

令和 3 年 7 月 13 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05741

研究課題名(和文) 広エネルギー領域の精密測定で探る超高エネルギー宇宙線源の進化

研究課題名(英文) Study of the ultra high energy cosmic ray source evolution by detailed measurement of cosmic rays in the wide energy range

研究代表者

荻尾 彰一 (OGIO, Shoichi)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20242258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 124,900,000円

研究成果の概要(和文)：10の16乗eV以上の高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル、到来方向異方性、化学組成の高精度測定を目標に、米国ユタ州のテレスコープアレイ(TA)実験観測サイトに、TA実験よりも高密度に配置された地表検出器(SD)80台と大気蛍光望遠鏡(FD)10台を配置したTA Low energy Extension(TALE)実験を2018年9月に完成し、ハイブリッド観測を順調に継続中である。TALE-FD単眼観測によるエネルギースペクトルを2018年に、化学組成を2021年に発表した。さらに、ハイブリッド観測によるエネルギースペクトルと化学組成について予備的成果を2021年に発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TALE実験はTA実験と共同することで、10の16.5乗eVから10の20乗eV以上までの宇宙線を、単一のエネルギースケールで、シームレスに、しかもFDとSDのハイブリッドで、観測している世界で唯一の装置である。また、ハイブリッド観測での宇宙線化学組成決定に使われるパラメーターである空気シャワー最大発達深さ(X_{max})決定精度は $30 \text{ g}/(\text{cm}^2)$ 以下と、このエネルギー領域では世界最高精度に到達している。今後、銀河系内宇宙線起源、銀河系外宇宙線起源、銀河系内外の宇宙線の伝播機構の解明へ向けた重要なデータを公表していく。また、ハドロン相互作用の研究に対しても貢献できる観測データを提供する。

研究成果の概要(英文)：The TA Low energy Extension (TALE) SD array was completed in February 2018 with 80 surface detectors (SDs) at the Telescope Array (TA) site in Utah, U.S.A., in order to measure the energy spectrum, the anisotropy and the chemical composition of ultra high energy cosmic rays above 10 to 16th eV with high statistics, homogeneous detection efficiency and high accuracy based on stable and hybrid observations. The data acquisition system for the hybrid observations with the TALE fluorescence detectors (FDs) was completed in September 2018, and the hybrid observations have been continued. A set of data analysis programs were developed in parallel with the construction of the instrument. Results from TALE-FD monocular observations were published in 2018 and 2021, and preliminary results from hybrid observations were reported in 2021.

研究分野：自然科学

キーワード：宇宙線物理学 超高エネルギー宇宙線 化学組成 宇宙線起源 粒子加速 宇宙線の伝播

1. 研究開始当初の背景

テレスコープアレイ実験 (TA 実験) は、米国ユタ州に 680 km² の地表検出器 (Surface Detector, SD) アレイと 38 台の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) からなる北半球最大のハイブリッド型検出器を建設し、2008 年から観測を継続している。2012 年にはこれらに隣接して 10 台の高仰角観測用 FD を設置し、感度を 10¹⁶ eV まで 2 桁下げること成功した (TA Low energy Extension-FD、TALE-FD)。そして、2014 年秋に 2 つの検出器による観測結果を合わせて、10^{15.9}eV から 4 桁のエネルギー領域の宇宙線エネルギースペクトルを発表し、そこに多様な構造があることを示した (引用文献[1]、図 1)。TA 実験は SD アレイと FD のハイブリッド装置であるという利点を利用して、フラックスの測定と並行して、10^{18.2} eV 以上の宇宙線化学組成は純粋に陽子のみであるとして矛盾がないことを明らかにした (引用文献[2]、[3])。すると、スペクトルの 10^{18.7}eV における「くぼみ」と 10^{19.7} eV の「上限」という構造は、銀河系外陽子宇宙線が宇宙背景放射と反応してエネルギーを失った結果であると説明できる。このエネルギー以下、すなわち、銀河系内起源宇宙線と銀河系外宇宙線のせめぎ合う 10¹⁶ eV~10¹⁸ eV のエネルギー領域のスペクトルに現れる構造は、系内起源での粒子加速の限界、銀河磁場による閉じ込め・遮断、そして系外起源の宇宙論的進化といった豊富な物理を反映していると考えられる。

<引用文献>

- [1] 米国物理学会 (T. Abu-Zayyad)、日本物理学会 (荻尾彰一) にて発表 (2014)
- [2] Y. Tameda et al., ICRC2011, #1268 (2011)
- [3] T. Abu-Zayyad et al., Astropart. Phys., 39-40, pp.109-119 (2012)

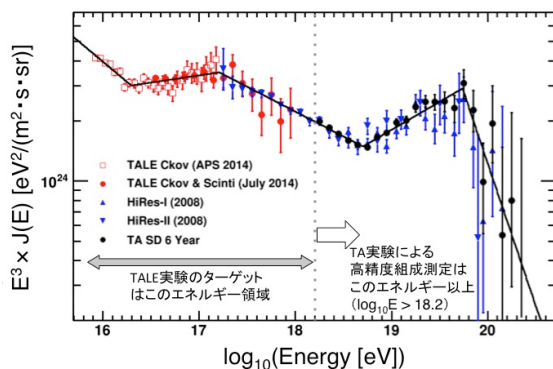


図 1 : TA 実験と TALE-FD による観測されたエネルギースペクトル。HiRes 実験の結果を重ね書きした (引用文献[1])。

2. 研究の目的

これらの複雑に織り込まれた情報を解きほぐすために、高統計で均質な検出効率でのエネルギースペクトル測定、さらにこれと同時に、安定した観測に基づく到来方向異方性と高精度な宇宙線化学組成決定が喫緊の課題である。我々は本研究によって、SD 検出器を TALE-FD の視野内に設置して 103 台の SD からなる検出面積 67 km² の空気シャワーアレイを最初の 3 年間で建設し、2017 年度中に TALE ハイブリッド検出器を完成する。これによって 10¹⁷ eV 以上で検出効率 100%、観測 duty 95%以上を達成し、同時に化学組成決定の指標であるシャワー最大発達深さ (Xmax) の測定精度を 20 g/cm² へと劇的に向上させ、2018 年からの 2 年間の観測から 10¹⁶ eV から 10^{20.5}eV にわたる広いエネルギー領域で、宇宙線のフラックスと到来方向異方性、そして化学組成を測定する。これにより、低エネルギー側の銀河系内起源の重い宇宙線 (鉄核など) と、高いエネルギー側で卓越する銀河系外起源の軽い宇宙線 (陽子) の寄与を分離して、それぞれのエネルギースペクトルを明らかにする。

宇宙物理学的な意義としては、銀河系外宇宙線源天体とその進化の解明、銀河間磁場の強さと構造に対する示唆、宇宙線の遮蔽・閉じ込めの解明から、宇宙線・銀河磁場・銀河ハローを含めた多体系としての銀河系の物理、銀河系内宇宙線源の加速エネルギー限界の精密測定と粒子加速理論への寄与、などを挙げることができる。現在活発な理論的研究がなされているこれらの課題に対して、本研究は決定的な実験結果を提示する。

TALE 実験で観測する 10¹⁶ eV から 10¹⁸ eV のエネルギー領域では、特に化学組成について、信頼に足る先行実験による観測結果は存在しない。TALE 実験はハイブリッド実験によって初めて決定的な観測結果を示すことになる。同じハイブリッド観測法を採用しているもう 1 つの実験である Pierre Auger 実験では、HEAT 実験 (FD) と AMIGA 実験 (SD アレイ) による低エネルギー拡張が進行している。これと比較して TALE 実験は、しきい値エネルギーの低さ (大気蛍光イベントの最頻エネルギーで比較すると、TALE は 10^{16.5} eV、HEAT は 10^{17.2} eV) と、電子加速器によって絶対較正されたエネルギースケールという利点がある。また、北半球にあるという点で、南米アルゼンチンにある Pierre Auger 実験とは相補的であると言える。

3. 研究の方法

有効面積 3 m^2 のプラスチックシンチレーター地表検出器 (SD) を、45 台新規に製作し、TA 実験に隣接した TALE 実験サイトに設置する (図 2 参照)。これによって、米国ユタ大学が 2012 年に設置した 10 台の FD と、同時期に設置された 35 台の SD と合わせて、面積約 40 km^2 の TALE 実験ハイブリッド観測装置を完成する。45 台の SD のシンチレーターと容器は TA×4 実験 (TA 実験の有効面積を 4 倍に拡張する計画で、2015 年度に特別推進研究に採択され進行中である) と仕様を共通化して量産することにより、コストダウンをはかる。エネルギー較正は、電子線形加速器によって絶対エネルギー較正されている TA 実験 FD に対して、中央レーザー、可搬 UV レーザー等を利用して同時検出事象を人工的に作りこれを比較することで実施する。その他の観測量も TA 実験との同時検出事象を利用して較正する。SD アレイ完成後 2 年間の観測によって、TA 実験、NICHE 実験と合わせて、 10^{16} eV 以上 4 桁に及ぶ広いエネルギー範囲の宇宙線のエネルギースペクトル、化学組成、到来方向異方性を求める。

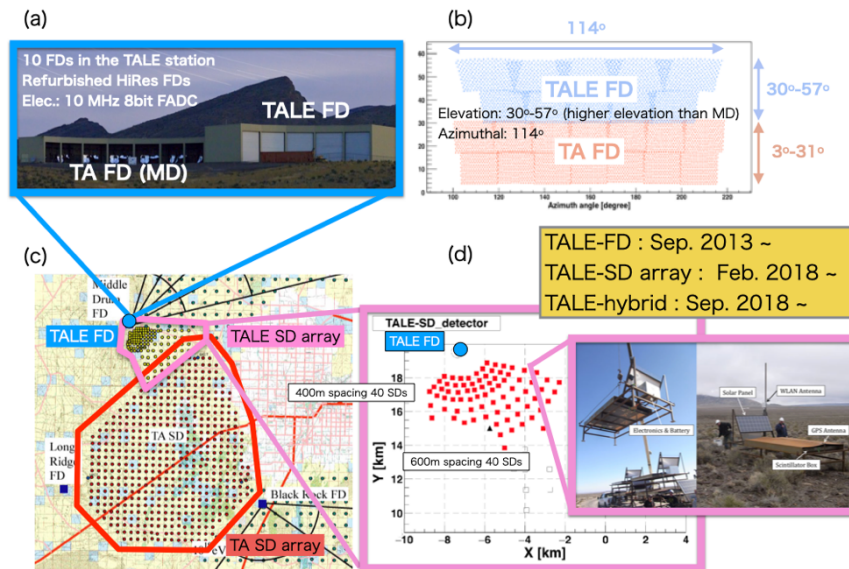


図 2 : (a)TA 実験 FD と TALE 実験 FD の建屋の外観。(b)TA 実験 FD と TALE 実験 FD の視野。(c) TA 実験サイトの地図。赤枠内が TA 実験 SD アレイ、ピンク枠内が TALE 実験 SD アレイ。青丸●が FD の位置。(d)TALE 実験 SD の設置点 (■) と実際の設置作業の様子 (右写真)。TALE-FD は 2013 年 9 月、TALE-SD アレイは 2018 年 2 月にそれぞれ設置され、2018 年 9 月から FD+SD によるハイブリッド観測が開始された。

4. 研究成果

(1) TALE 実験ハイブリッド検出器の完成 (定常観測 2018 年 9 月～)

2015 年から SD 本体・架台・制御回路の製作、制御回路のファームウェア・データ収集システムソフトウェアの開発を開始した。2018 年 2 月までに 45 台の SD の開発・製作を完了した。TA 実験 SD アレイと接続部分については、研究における重要性和資金の有効利用の観点から設置を見送った。結果として、2015 年以前に設置されていた 35 台と合わせ全 80 台の SD からなる TALE-SD アレイ (有効面積 21 km^2) が完成した。2019 年 9 月にデータ収集条件の変更以来安定稼働を継続している (図 3 (左))。

2018 年 9 月に TALE 実験 FD および SD アレイのデータ収集系を変更して、TALE 実験 FD と SD アレイをハイブリッド検出器として統合した。これ以降、定常観測を継続している (図 3 (右))。

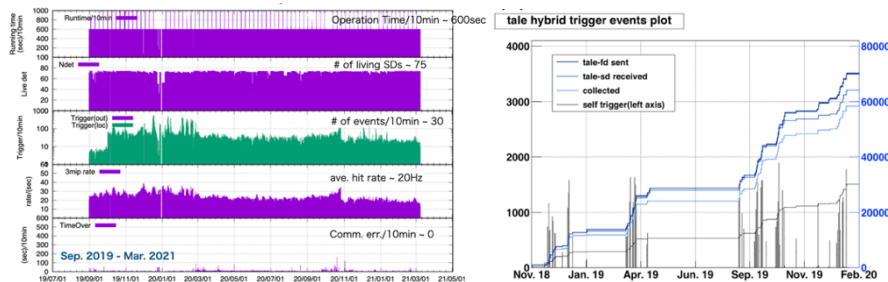


図 3 : (左) TALE 実験 SD アレイの安定稼働状況。平均台数 75 台、イベントレート 0.05Hz で安定稼働している。(右) TALE 実験ハイブリッド事象の増加。2019 年末に 70,000 事象に到達した。2020 年末に観測再開している。

(2) 宇宙線エネルギースペクトル、化学組成 (FD 単眼観測によるデータの解析結果)

TALE-FD 単体による単眼観測 22 ヶ月分のデータから得られた宇宙線エネルギースペクトルを 2018 年に発表した (図 4 (a))。大気チェレンコフ光の影響を積極的に取り入れた空気シャワー画像フィッティング法の開発に成功したことで、エネルギーしきい値 $10^{15.3}$ eV を達成した。 $10^{15.5}$ eV での折れ曲り構造「knee」、 $10^{16.2}$ eV における「くぼみ」、 $10^{17.1}$ eV における「2nd knee」といった構造が見える。

さらに、TALE-FD 単体による単眼観測約 4 年分の観測結果を用いてシャワー最大発達深さのエネルギー変化を求め、このエネルギー領域の化学組成の解析結果を 2021 年に公表した (図 4 (b))。

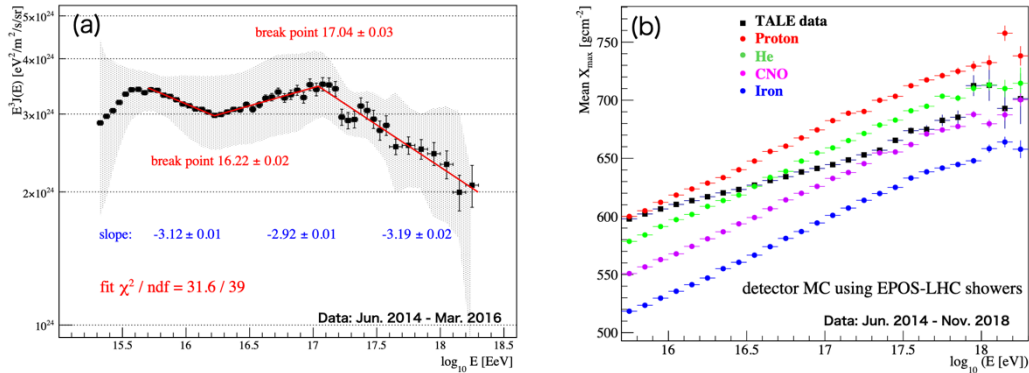


図 4 : TALE 実験 FD の単眼観測によるデータの解析結果。(a)は 22 ヶ月の観測から得られたエネルギースペクトル。(b)は約 4 年の観測から求められたシャワー最大発達深さ X_{max} の平均のエネルギーで、シミュレーションとの比較で化学組成を推定できる。

(3) 宇宙線エネルギースペクトル、化学組成 (FD+SD ハイブリッド観測によるデータの解析結果)

本研究の最大の目標である TALE-FD と SD アレイの組み合わせによるハイブリッド観測のための解析プログラム群の開発も進められ、これも 2020 年 3 月に完成した。これらのプログラム群による TALE ハイブリッド観測の性能を評価した結果が図 5 で、 $10^{16.5}$ eV 以上の宇宙線 (一次組成を陽子と仮定) に対して、 X_{max} 、エネルギーの決定精度はそれぞれ 29 g/cm²、10%である。一次鉄原子核の場合は 27 g/cm²、8%と、精度はやや良い。

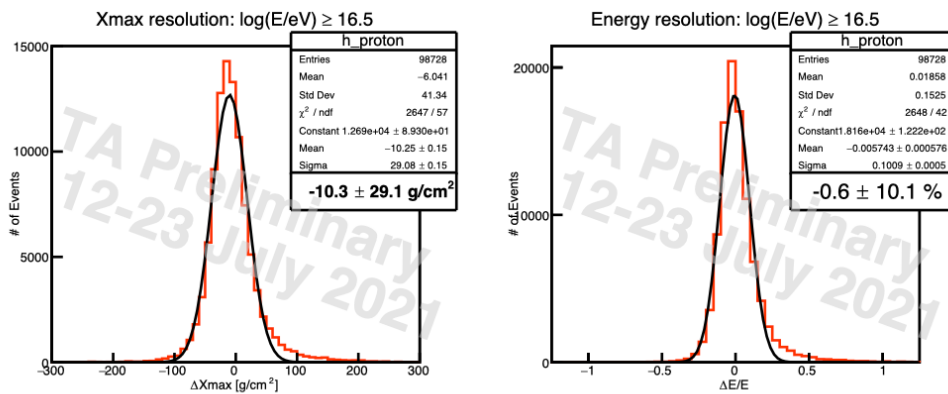


図 5 : TALE 実験ハイブリッド観測のシャワーパラメーター決定精度 ($10^{16.5}$ eV 以上の一次陽子宇宙線に対して)。(左)は X_{max} の決定精度で ± 29 g/cm²、(右)はエネルギーの決定精度で $\pm 10\%$ である。

約 2.5 年分の TALE 実験ハイブリッド観測データから得られた宇宙線エネルギースペクトル、平均 X_{max} についての予備的解析結果を 2021 年に発表した (図 6)。図 6 (a) のエネルギースペクトルは TALE 実験単眼データとも誤差の範囲で一致しており、折れ曲がり構造も見えている。図 6 (b) の平均 X_{max} は先行する HiRes-MIA 実験、TA 実験とも一致しており、特に高エネルギー側の TA 実験と 10^{18} eV でスムーズに接続している。またこのエネルギーでほぼ 100%陽子という組成であるのに対し、エネルギーの減少とともに組成が急速に重くなっていく様子が見て取れる。これは 10^{17} eV から 10^{18} eV の間での銀河系外起源から系内起源への宇宙線主成分の遷移を示唆している。

TALE 実験ハイブリッド観測はエネルギーしきい値 $10^{16.5}$ eV、 X_{max} 決定精度 ± 29 g/cm²、エネルギー決定精度 $\pm 10\%$ 、とほぼ当初の予定通りの性能を達成し、観測結果を公表できた。これほどの低エネルギーまで信頼性の高い FD+SD のハイブリッド観測でカバーした先行研究はなく、世界初の成果であり、今後、系統誤差の精査を進め、カロリメトリックなエネルギー決定、ミューオン成分に依らない化学組成決定、という信頼性の高いデータを宇宙線研究分野に提供する。また、FD 単体では $10^{15.5}$ eV 以下までエネルギーしきい値を下げることに成功しており、ハイブリッド感度をこのエネルギーまで下げる研究計画を進めている。

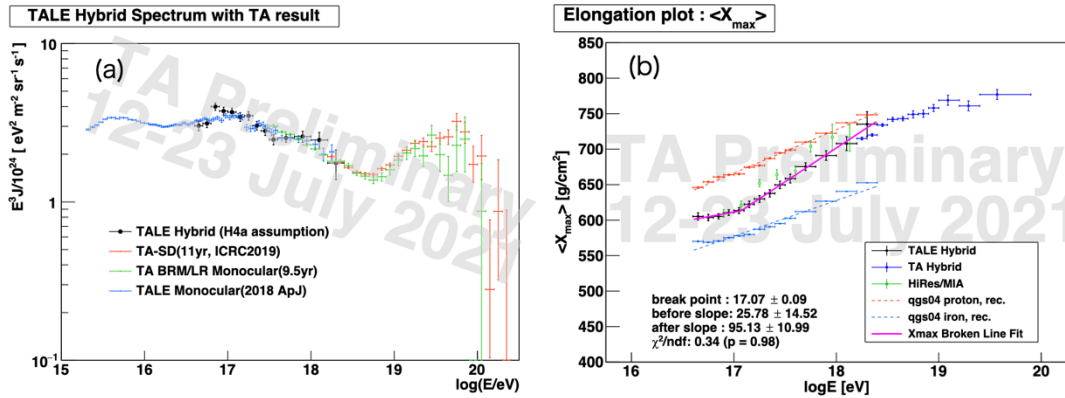


図6：TALE 実験ハイブリッド観測による約 2.5 年分のデータの解析から求めた宇宙線のエネルギースペクトル ((a)の黒丸) と、平均 X_{max} ((b)の黒丸)。他の実験結果 (実線やマーカーで表示) や、モンテカルロシミュレーションによる予想 (点線で表示) も比較のために示されている。2021 年 7 月の第 37 回宇宙線国際会議で公表したものである。

(4) TALE 実験 SD アレイ単体での宇宙線観測性能と観測結果

SD アレイは基本的に観測の duty factor が 100%であるので、FD 観測に比べて統計量が約 10 倍であるだけでなく、時間的に一様で等方的な観測が期待でき、宇宙線の到来方向異方性解析などの点でも有利である。このような利点を生かすため、TALE 実験 SD アレイ単体についてのデータ解析プログラムの開発も進めた。現在までにプログラムは完成し、系統誤差の評価を行っている。2021 年春の日本物理学会、2021 年 7 月の第 37 回宇宙線国際会議で解析プログラムの性能を公表した (図 7)。 10^{18} eV の一次宇宙線陽子の作る空気シャワーに対して、到来方向決定精度は 1.5° 、エネルギー決定精度は 18%である。データ解析とイベント選別 (天頂角 $< 45^\circ$ など) 後の aperture は 10^{18} eV 以上でほぼ一定となり、約 $20 \text{ km}^2 \text{sr}$ である。

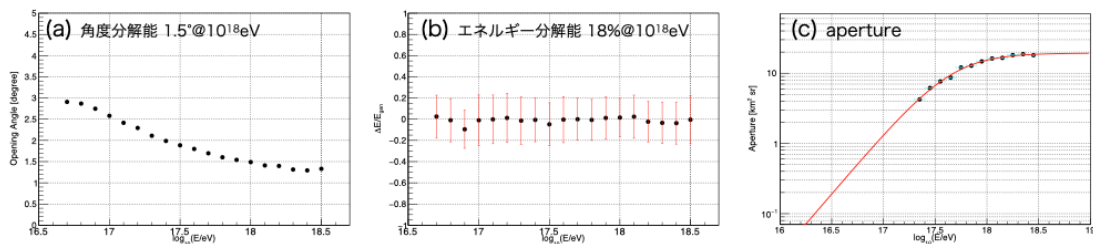


図7：TALE 実験 SD アレイのシャワーパラメーター決定精度 (一次陽子を仮定)。(a)は到来方向決定精度で、 10^{18} eV で 1.5° 、(b)はエネルギー決定精度で、 10^{18} eV で 18%。(c)はデータ解析とイベント選別 (天頂角 $< 45^\circ$ など) 後の aperture で、 10^{18} eV 以上でほぼ一定となり、約 $20 \text{ km}^2 \text{sr}$ である (赤実線は経験的な式によるフィッティング)。

実データ解析、モンテカルロシミュレーションとの比較も進めており、予備的な結果を第 37 回宇宙線国際会議で公表した、その一部を図 8 に示す。今後、系統誤差の評価を進めて、まずは高観測統計量に基づくエネルギースペクトルを公表したい。

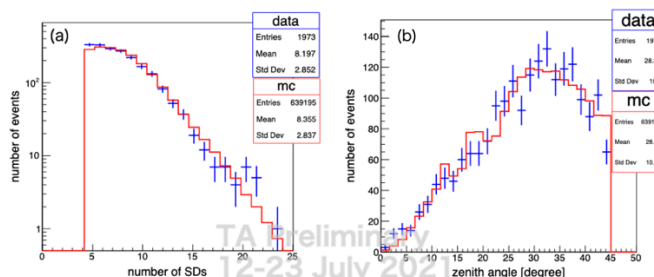


図8：TALE 実験 SD アレイによる 2019 年 10 月から 2020 年 1 月までの約 4 ヶ月分のデータの解析結果 (青マーカー)。(a)はエネルギー分布、(b)は天頂角分布である。シミュレーション結果 (赤線) も同時に示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 17件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 858
2. 論文標題 Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aabad7	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 98
2. 論文標題 Study of muons from ultrahigh energy cosmic ray air showers measured with the Telescope Array experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 22002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.022002	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 867
2. 論文標題 Testing a Reported Correlation between Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays and a Flux Pattern from nearby Starburst Galaxies using Telescope Array Data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Letter	6. 最初と最後の頁 L27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aaebf9	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 865
2. 論文標題 The Cosmic Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aada05	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 Y. Takahashi, R. Sahara, S. Konishi, T. Goto and S. Ogio for the Telescope Array collaboration	4. 巻 19
2. 論文標題 Development of the News DAQ System for the SD Array of TA×4 and TALE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.19.011038	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 S. Ogio for the Telescope Array collaboration	4. 巻 19
2. 論文標題 Telescope Array Low energy Extension: TALE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.19.011026	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 S. Udo, S. Ogio, M. Takeda, T. Nonaka, H. Sagawa, Y. Tsunesada, S. Kishigami, R. Sahara, Y. Takahashi and the Telescope Array Collaboration	4. 巻 1
2. 論文標題 The Telescope Array Low-energy Extension	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of International Cosmic Ray Conference 2017	6. 最初と最後の頁 544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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

1. 著者名 R.U. Abbasi, et al.	4. 巻 86
2. 論文標題 Search for EeV Protons of Galactic Origin	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2016.11.001	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 86
2. 論文標題 Search for EeV Protons of Galactic Origin	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2016.11.001	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 87
2. 論文標題 First upper limits on the radar cross section of cosmic-ray induced extensive air showers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2016.11.006	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 80
2. 論文標題 The energy spectrum of cosmic rays above $10^{17.2}$ eV measured by the fluorescence detectors of the Telescope Array experiment in seven years	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 131-140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2016.04.002	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 804
2. 論文標題 A northern sky survey for point-like sources of EeV neutral particles with the Telescope Array experiment	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0004-637X/804/2/133	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 R. U. Abbasi, et al.	4. 巻 92
2. 論文標題 Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array's Middle Drum detector and surface array in hybrid mode	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 32007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.92.032007	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 Ogio Shoichi for the Telescope Array Collaboration	4. 巻 1
2. 論文標題 Telescope Array Low energy Extension(TALE) Hybrid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of ICRC2019, PoS(ICRC2019)	6. 最初と最後の頁 375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0375	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

1. 著者名 AbuZayyad Tareq for the Telescope Array Collaboration	4. 巻 1
2. 論文標題 TALE FD Cosmic Rays Composition Measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of ICRC2019, PoS(ICRC2019)	6. 最初と最後の頁 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0169	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

1. 著者名 Abbasi R. U., et al.	4. 巻 865
2. 論文標題 The Cosmic Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aada05	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 Abbasi R. U., et al.	4. 巻 909
2. 論文標題 The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abdd30	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

〔学会発表〕 計34件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Shoichi Ogio for the Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Telescope Array Experiment
3. 学会等名 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interaction (ISVHECRI2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoichi Ogio for the Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Latest results and current status of the Telescope Array Experiment
3. 学会等名 Very High Energy Phenomena in the Universe 2018 (VHPU2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoichi Ogio for the Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TALE surface detector array and TALE hybrid system
3. 学会等名 Ultra High Energy Cosmic Rays 2018 (UHECR2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Fujiwara for Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Ultra-high-energy cosmic ray measurement, TALE experiment
3. 学会等名 International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田慧太郎 他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA実験320: モンテカルロシミュレーションによるTAとTALEによるFD複眼観測の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原亮太、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA実験325: TALE実験全体報告 4
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田慧太郎 他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA実験326: TALE実験大気蛍光望遠鏡を用いた単眼観測およびハイブリッド観測によるデータ解析
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Udo, S. Ogio, M. Takeda, T. Nonaka, H. Sagawa, Y. Tsunesada, S. Kishigami, R.Sahara, Y. Takahashi and the Telescope Array Collaboration
2. 発表標題 The Telescope Array Low-energy Extension
3. 学会等名 The 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤田慧太郎、荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA実験313 : TALE実験全体報告3
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐原涼介、荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA実験305 : TALE実験、TA×4実験用地表検出器アレイのための制御エレクトロニクスとデータ収集システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA実験288 : TALE実験地表検出器全体報告 (1)
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Shoichi Ogio for Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Telescope Array Low energy Extension: TALE
3. 学会等名 Ultra High Energy Cosmic Rays 2016 (UHECR2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuichi Takahashi, S. Ogio, for Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Development of the new DAQ system for the SD array of TA×4 and TALE
3. 学会等名 Ultra High Energy Cosmic Rays 2016 (UHECR2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐原涼介、荻尾彰一、有働慈治、野中敏幸、竹田成宏、佐川宏行、他
2. 発表標題 TA実験304 : TALE実験地表検出器全体報告 (2)
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Konishi, S. Ogio, for the Telescope Array Collaboration
2. 発表標題 Development of the TALE Surface Detector Array
3. 学会等名 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 西本義樹、荻尾彰一、野中敏幸、竹田成宏、佐川宏行、ほかTelescope Array Collaboration
2. 発表標題 TA実験274：TALE実験用地表検出器アレイのためのエレクトロニクスと検出器の開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会 2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 荻尾彰一
2. 発表標題 超高エネルギー宇宙線観測による宇宙線起源探査
3. 学会等名 日本物理学会 2015年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 高橋優一、荻尾彰一、有働慈治、野中敏幸、竹田成宏、佐川宏行、ほかTelescope Array Collaboration
2. 発表標題 TA実験279：TALE実験用地表検出器アレイのためのエレクトロニクスとTALE実験初期解析
3. 学会等名 日本物理学会 第71回年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Shoichi Ogio
2. 発表標題 Highlights from the Telescope Array experiment
3. 学会等名 20th Anniversary of the Foundation of the Pierre Auger Observatory（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoichi Ogio for the Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Highlights from the Telescope Array experiment
3. 学会等名 The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Fujita
2. 発表標題 Latest Results from Telescope Array Experiment on the Ultra High Energy Cosmic Rays
3. 学会等名 AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Fujita, R. Fujiwara, S. Ogio, and Y. Tanoue for the Telescope Array collaboration
2. 発表標題 MC study for TALE Hybrid detector
3. 学会等名 Topics on Astrophysics and Underground Physics 2019 (TAUP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoichi Ogio for the Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Telescope Array Low energy Extension (TALE) Hybrid
3. 学会等名 The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jihyun Kim
2. 発表標題 Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in the Magnetized Cosmic Web
3. 学会等名 The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rosa Mayta for the Telescope Array collaboration
2. 発表標題 Analysis of Air Shower Structure Measured with The Telescope Array Surface Detector
3. 学会等名 The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 355:TALE 実験全体報告 6
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田慧太郎、荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 356: TALE 実験ハイブリッド観測によるデータの解析
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤光希、荻尾彰一 他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 357: TALE-SD アレイで 測定された 2nd knee 領域宇宙線のエネルギースペクトル
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田慧太郎、荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA実験348: TALE実験大気蛍光望遠鏡を用いた単眼観測によるデータの解析
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 Rosa Mayta for Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 346: Time structure analysis of extensive air showers using the Telescope Array Data
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 佐藤光希、荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 343: TALE-SD によるエネルギー決定精度の評価
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 田上裕太、荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 333:TALE 実験全体報告 5
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jihyun Kim for Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 338:Correlation analysis between TA UHECRs and filaments of galaxies connected to the Virgo cluster
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田慧太郎、荻尾彰一、他 Telescope Array collaboration
2. 発表標題 TA 実験 330:TALE 実験ハイブリッド検出器の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>テレスコープアレイ実験 http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp</p> <p>Telescope Array experiment http://www.telescopearray.org</p> <p>大阪市立大学宇宙線物理学研究室 http://www.cosmicray-ocu.jp/</p>
--

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	竹田 成宏 (TAKEDA Masahiro) (40360581)	東京大学・宇宙線研究所・助教 (12601)	
研究分担者	有働 慈治 (UDO Shigeharu) (50506714)	神奈川大学・工学部・准教授 (32702)	
研究分担者	多米田 裕一郎 (TAMEDA Yuichiro) (90467019)	大阪電気通信大学・工学部・講師 (34412)	

	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
研究協力者	佐川 宏行 (SAGAWA Hiroyuki)	東京大学・宇宙線研究所・教授	
研究協力者	富田 孝幸 (TOMIDA Takayuki)	信州大学・工学部・助教	
研究協力者	野中 敏幸 (NONAKA Toshiyuki)	東京大学・宇宙線研究所・助教	
研究協力者	木戸 英治 (KIDO Eiji)	理化学研究所・長瀧天体ビッグバン研究室・研究員	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	奥田 剛司 (OKUDA Takeshi)	立命館大学・理工学部・助教	
研究協力者	大岡 秀行 (OHOKA Hideyuki)	東京大学・宇宙線研究所・技術職員	
研究協力者	榊 直人 (SAKAKI Naoto)	理化学研究所・戒崎計算宇宙物理研究室・協力研究員	
研究協力者	常定 芳基 (TSUNESADA Yoshiki)	大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授	
研究協力者	藤井 俊博 (FUJII Toshihiro)	京都大学・白眉センター・特定助教	
研究協力者	池田 大輔 (IKEDA Daisuke)	神奈川大学・工学部・助教	

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

アメリカ合衆国	University of Utah	Rutgers University		
大韓民国	Ewah Womans University	Hanyang Univeristy	Yonsei Univeristy	他2機関
ロシア連邦	ロシア科学アカデミー	Lomonosov State University		
ベルギー王国	Free University of Brussels			
チェコ	Czech Academy of Sciences			
スロベニア	University of Nova Gorica			