

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340081

研究課題名(和文) 超高エネルギー宇宙線の上空から観測のための近紫外線撮像望遠鏡の開発研究

研究課題名(英文) The study and development of the near-UV imaging balloon telescope for observing high energy cosmic rays

研究代表者

CASOLINO MARCO (Casolino, Marco)

独立行政法人理化学研究所・EUSOチーム・チームリーダー

研究者番号：10598163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円、(間接経費) 4,620,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終目的は、高エネルギー宇宙線が大気中で起こす空気シャワーからの微かな近紫外線発光を、次世代型の広視野望遠鏡を用いて宇宙から撮像観測し、高エネルギー宇宙線の起源を探る事である。本研究では、この目的のために、光学系と光検出モジュールを製作し、要素技術の醸成を行った。これらの開発物を、CNES (French Space Agency)によって実施される気球観測実験に提供し、望遠鏡へ組み込まれた。CNESに於いて、他の気球実験グループとの日程調整の結果、平成26年8月19日にカナダで行われるとの決定がなされた。気球観測望遠鏡の構築は、フランスのToulouseにて実施され、完了している。

研究成果の概要(英文)：Our final goal is to study the origin of extreme high energy cosmic ray by observing UV fluorescence light from air showers which are produced by extreme high energy cosmic ray in the Earth's atmosphere. We have developed three Fresnel lenses and photo sensor modules. These products are used on a balloon to observe the air showers from above (altitude about 40km). The balloon experiment is sponsored and carried forth by CNES (French Space Agency), with the first flight being scheduled on August 19th 2014 from Timmins base, Canada. The whole balloon system has been successfully integrated in Toulouse.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線 極限エネルギー宇宙線 気球実験 プラスチックフレネルレンズ

1. 研究開始当初の背景

私たちの最終目的は、高エネルギー宇宙線が大気中で起こす空気シャワーからの微かな近紫外線発光を次世代型の広視野望遠鏡で宇宙から撮像観測し、その起源を探る事である。これまでに、プラスチックフレネルレンズの製作技術の獲得や高速・高感度の撮像検出器の要素技術の開発を行って来た。これらを統合し望遠鏡システムを構築・運用する技術獲得が重要なステップと考え、本提案に至った。

2. 研究の目的

本研究では、高エネルギー宇宙線の空気シャワー観測のため、光学系と撮像検出モジュール(Photo detector module: PDM)を製作し、この二つを統合して望遠鏡を構築する。これを地上設置や気球へ搭載して、その機器特性を調べると共に、空気シャワーからの微かな近紫外線発光の観測を行い、宇宙様実機を製作する為の技術醸成を行う。本研究で製作したレンズ及び PDM は、フランス宇宙機関 CNES で計画している気球実験の望遠鏡に組み込み、空気シャワー観測の飛揚実験を行う予定である。

3. 研究の方法

本研究では、紫外線透過アクリル(三菱レイヨン製 PMMA-000)のフレネルレンズを製作し、光学系を構築する。また、光速で移動する空気シャワーからの微かな近紫外線発光を高速で撮像検出するモジュール(Photo detector module: PDM)を製作する。光学系に用いるレンズは、本研究により、設計・製作を行う。PDM は、本研究を構成するメンバーが参加している国際チーム JEM-EUSO の各国で、各構成要素を分担開発し統合して1つのモジュールを製作する。その構成要素は、紫外線フィルター、64ch 光電子増倍管、ASIC 回路、FPGA 回路、CPU 回路、高圧供給回路等である。本研究での担当は、紫外線フィルターと光電子増倍管からなるフォトセンサー部を製作し、供給する事である。

4. 研究成果

光学系の設計・製作、PDM の製作、フランス宇宙機関 CNES の気球実験の準備状況について順に報告する。本研究で担当したレンズ及びフォトセンサー部の設計・製作を行い、フランスへ供給を完了した。本研究の開始当初、最初の飛揚実験は 2013 年 8 月頃を予定していたが、CNES により、他の気球実験らとのスケジュール調整が行われ、2014 年 8 月に変更されたため、待機している。

光学系の設計と製作

本研究で、光学系の設計と製作を行った。製作したレンズは、本研究で準備した簡易測定装置により評価後、フランスへ発送され、現地で性能の確認後望遠鏡に組み込まれた。

光学系設計

国際チーム JEM-EUSO による検討の結果、気球高度 40km 程度から、1018 電子ボルトの宇宙線の空気シャワー観測の行う場合、レンズの口径として 1m 以上が、そして、その宇宙線の頻度から、視野は、 $\pm 6^\circ$  以上で、RMS スポットサイズは、64ch 光電子増倍管の画素である 2.88mm 角であることが要求された。さらに、紫外線透過アクリル(三菱レイヨン製 PMMA-000)のサイズに関する調達性も考慮して光学系の設計を行った<sup>1)</sup>。その結果、1m 角の PMMA-000 板の口径 1.2m の範囲をレンズとして使用し、3 種のレンズで構成する光学系となった。要求値と設計結果を表 1 に、デザインを図 1 に示す。光学系は、1) フロントレンズ、2) ミドルレンズ、3) リアレンズで構成される。フロントレンズ及びリアレンズは、片面にそれぞれ違ったフレネルレンズ構造が施され、反対面は平面になっている。ミドルレンズは、その片面に回折構造が施され、観測波長帯(330-400nm)での色収差を低減する。この光学系デザインでは、それぞれのレンズが別々の温度を持ち、屈折率が変化する。本設計では、上空での温度をそれぞれ、 $-40^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C}$  と仮定している。私たちが開発・保有している光線追跡シミュレーションに設計値を入力し得たスポットダイアグラムを図 2 に示す。

表 1 設計要求値と設計値

	Requirements	Design result
Optical system	3 lenses sys.	3 lenses sys.
Focal length	-	1620.717mm
FOV for a PDM	$> \pm 6^\circ$	$\pm 6^\circ$
RMS spot size	$<$ pixel size	1.6 mm @ $0^\circ$
Entrance pupil	$> 0.785 \text{ m}^2$	$0.95 \text{ m}^2$
Base shape of lens	Flat type	Flat type
Lens material	PMMA-000	PMMA-000
Lens thickness	$< 10 \text{ mm}$	8mm
F5 curvature	2505 mm	2505 mm

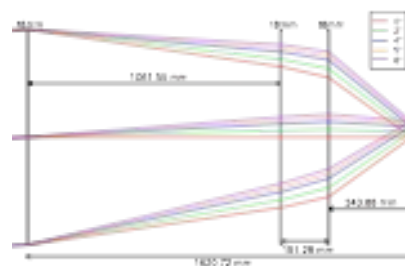


図 1 設計した光学系

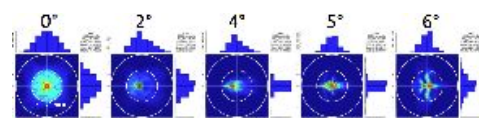


図 2 光線追跡シミュレーションで得た視野角に対するスポットダイアグラム 内側の白円は半径 1.4mm、外側の白円は半径 2.8mm である。

### 光学系製作

光学系を構成する次の3枚のレンズ、1) フロントレンズ、2) ミドルレンズ、3) リアレンズの製作を行った。レンズの大きさは、1m角、厚み8mmである。フロントレンズ及びリアレンズは、平面とフレネルレンズ構造面の構成となっており、ミドルレンズは、平面と回折レンズ構造の構成となっている。製作の手順として、1m角、厚み8mmの近紫外線透過型アクリル(PMMA000、三菱レイヨン製)の両面を、表面粗さ20nm RMS以下となるように切削加工を行い、その片面に、フレネルレンズ構造もしくは回折構造を加工する。以下、1)フロントレンズ、2)ミドルレンズ、3)リアレンズの順に加工結果を報告する。

製作したレンズの測定は、本研究で製作した測定装置(図3)を用い、移動式紫外線レーザーとCCDを使って、それぞれのレンズの半径方向の透過強度と屈折角もしくは回折強度と回折角の測定を行った。レンズ評価装置レンズを挟んで、レーザー(405nm)とCCD



図3 レンズ評価装置

カメラをそれぞれ移動ステージ上に設置する、レーザーをレンズ面に垂直に照射し、CCDでスキャンして、透過強度と屈折角もしくは回折強度と回折角の測定を行う。レーザー照射位置を順次、レンズの半径方向に変えながら測定する。この装置は、環境光の影響を受けるため透過率及び回折効率の絶対値を求める事はできない。

フロントレンズは、溝深さ10mmのフレネル構造を持つ。R0.5mmとR0.05mmの超寿命ダイヤモンドバイトツールを用いて加工を行った。R0.5mmツールで、フレネル構造とスムーズなフレネル斜面を作成し、R0.05mmツールで、溝に残るR0.5mmの曲面形状を取り除いた。図4に加工したレンズを示す。図3の測定装置で測定した結果を図5に示す。グラフ内の青い縦線がそれぞれCCDスキャンを行った範囲である。図中の曲線は、設計値から期待される屈折位置を示している。この結果から、フロントレンズは、設計値通りに製作されている事を確認した。

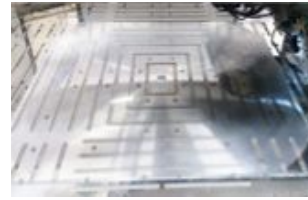


図4 製作したフロントレンズ

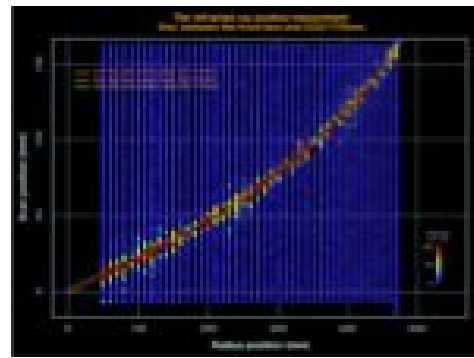


図5 透過強度と屈折角の測定結果

ミドルレンズは、回折構造面を持ち、その構造深さは、700nmである。この微細構造を加工するため、先端が数十nmレベルの剣先バイトを使用して行った。加工の様子を図6に示す。中心から $r=150\text{mm}$ 、 $300\text{mm}$ 、 $450\text{mm}$ の位置を可搬式原子間力顕微鏡でサンプリング測定した。その結果、要求値である $700 \pm 10\%$ の範囲であることを確認した。図4の測定装置で測定した結果を図7に示す。グラフ内の青い縦線がそれぞれCCDスキャンを行った範囲である。理論曲線上に1次光が分布していることを確認した。

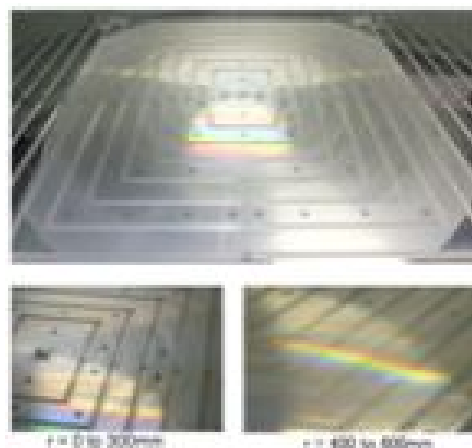


図6 製作したミドルレンズ

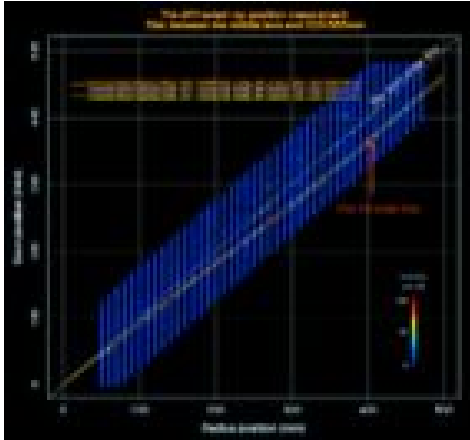


図7 回折強度と回折角の測定結果

リアレンズは、溝深さ 20mm のフレネル構造を持つ。R0.5mm と R0.05mm の超寿命ダイヤモンドバイトツールを用いて加工を行った。R0.5mm ツールで、フレネル構造とスムーズなフレネル斜面を作製し、R0.05mm ツールで、溝に残る R0.5mm の曲面形状を取り除いた。図 8 に加工したレンズを示す。図 4 の測定装置で測定した結果を図 9 に示す。グラフ内の四角いドットで示す領域が CCD スキャンを行った領域である。図中の曲線は、設計値から期待される屈折位置を示している。測定データは、その曲線上に分布しており、フレネル構造は設計値通りに製作されている事を確認した。



図8 製作したリアレンズ

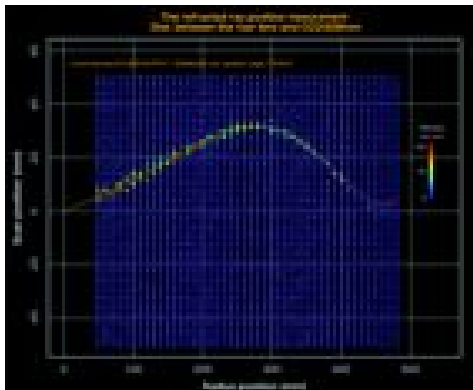


図9 透過強度と屈折角の測定結果

### フォトセンサー部製作

撮像検出モジュール (Photo detector module: PDM) は、図 10 の構成となっている。本研究では、図 10 中の MAPMT module の部分を主として担当し、紫外線フィルターの設計と光電子増倍管の 22 本調達 (他は国際分担)、そして、すべての紫外線フィルターと光電子増倍管の接合を担当した。紫外線フィルターは、光線追跡シミュレーションの結果、素材として BG3 が良く、形状は図 11 が良いことが分かった。紫外線フィルターと光電子増倍管の接合の為に、本研究で専用装置ポッティングチェンバーを準備した (図 12)。この装置は、PDM のポッティングの手法の探索にも活用した。この情報を基に、フランスにて PDM のポッティングが実施された。紫外線フィルターと光電子増倍管の接合を行ったフォトセンサー部 (図 10 の MAPMT module) の内、気球実験用として 40 本がフランスに送られ、気球実験用の PDM 構造体に組み込まれた。

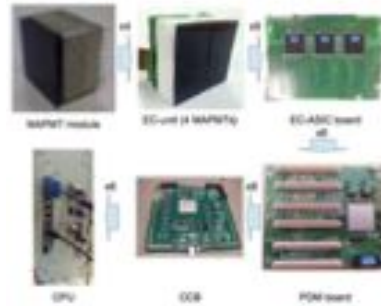


図10 撮像検出モジュール(Photo detector module: PDM)の構成



図11 BG3 フィルターの形状



図12 ポッティングチェンバー

フランス宇宙機関 CNES の気球実験準備状況  
 本研究で、製作したレンズ及びフォトセンサー部は、フランスにて単体チェックの後、望遠鏡として組上げられ、気球のゴンドラへの組み込みが進められている。飛揚実験は2回以上を予定されている。本研究の開始当初、最初の飛揚実験は2013年8月頃を予定していたが、CNESにより、他の気球実験らとのスケジュール調整が行われ、2014年8月に変更された。このため、待機状態となっている。レンズ3枚は、専用の光学ベンチに設置され、直径25cmのコリメータにより生成された平行光によりスポット形状が評価され(図13)、64ch光電子増倍管のピクセル程度のスポットを得ることを確認した3)(図14)。フォトセンサー部は、フランスにて、準備が進んでいたエレクトロニクスが組み込まれた構造体(図15)に装着された(図16)。望遠鏡は、気球ゴンドラに組み込まれ(図17)、2014年8月の飛揚実験の準備は完了した。

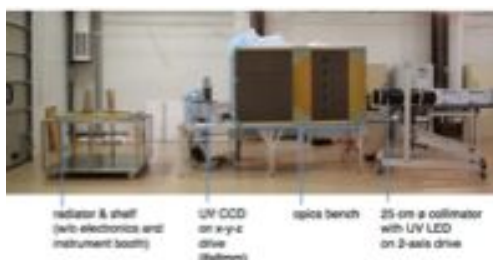


図13 フランスでの光学ベンチを用いたレンズ評価の様子

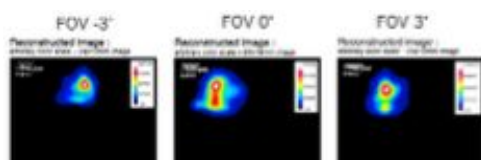


図14 コリメータと CCD をスキャンさせ取得したデータから構成したスポット図(波長391nm)



図15 調整中の焦点面検出器

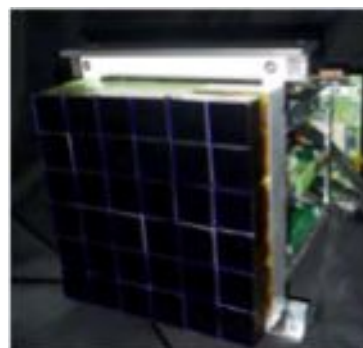


図16 フォトセンサー部が装着された様子

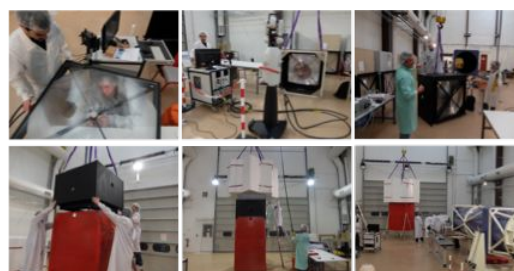


図17 フランスにて望遠鏡が気球ゴンドラに組み込まれる様子

#### 参考文献

- 1) Y. Takizawa et al, The TA-EUSO and EUSO-Balloon optics designs, 33rd ICRC, Rio de Janeiro, 2013
- 2) Y. Hachisu et al, Manufacturing of the TA-EUSO and the EUSO-Balloon lenses, 33rd ICRC, Rio de Janeiro, 2013
- 3) Baptiste Mot, Gilles Roudil, Camille Catalano eusoballoon optics test, (2014\_02\_optics\_testsb.pptx)

#### 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5件)

1. Y. Hachisu, T. Ebisuzaki et al, "Manufacturing of the TA-EUSO and the EUSO-Balloon lenses", The 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, July, 2013, (査読無), 印刷中, 2013
2. P. von Ballmoos, M. Casolino et al, "EUSO-BALLOON a pathfinder for detecting UHECR's from the edge of space", EPJ Web of Conferences (査読無), 53, 2013, DOI: 10.1016/j.asr.2013.11.049
3. F. Kajino, "The JEM-EUSO Instruments", The 33rd International Cosmic Ray

Conference, Rio de Janeiro, July, 2013,  
( 査読無 ), 印刷中,2013

4. Casolino, M., and Jem-Euso  
Collaboration, "Detecting ultra-high  
energy cosmic rays from space with  
unprecedented acceptance: objectives and  
design of the JEM-EUSO  
mission", Astrophysics and Space Sciences  
Transactions ( 査読有 ), 7:477, 2011, DOI:  
10.5194/astra-7-477-2011

5. Kawasaki, Y., and Jem-Euso  
Collaboration, "The focal surface of the  
JEM-EUSO instrument", Astrophysics and  
Space Sciences Transactions ( 査読有 ), 7:  
167, 2011, DOI: 10.1063/1.3628745

[ 学会発表 ] ( 計 8 件 )

1. 宮本寛子, Marco Casolino et al., "JEM-EUSO(140) EUSO-BALLOON project  
現状報告", 日本物理学会 第 69 回年次大会,  
2014 年 3 月 29 日, 東海大学 湘南キャンパス

2. Marco Casolino, "EUSO-BALLOON", 平成 25  
年度大気球シンポジウム, 2013 年 11 月 14 日,  
JAXA 宇宙科学研究所

3. 宮本寛子, Marco Casolino et al., "JEM-EUSO(137) EUSO-BALLOON project",  
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9  
月 23 日, 高知大学朝倉キャンパス

4. Hachisu Y, Takizawa Y et al.,  
"Manufacturing of the TA-EUSO and the  
EUSO-Balloon lenses", The 33rd  
International Cosmic Ray Conference, 2-9  
July, Rio de Janeiro, 2013

5. 戎崎俊一, "JEM-EUSO(127) 全体報告",  
第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大  
学東広島キャンパス

6. 戎崎俊一, "JEM-EUSO(123) 全体報告",  
日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9  
月 13 日, 京都産業大

7. Marco Casolino, "The JEM-EUSO project  
to study", 12th Symposium on Space Science  
in ISAS, 2012 年 1 月 5 日 6 日, 宇宙科学研  
究所 ( 相模原市 )

8. Marco Casolino, "The JEM-EUSO project  
to study", Ultra-High Energy Cosmic Rays  
from the International Space Station, 2011  
年 8 月 16 日, 北京 ( 中国 )

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

C A S O L I N O M A R C O ( Casolino

Marco )

独立行政法人理化学研究所・EUSO チーム・チ  
ームリーダー

研究者番号 10598163

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

戎崎 俊一 ( Ebisuzaki Toshikazu. )

独立行政法人理化学研究所・戎崎計算宇宙物  
理研究室・主任研究員

研究者番号 10183021

滝澤 慶之 ( Takizawa Yoshiyuki )

独立行政法人理化学研究所・戎崎計算宇宙物  
理研究室・専任研究員

研究者番号 70312246

川崎 賀也 ( Kawasaki Yoshiya )

独立行政法人理化学研究所・EUSO チーム・協  
力研究員

研究者番号 70344033

大森 整 ( Ohmori Hitoshi )

独立行政法人理化学研究所・大森素形材工学  
研究室・主任研究員

研究者番号 50233276

梶野 文義 ( Kajino Fumiyoshi )

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号 50204392

萩尾 彰一 ( Ogi Shoichi )

大阪市立大学・理学研究科・准教授

研究者番号 20242258

井上 直也 ( Inoue Naoya )

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号 40168456

榊 直人 ( Sakaki Naoto )

Karlsruhe Institute of Technology ·  
Researcher

研究者番号 90342790

和田 智之 ( Wada Satoshi )

独立行政法人理化学研究所・光量子技術基盤  
開発グループ・グループディレクター

研究者番号 90261164