも使用する設計としたため、打ち上げ時のレンズ基盤の固有振動数解析も行った。レンズ加工時には、表面を目視及びレーザー光の透過光量の確認で状態を確認した。レンズ加工後は、酸化アルミナ(1 μ m 粒径)を用いて手研磨を行い旋盤加工特有の同心円状の切削痕を減少させ光学表面の質向上を行った。

4. 研究成果

(1) テーマ 1 光学設計とレンズ製造精度の決定

ROSCOSMOS から具体的な数値条件は示されなかったため、日露の光学チームは、次のように光学パーツの設置精度を定義した。光軸に対して、位置精度 0.5mm 以下で、設置角度 1 度以下である。この条件を満たす光学系を、ZEMAX を用いて探索した結果、2 枚の湾曲両面フレネルレンズを用いた従来の JEM-EUSO 光学系が良いことがわかった。このため、当初の設計（補正レンズ + 反射鏡）の光学系から、2 枚の湾曲両面フレネルレンズによる光学系への変更を行うことと

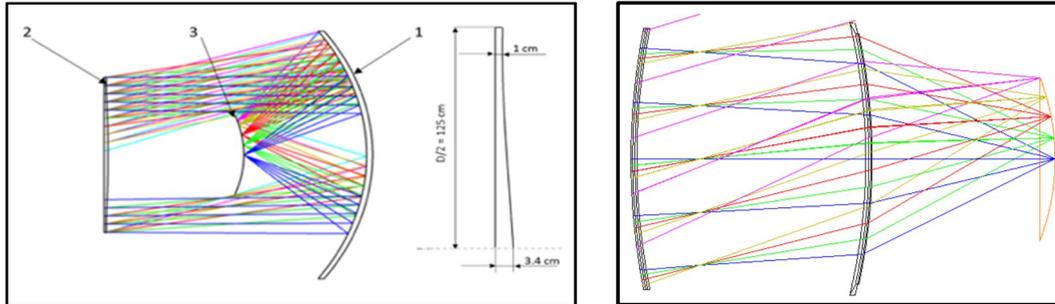


図 1 K-EUSO 光学系の変更。左図：当初の設計（補正レンズ + 反射鏡）、右図：新たに設計した湾曲両面フレネルレンズによる光学系。

した（ROSCOSMOS は、この設計変更は了承した）。当初の設計では、大きな反射鏡と使う。反射鏡のセグメント化による光学パーツの増加とその設置精度の厳しさが問題であった。要求設置精度が格段に緩いレンズのみの光学系への変更となった。K-EUSO 望遠鏡は、ソユーズによって国際宇宙ステーションに輸送される。ソユーズへの格納は、1 ユニットあたり、1200mm × 700mm × 350mm のサイズに収める必要がある。1 枚の湾曲フレネルレンズは、図 2 のように分割されて格納ユニット化する。

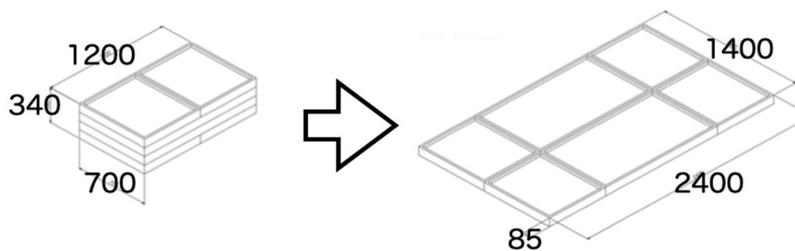


図 2 湾曲フレネルレンズの格納。左図：格納時の形状、右図：展開時のレンズ。

この光学系での観測性能（年間露出量）を図 3 に示す。図 3 の赤い線が湾曲レンズ 2 枚組による性能を示している。宇宙線エネルギー 5×10^{19} eV 以上で、Auger と TA × 4 を合わせた露出量を上回り観測性能要求値を満たしている。この観測性能を満たすためには、K-EUSO 用に開発し

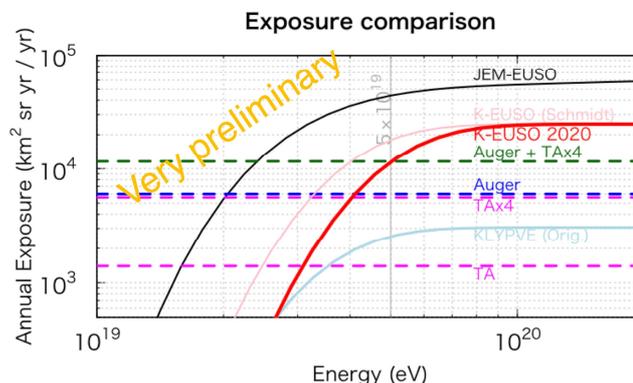


図 3 年間露出量の比較。薄いピンクの線が当初の光学系、赤が湾曲レンズ 2 枚

た光線追跡シミュレーションを用いて、レンズの表面粗さは 25nm RMS より小さいことが必要であることがわかった。25nm RMS の場合、表面 1 面あたりの散乱による光量ロス は 5% である^[1]。

(2) テーマ2 レンズ製造

テーマ1で行った光学系設計で、各レンズは、曲率5500mmの湾曲形状で、2400mm × 1400mmのサイズとなった。レンズは図2に示した通り、2枚の大型セグメントと4枚の小型セグメントに分割される。まず構造解析によりレンズ固定ネジ穴位置の決定（固有振動数の評価）をした。その後、レンズ加工時このネジ穴位置で固定した場合の遠心力による形状変形を評価して治具の設計を行い、実際の加工を行った。

構造解析によりレンズ固定ネジ穴位置の決定（固有振動数の評価）

FreeCADソフトを用いて、図4のようにネジ穴位置を決定してレンズフレームに対しての固有振動数を計算した。満たすべき1次固有振動数は、ROSCOSMOSからは提示されていないため暫定値として25Hzとした。大型セグメントは、1次固有振動数が低くなる傾向があるためこれについて解析を行ったその結果、56Hzとなり25Hzをより高い周波数を持つことがわかった。図4のように最低6か所でレンズを固定すれば良いことがわかった。レンズ化加工時のネジ穴は、この6か所を使用し、さらにネジ穴を追加してレンズ加工時の表面の振動を抑えることとした。

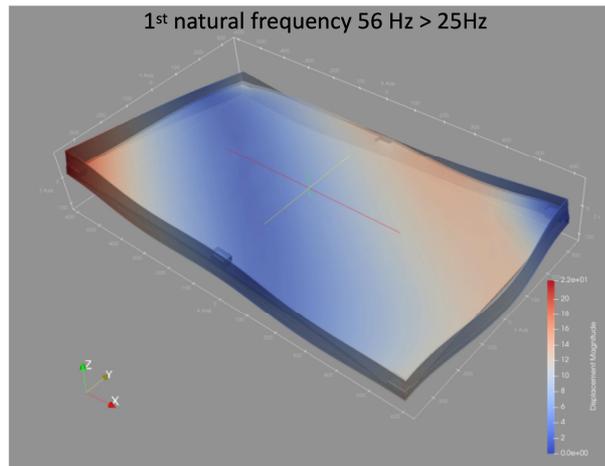


図4 大型セグメントの1次固有振動数の構造解析結果

加工時の遠心力による形状変形を評価

FreeCADソフトを用いて、図5のように治具と等間隔に配置して固定し、重力と遠心力(60rpm)での変形を計算した。計算結果から、主に重力が主要因となっているが、回転中心からの距離に従って遠心力の効果が増加していることがわかる。この結果から、重力による歪みを取るためにはレンズ背面の全面で保持する必要がある。これにはコストが高いため図5のような間隔の治具板で支えることとした。この際の歪みの最大値は、大型セグメントで560nm、小型セグメントで590nmと1μmを下回り、光学性能上、問題ないレベルとなる。

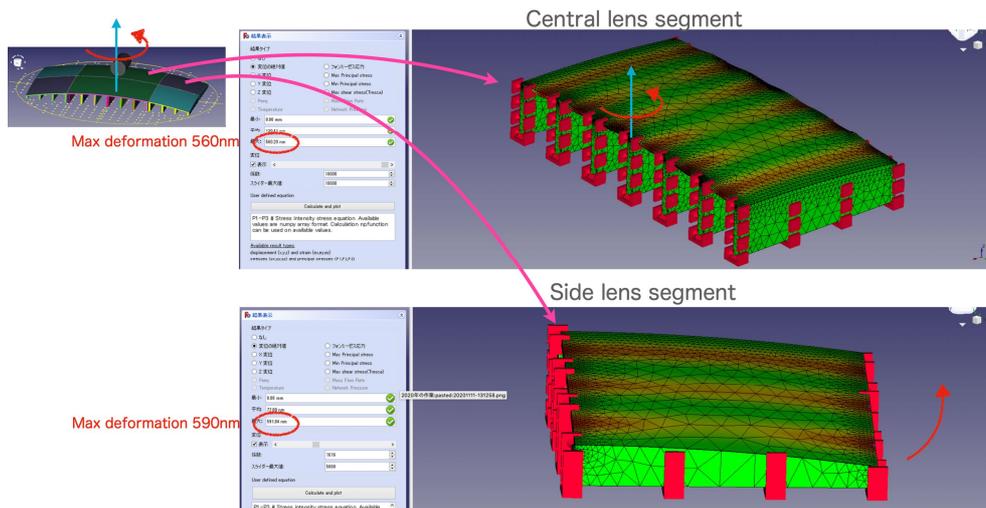


図5 加工時の60rpmでの遠心力による形状変形。上図：大型セグメントの形状変化、下図：小型セグメントの形状変化

レンズの製作

2019年末ごろから始まったコロナ禍により、レンズの治具製作、レンズ部材の加工に影響を大きくうけた。レンズ製作は2021年度の3月までを要した。まず、大型のレンズ部材である紫外線透過アクリル（PMMA000、三菱マテリアル製）を図6（上図）の型で湾曲させる作業をおこなった（図6下図）。その後、湾曲基板に固定用のネジ穴を加工した。図7に大型旋盤にレンズを設置した様子を示す。レンズ加工は、先端径の大きいダイヤモンドバイトで、正しい曲率半径5500mmになるように成形後、先端径0.05mmのダイヤモンドバイトに変更してフレネル形状（溝深さ1mm）を加工して、フロントレンズ（図8上図）とリアレンズ（図8下図）の両方を

作製し、酸化アルミナ（1 μ m 粒径）を用いて手研磨を光軸中心付近から進めている。コロナ禍によるレンズ加工が 2021 年度の 3 月までかかったため、研究期間中に研磨作業を完了することはできなかった。この研磨作業は、旋盤加工特有の同心円状の切削痕を減少させ光学表面の質向上を行う作業である。

製作したレンズの透過率測定

コロナ禍によりレンズの製造が遅れたため、レンズ全面の研磨作業が行えなかった。そのため、研磨のしやすい中央付近に 405nm のレーザー光を透過させその強度比から透過率を求める簡易評価を行った結果、フロントレンズ、リアレンズそれぞれ 80%前後の結果を得た。これは十分に研磨を行えば、観測性能を満たす 82%以上に達することができると思積もっている。レンズ全面で 82%以上を得るように、2022 年度も引き続き研磨作業を行う。

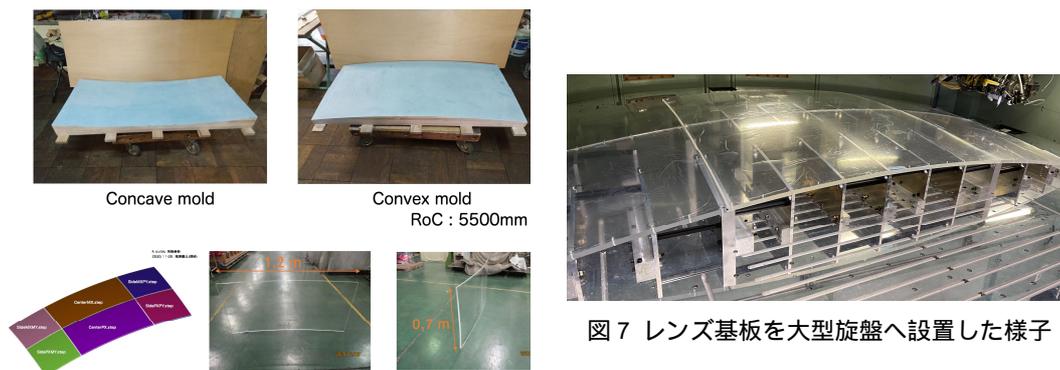


図 6 湾曲基板の製作

図 7 レンズ基板を大型旋盤へ設置した様子

Front lens manufacturing

2021 & 2022



Rear lens manufacturing

2022



5. 最後に

2022 年 2 月に起こったロシアによるウクライナ侵攻により、本研究で製作した K-EUSO のレンズの取り扱いが不明瞭になっている。日本 JEM-EUSO チームおよび国際 JEM-EUSO チームは、この戦争の宇宙科学プロジェクトへの影響について情報収集と分析を行なっている。チームでは、宇宙科学プロジェクトに関して日本政府としての判断があればそれに従うことを確認している。

<引用文献>

[1] Report on the Phase A Study2007-2008 for JEM-EUSO

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Klimov, P. Battisti, M. Belov, A. Bertaina, M. Bianciotto, M. Blin-Bondil, S. Casolino, M. Ebisuzaki, T. Fenu, F. Fuglesang, C. Marszal, W. Neronov, A. Parizot, E. Picozza, P. Plebaniak, Z. Prevot, G. Przybylak, M. Sakaki, N. Sharakin, S. Shinozaki, K. Szabelski, J. Takizawa, Y. Trofimov, D. Yashin, I. Zotov, M	4. 巻 8, 88
2. 論文標題 Status of the K-EUSO Orbital Detector of Ultra-High Energy Cosmic Rays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe8020088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 F. Fenu, S. Sharakin, M. Zotov, N. Sakaki, Y. Takizawa, M. Bianciotto, M.E. Bertaina, M. Casolino, P. Klimov on behalf of the JEM-EUSO Collaboration	4. 巻 395
2. 論文標題 Expected performance of the K-EUSO space-based observatory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.395.0409	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 滝澤慶之
2. 発表標題 JEM-EUSO(177) JEM-EUSO関連ミッションの概要報告
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝澤慶之
2. 発表標題 JEM-EUSO(178) JEM-EUSO関連ミッションの概要報告
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会（2020年）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝澤慶之
2. 発表標題 JEM-EUSO(180) JEM-EUSO関連ミッションの概要報告
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝澤慶之
2. 発表標題 JEM-EUSO(181) JEM-EUSO関連ミッションの概要報告
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 滝澤慶之
2. 発表標題 JEM-EUSO(183) JEM-EUSO関連ミッションの概要報告
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 滝澤慶之
2. 発表標題 JEM-EUSO(184) JEM-EUSO関連ミッションの概要報告
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

〔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
研究 分担 者	榎 直人 (Sakaki Naoto) (90342790)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・協力研究員 (82401)	

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			
ロシア連邦	モスクワ大学			
イタリア	トリノ大学			