

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月19日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21654036

研究課題名（和文） 大気中の荷電粒子カスケードシャワーからの分子制動放射の特性測定

研究課題名（英文） Study for the molecular bremsstrahlung from extensive air showers

研究代表者

萩尾 彰一（OGIO SHOICHI）

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20242258

研究成果の概要（和文）：高エネルギー宇宙線が大気中で作る高エネルギー粒子群（空気シャワー）からのマイクロ波帯電波放射（分子制動放射）を検出する、という全く新しい宇宙線観測法の基礎研究を行った。この方法は、稼働時間率 100%に加え、優れた空間分解能とカロリメトリックなエネルギー推定を実現できる可能性がある。大阪市立大学内宇宙線観測装置との連動観測を行い、有意なマイクロ波信号を検出されたが、その頻度は当初の見積もりより少なかった。また、米国ユタ州に設置された電子線形加速器ビームの同期観測も行ったが、こちらは有意な信号を検出できなかった。

研究成果の概要（英文）：This is a basic research for the molecular bremsstrahlung from extensive air showers induced by high energy cosmic rays. This technique can be expected to provide a new detection method for cosmic rays with a good angular and energy resolutions and also with 100% of running time efficiency. We developed two sets of radio telescopes in Osaka and in Utah, USA. In Osaka, we were coincidentally operating two Ku band radio telescopes with an air shower array, and detected radio signals coincidentally with air showers. But the observed event rate is smaller than a theoretical expectation. In Utah, we installed two telescopes that operated coincidentally with an electron linear accelerator. We did not detect any radio signals from accelerated electron beams.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	0	1,300,000
2010年度	1,300,000	0	1,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	150,000	3,250,000

研究分野：宇宙線物理学、高エネルギー天文学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：空気シャワー、分子制動放射、最高エネルギー宇宙線

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 日米韓露共同で建設し稼働を開始した Telescope Array (TA) 実験、南米の Auger 実験、南極の IceCube 実験などによって、最高エネルギー(>10<sup>20</sup>eV)宇宙線(UHECR)、

高エネルギー(>10<sup>16</sup>eV) ニュートリノ (HEν)など宇宙空間を直進する粒子の観測による天文学が創始されようとしている。しかし、年間事象数は1から10程度にとどまり統計量は十分ではない。十分な統計量、年間

1000 事象検出するためには、検出面積  $10^5 \text{ km}^2$  の観測装置が必要である。

(2) 氷、海水、岩塩、月表面をターゲットボリュームとする装置は HE $\nu$  専用である。UHE ガンマ線、UHECR も同時に観測できる、「大気」をターゲットとした装置こそ、期待される研究成果が多様で、豊富である。

(3) さらに、本格的な粒子線天文学を担う観測装置は、 $\nu$ 、 $\gamma$ 、陽子、原子核を区別するためシャワー縦方向発達を測定し、相互作用モデルに左右されないカロリメトリックなエネルギー推定が可能な検出器でなければならない。現在確立しているカロリメトリックな方法は、シャワー粒子による大気蛍光を検出する方法である。しかし、この方法では、観測時間が月のない夜間に限られることから duty factor $\sim$ 10%を超えることができないこと、晴天でなければならないので設置場所が極めて限定される、という大きな2つの欠点がある。

(4) 電波による空気シャワー観測の可能性検出器の巨大化を進めるために、今もっとも盛んに研究・開発が行なわれているのはシャワー粒子による電波放射を検出方法である。電波は荷電粒子や可視光に比べ、波長帯を選べば、直進性と長距離伝達性が良く、これらが天候に左右されない。

## 2. 研究の目的

(1) 全く新しいシャワー観測法の基礎研究を行う。その観測法とは、シャワー中の電子成分粒子からの分子制動放射(Molecular Bremsstrahlung Radiation, MBR)を、特にマイクロ波帯(Cバンド)で検出する方法である。この方法は現在までに提案されている電波検出法の中で唯一、空気シャワーの縦方向発達を測定できるほどの空間分解能を有する。大気をターゲットとし、カロリメトリックなエネルギー推定と粒子種判別を実現でき、duty factor=100%となる可能性を持った新しい空気シャワー検出法の基礎研究を行う。具体的には、

①加速器による高エネルギー電子線束からの MBR を測定し、MBR の波長スペクトル・エネルギー依存性・偏光・放射領域の空間的広がり・放射の減衰特性・大気の状態による放射効率の変化、を明らかにする。

②空気シャワーからの MBR を宇宙線観測装置と同時観測し、MBR のシャワー軸に対する角度依存性、一次エネルギー依存性、縦方向発達との関係を明らかにする。

(2) 本研究では、電子線形加速器ビーム、宇宙線空気シャワーからのマイクロ波放射

を観測する。特に空気シャワー観測装置と MBR 検出器の連動実験は世界で初めてである。

(3) 本研究の結果を踏まえ、全く新しい空気シャワー観測法を提案する。ここで提案する空気シャワーからの GHz 帯の電波を検出する方法の大きな特徴は、比較的小型の検出器であっても 1°程度の空間分解能が得られること、大気による減衰が無視できるほど小さいこと、という2点にある。十分な空間分解能を持った検出器を多数配置することによって、大気蛍光望遠鏡による観測と同様に、空気シャワーを「撮像」することが可能となる。しかも、天候・昼夜に関係なく観測可能であり、duty factor=100%のカロリメトリックな観測装置が実現できる。

(4) マイクロ波検出器は、すなわち通信衛星用アンテナであるため、検出器は軽量であり、メンテナンスも容易で、しかも量産品が安価に流通しているため、大気蛍光望遠鏡よりも大幅なコストダウンが期待できる。さらに、その検出器は、従来の粒子線観測装置のように砂漠や南極に建設される必要はなく、交通機関、通信、電力などの社会的インフラストラクチャーの整備された場所にも設置することも可能である。このことはそれらにかかるコストを下げることにつながり、より多くの検出器をより広範囲に設置することが可能になると期待できる。

## 3. 研究の方法

### (1) 観測装置

①BS 放送用 Ku バンドアンテナ(口径 45cm、 $\sim$ 11GHz) 2台と海外衛星放送用 C バンドアンテナ(口径 120cm、 $\sim$ 5GHz) 1台を利用して電波望遠鏡を製作した。

②パワーデテクタ(RF 信号強度測定器)として、チップ型 RF 検出器 LT5534 を利用したマイクロ波検出器を製作すると同時に、市販品である Mini Circuit 社製 ZX-47-60+も同時に利用した。

③出力 DC 信号を AD 変換して記録するための記録系としてデジタルマルチメーターを連続的に自動読み出しするシステム、デジタルオシロスコープによる外部信号同期型データ収集系、およびより高速なデータ収集レートに対応した PC カードとノート PC を利用したシステムを構築した。

④望遠鏡周囲に電波吸収材を配置することによってノイズ対策を施し、これによって雑音温度を約 10 度低下させることができた。

### (2) 観測

①太陽の日周運動による望遠鏡の視野の通過とその際の電波強度の変化から、望遠鏡の

方向精度・指向性を測定した。

②大阪市立大学理学部に設置されている空気シャワーアレイ (0.5m<sup>2</sup> シンチレーション検出器 18 台を 20m×40m の範囲にほぼ等間隔に設置) 内に口径 45cm の Ku バンド電波望遠鏡を 2 台設置し、空気シャワーを同時観測した。



図 1 : アンテナとその周囲の電波吸収材

③日本国内での観測と並行して、米国ユタ州のテレスコープアレイ実験サイト内の Black Rock Mesa 大気蛍光望遠鏡ステーションに大阪市立大学で使われていたものと同型の電波望遠鏡 2 台を設置し、大気蛍光望遠鏡のトリガーによる電波観測を実施した。このとき、電波望遠鏡の視野中には垂直射出電子加速器ビームが通るように望遠鏡を配置した。



図 2 : テレスコープアレイ実験大気蛍光望遠鏡の横に設置された 2 台の電波望遠鏡。その背景に電子線形加速器施設が写っている。

#### 4. 研究成果

##### (1) 観測による主な成果

①望遠鏡の指向性は口径と観測周波数から理論的に計算される値と一致し、Ku バンドアンテナでは約 4° であった。また環境ノイズ測定の結果、C バンドは背景電波強度が強く、太陽電波の測定も難しいことがわかった。

②2011 年 6 月 30 日から 2011 年 12 月 12 日まで行われた大阪市立大学キャンパス内での空気シャワー同時観測では、稼働時間は 111 日間に達し、114,265 個の空気シャワー事象を記録した。この結果、空気シャワー由来と考えられる極めて大きなパルス状信号を 1 例検出した。

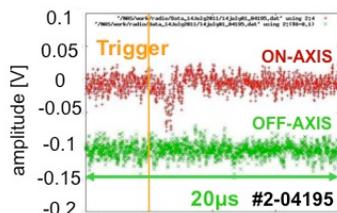


図 3 : 空気シャワーに同期した信号例

また、天頂方向に向けた望遠鏡 (On axis 望遠鏡) は、仰角 30° の Off axis 望遠鏡に比べ、空気シャワートリガー直後 (10 マイクロ秒以内) に S/N 比の大きなパルス信号が多く得られていることがわかった。

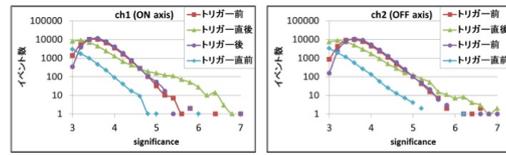


図 4 : パルス信号の有意度分布。On-axis (左図) の 5.5 から 6.5 が右図の Offaxis に比べ多いように見える。

③米国ユタ州での加速器ビームの測定は、2011 年 10 月 29 日、および 2012 年 3 月 13 日から 17 日に行われ、3 月の測定期間には電子加速器ビームの射出も実際におこなわれた。およそ 100,000 トリガー分の信号が記録された。電子加速器ビーム射出タイミングと電波波形の時間的な同期が最も正確に取れている (精度 25ns) 3 月 17 日のデータ解析からは、電子加速器ビームに同期したいかなる電波信号も検出されなかった。

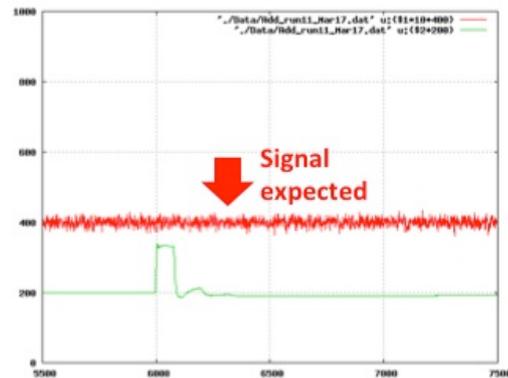


図 5 : 加速器ビームに同期して取得した電波信号の 533 事象分の重ね合わせ。有意な信号は見えない。

④以上の結果から、空気シャワーに由来したマイクロ波信号は検出されているが、その強度は当初の期待よりもずっと低そうであること、また加速器ビームを側方から観測した場合には信号が全く得られないことから、等方的な分子制動放射の強度は極めて低く (当初予測の 4 桁以下)、空気シャワーに同期して検出される信号はシャワーの前方に放射されるチェレンコフ光であろうと考えられる。

(2) 国内外におけるインパクト  
研究成果は、別項目に列挙したように国内外の研究集会で公表された。また、そのような研究集会を通じて、米国・シカゴ大学、ドイツ・カールスルーエ工科大学との密接な情報交換と電子加速器の共同観測に発展して、現

在も2週間に1度の割合で国際電話会議を行っており、電子加速器ビームの共同観測を中心に協力体制が維持されている。

#### 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3件)

- ① K. Kuramoto, S. Ogio et al., “Surveys of Microwave Emission from Air Showers”, Proc. of International Symposium on the Recent Progress of Ultra High Energy Cosmic Ray Observation (AIP Conf. Proc. 1367), 査読無, (2011) 228-231
- ② K. Kuramoto, S. Ogio et al., “Measurement of Molecular Bremsstrahlung Radiation from Extensive Air Showers using Satellite TV Antennas with a Scintillator Array”, Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Vol. 3, 査読無, (2011) 161-163
- ③ H. Tokuno, S. Ogio et al., “The Telescope Array Experiment: Status and Prospects”, AIP Conf. Proc., Vol.1238, TOURS Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII edited by H. Susa et al., 査読無, (2010) 365-368

[学会発表] (計11件)

- ① 倉本 和幸, 「空気シャワーから放射されるマイクロ波の探索V」, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月25日, 関西学院大学
- ② 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V」, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月25日, 関西学院大学
- ③ 荻尾 彰一, “Search for molecular bremsstrahlung radiation signals in Ku band with coincidental operations of radio telescopes with air shower detectors”, International Symposium on Future Directions in UHECR Physics, 2012年2月13-16日, ジュネーブ (スイス)
- ④ 荻尾 彰一, 「空気シャワーから放射されるマイクロ波の探索III」, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月16日
- ⑤ 飯島 隆志, 「空気シャワーから放射されるマイクロ波の探索IV」, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月16日
- ⑥ 荻尾 彰一, “Measurement of Molecular Bremsstrahlung Radiation from Extensive Air Showers using Satellite TV Antennas with a Scintillator Array”, 32<sup>nd</sup> International Cosmic Ray Conference, 2011年8月11-18日, 北京 (中華人民共和国)
- ⑦ 飯島 隆志, 「空気シャワーから放射される

マイクロ波の探索II」, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年3月26日, 新潟大学

- ⑧ 荻尾 彰一, “Future plans of Telescope Array”, International Symposium on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation, 2010年12月12日, 名古屋国際会議場
- ⑨ 倉本 和幸, “Surveys of Microwave Emission from Air Showers”, International Symposium on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation, 2010年12月10日, 名古屋国際会議場
- ⑩ 荻尾 彰一, 「テレスコープアレイ実験の将来計画」, 宇宙線研究者会議 将来計画シンポジウム, 2010年9月17日, 東京大学
- ⑪ 倉本 和幸, 「空気シャワー電波から放射されるマイクロ波放射の探索」, 日本物理学会 2010年秋季大会, 2010年9月12日, 九州工業大学

[その他]

ホームページ等

[http://alpha.sci.osaka-cu.ac.jp/ocu\\_ta](http://alpha.sci.osaka-cu.ac.jp/ocu_ta)

#### 6. 研究組織

##### (1) 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・准教授  
研究者番号: 20242258

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし

##### (4) 研究協力者

山本 常夏 (YAMAMOTO TOKONATSU)

甲南大学・理工学部・准教授

倉本 和幸 (KURAMOTO KAZUYUKI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・前期博士課程2年

飯島 隆志 (IIJIMA TAKASHI)

甲南大学・理工学部・修士課程2年

藤井 俊博 (FUJII TOSHIHIRO)

大阪市立大学・大学院理学研究科・後期博士課程2年

櫻井 信之 (SAKURAI NOBUYUKI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・特任助教