

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 9日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654078

研究課題名（和文）

加速器ビームによる空気シャワーの電波エコー観測と超高エネルギー宇宙線観測への応用

研究課題名（英文）

Test of Radar Echo Detection using Electron Beam for Future Large Air Shower Observatory

研究代表者

池田 大輔（IKEDA DAISUKE）

東京大学・宇宙線研究所・特任研究員

研究者番号：60584258

研究成果の概要（和文）：

将来の大規模超高エネルギー宇宙線観測実験を見据え、これを構成する実験手法として電波を用いた空気シャワー観測、特に電波エコー法についての実証実験を行なった。本研究では米国ユタ州の Telescope Array 実験サイトに設置された小型電子線形加速器から大気中に打ち出す電子ビームを擬似空気シャワーとして使用し、観測手法を検証した。その結果、電波エコー信号は検出されなかったが、電子ビームから自発的に発生する電波信号の検出に成功した。

研究成果の概要（英文）：

We are carrying out an R&D project to search for radar echoes from cosmic ray induced extensive air showers. To test and develop this technique, we have used the Electron Light Source (ELS) electron beams at the Telescope Array site as artificial air showers. A radio transmitter and receivers have been constructed and placed them 140m from the accelerator beam to search for radar echoes from the trail of the electron beam. In September and December 2012, we have tried to detect radio signals from ELS electron beams of 40MeV, 10^9 electrons with two different beam durations. We have not found any radio echo signals, but we have observed a radio emission from the electron beam.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，宇宙線（実験）

キーワード：電波エコー観測，電子線形加速器，Telescope Array 実験，国際研究者交流（米国）

1. 研究開始当初の背景

これまで Telescope Array (TA) 実験、Auger 実験らにより 10^{20} eV を超える超高エネルギー宇宙線 (UHECR) が観測されている。また IceCube 実験による高エネルギーニュートリノの観測も始まっており、粒子線による天文学が始まろうとしている。しかしこのような膨大なエネルギーを持った宇宙線の生成場所、生成過程や宇宙空間の伝播については未だ解明されていない。

その理由の一つに観測事象の少なさがあ

る。地球に到来する宇宙線の数は、そのエネルギーの3乗程度で減少していく事が分かっており、これまでの観測では年間10事象程度しか観測されなかった。年間1000事象程度の観測能力があれば、UHECRの到来方向による生成源の発見に繋がるだけでなく、方向ごとのエネルギースペクトル及び粒子種という、起源の解明に対して非常に有用な情報が得られる。このためにはTA実験の100倍規模である、検出面積 10^5 km² 級の大規模検出器が必要である。

このような大規模検出器を構築する検出手法として、近年電波を用いた空気シャワー観測が注目されている。安価な検出器で昼夜、天候によらず観測でき、また観測手法によっては空気シャワーの縦方向発達の測定から UHECR の粒子種の測定も行なうことができる。そのため、粒子種が判別可能な大面積検出器を構築できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では将来の大規模実験を見据え、電波を用いた空気シャワー観測手法、特に電波エコー法に着目し、本手法の確立を目指す。

電波エコー法とは、ある地点から 50MHz 帯の電波を送信し、空気シャワーが通過した際に形成される電子柱からの反射波を多地点で検出する手法である (図 1)。受信強度は散乱に関与した電子数の 2 乗、すなわち宇宙線エネルギーの 2 乗に比例するため、特に UHECR の観測に適している。また反射条件を満たした地点でのみ受信が可能のため、設置場所が違う受信器は空気シャワーの別の深さを測定する。これは空気シャワーの縦方向発達の再構成が可能であり、電波エコー法は、発達の違いを利用した粒子種の弁別、カロリメトリックなエネルギー測定の実現し、観測効率 100%となる可能性を持った新しい宇宙線観測手法となる。

これまで電波エコー法による観測で宇宙線事象であると断定された観測例はない。本研究では電子線形加速器からの電子ビームを用いて、電波エコー法の基礎実験を行ない、手法の実証、及び電子柱の存続時間や電波散乱強度を明らかにする。

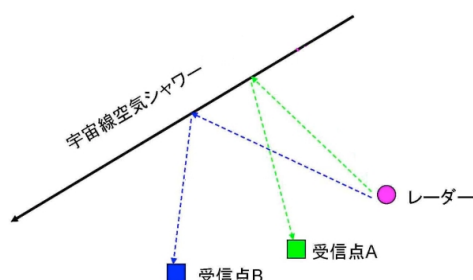


図 1) 電波エコー法による宇宙線観測

3. 研究の方法

本研究では、米国ユタ州 TA 実験サイトに設置された電子線形加速器 (Electron Light Source: ELS) からの電子ビームを擬似空気シャワーとして使用し、その周囲に電波送信器及び受信器を設置することで、電波エコー信号の検出を行なう。

ELS は TA 実験観測装置の絶対較正を行なうために設置された物で、エネルギー 40MeV

の電子を最大 10^9 個、0.5Hz で大気中に射出し、擬似空気シャワーを生成する。電子ビームの時間幅は可変であり、本実験では 1 μ s 幅の長パルス、20ns 幅の短パルスの 2 種類のビームを使用した。

電波送信器にはユタ大学が所有する中心周波数 54.1MHz、出力 2kW のジェネレータと八木アンテナを組み合わせた物 (TX1) を使用した。このジェネレータは米国において過去アナログ TV (2ch) として使用されていた物である。また小型で可搬性の高い送信器として、ファンクションジェネレータと増幅器、八木アンテナを用いた最大 100W 出力の送信器も使用した (TX2)。なお米国における電波送信許可については、ユタ大学 J.Belz 氏らによって取得済みである。

電波受信器は Log-periodic アンテナ、バンドパスフィルタ、増幅器、デジタル受信器 (Ettus 社 USRP) を組み合わせた物を開発した。これは将来の空気シャワー観測にも使用できる広帯域受信器であり、アンテナからの信号を 25MHz サンプリングし、直交検波を行なう。バンドパスフィルタは主なノイズ源である FM ラジオ波をカットするため、欲しい帯域に合わせたバンドパスフィルタ以外に FM カットフィルタを追加している。データは電子ビーム射出時に生成されるトリガー信号がある時のみ PC に記録される。また GPS による 1PPS と 10MHz の信号に同期することで複数台の受信器を同期して運用し、50ns の時間精度で測定を行なう。本実験では 2 つの受信器 (RX1, RX2) を制作し、偏波や受信周波数を変えて測定を行なった。

図 2 に TA 実験サイトにおける ELS, 受信器、送信器の場所を示す。受信器は ELS から 140m 離れた場所に設置した。大出力送信器は ELS から 21km 離れた場所、小型送信器は受信器と同様に、ELS から 140m 離れた場所に設置した。

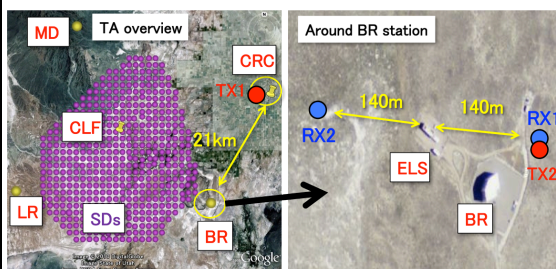


図 2) TA 実験サイト全体図

4. 研究成果

2012 年 7 月、12 月に現地にて 1 μ s 幅の長パルスビーム、20ns 幅の短パルスビームを用いた測定を行なった。1 μ s 幅のビームでは ELS トリガーから 5 μ s 後に ELS のサイクロトロン起源のノイズが観測された物の、電波エコー

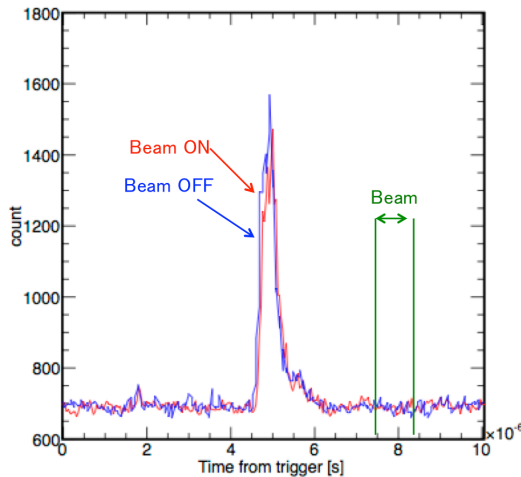


図 3) 長パルスビームによる測定結果

が期待される $8 \mu\text{s}$ 後に有意な信号は検出されなかった(図 3)。

一方 20ns 幅のビームを用いた測定では、信号が確認された(図 4)。ただしこの信号は送信器を停止しても検出されたため、電波エコー信号ではないことが分かった。電子ビームを射出している時のみ検出され、またこの信号の波高は電子ビームの出力電荷量と共に増加していくことから、これは電子ビームから自発的に放射される電波であると考えられる(図 5)。

このような信号はこれまで報告されたことが無く、大変興味深い物であったため、追加の詳細測定を行なった。その結果、受信アンテナを水平偏波にした場合、垂直偏波にした場合の半分の波高になること、受信周波数を大きくすると波高が激減することが分かった。

このような電波の生成メカニズムのモデルの一つとして、ビーム射出時にビーム内電子による電場が急激に変化することから発生する電波が考えられる。このモデルについて数値計算を行なった所、観測された波形を再現することが分かった。また、空気シャワーが地面に衝突した際にも同様の電波が生成される可能性があり、電波による空気シャワー観測の新しい手法となる可能性がある。

一方電波エコー信号に関しては、この信号に埋もれてしまい、詳細な測定を行なう事ができなかった。本研究で測定されたこの信号の特性、特に偏波を利用することで、この信号の影響を受けない測定を行なう事ができるため、今後そのような測定を行なうつもりである。

以上より、本研究では電波エコー信号は検出されなかった物の、想定していなかった電波生成メカニズムによる信号の検出に成功した。この信号は空気シャワー観測に応用で

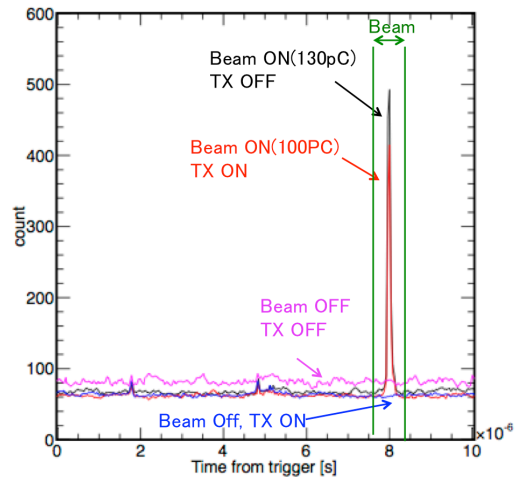


図 4) 短パルスビームによる測定結果

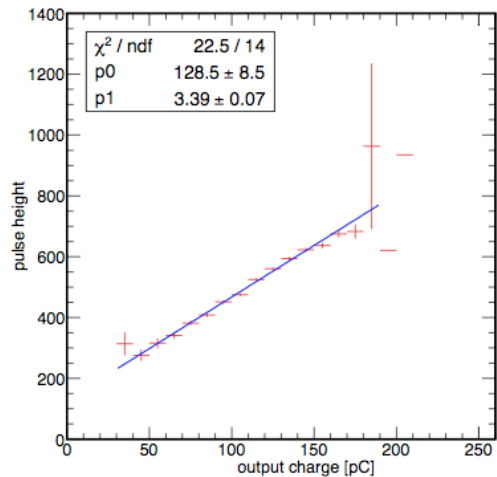


図 5) 信号の電子ビーム電荷量依存性

きる可能性があり、新たな観測手法として電波エコー測定と平行して観測を継続する予定である。また本研究において開発された広帯域受信器は空気シャワー観測にも使用できる物であるため、今後これを使用した空気シャワー観測実験を行ない、電波エコー法の確立と本手法を用いた大規模超高エネルギー宇宙線観測実験の構築を目指す。

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 9 件)

- (1) T-Abu-Zayyad・他 140 名 (研究代表者 28 番目), “The Cosmic Ray Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment”, ApJ 768 L1 (2013), 査読有, doi:10.1088/2041-8205/768/1/L1

(2) D.Ikeda, “Recent Results of Energy Spectrum and Mass Composition from Telescope Array Fluorescence Detector”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 409 012097 (2013), 査読有
doi:10.1088/1742-6596/409/1/012097

(3) T-Abu-Zayyad・他 140 名 (研究代表者 28 番目), “The Energy Spectrum of Telescope Array’ s Middle Drum Detector and the Direct Comparison to the High Resolution Fly’ s Eye Experiment”, *Astropart. Phys.* 39-40, 109 (2012), 査読有
doi:10.1016/j.astropartphys.2012.05.012

(4) T-Abu-Zayyad・他 140 名 (研究代表者 28 番目), “Search For Anisotropy of Ultra-High Energy Cosmic Rays with the Telescope Array Experiment”, *ApJ*, 752, 26 (2012), 査読有
doi:10.1088/0004-637X/757/1/26

(5) T-Abu-Zayyad・他 137 名 (研究代表者 29 番目), “The surface detector array of the Telescope Array experiment ” , *Nucl.Instr.And Meth. A*, 689, 87-97 (2012), 査読有
doi:10.1016/j.nima.2012.05.079

(6) H.Tokuno・他 137 名 (研究代表者 5 番目) “New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array experiment ” , *Nucl.Instr.And Meth. A*, 676, 54 (2012), 査読有
doi:10.1016/j.nima.2012.02.044

(7) T.Tomida・他 19 名 (研究代表者 10 番目), “The atmospheric transparency measured with a LIDAR system at the Telescope Array experiment ” , *Nucl.Instr.And Meth. A*654, 653 (2011), 査読有
doi:10.1016/j.nima.2011.07.012

(8) D.Ikeda, “Results from the Telescope Array” , *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 7, 257 (2011), 査読有
doi:10.5194/astra-7-257-2011

(9) D.Ikeda, “Energy measurement and spectrum by the Telescope Array” , *AIP Conf. Proc.* 1367, 54 (2011), 査読無
doi:10.1063/1.3628715

[学会発表] (計 16 件)

(1) 池田大輔, “最高エネルギー宇宙線の電波

的観測(10) 電子線形加速器を用いたエコー観測手法の実証実験 2”, 日本物理学会, 広島大学, 2013 年 3 月 26 日 - 2013 年 3 月 29 日

(2) 池田大輔, “最高エネルギー宇宙線の電波的観測(9) 電子線形加速器を用いたエコー観測手法の実証実験” , 日本物理学会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 10 日 - 2013 年 9 月 14 日

(3) D.Ikeda, “Recent Results of Energy Spectrum and Mass Composition from Telescope Array Fluorescence Detector”, 23rd European Cosmic Ray Symposium, Moscow (Russia), July 3, 2012 – July 7, 2012

(4) 池田大輔, “テレスコープアレイ実験 ~最高エネルギー宇宙線で探る 宇宙極高エネルギー現象~”, レーザー研利用者ワークショップ/レーザー研シンポジウム 2012, 大阪大学, 2012 年 4 月 17 日

(5) 池田大輔, “TA 実験 201 ハイブリッド観測”, 日本物理学会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日 - 2012 年 3 月 27 日

(6) 池田大輔, “電波による宇宙線観測の R&D”, 研究会「グローバルな宇宙天文観測」, 国立天文台, 2012 年 2 月 20 日

(7) D.Ikeda, “Hybrid analysis for the Telescope Array”, International Symposium on Future Directions in UHECR Physics, Geneva (Switzerland), Feb. 13, 2012 – Feb. 16, 2012

(8) D.Ikeda, “Hybrid Analysis for the Telescope Array”, International Symposium on Future Directions in UHECR physics, Geneva (Switzerland), Feb. 13, 2012 – Feb. 16, 2012

(9) J.Belz, “TARA: Forward-Scattered Radar Detection of UHECR at the Telescope Array”, International Symposium on Future Directions in UHECR Physics, Geneva (Switzerland), Feb. 13, 2012 – Feb. 16, 2012

(10) D.Ikeda, “Recent Results and Plan from Telescope Array”, TA-LHCf mini workshop: UHECR and hadron interaction in the LHC era, Kashiwa (Japan), Oct. 12, 2011

(11) 池田大輔, “TA 実験 192 超高エネルギー

一宇宙線 エネルギースペクトル”, 日本物理学会, 弘前大学, 2011年9月16日 – 2011年9月19日

(12) D.Ikeda, “Recent Results from Telescope Array”, 8th Air Fluorescence Workshop, Karlsruhe (Germany), Sep. 12, 2011 – Sep. 14, 2011

(13) D.Ikeda, “Recent Results from Telescope Array”, 12th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, Munich (Germany), Sep. 5, 2011 – Sep. 9, 2011

(14) D.Ikeda, “Ultra-high energy cosmic-ray spectra measured by the Telescope Array experiment from hybrid observations”, 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing (China), Aug. 11, 2011 – Aug. 18, 2011

(15) J.Belz, “Radar Detection of UHECR Air Showers at the Telescope Array”, 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing (China), Aug. 11, 2011 – Aug. 18, 2011

(16) H.Takai, “Forward Scattering Radar for Ultra High Energy Cosmic Rays”, 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing (China), Aug. 11, 2011 – Aug. 18, 2011

[その他]

ホームページ等

Telescope Array 実験

<http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

TARA: Telescope Array Radar

<http://www.telescopearray.org/tara/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 大輔 (IKEDA DAISUKE)

東京大学・宇宙線研究所・特任研究員

研究者番号: 60584258

(2) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

寺澤 敏夫 (TERASAWA TOSHIO)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号: 30134662

中村 卓司 (NAKAMURA TAKUJI)

国立極地研究所・教授

研究者番号: 40217857

佐川 宏行 (SAGAWA HIROYUKI)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号: 80178590

荻尾 彰一 (OGIO SYOICHI)

大阪市立大学・理学系研究科・准教授

研究者番号: 20242258