

令和 7 年度（2025） 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：宇宙線望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の研究 英文：Study on Ultra-High-Energy Cosmic Rays with The Telescope Array
研究代表者	常定芳基（大阪公立大学）
参加研究者	荻尾彰一、さこ隆志、川田和正、竹田成宏、野中敏幸、木戸英治、樋口諒、藤田慧太朗（東京大学宇宙線研究所）、藤井俊博、Jihyun Kim、Heungsu Shin、櫻井駿介（大阪公立大学）、有働慈治（神奈川大）、富田孝幸（信州大）、山崎勝也（中部大）、大島仁（東京電機大）、多米田裕一郎（大阪電通大）
研究成果概要	ユタ州ミラード郡に建設された宇宙線望遠鏡“Telescope Array”（以下 TA）は、面積 700km² に 507 台の地表検出器（SD）を設置した空気シャワーアレイ、および 3 か所合計 38 台の大気蛍光望遠鏡（FD）によってエネルギー 10¹⁸ eV を超える超高エネルギー宇宙線を観測し、この宇宙における最も高いエネルギーを有する原子核の起源と加速・伝播のメカニズムを解き明かすことを目的としている。TA は北半球に建設された宇宙線観測施設としては最大の有効検出面積を有している。検出器は 2008 年 5 月より稼働しており、17 年間にわたり安定的に観測とデータ収集を続けている。2025 年度は学術振興会の「拠点形成事業」に採択され、TA 実験のみならず、世界中の宇宙線研究者が TA サイトを訪れ、その施設を利用して研究ができるハブとしての機能をもあわせもつこととなり、その存在感はますます高まっている。 TA の検出器開発としては、コロナ禍以降の人的資金的資源削減のため、観測の自動化、遠隔操作化を一段と推し進めたことが成果として挙げられる。また 2025 年度の科学成果としては、2008-2024 の 16 年間の観測データを用いてエネルギー 1018.2 eV 以上の宇宙線のエネルギースペクトルを更新し、宇宙線国際会議 ICRC2025（ジュネーブ、7 月）で報告することができた（Jihyun Kim）。この領域の宇宙線スペクトル形状を詳しく調べることにより、従来より知られていたいわゆる ankle/cut-off 構造の確認と、1019.2 eV 付近でスペクトルがいったん緩やかになる“instep”と呼ばれることとなった折れ曲がり構造の存在も統計的に有意に確認された。これらは宇宙線の加速や伝播のメカニズムと関連しているはずであり、理論・モデル予測との比較研究が進められている。また南半球における超高エネルギー宇宙線観測実験である Pierre Auger Observatory（以下 Auger）との協力関係を推進し、エネルギースペクトルや到来方向異方性の解析を合同ワーキンググループで行い、共同発表を ICRC2025 で報告した。TA と Auger では用いている検出器の種類、そのデータ解析の手法に違いがあり、両実験で得られた結果の比較は容易ではない。合同ワーキンググループでは、それぞれの実験

で標準的に用いられている解析チェーンを、できるだけ両実験で同じまたは同等の手続きやキャリブレーション手法を共有することで、南北半球で観測されたエネルギースペクトルを比較可能な形で提示した。その結果、両実験でともに視野に入る赤緯領域（ $\delta = -16 \sim 24^\circ$ ）でのエネルギースペクトルは両実験のエネルギー不定性の範囲で矛盾がないことが示された。しかし $10^{19.7}$ eV 以上の最高エネルギー領域での不一致は解消されず、解析の問題であるのか、または南北半球で観測されるエネルギースペクトルは **astrophysical** に異なるものであるのかの議論が継続中である。また 2025 年度中の成果としては、FD から SD へトリガー信号を送ってデータ取得する「ハイブリッドトリガーシステム」のデータ解析、それによる宇宙線質量組成の解析が挙げられる。これによって FD での空気シャワー最大発達深さ **Xmax** の測定をこれまでよりも低いエネルギーにまで広げることに成功した (Heungu Shin)。その結果、エネルギー 1019 eV では宇宙線の主成分はほぼ陽子であるという TA, Auger の従来の結果を確認しつつ、低エネルギー領域 ($10^{17.6-18}$ eV) では重い原子核の混じりこみがあることが示唆された。さらにデータ解析手法の改善にもつとめ、これまではエネルギーや到来方向決定精度を保つ目的で天頂角 60° までのイベントのみを使用していたのに対し、天頂角 75° までほぼエネルギー決定精度が変わらない解析手法を開発した。また大気の奥深くまで突入してきた空気シャワーの解析から、超高エネルギー領域における宇宙ニュートリノの探索を行った。結果的にはそのような超高エネルギー宇宙ニュートリノは発見されず、到来頻度の上限值を与えることとなった。この成果は東京大学の博士論文にまとめられ、学位取得につながった。

さらに、TA の低エネルギー拡張である TALE のデータ解析に進展があり、TALE-FD データを用いた空気シャワー最大深さの発達から宇宙線の原子核組成を決定することに成功した。この成果は *Physical Review D* 誌に掲載された。

出版論文の一部：

- [1] Cosmic ray mass composition measurement in the energy range from $10^{16.5}$ eV to $10^{18.5}$ eV observed with the TALE hybrid detector, *Phys. Rev. D*, 113, 062003 (2026)
- [2] Searching for EeV photons with Telescope Array Surface Detector and neural networks, *JCAP* 23 (2026)
- [3] Time-Resolved Leader Spectra of Downward Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed at the Telescope Array Surface Detector, *J. Geophys. Res.*, 130 (2025)