

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03996

研究課題名（和文）CTA大口径望遠鏡による超高エネルギー宇宙線源候補天体フレア時の観測手法の確立

研究課題名（英文）CTA LST

研究代表者

吉田 龍生（Tatsuo, Yoshida）

茨城大学・理工学研究科（理学野）・教授

研究者番号：60241741

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000円

研究成果の概要（和文）：超高エネルギー宇宙線源候補天体の活動性を、20 GeVから1 TeV程度までの低エネルギー帯のガンマ線観測で高頻度に捉え、宇宙線の加速機構に迫るために、建設中のCherenkov Telescope Array（CTA）計画の大口径望遠鏡（LST）2-4号基のステレオ観測を実現に向けた準備研究を行った。低エネルギー帯のガンマ線を捉えるためには、Cherenkov光量を十分に集光できる光学系の要素の性能評価が不可欠である。光学系主要要素であるLSTの主鏡（放物面鏡）を構成する球面分割鏡と、焦点面検出器の光電子増倍管に取り付けるライトガイドについての性能評価を行い、その評価を完了することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LST-2-4号基の光学系の性能評価の結果、CTA北サイトのLST-2-4号基のステレオ観測開始後、高エネルギーニュートリノ天文学、重力波天文学、他の波長の電磁波天文観測と連携し、20 GeVから1 TeV程度のエネルギー帯の超高エネルギー宇宙線源候補天体フレア時のマルチメッセンジャー観測で十分な貢献を果たすことが期待できることがわかった

研究成果の概要（英文）：In order to observe the activity of ultra-high energy cosmic-ray source candidates in the low-energy gamma-ray band from 20 GeV to 1 TeV, stereoscopic observations with the Large-Sized Telescopes (LST-2-4) of the Cherenkov Telescope Array (CTA) are highly anticipated. It is essential to evaluate the performance of the elements of the LSTs' optical system for capturing gamma-rays in this energy band. In this research, the performance evaluations of the main elements of the optical system; specifically, the spherical mirror segments that constitute the primary parabolic mirror of the LSTs and the hexagonal light concentrators of the focal-plane camera, have been carried out.

研究分野：ガンマ線天文学

キーワード：解像型大気チェレンコフ望遠鏡 超高エネルギーガンマ線天体物理学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙から地球に飛来する陽子や原子核の荷電粒子である超高エネルギー宇宙線の起源や加速機構は未だ解明されていない。この謎に迫るため、Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画の大口径望遠鏡 (LST) 4 基のステレオ観測によって、超高エネルギー宇宙線源候補天体の活動性を、20 GeV から 1 TeV 程度までの低エネルギー帯のガンマ線観測で高頻度に捉えるための準備研究を行った。LST-1 号基は 2018 年 10 月に、CTA 北サイトのカナリー諸島のラ・パルマ島に完成し観測を開始したが、残り 3 基の建設開始を待っている状況であった。本研究期間中の 2021 年 9 月下旬から 12 月中旬までラ・パルマ島の火山噴火が継続し、観測が中断された。その後、2022 年春から観測が再開され、2022 年度から残り 3 基の建設が開始された。2024 年 6 月現在、順調に建設作業が進み、2026 年の完成を目指している。

LST4 基の完成後は、ステレオ観測によって、宇宙線の起源に迫るマルチメッセンジャー宇宙物理学を早期に展開していく必要があり、高エネルギーニュートリノ天文学、重力波天文学、他の波長の電磁波天文観測と連携し、マルチメッセンジャー観測において重要な役割を果たすことが期待されていた状況であった。そのため、本研究では、超高エネルギー宇宙線源候補天体の活動性を、数十 GeV から TeV エネルギー帯の低ガンマ線観測で高頻度に捉えるための準備研究を行うこととした。

### 2. 研究の目的

LST-2-4 号基完成後には、現在の LST-1 号基のみの観測体制から、できるだけ早期にステレオ観測体制に移行し、今までより高頻度に超高エネルギー宇宙線源候補天体の活動性を 20 GeV から 1 TeV 程度までの低エネルギー帯のガンマ線観測で捉え、宇宙線の加速機構に迫っていくことになる。CTA 計画の中で LST が重要な役割を担っている低エネルギー帯のガンマ線を捉えるために、LST 光学系が Cherenkov 光量を十分に集光することが鍵となってくる。そのため、本研究では、LST の光学系主要要素である LST の主鏡 (放物面鏡) を構成する球面分割鏡と、焦点面検出器 (カメラ) の光電子増倍管 (PMT) に取り付けられるライトガイドについての性能評価を行った。

### 3. 研究の方法

LST-2-4 号基の光学系の性能評価に重点を置いて進められた。LST の主鏡である球面分割鏡と焦点面検出器の光電子増倍管 (PMT) に取り付けられるライトガイドの性能評価を行った。

#### 球面分割鏡の性能評価

球面分割鏡は対辺間距離が 1.51 m の六角形で、各 LST は 198 枚の分割鏡によって、口径 23 m、焦点距離 28 m の主鏡放物面を構成する。理想的な放物面を実現できるように、6 種類の曲率半径を持った球面分割鏡を 1000 枚製造した。まず、これらの分割鏡の中から LST-1 号基に使用された分などを除いたものを用いて、LST-2-4 号基に搭載予定となる 198 枚×3 基 (594 枚) の分割鏡を、主鏡の放物面を実現する配置を決定した。

次に、この配置を元に、結像性能の評価を行った。各分割球面鏡は、2f 法による曲率半径 (2f は球面鏡の焦点距離 f の 2 倍で、入射する平行光線が光軸に十分近い場合は曲率半径となる) と結像性能が実測されている。この実測に基づき、LST-1 号基も含め 4 基分の光線追跡シミュレーションを行い、スポットサイズ (全光量の 80% が含まれる直径として定義) の評価を行った。図 1 に各望遠鏡での光の入射角とスポットサイズの関係を示す。入射角は光軸からの傾きが 0° から 2.5° まで 0.5° 間隔でシミュレーションを行った。各入射角において、各望遠鏡のスポットサイズの差は最大でも 1% 以内に収まっており (図 1 では 4 基の結果が重なって 1 点に見える)、4 基で同等の結像性能が実現可能であることを示した。

また、実測に基づいた分割球面鏡の反射率のデータを用いて、平均的な反射率の波長依存性についても評価した。この実測は、分割鏡をスパッタリングで製造する際に分割鏡の横に数センチ角のミラーの小片を置き、同時にスパッタリングされ製造された小片の反射率を測定したものである。分割鏡の面積は大きく、製造された 1000 枚の反射率測定を精度よく行うことは困難なため、小片の反射率を分割鏡の反射率として評価を行った。図 2 に、波長 250 nm-850 nm における LST-1-4 号基の平均の反射率を示す。400 nm で 90% 以上の平均反射率で標準偏差も約 1% 以内を達成できていることがわかる。反射率についても 4 基で同等の性能が実現可能であることを示した。

#### 焦点面検出器 (カメラ) のライトガイドの性能評価

LST の焦点面カメラ 1 基分は、1855 本の PMT で構成されており、PMT 間のデッドスペースを減らして Cherenkov 光をより集光するためのライトガイドと呼ばれている開口部が六角形のコーン状の集光器が PMT ごとに取り付けられる。このコーンの側面は放物面形状をしており、その内側は Cherenkov 光の反射率を高めるように蒸着を最適化して製造されている。この形状の反射面により望遠鏡の主鏡方向から来る光を PMT に選択的に導き、主鏡の外側から来るバックグラウンド光を除く役割を担っており、20 GeV という低エネルギー帯のガンマ線を検出する上で重要な役割を担っている。

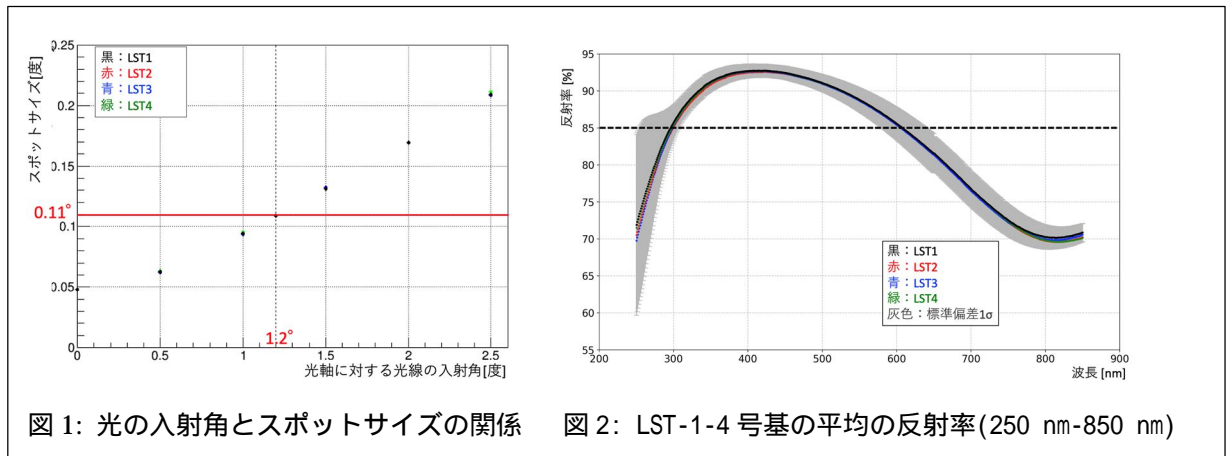


図 1: 光の入射角とスポットサイズの関係

図 2: LST-1-4 号基の平均の反射率(250 nm-850 nm)

このライトガイドの性能評価を行うために、紫外線 310 nm から可視光 650 nm までの 9 波長の LED を光源として、LST-1 号基用と LST-2-4 号基用のライトガイドを PMT に取り付けて、暗室中で回転測定を行い、各波長での集光効率の角度依存性を測定した。今回、LED 光の強度の時間変化を補正するために、ライトガイドを取り付けた PMT と光源のモニター用の PMT でデータの両方を用いて、集光効率 (Relative Anode Sensitivity: RAS) を求めた。測定したライトガイドの個体は、量産時の lot 番号の違うものから任意に抽出した。

図 3 に、LST-2-4 のライトガイドの集光効率 (RAS) が光の入射角依存性を示した。図 4 は主鏡からの入射光の角度分布を考慮した集光効率 (RAS) の波長依存性を示している。蒸着方法を改良した LST-2-4 の量産品 (赤点が測定点、赤線は平均値をフィッティングした曲線) は、LST-1 の量産品 (青点が測定点、青線は平均値をフィッティングした曲線) より高い集光効率に品質管理できていることがわかった。

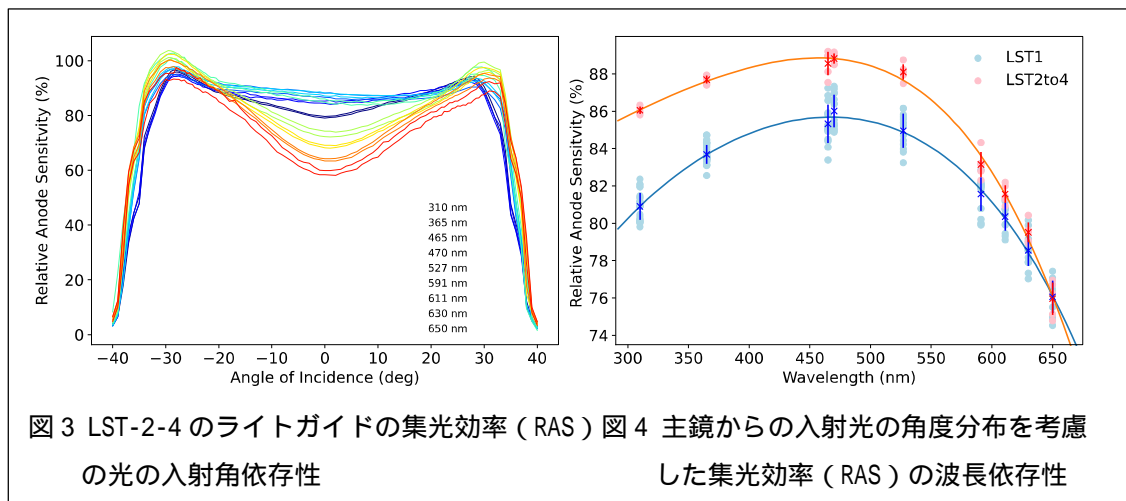


図 3 LST-2-4 のライトガイドの集光効率 (RAS) の光の入射角依存性

図 4 主鏡からの入射光の角度分布を考慮した集光効率 (RAS) の波長依存性

#### 4. 研究成果

CTA 北サイトの LST-2-4 号基の主な光学系である球面分割鏡と焦点面カメラのライトガイドの性能評価を行った結果、以下のように 20 GeV から 1 TeV 程度の低エネルギー帯のガンマ線観測を行うための Cherenkov 光の集光性能を十分に持っていることが示された。

##### 球面分割鏡の性能評価

分割鏡を放物面に近い曲率半径を実現するように配置した場合、図 1 に示したように焦点面でのスポットサイズが CTA の要求仕様「Off-Axis Angle(光軸に対する光線の入射角度)が 1.2° においてスポットサイズ (全光量の 80% が含まれる直径として定義) が 0.11° 以下」を満たす結像性能であることが示された。

さらに、図 2 に示したように LST-1-4 号基全てで CTA の要求仕様である「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が 85% 以上」を満たすことが確認できた。この成果は、日本物理学会 2020 年秋季大会で発表された。

##### 焦点面検出器 (カメラ) のライトガイドの性能評価

図 4 の結果と、空気シャワーによって生成された Cherenkov 光の 300 nm から 550 nm のスペクトルを考慮して、LST-1 量産品のライトガイドの平均集光効率が 84% に対して、LST-2-4 量産品のライトガイドは 88% という結果を得た。この成果は、LST の焦点面カメラモジュールの開発と品質管理をまとめた準備中の論文の一部として発表される予定である。

以上により、LST-2-4 号基のステレオ観測開始後は、20 GeV から 1 TeV のガンマ線観測によって、宇宙線の起源に迫るマルチメッセンジャー宇宙物理学を展開していく準備を整えることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Abe H., Abe K., Abe S., Aguasca-Cabot A., Agudo I., Alvarez Crespo N., Antonelli L. A., Aramo C., Arbet-Engels A., Arcaro C., Artero M., Asano K., Aubert P., Baktash A., Bamba A., Baquero Larriva A., Baroncelli L., Barres de Almeida U., Barrio J. A., Yoshida T. et al.	4. 巻 956
2. 論文標題 Observations of the Crab Nebula and Pulsar with the Large-sized Telescope Prototype of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 (1-25)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace89d	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 Abe H., Abe K., Abe S., Acciari V. A., Aguasca-Cabot A., Agudo I., Alvarez Crespo N., Aniello T., Ansoldi S., Antonelli L. A., Aramo C., Arbet-Engels A., Arcaro C., Artero M., Asano K., Aubert P., Baack D., Babic A., Baktash A., Yoshida T. et al.	4. 巻 680
2. 論文標題 Performance of the joint LST-1 and MAGIC observations evaluated with Crab Nebula data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A66 (1-21)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202346927	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 Abe K., Abe S., Aguasca-Cabot A., Agudo I., Alvarez Crespo N., Antonelli L. A., Aramo C., Arbet-Engels A., Cornelia A., Artero M., Asano K., Aubert P., Baktash A., Bamba A., Baquero Larriva A., Baroncelli L., Barres de Almeida U., Barrio J. A., Batkovic I., Yoshida T. et al.	4. 巻 679
2. 論文標題 Star tracking for pointing determination of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A90 (1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202347128	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 S. Abe, A. Aguasca-Cabot, I. Agudo, N. Alvarez Crespo, L. A. Antonelli, C. Aramo, A. Arbet-Engels, M. Artero, K. Asano, P. Aubert, A. Baktash, A. Bamba, A. Baquero Larriva, L. Baroncelli, U. Barres de Almeida, J. A. Barrio, I. Batkovic, J. Baxter, J. Becerra Gonzalez, T. Yoshida et al.	4. 巻 673
2. 論文標題 Multiwavelength study of the galactic PeVatron candidate LHAASO J2108+5157	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A75(1-16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202245086	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 A. Aguasca-Cabot, I. Agudo, A. Aguirre-Santaella, J. Alfaro, R. Aloisio, N. Alvarez Crespo, R. Alves Batista, L. Amati, E. Amato, G. Ambrosi, E.O. Anguener, C. Aramo, C. Arcaro, T. Armstrong, K. Asano, Y. Ascasibar, J. Aschersleben, M. Backes, A. Baktash, T. Yoshida et al.	4. 巻 150
2. 論文標題 Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to spectral signatures of hadronic PeVatrons with application to Galactic Supernova Remnants	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102850(1-28)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2023.102850	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 T. Saito, C. Delgado, O. Blanch, 他28人, T. Yamamoto, T. Yoshida for the CTA LST project)	4. 巻 395
2. 論文標題 Commissioning of the camera of the first Large Size Telescope of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science - 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021)	6. 最初と最後の頁 718 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.395.0718	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 Inada Tomohiro, Fukami Satoshi, Noda Koji, Chikawa Michiyuki, Kagaya Mika, Katagiri Hideaki, Mazin Daniel, Obara Koutaro, Okumura Akira, Saito Takayuki, Teshima Masahiro, Yamamoto Tokonatsu, Yoshida Tatsuo, Vovk Ievgen	4. 巻 11451
2. 論文標題 Design and production of segment mirrors for the large-sized telescopes of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11451, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV	6. 最初と最後の頁 114510G
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562111	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 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 服部勇大, 片桐秀明, 吉田龍生, CTA-Japan Consortium
2. 発表標題 CTA大口径望遠鏡2-4号機における波形記録チップDRS4のサンプリング時間幅較正
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小原光太郎, 稲田知大, 野田浩司, 深見哲志, Ievgen Vovk, 奥村暁, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 齋藤隆之, 手嶋政廣, 千川道幸, 山本常夏, 吉田龍生, 他 CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題 CTA報告 170 : CTA大口径望遠鏡2-4号基における分割鏡配置の決定と光学性能の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
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		
ドイツ	Max-Planck-Institut fuer Physik		
スペイン	CIEMAT		