

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03667

研究課題名(和文) ロングバースト雷雲ガンマ線発生源の気象用ラジオゾンデ観測による解明

研究課題名(英文) Observation of long burst thundercloud gamma rays and their origin by a meteorological radiosonde

研究代表者

蓑輪 眞 (Minowa, Makoto)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・名誉教授

研究者番号：90126178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：電子・ガンマ線の識別可能な検出器を気象用ラジオゾンデに搭載して雷雲中に直接投入し、ロングバースト雷雲ガンマ線の起源と考えられる、10MeVオーダーの鉛直方向の大強度電子フラックスを直接検出することを目指した。千葉県柏市と石川県輪島市においてラジオゾンデを合計6回飛揚させ、高度ごとの荷電粒子の計数データを採取することに成功した。

しかし、いずれも十分強い雷雲の中心付近に投入することはできず、雷雲中の大強度電子フラックスを直接検出することはできなかった。これは不安定な気象現象を対象としているので仕方がないとはいえ、大変残念である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで未知であった雷雲中での静電電子加速現象と電子なだれによる増倍現象の存在を実証し、ロングバースト雷雲ガンマ線の起源を確定することができていれば、通常宇宙線以外に、これまで知られていなかった別種の強力な自然放射線が地上に振り注いでいる機構を明らかにでき、宇宙線物理学と地球物理学の両方に重要な知的メリットを与えるものであった。

しかし、ラジオゾンデを十分強い雷雲の中心付近に投入することはできず、大強度電子フラックスを直接検出することはできなかった。大変残念である。

研究成果の概要(英文)： A meteorological radiosonde equipped with a detector capable of discriminating electrons and gamma rays was directly injected into thunderclouds to directly detect the vertical high-intensity electron flux with energy of the order of 10 MeV, which is considered to be the origin of long-burst thundercloud gamma rays. A total of six radiosonde flights were made in Kashiwa City, Chiba Prefecture, and Wajima City, Ishikawa Prefecture, and charged particle counting data were successfully collected as a function of altitude.

However, none of them were able to directly detect the high-intensity electron flux in thunderclouds because they could not be deployed near the center of sufficiently strong thunderclouds. This is very regrettable, although it is unavoidable because we are targeting an unstable meteorological phenomenon.

研究分野：宇宙素粒子物理学

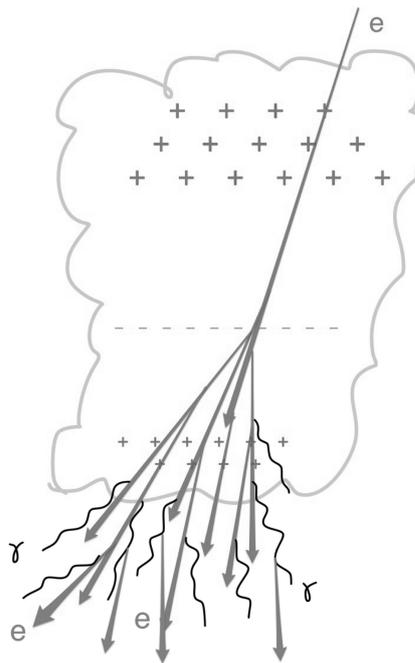
キーワード：雷 ガンマ線 ラジオゾンデ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高山の頂上付近や冬の日本海沿岸地方における雷雲発生下で地上に降り注ぎ、100秒程度以上持続するエネルギー10 MeVオーダーのいわゆるロングバースト雷雲ガンマ線の存在が近年明らかにされてきた。雷雲が持続的に下向きにガンマ線を放出しており、その移動により地上ではガンマ線のロングバーストとして観測されるという解釈が有力である[1]。

一方、これらのガンマ線は高度数百メートルに存在する下向きにほぼ単一エネルギーの電子が発生する制動放射によるものと考えて矛盾しないこともわかってきた[2]。



理論的には、Gurevichらにより Relativistic Runaway Electron Avalanche (RREA)モデルが提唱され[3]、ロングバーストガンマ線は主として二次宇宙線内の電子が雷雲中の電場で加速され、その電子が大気分子からknock-on電子をたたき出してそれが更に加速されてなだれ的に増倍した10 MeVオーダーの大強度電子の制動放射が引き起こすと解釈した(左図)。これは、いわば天空の静電加速器とも言えるものである。ロングバーストは雷放電とは無関係で、ある程度以上に発達した雷雲中の静電場から定常的に下向きに発生していることになる。また、ロングバーストの持続時間は、地上の観測点上空を雷雲の有効領域が通過する時間で決まると考えられる。

制動放射ガンマ線のエネルギーが最高10 MeVオーダーであることから、夏の雷雲のような雲底の高度が高い場合には空気による吸収のため地上ではガンマ線は観測されないが、雲底までの距離の近い高山や日本海沿岸地方などで発生する雲底の低い冬の雷雲では空気による吸収が少ないのでガンマ線が観測されることと符合する。

これまで他の研究者により、福島第一原子力発電所の事故に伴う環境調査のために放射能ゾンデと呼ばれる小型のガイガーカウンタを搭載した気象用ラジオゾンデ気球を飛揚した際に、雷雲中で計数率が上昇することが一例観測されている。ガイガーカウンターには粒子識別性能があまりないことを考慮すると、モデルの確実な検証には電子・ガンマ線の識別可能な観測が必須である。

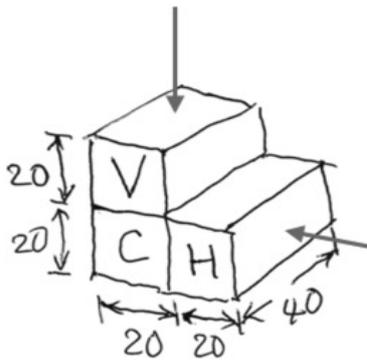
2. 研究の目的

以上の学術的背景を踏まえて、電子・ガンマ線の識別可能な検出器を雷雲中に直接投入して、そこに存在するであろう10 MeVオーダーの鉛直方向の大強度電子フラックスを直接検出することで、上記のRREAモデルの正当性を検証する。この研究では、これまで未知であった雷雲中での静電電子加速現象と電子なだれによる増倍現象の存在を実証し、ロングバースト雷雲ガンマ線の起源を確定することをめざす。

これまでの雷雲ガンマ線の観測的研究では、地上または高山に検出器を設置して、そのエネルギー、フラックス、粒子成分、持続時間等を調べるものであり、雷雲ガンマ線の発生源である雷雲そのものに電子・ガンマ線の識別可能な検出器を投入しようという試みは今回の研究が初めて

である。

3. 研究の方法



大量生産されている比較的安価な使い捨ての気象観測用ラジオゾンデに、独自開発の軽量(200g以下)の素粒子検出器を接続し、雷雲中に飛揚させてその中で電子・ガンマ線等のフラックスとエネルギー、進行の向きなどを測定する。

まず、20mm×20mm×20mmのプラスチックシンチレータにMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を接続したカウンタ3個を左図に示すように配置した検出器を開発した。これまでの地上での観測に基づくシミュレーションによれば、元になる雷雲中の下向き電子線のエネルギーが約17 MeVのほぼ単色で、フラックスが約 $2 \times 10^5 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ あれば観測データを再現できることがわかっている[2]ので、これをもとに検出器の寸法を決めた。それぞれのカウンタで最小電離荷電粒子を十分検出できるように閾値を設定して、カウンタVとカウンタCのcoincidenceおよびHとCのcoincidenceのそれぞれの毎秒の計数をラジオゾンデにより地上に送信する。荷電粒子が2個のカウンタを貫通していれば約8MeV以上の運動エネルギーを持つことがわかる。

MPPCの信号はマイクロコントローラによりcoincidence計数して1秒に1回シリアル通信によりラジオゾンデ本体に送られる。ラジオゾンデからは気象データやGPSによる位置・高度とともに単位時間あたりの2種の計数データが400 MHz帯の無線により1秒に1回地上に送信される。検出器と電子回路は発泡スチロール製の断熱容器に入れられており、マイクロコントローラで制御されたヒーター抵抗により内部の温度がある程度一定に保たれるようになっている。

鉛直方向に走行する大強度電子が存在すればVとCのcoincidence計数が増大し、水平方向の場合はHとCのcoincidence計数が増大するはずである。ガンマ線の場合は2つのプラスチックシンチレータで二重コンプトン散乱をおこせば計数されるので、両方のcoincidence計数が増大するはずであるが、電子の場合よりは計数率が低いはずである。一方、雷雲中の雷放電による電気雑音でカウンタが誤作動した場合は、やはり両方のcoincidenceが計数するが、放電に同期して散発的に起きると考えられる。こうして荷電粒子とガンマ線の識別が可能となった。

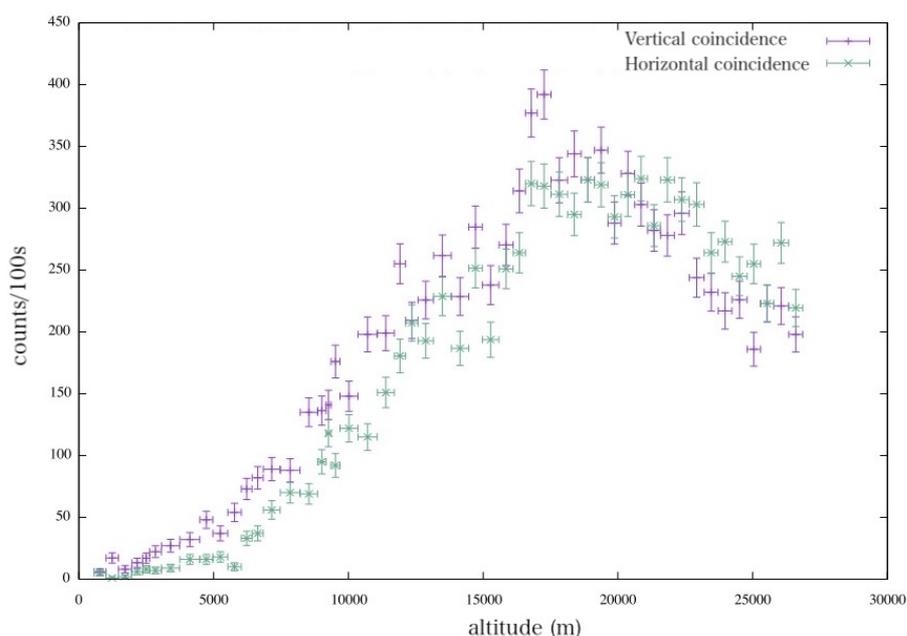
もし、雷雲中に大強度の荷電粒子の存在が確認されればそのフラックスを測定したいが、上記の検出器はプラスチックシンチレータの幾何学的アクセプタンスが単純ではないためにフラックスを知るには不適當である。そのために、別の荷電粒子検出器を開発した。この検出器は40mm×40mm×10mmのプラスチックシンチレータ2枚を80mmの間隔をおいて設置し立体角が精度良く決まるように設計されている。

これらの検出器を使って千葉県柏市の東京大学柏キャンパスの東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構近辺に雷雲が到来するのを待機して建物屋上よりラジオゾンデを飛揚させる。これまでの経験では、この地域を活動度の高い雷雲が通過する頻度は1年に2回程度と考えられる。

ラジオゾンデの飛揚にあたっては、電波法の定めに従って総務省より「気象援助局」という無線局の免許状を取得した。また、高層で十分な風速の西風が吹いていないとラジオゾンデ気球が成田空港と羽田空港の近辺の制限空域に落下する危険がある。そのため、国土交通省東京航空局に対して航空機の妨害にならないことを示す「自由気球の飛行通報書」を3ヶ月に一度提出する必要がある。

4. 研究成果

気象情報で千葉県柏市において高い発雷確率が予想されているときに狙って、現地で待機してラジオゾンデの飛揚タイミングを待った。研究期間中に合計31回の現地待機をしたが、多くの場合、実際には雷雲の活動度が十分ではなかった、あるいは雷雲が現地をはずれて通過した、または高層での風速・風向が条件を満たさなかったなどの理由によりラジオゾンデを飛揚させることはできなかった。それでも合計5回のラジオゾンデ飛揚を行ないデータを取得することに成功した。いずれも現地上空にある程度の雷活動があるときに観測したが、雷活動の中心部分に投入できなかったため、荷電粒子検出率の顕著な増大は見られなかった。下図に典型的な観測データ（2018年6月12日観測）を示す。この計数率対高度のふるまいは通常の宇宙線中の陽子と中性子のフラックスで説明可能なものである。



冬季には関東地方では雷活動はまれなため、2018年12月から翌年3月までは冬季雷活動が多いとされる石川県で輪島市役所屋上を借用してラジオゾンデを飛揚可能な状態にした。この間、1回ラジオゾンデを飛揚させることができた。このときも雷活動の中心部分に投入できなかったため、荷電粒子検出率の顕著な増大は見られなかった。

結局、本研究期間中に雷雲に対して合計6回ラジオゾンデを飛揚させることができた。高度ごとの荷電粒子の計数にも成功した。しかし、いずれも十分強い雷雲の中心付近に投入することはできず、本研究の目的であるロングバースト雷雲ガンマ線の起源を説明する雷雲中の大強度電子フラックスを直接検出することはできなかった。これは不安定な気象現象を対象としているので仕方がないとはいえ、大変残念である。

<引用文献>

- [1] T. Torii, et al., 'Migration source of energetic radiation generated by thunderstorm activity', *Geophysical Research Letters* 38 (2011) L24801.
- [2] Y. Kuroda, et al., 'Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds', *Physics Letters B* 758 (2016) 286–291.

[3] A.V. Gurevich, K.P. Zybin, 'Runaway breakdown and the mysteries of lightning', Phys. Today 58 (2005) 37.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------