

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800128

研究課題名(和文) 極高エネルギーアンクル領域の宇宙線強度非等方性の研究

研究課題名(英文) Study of Cosmic-Ray Anisotropy in the Ultra-High-Energy Ankle Region

## 研究代表者

川田 和正 (Kawata, Kazumasa)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：10401291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球に到来する宇宙線の最高エネルギー(100EeV=100エクサ電子ボルト)は人類が粒子加速器で生成できる陽子の約1000万倍に達し、その起源は現代物理学の謎の一つである。本研究では、望遠鏡アレイ実験が観測する約1EeV以上の宇宙線データを用いて、宇宙線が過剰に多い/少ない方向(宇宙線の異方性)を探索した。その結果、1EeV領域では有意な宇宙線の異方性は観測できなかったが、解析条件の緩和及び最適化により、北天領域の観測においてはこれまでで最も高い感度で探索した。また、57EeV以上では、おおぐま座銀河団の近くに最高エネルギー宇宙線が過剰に到来するホットスポットの兆候を捉えた。

研究成果の概要(英文)：The highest-energy cosmic rays (100EeV =100 exa-electron volt) observed at the earth have energy of 10 million times larger than that of protons produced in any terrestrial particle accelerators. The origin of the highest-energy cosmic rays is one of mystery in the modern physics. In this research, we searched for cosmic-ray excess / deficit (cosmic-ray anisotropy) using the data above 1 EeV collected by the Telescope Array experiment. As a result, we found no significant cosmic ray anisotropy around 1 EeV. However, this observation achieved the best sensitivity in the northern sky survey. In the energy region above 57 EeV, we found an indication of the cosmic-ray excess, which is called "hotspot", in the vicinity of the Ursa Major galaxy cluster.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 極高エネルギー宇宙線 宇宙線異方性

### 1. 研究開始当初の背景

地球に到来する宇宙線のエネルギーは約 11 桁に亘る広い領域に及び、その最高エネルギーは  $10^{20}\text{eV}$  に達し、どこからやって来て、どのようにエネルギーを獲得するのかは謎である。宇宙線の頻度はエネルギーが高くなると指数関数的に減少し、エネルギースペクトルにはいくつかの構造が見られる。最高エネルギー領域の宇宙線が陽子で、その源が宇宙論的な距離のとき、陽子は途中で宇宙を満たす 2.7K 光子と衝突してパイオン生成するため、約  $5 \times 10^{19}\text{eV}$  でスペクトルは急激な折れ曲がりを示す(GZK カットオフ)。そして、約  $4 \times 10^{18}\text{eV}$  近辺(アングル)でスペクトルが緩やかになるのは銀河系外起源宇宙線の割合が増えるためと考えられている。すなわち、アングル領域( $10^{18} \sim 10^{19}\text{eV}$ )は宇宙線成分の銀河系内起源から系外起源への遷移領域であり、宇宙線強度の非等方性や化学組成(陽子/鉄)に大きな変化が期待できる。

TA 地表アレイは北半球で最大の観測面積を持ち、北天における宇宙線強度の非等方性の測定では世界最高感度のポテンシャルを有するが、解析や検出器の配置が  $10^{19}\text{eV}$  以上で最適化されており、アングル領域のエネルギーを持つ宇宙線を効率よく解析するためには大きな改善の余地がある。

### 2. 研究の目的

テレスコープアレイは  $10^{18}\text{eV}$  以上の極高エネルギー宇宙線(UHECR)の起源を解明するため、米国ユタ州の砂漠地帯に設置され、2008年に本格的に観測を開始した。TAの地表アレイは北半球最大の観測面積(700km<sup>2</sup>)を持つが、UHECRの頻度が極端に少ないため、このような巨大装置でも大きな統計量の解析は容易でない。本研究では、アングルと呼ばれるエネルギー領域( $10^{18} \sim 10^{19}\text{eV}$ )の宇宙線強度の非等方性を、データ解析の最適化とアレイの高密度化検出器の開発の両面から大幅に向上させ、十分な統計精度で宇宙線非等方性を測定し、UHECRの起源の謎に迫る。

### 3. 研究の方法

TAはUHECRのエネルギースペクトルの精密測定を主目的にしているため、エネルギー分解能の向上に特化した解析が行われてきた。従って、 $10^{19}\text{eV}$ 以下のアングル領域の宇宙線が作る小さな空気シャワーは、良いエネルギー分解能が期待できないため、解析の初期段階でほとんどが捨てられてしまっている。また、到来方向決定の解析においても  $10^{19}\text{eV}$ 以上の大きな空気シャワーの形状に最適化されている。本研究の目的は大きな角度スケールの宇宙線非等方性を測定することであり、角度分解能やエネルギー分解能をある程度犠牲にしても、宇宙線検出効率の向上に重点を置き統計精度を上げることが先決である。本計画では、この観点から  $10^{19}\text{eV}$ 以下の小さな空気シャワーに最適化した解析方法を開

発し、宇宙線の統計量を 10 倍以上に向上させる。さらに、アングル領域の高感度化のための高密度化検出器(TALE計画)のR&Dを行い、アレイの有効面積を増やすことを試みる。

### 4. 研究成果

#### (1) データ解析方法の最適化

本課題では、まず、地表アレイで得られた  $1\text{EeV}$  程度の比較的低いエネルギーの空気シャワーの解析方法の最適化を行った。解析条件の緩和と最適化により、精度を十分に確保しつつ、抽出可能な宇宙線のイベント数を従来の約 10 倍にすることに成功した(図1)。また、空気シャワー構造関数の最適化により、宇宙線の到来方向の決定精度を約 20%向上させた。さらに、この最適化に伴い宇宙線エネルギーを推定するための関数の再定義を行った。

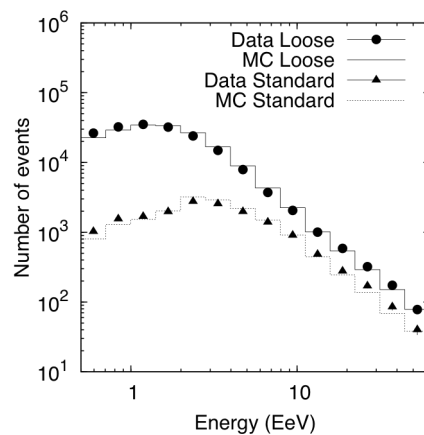


図1 TA実験データの解析後の宇宙線エネルギー分布。▲：従来の解析。●：当該研究による解析。1EeV領域で当該研究の解析は、従来解析の約10倍の統計量が得られている。

#### (2) 1EeV領域の宇宙線大規模異方性の探査

山梨県明野村で稼働していたAGASA(+Akeno 20km<sup>2</sup>アレイ)実験は、 $10^{18}\text{eV} \sim 10^{18.4}\text{eV}$ 領域において宇宙線強度の非等方性を観測した。図2(a)はそのAGASAの結果から期待されるTA実験での予想図である。これによると、銀河中心の北側方向(図2(a)のG.C.付近)と白鳥座付近(図2(a)の左上辺り)に宇宙線過剰が見られる。また銀河中心と反対の方向(図2(a)のanti G.C.付近)では、宇宙線の欠損が見られる。これらの非等方性の角度スケールは  $10^\circ$  以上で、UHECRの起源として当時注目された。しかし、近年に南半球から観測するAUGER実験は銀河中心(G.C.)付近にはAGASAの観測したような宇宙線過剰はなかったと報告した。このような状況の中、北半球で最大の観測面積を持つTA(有効面積はAGASAの7倍)によりこれらの結果を再検証することは極めて重要である。

2008年5月から2012年10月までの4.4年間にTA地表アレイで得られたデータを、AGASAとほぼ同様の条件で解析を行った。エ

エネルギー領域は AGASA が異方性を主張した  $10^{18.0}$  eV から  $10^{18.4}$  eV で、TA 実験の解析イベント数は約 8 万イベントに達する。AGASA (+Akeno 20km<sup>2</sup> アレイ) では約 14 年間の観測で、約 5 万イベントであり、TA の統計量は AGASA の約 1.6 倍となった。また、AGASA で行われた解析方法と同様に、各方向を中心に半径 20° の円の中に入る宇宙線事象数を数え、平均的な宇宙線強度からの超過/欠損

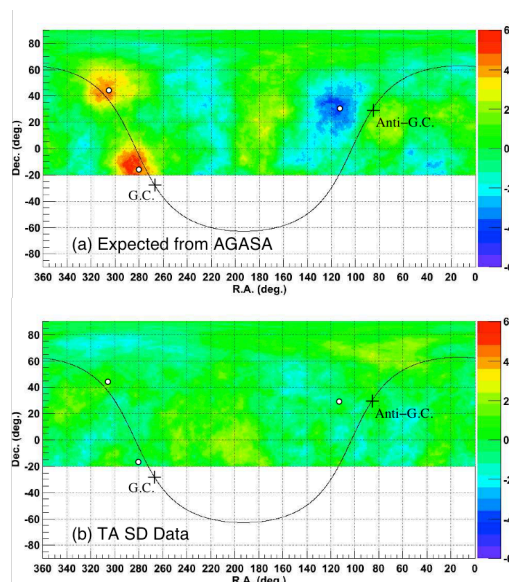


図 2  $10^{18.0}$  eV ~  $10^{18.4}$  eV の宇宙線異方性の有意度マップ (a) AGASA 実験の観測から期待される TA 実験での予想図。 (b) TA 実験の実観測の結果。TA 実験では AGASA が主張する宇宙線異方性は観測されなかった。

(異方性) を調べた。図 2(b) は、TA 実験でえられた宇宙線異方性の有意度マップである。TA 実験の観測では、AGASA が主張するような宇宙線異方性は観測されなかった。[雑誌論文⑥][学会発表⑤⑦]

### (3) 1EeV 領域の中性粒子放射天体の探査

1EeV 領域の宇宙線の起源は銀河系内にあるのか銀河系外であるのか分かっていない。もし宇宙線が中性粒子である中性子やガンマ線であれば、磁場によって曲げられることなく、角度分解能程度の小さな広がり度で宇宙線が観測されることが期待される。過去に日本の Akeno 20km<sup>2</sup> Array と米国の Fly's Eye 実験が独立に Cygnus X-3 の方向から 3σ 程度の宇宙線の超過を報告している。

本課題では、TA 実験で得られたデータを用いて、1EeV 領域における中性粒子の放射天体の探索を行った。約 18 万イベントの宇宙線を解析した結果、北天領域に有意な信号は観測されなかったため、中性粒子の放射強度に対しての上限値を計算した。この上限値は北天領域の観測においては最も感度の高い結果で、Cygnus X-3 については過去に報告された放射強度より 10 倍低い上限値を得た。[雑誌論文①⑤][学会発表⑥]

### (4) 57EeV 以上の宇宙線大規模異方性の発見

上記と同様の解析方法を用いると、比較的高いエネルギーである 57EeV 以上 (最高エネルギー領域) においても、宇宙線の統計量が約 1.4 倍増加することがわかった (図 3)。

最高エネルギー宇宙線は地球上で観測される最もエネルギーの高い宇宙粒子であり、その発生源とエネルギー獲得機構は謎に包

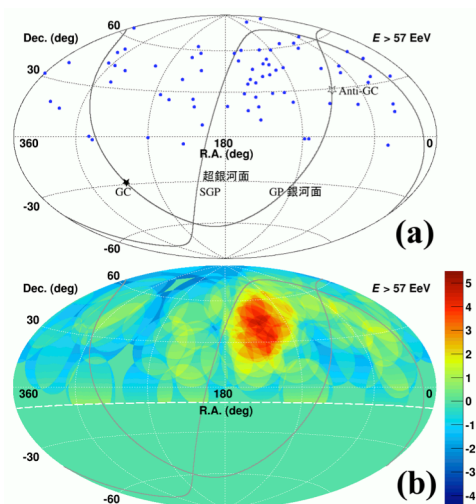


図 3 (a) 青点は  $5.7 \times 10^{19}$  EeV 以上で観測された宇宙線到来方向分布。 (b) 宇宙線の集中度の有意度カラーマップ。

まれている。2008 年から 2013 年までの 5 年間に 72 事象の最高エネルギー宇宙線 ( $5.7 \times 10^{19}$  eV 以上) を観測した。この方向を詳しく解析した結果、おおぐま座の方向に最高エネルギー宇宙線が集中する「ホットスポット」の兆候を捉えた (図 3)。ホットスポットの中心付近に明確な候補天体は発見されていないが、近くの方には「おおぐま座銀河団」が存在する。この結果は、最高エネルギー宇宙線の起源の解明への大きな手がかりになると期待されている。[雑誌論文③④][学会発表②④]

### (5) TALE 計画

現在、検出器を密に並べて低エネルギー側を高感度する TALE 計画が進行中であり、全体の 1/3 程度の 36 台の検出器の設置が完了し、同時に検出器開発も行われている。本課題では、データ取得エレクトロニクスが落雷等により制御不能に陥った際の自動復帰システムの構築とメンテナンスプロセスの簡素化を行った。これらは、将来、検出器台数が増加した際に重要となるであろう。[学会発表③]

## 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 7 件)

- ① R. U. Abbasi, K. Kawata et al. (The Telescope Array Collaboration), A Northern Sky Survey for Point-Like Sources of EeV Neutral Particles with the Telescope Array Experiment, The Astrophysical Journal, 査読有, 804, 133 (2015)
- ② R. U. Abbasi, K. Kawata et al. (The Telescope Array Collaboration), Study of Ultra-High Energy Cosmic Ray composition using Telescope Array's Middle Drum detector and surface array in hybrid mode, Astroparticle Physics, 査読有, 68, 27-44 (2015)
- ③ R. U. Abbasi, K. Kawata et al. (The Telescope Array Collaboration), Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment, The Astrophysical Journal, 査読有, 790, L21-L25 (2014)
- ④ 川田和正、佐川宏行、テレスコープアレイ実験で捉えた最高エネルギー宇宙線のホットスポット、ICRR ニュース、査読無、第 90 号、p1-5 (2014)
- ⑤ K. Kawata et al. (The Telescope Array Collaboration), Search for EeV Neutral Particles from the Point-like Sources with the Telescope Array Surface Detector, Proceedings of 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), 査読無, CR, 310 (2013)
- ⑥ K. Kawata et al. (The Telescope Array Collaboration), Search for the Large-Scale Cosmic-Ray Anisotropy at  $10^{18}$  eV with the Telescope Array Surface Detector, Proceedings of 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), 査読無, CR, 311 (2013)
- ⑦ T. Abu-Zayyad, K. Kawata et al. (The Telescope Array Collaboration), Correlations of the Arrival Directions of Ultra-High Energy Cosmic Rays with Extragalactic Objects as Observed by the Telescope Array Experiment, The Astrophysical Journal, 査読有, 777, 88(p1-8) (2013)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 川田和正、他 (テレスコープアレイ共同研究者)、TA 実験 253 : TA 実験と Auger 実験のデータを用いた極高エネルギー宇宙線クラスターの探索、日本物理学会

秋の分科会、佐賀大学 本庄キャンパス (佐賀県佐賀市)、2014 年 9 月 20 日

- ② K. Kawata, Highest-Energy Cosmic-Ray Hotspot Observed by the Telescope Array Experiment, 宇宙線研セミナー、招待講演、東京大学宇宙線研究所 (千葉県柏市)、2014 年 8 月 27 日
- ③ K. Kawata, (The Telescope Array Collaboration), Telescope Array Experiment: Recent Results and Future Plans, A Joint TeVPA/IDM conference 2014, 招待講演、アムステルダム (オランダ)、2014 年 6 月 26 日
- ④ 川田和正、他 (テレスコープアレイ共同研究者)、TA 実験 238 : 地表検出器アレイによる極高エネルギー宇宙線の大規模異方性の探索、日本物理学会 年会、東海大学 湘南キャンパス (神奈川県平塚市)、2014 年 3 月 30 日
- ⑤ 川田和正、他 (テレスコープアレイ共同研究者)、TA 実験 228 : 地表検出器アレイによる EeV 領域の宇宙線到来方向の大規模異方性の探索、日本物理学会 秋の分科会、高知大学 朝倉キャンパス (高知県高知市)、2013 年 9 月 23 日
- ⑥ K. Kawata, (The Telescope Array Collaboration), Search for EeV Neutral Particles from the Point-like Sources with the Telescope Array Surface Detector, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), リオデジャネイロ (ブラジル)、2013 年 7 月 3 日
- ⑦ K. Kawata, (The Telescope Array Collaboration), Search for the Large-Scale Cosmic-Ray Anisotropy at  $10^{18}$  eV with the Telescope Array Surface Detector, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), リオデジャネイロ (ブラジル)、2013 年 7 月 6 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

- ① テレスコープアレイ実験 公式ページ <http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp>
- ② Telescope Array Project (in English) <http://www.telescopearray.org>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

川田 和正 (KAWATA, Kazumasa)  
東京大学・宇宙線研究所・特任助教  
研究者番号 : 1 0 4 0 1 2 9 1

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし