

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 27 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340059

研究課題名(和文)電波望遠鏡による最高エネルギー宇宙線検出

研究課題名(英文)Detection of Ultra-High-Energy Cosmic Ray using radio telescopes

## 研究代表者

山本 常夏(yamamoto, tokonatsu)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：40454722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の最高エネルギー宇宙線観測方法の開発を目指し、空気シャワーから等方的に放出されるマイクロ波の測定を行った。1.2 m口径のパラボラアンテナを使い12GHzのマイクロ波を測定した。特にアメリカユタ州にある宇宙線観測所で電子ビームを大気中に放ち人工的に疑似空気シャワーを生成し、そこから放出されるマイクロ波の測定を行った。その結果等方的に放出されるマイクロ波検出されず、その強度の上限を求め論文にまとめた。またビーム射出口付近から広い放射角で発生するマイクロ波を検出した。このマイクロ波は急激な電場の変化から生じると考えられ、宇宙線の観測に応用することを含め検討する。

研究成果の概要(英文)：To develop a next-generation observation method of the ultra-high energy cosmic rays, we have tried to detect isotropic microwave radiation from air showers. A microwave detector based on 1.2 m parabola antennas with 12 GHz receivers have been developed. An electron light source (ELS) which is located at the Telescope Array Observatory in Utah, USA are used. To simulate extensive air showers, the ELS emits an electron beam into the atmosphere and the parabola antenna system is used to measure the microwave radiation from the electron beam. Based on this measurement, an upper limit on the intensity of a 12.5 GHz microwave radiation from air shower was estimated. In this measurement, a wide angle radiation around the beam exit was detected. This radiation can be explained by a rapid appearance of electric field. Application of this radiation to the cosmic-ray observation is under a study.

研究分野：宇宙線物理学

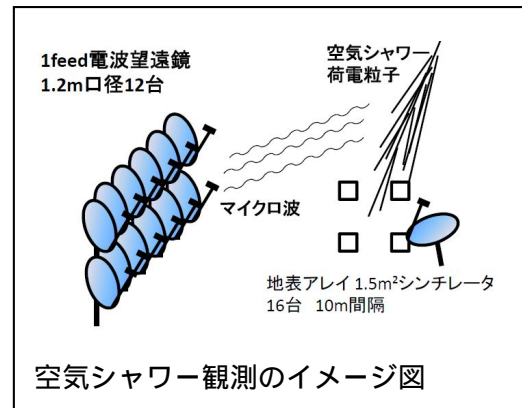
キーワード：最高エネルギー宇宙線 マイクロ波 宇宙観測 空気シャワー

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙で最大のエネルギーを持った粒子を最高エネルギー宇宙線と呼んでいる。これら  $10^{20}\text{eV}$  を超える極端に高いエネルギーを持った宇宙線は 1960 年代に Volcano Ranch や Haverah Park など  $10\text{ km}^2$  規模の空気シャワー検出器により検出された。最高エネルギー宇宙線は宇宙で起こっている爆発的な高エネルギー現象に伴い発生していると予想され、その起源を解明するために観測が続けられた。1990 年代にシンチレータ検出器を使った日本の AGASA や大気蛍光望遠鏡を利用した Fly's Eyes/HiRes など  $100\text{ km}^2$  規模の観測装置によりその存在が確認され、現在南米の Auger や北米で日本グループが開発している Telescope Array など数  $1000\text{ km}^2$  規模の観測所により観測が続けられている。これらの観測により宇宙線の流量 (Flux) は  $10^{20}\text{eV}$  以上のエネルギー領域で急激に減少していることが確認された。しかしその発生源の解明には至っていない。これらの結果を受けて、現状の観測所の 10 倍規模の観測装置を建設することが提案されているが、予算獲得には至っていない。

この最高エネルギー宇宙線の将来計画には 3 つの問題が内在している。1 つは検出器を大規模にするほど予算が肥大化していく上に、装置の維持やデータ収集が格段に難しくなる点である。 $100\text{ km}$  四方の領域に検出器を敷き詰め、その装置を維持することは想像以上に変な作業になる。2 つ目は既存の技術を使い検出器を大型にするだけでは科学者の育成が出来ず、予算獲得や実験グループの維持が難しい。3 つ目は検出器の系統誤差である。現在の高エネルギー宇宙線観測は 2 つの方法で行われている。1 つは地表に放射線検出器を並べ宇宙線が生成する空気シャワーの断面を測定する方法である。この方法は長期間安定した観測が可能になり統計精度が高くなるが、空気シャワーの一部のみの観測になるためエネルギー測定の不定性が大きくなる。もう 1 つは望遠鏡により大気蛍光を測定する方法である。月のない夜しか観測できないが、空気シャワー全体を測定するため原理的には系統誤差を抑えることができる。しかし、大気中の水蒸気・埃等に散乱されながら数  $10\text{ km}$  伝搬する光の絶対量を PMT で測定するためキャリブレーションが難しく、その測定は単純には行かない。こうした中、新たな検出方法の開発が進んでいる。特に空気シャワーから発生する電波をアンテナにより検出する手法の開発が盛んに行われている。携帯電話や衛星通信など通信技術の発達と普及により高性能の受信機が安価で利用できることを受け、これらの技術を活用し巨大な検出面積を実現することができるからである。本計画では空気シャワーが等方的に発するマイクロ波を検出する方法を開発する。このマイクロ波による空気シャワーの測定は、次世代の最高エネルギー宇宙

線観測方法として注目されている。この方法は原理的に従来の大気蛍光観測と同じように空気シャワー全体をカロリメトリックに測定でき、しかも昼夜を問わず一年中観測できる。つまり現在の観測で使われている地表アレイと大気蛍光法の両方の利点を併せ持つ夢の観測方法になる。本研究はこの観測方法を研究するために空気シャワーのマイクロ波等方放射の検出を目指している。



### 2. 研究の目的

本研究により空気シャワーから等方的に放射されるマイクロ波の測定を行った。空気シャワーは制動輻射やシンクロトロン放射、チェレンコフ放射などにより前方に電磁波を放射する。マイクロ波領域でも前方放射は宇宙線観測に応用されているが、地表に多数のアンテナを配置することになり、粒子検出器を使った方法と同様に広範囲の領域が必要になる。これに対して等方等方的に放射されるマイクロ波を検出できればリモート観測が可能になる。この観測方法を開発することが本研究の目的である。

空気シャワーの主成分は数  $10\text{ MeV}$  の電子や陽電子であり、これらの荷電粒子は大気中で様々な過程により電磁波を放出する。一部はチェレンコフ光やシンチレーション光など前方放射であり、これにはマイクロ波放射も含まれる。また大気分子を励起することにより等方的な紫外線を発する大気蛍光もある。これらの放射に使われる粒子のエネルギーは数%程度である。電子のエネルギーのうち大部分は電離により失われる。電離により生じた低エネルギー電子は大気中で散乱されながら制動輻射によりマイクロ波を放出しエネルギーを失う。このマイクロ波は大気分子制動輻射と呼ばれ、次世代の最高エネルギー宇宙線観測方法として提案されている。加速器を使った実験で空気シャワーからの放射が確認できたという実験結果が 2008 年に示され (P.Gorham et al., Phys.Rev.D, 2008, 78:032007)、これを受けて複数の実験が世界で行われている。本研究では衛星放送受信機を使ったマイクロ波検出器を開発し、空気シャワーからの大気分子制動輻射の検出を目指した。

### 3. 研究の方法

検出器として衛星放送アンテナ等の汎用品を応用した。1.2 m 口径の off-axis パラボラに 12.5 GHz の受信機を取り付けた BS 受信機を使った。受信機は縦横 2 偏光を測定できるようになっており、1 GHz へ波長変換する回路を備えている。波長変換回路は低ノイズ増幅器を兼ねている。12.5 GHz の高周波を信号線で運ぶとすぐに減衰する。このため扱いやすい低周波に変換してさらに増幅してから信号線に乗せるのが衛星放送受信システムの技術であり、高感度であると同時に量産により低価格を実現している。さらにこの信号を検波器により DC 変換して測定器に送る回路を開発した。この回路は R&K 社と共同で開発した。これらの検出器は京都大学の Microwave Energy Transmission Laboratory に持ち込んでキャリブレーションを行い、感度を確認した。

開発したマイクロ波検出器を使い 2 種類の測定を行なっている。1 つは加速器により加速した電子を大気中に放ち人工的に空気シャワーを生成し、そこから放出されるマイクロ波を測定する。もう一つはシンチレータを使った空気シャワーアレイとマイクロ波検出器を併設して、空気シャワーからのマイクロ波を測定する。

まず加速器を使った測定は、米国ユタ州にある Telescope Array 観測所にある電子加速器を使用した。このユタ州の砂漠地帯にある観測所には 40 MeV の電子ビームを大気中に放射する装置がある。この装置により人工的に空気シャワーを生成し、そこから放射される大気蛍光を測定することにより検出器のキャリブレーションを行っている。この装置を使い、空気シャワーから放出されるマイクロ波の測定を行った。測定では加速器からのノイズを避けるため、電子ビームの射出口から 85 m 離れたところに 1.2 m 口径パラボラを設置した。開発したマイクロ波検出器を使い電子ビームからの放射を測定したところマイクロ波は検出されなかった。ビームからの距離、角度、偏光方向など様々な設定で測定を行ったが電子ビームからのマイクロ波放射は確認されなかった。ただし、ビームの射出口から広い角度で放射されるマイクロ波が確認された。

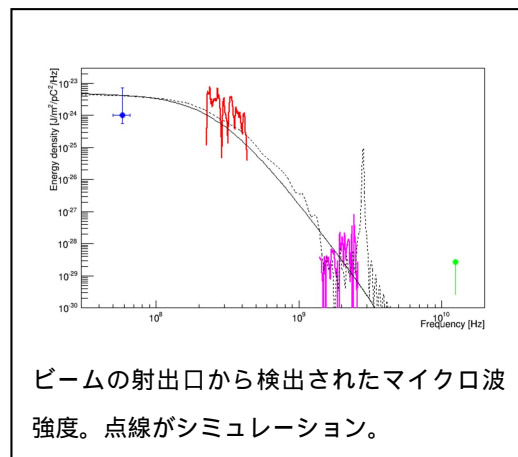
一方、シンチレータを使った空気シャワーアレイは甲南大学の校舎屋上に建設した。1 × 1 × 0.1 m<sup>3</sup> のプラスチックシンチレータを内部をタイベックで塗装したステンレスの箱に入れ 8 インチの光電子増倍管を付けたものを 16 台並べている。それぞれの検出器には実験室から高電圧ケーブルと信号ケーブルが敷かれ、複数の検出器に信号が入った時に信号の波形が保存されるようになっている。この空気シャワーアレイと同じ場所に 12 台のマイクロ波検出器を設置した。これらの装置を使い空気シャワーからのマイクロ波放射を多角的に測定している。

これらの研究を進めるにあたり、国内外の研究者とワークショップを行った。空気シャワーから放出されるマイクロ波を使った宇宙線観測は複数のグループで研究されており、これらのグループと情報を交換するため、1 年に 1 回程度ワークショップを企画した。

### 4. 研究成果

電子ビームを使った測定の結果、空気シャワーから等方的に放射されるマイクロ波は検出されなかった。先行研究とは測定している波長が違うため直接比較することはできないが、今回測定した波長領域で最高エネルギー宇宙線を測定することは相当困難であると言える。この結果からマイクロ波の放射強度の上限を求め論文として発表している。ドイツやアメリカのグループが 1~2GHz 領域の放射強度を測定しているが、我々と同様に検出には至っていない。

また今回の測定からビームの射出口からの放射が確認された。電子ビームが金属製の加速器内部から大気中に射出されるときに広い角度に放射されることが分かった。同時期に測定を行っていた他のグループとの結果から広い波長領域で放射されることも分かった。これは急激な電場の変化から起こると考えられる。この放射に関するシミュレーションをシカゴ大とブラジルの研究者が独立して行っており、彼らの結果とほぼ一致することが確かめられている。空気シャワーが地面に到達するときにも同様の電場の変化が起こるはずで、この放射が宇宙線観測に使えるか検討中である。



甲南大学の校舎屋上に 12 台の 1.2 m 口径パラボラを設置し空気シャワーからのマイクロ波放射を検出する実験でもマイクロ波放射は検出されなかった。ただし、神戸や大阪港が近く人工的なノイズが多いため観測は容易ではなかった。この装置に 16 台のシンチレータ検出器からなる空気シャワーアレイを加えた。この装置により空気シャワーとマイクロ波が同期して同時に測れるようになった。現在、この装置で空気シャワーからのマイクロ波放射を多角的にはかり、教育

にも役立てている。

この研究を推進するために毎年ワークショップを開催した。宇宙線、ガンマ線、ニュートリノ、電波など様々な観測を行っている研究者やアマチュア天文家が集まり情報を交換することができた。今後もこのワークショップを続ける予定である。

#### 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 5 件)

I.S.Ohta, H.Akimune, M.Fukushima, D.Ikeda, Y.Inome, J.N.Matthews, S.Ogio, H.Sagawa, T.Sako, TShibata, T. Measurement of microwave radiation from electron beam in the atmosphere, NIM A, 査読有、810 巻、2016、pp.44-50

T.Yamamoto, I.S.Ohta, Y.Inome, D.Ikeda, H.Sagawa, S.Ogio, T.Sako, T.Shibata, J.N.Matthews、Search for isotropic microwave radiation from electron beam in the atmosphere, Proc.of the 34th international Cosmic Ray Conference (2015)、査読無、2015、

T.Yamamoto et.al.、Study of Isotropic Radiation of Microwave from Air Showers toward Future Observation of Ultra-High-Energy Cosmic Ray、The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Technical Report、査読有、WPT2014-105、2015、pp61-64

T.Yamamoto, H.Akimune, M.Fukushima, J. N.Matthews, S.Ogio, I.S.Ohta, H.Sagawa, T.Sako, N.Sakurai, T.Shibata, M.Takeda, T.Terasawa、Three Experiments to Detect Microwave emission from Extensive Airshowers through Molecular Bremsstrahlung Radiation、Proc. of the 33th International Cosmic Ray Conference、査読無、2014

S.Ogio, T.Yamamoto, K.Kuramoto, T. Iijima, H.Akimune, T.Fujii, N.Sakurai, M. Fukushima, and H.Sagawa、Search for molecular bremsstrahlung radiation signals in Ku band with coincidental operations of radio telescopes with air shower detectors、Conf.Ser.23rd European Cosmic Ray Symposium、査読無、409 巻、2013、pp.012091-012094

[学会発表](計 13 件)

Daisuke Ikeda, Tokonatsu Yamamoto, Radio detection for the ultra-high energy cosmic rays, Workshop for Next-Generation Techniques for UHE Astroparticle Physics, 2016.02.29 - 2016.03.02, University of Chicago, IL, USA

山本常夏、大田泉、池田大輔、佐川宏行、福島正己、荻尾彰一、Romain Gaior, 間瀬圭一、吉田滋、石原安野、Matthew Relich, 桑原孝夫、上山俊佑、Bokkyun Shin, Gordon Thomson, Jon N. Matthews, 桑田達伸、Detection of radio emissions ranging over broad frequencies by appearances of electron beams、日本物理学会、2015 年 09 月 25 日~2015 年 09 月 28 日、大阪市立大学 杉本キャンパス (大阪市)

Tokonatsu Yamamoto、Signal Intensity of Sudden Birth at 12.5 GHz、Sudden Birth meeting(国際学会)、2015 年 09 月 14 日~2015 年 09 月 14 日、Chiba University (千葉県千葉市)

山本常夏、空気シャワーから放出されるマイクロ波検出に関する研究、通信学会 WPT 研究会、2015 年 03 月 24 日~2015 年 03 月 25 日、京都大学(京都府宇治市)

大田泉、山本常夏、空気シャワーから放射されるマイクロ波の探索 III、天文学会、2015 年 03 月 18 日~2015 年 03 月 21 日、大阪大学(大阪府豊中市)

山本常夏、Study of Molecular Bremsstrahlung Radiation from electron beams、Workshop for Observation of Radio Emission from Air-shower 2015、2015 年 03 月 08 日~2015 年 03 月 08 日、東京大学宇宙線研究所(千葉県柏市)

山本常夏、空気シャワーから放射されるマイクロ波の探索 9、物理学会、2014 年 09 月 18 日~2014 年 09 月 21 日、佐賀大学(佐賀県佐賀市)

山本常夏、電波望遠鏡による最高エネルギー宇宙線検出実験の進展、第 14 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ(招待講演)、2014 年 04 月 03 日~2014 年 04 月 04 日、茨城大学(茨城県水戸市)

大田泉、山本常夏、空気シャワーから放射されるマイクロ波の探索 II、日本天文学会 2014 春季年会、2014 年 03 月 20 日、国際基督教大学

荻尾彰一、空気シャワー電波的観測、空気シャワー電波観測ワークショップ 2014、2014 年 01 月 11 日、甲南大学

大田泉、山本常夏、高周波観測、空気シャワー電波観測ワークショップ 2014、2014年01月11日、甲南大学

山本常夏、広帯域測定計画、空気シャワー電波観測ワークショップ 2014、2014年01月11日、甲南大学

大田泉、山本常夏、空気シャワーから放射されるマイクロ波の探索、日本天文学会2013秋季年会、2013年09月10日、東北大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 件)

取得状況(計 件)

〔その他〕  
ホームページ等

甲南大学 空気シャワーアレイ  
<http://aplabconfluence.konan-u.ac.jp/pages/viewpage.action?pageId=2195504>

甲南電波望遠鏡アレイ  
<http://aplabconfluence.konan-u.ac.jp/pages/viewpage.action?pageId=1769544>

空気シャワー電波観測ワークショップ 2014  
<http://aplabConfluence.konan-u.ac.jp/x/BAAb>

Workshop for Observation of Radio Emission from Airshowers 2015  
<http://aplabConfluence.konan-u.ac.jp/x/NwEm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本常夏 (YAMAMOTO, Tokonatsu)  
甲南大学・理工学部・教授  
研究者番号：40454722

### (2) 研究分担者

荻尾彰一 (OGIO Shouiti)  
大阪市立大学・理学研究科・教授  
研究者番号：20242258

### (3) 研究分担者

秋宗秀俊 (AKIMUNE Hidetoshi)  
甲南大学・理工学部・教授  
研究者番号：60319829

### (4) 研究分担者

さこ 隆志 (SAKO Takashi)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師  
研究者番号：90324368

### (5) 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

### (6) 連携研究者

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

### (7) 連携研究者

竹田 正宏 (TAKEDA Masahiro)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号 40360581