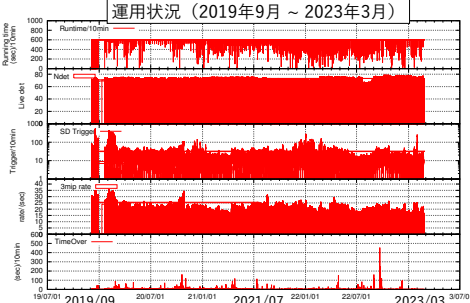



## 令和 4 年度 (2022) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：TALE ハイブリッド実験による 10 の 17 乗 eV 領域宇宙線の研究 英文：Study of very high energy cosmic rays around $10^{17}$ eV with the TALE hybrid experiment
研究代表者 参加研究者	荻尾彰一（東京大学宇宙線研究所・教授） 常定芳基（大阪公立大学大学院理学研究科・教授）、 藤田慧太郎（東京大学宇宙線研究所・研究員）、 有村龍平（大阪公立大学大学院理学研究科・大学院生）、 岩崎葵（同・大学院生）、古前壱朗（同・大学院生）、 敷田淳（同・大学院生）、竹田成宏（東京大学宇宙線研究所・助教）
研究成果概要	<p><b>(1) TALE 実験の観測実施による安定運用の継続</b></p> <p>日本からの派遣を再開することができ、夏に集中的なメンテナンスキャンペーンを実施し、稼働地表検出器 (SD) 台数 100% を達成できた。その後もリモートでの実験装置の監視とユタ大学の現地雇用職員による現地作業の連携によって定常観測継続している。</p>  <p>図 1：TALE SD アレイの運用状況。2019 年 9 月にトリガー条件を変更したその時点以来運用状況である。上段から、10 分あたりの稼働時間（単位：秒）、稼働している SD 台数、10 分間のイベント数、平均ヒットレート（単位：Hz）、10 分あたりの通信エラー回数、である。コロナ禍にあっても安定した運用を継続できていたことがわかる。</p> <p><b>(2) SD の追加設置による TALE 実験の低エネルギー拡張 (TALE-infill)</b></p> <p>TALE ハイブリッド観測のエネルギーしきい値を <math>10^{16.5}</math> eV からさらに一桁下げるべく、SD を追加設置した (2022 年 10 月)。設置作業の様子を図 2 に示す。50 台の SD を 100 m 間隔で追加設置し、<math>0.36 \text{ km}^2</math> をカバーしている</p>  <p>図 2：左から、設置作業準備、最終動作確認、設置作業、作業完了後の SD アレイの様子。</p>

### (3) TALE 実験によって観測された空気シャワーデータの解析

TALE ハイブリッド観測による  $10^{17}$ eV 領域宇宙線のエネルギースペクトル、平均原子核質量数のエネルギー変化を日本物理学会、イタリアで開かれた国際会議 UHECR2022 などで報告した。さらに、TALE SD による観測データから原子核種を決定する手法の研究についても国内外の研究集会で報告した。以下、それらの一部を示す。

図3は TALE ハイブリッド観測による  $10^{16.5}$  から  $10^{18.4}$  eV までの宇宙線平均質量数の測定結果 (●) である。 $10^{16.5}$  eV からエネルギー増加とともに「重くなり」、 $10^{17.0}$  eV で最も重くなる。その後は減少に転じ、 $10^{18.7}$  eV 付近で最も軽くなる。特に興味深いのは、最も「重く」なる  $10^{17}$  eV 付近においても鉄原子核 100% ( $\ln A=4$ ) には達していない点である。

<ln A> vs log(E/eV)

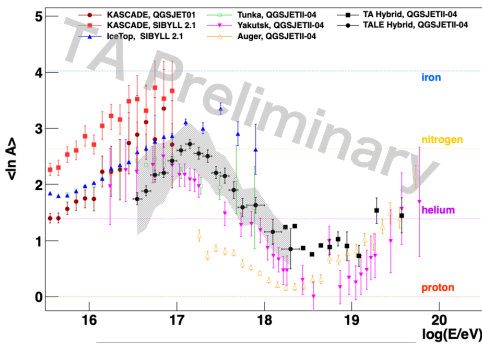
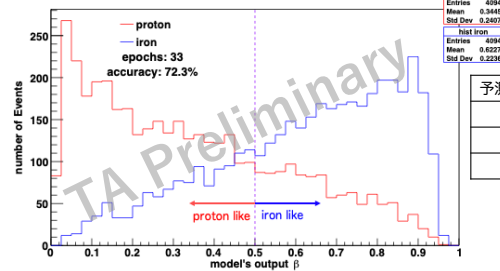


図3：TALE ハイブリッド観測による  $10^{16.5}$  から  $10^{18.4}$  eV までの宇宙線平均質量数の測定結果 (●)。統計誤差を縦棒で、系統誤差を灰色塗りで示した。グラフの縦軸は質量数 A の自然対数の平均<lnA>であり、0 ならば陽子 100% ということになる。鉄原子核 100% ならば約 4 となる。陽子、He、N、Fe100%に対応する横点線が示されている。  $10^{18}$  eV を超えたところで TA 実験による結果 (■) とスムーズに接続している。

ハイブリッド観測に比べて圧倒的に (10 倍以上) 統計量の多い TALE SD アレイによる空気シャワー観測データから一次宇宙線原子核種を event by event に決定する手法を研究している。モンテカルロ (MC) シミュレーションで作られた陽子または鉄原子核由来の TALE SD 擬似測定データに対して、粒子種を判別する 2 値分類機械学習モデルを作成し、性能を評価した。研究結果の 1 つを図 4 に示す。モデルへの入力データは、シャワー解析の結果として得られる到来方向、一次エネルギー、横方向粒子数分布、シャワー面曲率、シャワー面厚みなど 27 個のパラメーターとコアにもっとも近い検出器 1 台の上下 2 層の波形信号、合計 283 個の数値である。モデルの出力  $\beta$  は 0 ならば陽子、1 ならば鉄原子核であると判定されたことを示す。図 4 に示す通り、分類精度 72.3% が得られている。

the prediction of the model



予測\正答	陽子	鉄
陽子	2999(73.3%)	1095(26.7%)
鉄	1169(28.6%)	2925(71.4%)
合計	4168	4020

全試験イベントに対する  
分類結果表  
→ 現在の精度：72.3%

図4：27 個の空気シャワーパラメーターとコアにもっとも近い検出器 1 台の上下 2 層の波形信号、合計 283 個を入力とする 2 値分類機械学習モデルの性能評価結果。MC イベントのエネルギーは  $10^{18}$  eV、天頂角は  $30^\circ$  と固定されている。

### (4) 関連する発表論文

- A. Iwasaki, et al., "Performance of the TALE infill experiment as a TA-TALE extension down to the PeV region", EPJ Web of Conferences, 283, 06015(2023)
- K. Fujita, et al., "Cosmic ray mass composition measurement with the TALE hybrid detector", EPJ Web of Conferences, 283, 02009(2023)
- R. Arimura, et al., "A machine learning approach for mass composition analysis with TALE-SD data", EPJ Web of Conferences, 283, 02011(2023)
- H. Oshima, et al., "Measurement of cosmic-ray energy spectrum with the TALE detector in hybrid mode", EPJ Web of Conferences, 283, 02006(2023)