

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400296

研究課題名(和文) 将来の大規模検出器を見据えた電波による空気シャワー観測手法の実証試験

研究課題名(英文) Air shower detection using radio technique for the future huge ultra-high energy cosmic ray observatory

研究代表者

池田 大輔 (Ikeda, Daisuke)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：60584258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：将来の大規模宇宙線観測実験を見据え、電波による超高エネルギー宇宙線観測手法、特に電波エコー法と前実験で観測された電子ビームから発生した電波についての研究を行なった。電波エコー法についてはTA実験サイト中央に電波検出器を2基設置し、TA実験との宇宙線同時観測を行なったが空気シャワー由来の信号は観測されなかった。しかし理論的理解が進み、期待されていたほど電波強度が強くないことが分かった。一方電子ビーム由来の電波については甲南大、千葉大らの研究グループでも確認された。そこでこれらのグループと共同で研究を進め、50MHz-12GHzまでの広い帯域でこの電波を説明できるモデルの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：For the future huge ultra-high energy cosmic ray observatory, we studied the radio technique to detect the air shower. We picked up two methods, the bi-static radar echo technique and the observed radiation from the electron beam from the accelerator. For the radar echo, we have developed two radio detectors and installed at the center of the Telescope Array (TA) site. By the stable observation together with the TA detectors, we have not found any signals induced by air showers. We checked the theory of the radio echo, and found an additional component to reduce the cross section, which is the neutral collision with the atmospheric molecule. By this effect, the radio emission become weaker than we expected. The radio emission from the electron beam which we found previous measurement has been observed by the another three experiments. So we made the collaboration with them and carried out a theoretical model to explain the observed emission in wide frequency range, from 50MHz to 12GHz.

研究分野：超高エネルギー宇宙線物理

キーワード：超高エネルギー宇宙線 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

$10^{19}\text{eV}\sim 10^{20}\text{eV}$ という膨大なエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線 (UHECR) は現在 Telescope Array (TA) 実験、Auger 実験らによって観測されており、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、生成法、宇宙空間における伝搬課程は未だ解明されていない。

その理由の一つに観測事象数の不足がある。現在の測定では UHECR は年間 10 事象程度しか観測できないが、年間 1000 事象程度の観測能力があれば到来方向ごとのエネルギースペクトル及び粒子種という、起源を探る上で非常に有用な情報を得ることができる。このためには TA 実験の 100 倍規模となる 10^5km^2 の観測面積を持つ実験が必要となる。

現在運用されている UHECR を観測する検出器は、地表に検出器を並べ、UHECR によって生成された空気シャワー粒子を直接捉える地表検出器 (SD)、空気シャワーが大気を通過する際に発する大気蛍光を捉える大気蛍光望遠鏡 (FD) の 2 種類がある。SD でこのような大規模な実験を構成する場合、1 万台規模の検出器を地表に並べる必要があり、制作や運用という点で難しさがある。FD は少数台で広い範囲をカバーでき、粒子種の測定が可能であるという利点を持っているが、観測が月の無い夜に限定されることから事象数の確保が難しい。また、どちらの観測手法もこのような規模の実験を行なうには高価である。

このような状況で近年注目されているのが、電波を用いた空気シャワー観測手法である。安価な検出器で昼夜や天候によらず観測でき、一つの検出器が広い範囲をカバーできることから少数検出器で実験を構成することができる。また観測法によっては UHECR の粒子種を測定することができる可能性がある。現在、TA 実験や Auger 実験の次の世代の大規模実験を考案する時期にあり、このような電波を用いた観測手法の実現性や特性を理解する事は急務である。

2. 研究の目的

電波を用いた空気シャワー観測の手法は複数考案されているが、本研究では電波エコー法に着目した。これは外部から電波を送信し、空気シャワーが大気を通過した際に生成される低エネルギーの電子群による散乱を多地点で検出する手法である (図 1)。受信強度は散乱に寄与した電子数の自乗、すなわち宇宙線エネルギーの自乗に比例することが期待されており、特に UHECR の観測に適している。多地点観測の信号の時間差によって空気シャワーが到来した位置、方向を再構成し、受信した電波強度からエネルギーを推定する。多地点観測による信号の時間情報は空気シャワーの縦方向発達の情報を持つため、FD と同様に空気シャワーの最大発達深さの情報を用いた粒子種の弁別ができる可能性がある。電波エ

コー法は既存の観測手法である SD、FD 両検出手法の利点、すなわち SD の特徴である観測効率 100% と FD の特徴である粒子種の弁別が可能となる安価な検出手法となる可能性がある。

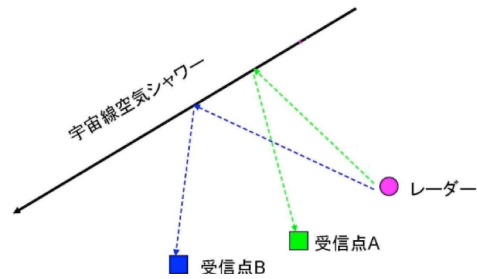


図 1: 電波エコー法による空気シャワー観測の模式図

一方、これまでの研究で行なった、TA 実験の小型線形加速器で生成した電子ビームを用いた実験において、電子ビーム由来の電波信号を検出した (図 2)。このような現象はこれまで報告されておらず、空気シャワー観測への応用が期待される。

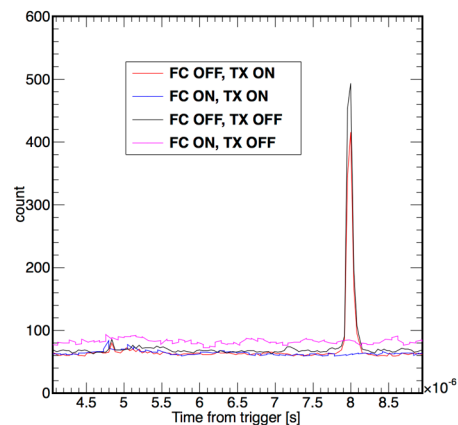


図 2: 前実験で得られた電波信号。図中の FC はビームダンプ、TX は電波送信機を示す。

そこで電波エコー法、及び前実験で観測された電波放射を用いた電波による空気シャワー観測手法についての原理検証実験を行い、両検出手法の実現性や特徴を理解する。これらの成果により、将来の大規模 UHECR 観測実験の観測手法となるかどうかを検証する。もしこれらの観測手法が確立された場合、これらの観測手法を用いた大規模観測実験を構築し、提案する。

3. 研究の方法

本研究では、上述の 2 種類の観測手法について、TA 実験の検出器と加速器を用いた原理検証実験を行なう。具体的には以下の 2 点により、これらの観測手法を検証する。

- (1) TA 実験の SD、FD との空気シャワー同時観測により、電波を用いた検出手法を実証し、電波信号と空気シャワーとの関係性（観測効率、エネルギーや到来方向の決定精度、最大発達深さとの関係）を明らかにする
- (2) TA 実験の小型電子線形加速器によって生成した擬似空気シャワーを用いた実験を再度行い、偏波や周波数による依存性を測定することでその発生原理を理解する。

TA 実験との空気シャワー同時観測では、TA 実験サイト中央にあるレーザー射出施設 (CLF) に水平、垂直偏波を観測可能なアンテナを 2 基設置した (図 3)。それぞれのアンテナは電波送信機方向とその逆方向に向けて設置されている。これは電波強度が大きい送信機の直接受信ノイズの大きい前方散乱と、電波強度が小さいがノイズの少ない後方散乱をそれぞれ観測するためである。送信電波の偏波は水平、垂直に変更可能であるが電波エコー信号はそれと同じ偏波となるため、水平、垂直偏波で観測した両信号を比較することで電波エコー信号を同定する。送信機は同サイトで行われている TARA 実験が運用している物で、送信周波数は 54.1MHz、最大出力は 40kW となっている。

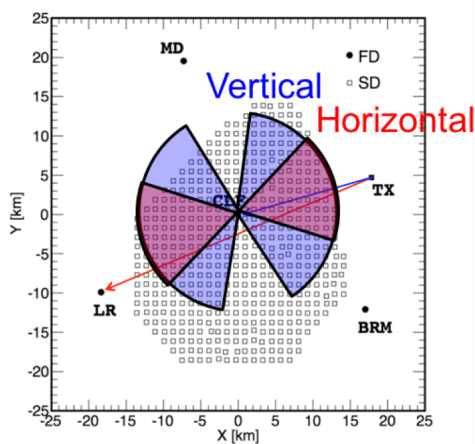


図 3 : TA 実験の全体図と設置した 2 基アンテナの位置、及び偏波ごとの視野方向を示す。

設置したアンテナの外観、及び受信システムの概要を図 4 に示す。アンテナには 50–500MHz までの感度を持つ、十字にマウントされた Log-periodic アンテナ (Creative Design CLP5130-1X) を選択し、これを地上 6m の高さに設置した。アンテナからの信号は 25MHz から 88MHz までを通すバンドパスフィルタ、25dB の低ノイズ信号増幅器を通り、デジタル受信機 (Ettus 社 USRP N200) で信号をデジタル化する。USRP では 54.1MHz で直行検波を行

なった後、25MHz、14bit でサンプリングを行なう。このシステムは TA 実験の SD アレイと動機しており、SD が空気シャワーを検出した場合にのみ信号が記録される。またそれぞれの信号に対して、GPS を用いて 50ns 精度で時間情報を付与する。2 基のアンテナそれぞれに水平、垂直信号があるため合計 4 系統の信号が存在するが、これらを記録する 4 つの USRP は共通の 10MHz クロックで運用されており、全ての検出器は同期している。本検出システムの感度は京都大学の METLAB において較正済である。このシステムは CLF を動かすための発電機を用いて稼働しているが、CLF は FD の観測時間、すなわち月の無い夜のみ稼働するため、本検出器もその時間のみ観測を行なう。本観測システムは全て自動化されており、CLF の運用に合わせて自動で観測を開始/終了する。

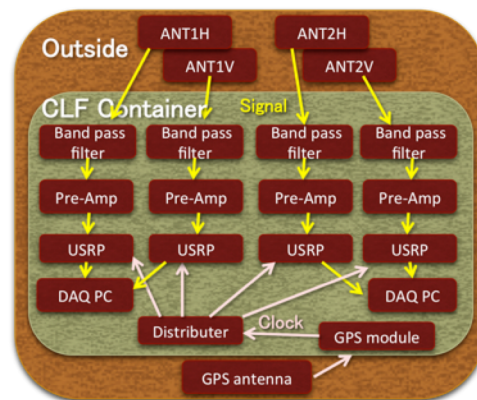


図 4 : TA 実験に設置したアンテナの外観 (上) とその受信システムの概要 (下)

本装置は 2014 年 7 月に建設が終了した。2014 年 8 月から試験観測を開始し、同年 10 月から現在まで安定して定常観測を継続している。

また、TA 実験の加速器 (ELS) からの電子ビームを用いた実験における装置の配置図を図 5 に示す。ELS から 140m 離れた地点に受信機を 2 基設置する。受信システムは CLF に設置した物とほぼ同じ物で構成しており、両実験の比較を容易にしている。本実験は 2014 年 11

月に行われた。

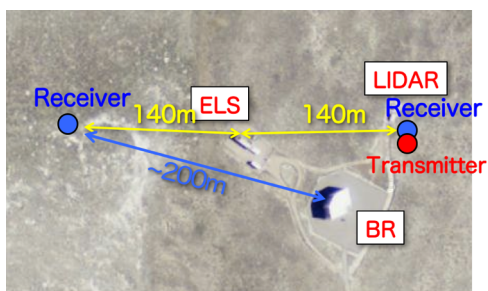


図 5 : TA 実験の加速器 (ELS) からの電子ビームを用いた実験時の装置配置図

4. 研究成果

TA 実験との空気シャワー同時観測実験において、電波エコー信号だと同定される優位な信号は検出されなかった。これは空気シャワー通過後に生成される電子群と送信電波の散乱断面積が想定よりもかなり小さい事を意味する。

そこで電波散乱の理論的研究を進めた所、これまで想定していなかった低エネルギー電子と大気分子との間の衝突により、実効的な散乱断面積が小さくなる事が分かった。この効果を加えると、現在の装置による観測は難しい。より高感度の観測によって電波エコーが検出される可能性はあるが、いずれにしても将来の大規模 UHECR 観測実験の検出手法となることは難しいという事が分かった。

一方、前実験で電子ビーム射出時に検出された電波信号は、本実験でも再び観測された。本装置の較正定数、及びアンテナシミュレータによって得られたアンテナゲインを用いて計算したところ、本実験で観測された電波強度は 50-66MHz 帯において、 $1.0 (+5.17/-0.56) \times 10^{-24} \text{ J/m}^2/\text{Hz}/\text{pC}^2$ であることが分かった。

また本実験が行われたのと同時期に、電子ビームを用いた複数の電波検出実験が行われた。これらはそれぞれ 300MHz (千葉大学)、2.4GHz (ブリュッセル大学)、12GHz (甲南大学) と全く違う周波数帯で観測している。50MHz 帯で行なれた本実験結果との比較により、電波信号の有無の検証とその周波数特性を理解する事が可能である。

測定の結果、受信周波数が大きく違うにもかかわらず全ての実験で同信号は検出された。この信号は他の実験にとってはノイズとなる信号であるため、電波発生を原理を理解する事は他の実験においても重要である。

そこで本研究を含めた 4 つのグループで共同研究を行い、検出された電波強度と周波数の関係を用いて電波放出モデルの構築及び検証を行なった。特に、電子ビームが射出される際の急激な電場の変化によって本電波が発

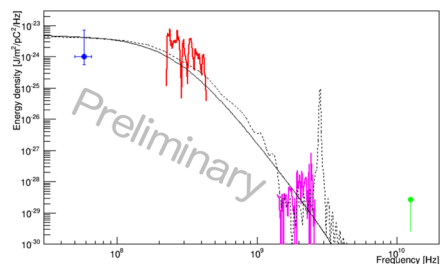


図 6 : 電子ビームから発生した電波の強度とその周波数。青が本観測結果であり、赤、紫、水色がそれぞれ他測定による観測結果である。黒の実線及び点線はモデルによって期待される電波強度を示す。

生する物であると考えるモデルを用いて各周波数で期待される電波強度を計算したところ、50MHz から 12GHz という非常に広い周波数帯に及ぶ 4 つの実験結果を良く表現できる事がわかった (図 6)。

空気シャワーを構成する粒子には正の電荷と負の電荷を持つ粒子があるが、正の電荷を持つ粒子は遅いもしくは大気中で早く消失する事から、空気シャワー全体としては負の電荷を持つことが分かっている。そのため、空気シャワーが地表に到達した際にも、このような急激な電場の変化による電波放射があると考えられる。この電波を捉える事で、空気シャワーを観測することができる可能性があり、新たな UHECR 観測手法としての応用が期待される。

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 11 件)

- ① I. S. Ohta・他 10 名 (研究代表者 4 番目), “Measurement of microwave radiation from electron beam in the atmosphere”, Nucl. Instr. Meth. A 810, 44-50 (2016), 査読有, doi:10.1016/j.nima.2015.11.113
- ② R. U. Abbasi・他 126 名 (研究代表者 25 番目), “The hybrid energy spectrum of Telescope Array’s Middle Drum Detector and surface array”, Astropart. Phys 68, 27-44 (2015), 査読有, doi:10.1016/j.astropartphys.2015.02.008
- ③ R. U. Abbasi・他 126 名 (研究代表者 25 番目), “Study of Ultra-High Energy Cosmic Ray composition using Telescope Array’s Middle Drum detector and surface array in hybrid

- mode”, *Astropart. Phys.* 64, 49-62 (2015), 査読有,
doi:10.1016/j.astropartphys.2014.11.004
- ④ R. U. Abbasi・他 124 名 (研究代表者 24 番目), “Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array’s Middle Drum detector and surface array in hybrid mode”, *Phys. Rev. D* 92, 03200 (2015), 査読有,
doi:10.1103/PhysRevD.92.032007
- ⑤ R. U. Abbasi・他 125 名 (研究代表者 25 番目), “A Northern Sky Survey for Point-Like Sources of EeV Neutral Particles with the Telescope Array Experiment”, *ApJ* 804, 133 (2015), 査読有,
doi:10.1088/0004-637X/804/2/133
- ⑥ T. Abu-Zayyad・他 144 名 (研究代表者 28 番目), “Energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays observed with the Telescope Array using a hybrid technique”, *Astropart. Phys.* 61, 93-101 (2015), 査読有,
doi:10.1016/j.astropartphys.2014.05.002
- ⑦ B. K. Shin・他 142 名 (研究代表者 31 番目), “Gain monitoring of telescope array photomultiplier cameras for the first 4 years of operation”, *Nucl. Instr. Meth. A*, 768 96-103 (2014), 査読有,
doi:dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.059
- ⑧ R. U. Abbasi・他 125 名 (研究代表者 25 番目), “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”, *ApJ:L21* (2014),
doi:10.1088/2041-8205/790/2/L21
- ⑨ T-Abu-Zayyad・他 141 名 (研究代表者 29 番目), “Upper limit on the flux of photons with energies above 10^{19} eV using Telescope Array surface detector”, *Phys. Rev. D* 88, 112005 (2013), 査読有,
doi:10.1103/PhysRevD.88.112005
- ⑩ T-Abu-Zayyad・他 145 名 (研究代表者 28 番目), “Correlations of the Arrival Directions of Ultra-high Energy Cosmic Rays with Extragalactic Objects as Observed by the Telescope Array Experiment”, *ApJ* 777 88 (2013), 査読有,
doi:10.1088/0004-637X/777/2/88
- ⑪ T-Abu-Zayyad・他 143 名 (研究代表者 28 番目), “The energy spectrum of ultra-high-energy cosmic rays measured by the Telescope Array FADC fluorescence detectors in monocular mode”, *Astropart. Phys.*, 48, 16-24 (2013), 査読有,
doi:10.1016/j.astropartphys.2013.06.007
- [学会発表] (計 14 件)
- ① D. Ikeda, “Radio detection for the ultra-high energy cosmic rays”, Next-Generation Techniques for Ultra-High Energy Astroparticle Physics, Chicago (US), Feb 29 - Mar 2, 2016
- ② D. Ikeda, “Summary of UHECR Composition Measurements by the Telescope Array Experiment”, TeV Particle Astrophysics 2015, Kashiwa (Japan), Oct 26-30, 2015
- ③ D. Ikeda, “Recent Results from Telescope Array”, 6th workshop on Air Shower Detection at High Altitude, Chengdu (China), Oct 18-20, 2015
- ④ 池田大輔, “TA 実験 266: 大気蛍光望遠鏡全体報告”, 日本物理学会、大阪市立大学、2015 年 9 月 25-28 日
- ⑤ D. Ikeda, “Test for the Radio Detection of the Extensive Air Shower using the Electron Beam in Telescope Array”, 34th International Cosmic Ray Conference, Hague (Netherlands), July 30 - Aug 6, 2015
- ⑥ D. Ikeda, “Energy Spectrum and Mass Composition of Ultra-High Energy Cosmic Rays Measured by the hybrid technique in Telescope Array”, 34th International Cosmic Ray Conference, Hague (Netherlands), July 30 - Aug 6, 2015
- ⑦ 池田大輔, “最高エネルギー宇宙線の電波的観測(11): TA 実験サイトにおける電波エコー観測手法の実証実験”, 日本物理学会、2015 年 3 月 21-24 日
- ⑧ 池田大輔, “TA 実験と MC シミュレーション”, 第 4 回空気シャワーモンテカルロ研究会、東京大学柏キャンパス、2015 年 3 月 19 日
- ⑨ 池田大輔, “最高エネルギー宇宙線の電波的観測の研究”, 平成 26 年度共同利用研究成果発表会、東京大学柏キャンパス、2014 年 12 月 12 日、13 日
- ⑩ 池田大輔, “レーダーによる宇宙線観測”, 第 8 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第 260 回生存圏シンポジウム、京都大学 2014 年 9 月 16-17 日
- ⑪ J. Belz, “Bistatic Radar Detection

of UHECR with TARA”, 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro (Brazil), July 2 - July 9, 2013

- ⑫ D. Ikeda, “Test of Radar Echo Detection using the Electron Beam from the ELS at the Telescope Array Site: A Test for Future Large Scale Extension of the Air Shower Observatory”, 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro (Brazil), July 2 - July 9, 2013
- ⑬ D. Ikeda, “Ultra-High Energy Cosmic Ray Spectrum Measured by the Hybrid Analysis in the Telescope Array”, 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro (Brazil), July 2 - July 9, 2013
- ⑭ I. Myers, “Searching for Cosmic Ray Radar Echos in TARA Data”, American Physical Society, Denver (US), Apr 13 - Apr 16, 2013

[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・特任助教

研究者番号:60584258

(2) 研究分担者

該当なし

(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・教授

研究者番号:20242258