

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740167
 研究課題名（和文）
 エックス線および核ガンマ線観測による雷電場での粒子加速メカニズムの解明
 研究課題名（英文）
 understanding of particle acceleration in lightning and thunderclouds via measurement of x rays and nuclear-gamma rays
 研究代表者
 土屋 晴文 (Tsuchiya Harufumi)
 独立行政法人理化学研究所・牧島宇宙放射線研究室・基礎科学特別研究員
 研究者番号：70415230

研究成果の概要（和文）：

近年、雷にともないガンマ線が観測されていた。これは雷や雷雲がもつ電場で電子が加速されていることを示唆する。そして、このガンマ線を測れば、宇宙でもなぞが多い電場加速を、宇宙を見るよりも圧倒的に安い費用で、かつ詳細に検証できるという新たな着想を得た。そこで、2006年から、世界でも稀な冬の雷が頻発する日本海沿岸や北アルプスの乗鞍岳で観測を行ってきた。その結果、雷雲から10 MeVに達するガンマ線を8例捉え、身近な雷雲が天然の粒子加速器であることを証明した。

研究成果の概要（英文）：

High-energy gamma rays, which are possibly associated with electron acceleration in thunderstorm activity, have been observed. Given these observations, we obtained a new idea that such gamma rays reveal mechanisms of electric-field acceleration, which is difficult to be investigated by space measurement. Hence, gamma-ray observations have been performed since 2006, at the coastal area of Japan sea and at a high mountain. By 2010 February, 8 thundercloud gamma-ray events were obtained. These detections confirmed that thunderclouds are indeed natural particle accelerators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	0	2,300,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

研究分野：数物系科学

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：粒子加速、雷、雷雲、ガンマ線、放射線観測

1. 研究開始当初の背景

粒子加速のなかで、もっともシンプルで、地上の人工の加速器では一般的な電場による粒子加速は、宇宙において地球磁気圏や太陽フレア、パルサー近傍で起こる高エネルギー現象に深く関わっているはずである。しかしながら、電場による粒子加速はそれまで観測的にはほとんど議論されてこなかった。実際、宇宙では粒子はおもに衝撃波によって加速され、磁場が決定的な役割をもつとされている。それは遠方の天体を観測しても電場を決めることが難しく、またそもそも宇宙には局所的にしか電場が存在しないからである。ここで地球に目を向けると、驚くべきことに雷から 1 MeV を超えるガンマ線が天文衛星や国外の高山や地上の装置、さらには日本海沿岸の原子力発電所の監視モニタで見つかった。

ガンマ線は、雷によって最大でも数万度に熱せられた大気プラズマからは絶対に発生しない。観測されたガンマ線を熱で発生させるためには、10 億度を超える温度が必要になるからである。そうしたことから、観測されていたガンマ線は、雷とともに発生する過渡的で強力な電場で電子が高エネルギーに加速された結果、その制動放射で作られると言われるようになった。実際、そう考えることで雷と同期するガンマ線をうまく説明できることがわかり、雷が電子を MeV 領域にまで加速できる粒子加速器とわかった。一方で、準定常的な電場をもつ雷雲が電子を MeV 領域にまで加速できるかどうかは観測的にまったく不明であった。その原因は装置の感度の問題もあるが、そもそも雷雲が粒子加速器かどうかという視点で系統的に研究がされてこなかったからである。

2. 研究の目的

はたして雷や雷雲で粒子が相対論的なエネルギーにまで加速されているかどうかを明かすことがまず第 1 目的である。それを明

かした上で、電子が制動放射で発するガンマ線を精密に観測し、雷や雷雲のもつ電場による電子の加速を詳細に検証する。最後に、電子のみならず陽子も、雷や雷雲で加速されているかどうかを明かすために、核ガンマ線の探索を行う。

3. 研究の方法

本研究は、世界でも稀な冬季雷が頻発する日本海側の柏崎刈羽原発や、北アルプスの乗鞍岳で行った。2006 年より申請者は NaI や CsI 検出器とともに、X 線衛星に搭載の装置を模して雷からのガンマ線測定に特に優れた感度を有す放射線検出器や、電場や光、音の変化も捉える装置も備え、こうした場所で観測を続けてきた。

ガンマ線観測に特化した検出器（以下、装置 1）は、円筒形の 3" × 3" の NaI 検出器の周りを井戸型の BGO シンチレータが囲っている。NaI のエネルギー観測範囲は、40 keV - 10 MeV で、時間分解能は 10 マイクロ秒である。周囲の BGO で、低エネルギー環境放射線を徹底的に除去し、上部のプラスチックシンチレータは、荷電粒子とガンマ線を分別するために使われる。こうした BGO とプラスチックシンチレータのシールドにより、NaI 検出器は、上方からのガンマ線に優れた感度を有する。この放射線検出器に加えて、球形 3" の NaI と CsI 検出器がおおよそ 10 m ほど離れたところに設置されている（以下、装置 2）。これらのシンチレータは、BGO などのシールドはなく、全方向を観測するためのものである、エネルギー範囲は、NaI が 40 keV - 10 MeV を、CsI が 300 keV - 80 MeV をカバーする。これらの放射線検出器に加えて、電場や光、音も測る装置を備えている。

4. 研究成果

(1) 冬の雷雲からの 10 MeV ガンマ線の初めての検出 [Phys. Rev. Lett. 99, 165002 (2007)]

雷放電が電子を相対論的なエネルギーにまで加速できると明らかになりつつなる一方で、雷雲が、雷放電と同様に、電子を高エネルギーに加速できるのかどうかは長らく不明であった。そうした状況のなか、本研究では、2007年1月7日の早朝に、雷雲から10 MeVに達するガンマ線が40秒にわたり放射されているさまを初めて観測した。

実際に得られた変動は図1である。上の二つのパネルは、3-10 MeVのガンマ線の変動を表す(青:装置1のNaI、赤:装置2のNaI)。真ん中のパネル(緑)は荷電粒子のデータを示し、ガンマ線の増加のさいに目立った変化が見られないことが明らかにわかる。残りの二つのパネルは、それぞれ上から光(ピンク)と電場(黒)の変化の様子で、ガンマ線の増加のさいには、雷放電が起こっていないことが知れる。実際には、ガンマ線のイベントが終了して、およそ30秒後に雷が起こり、引き続き、4回発生していることもわかる。

これらの結果から、電子が雷雲の中でも10 MeVを超えて加速されていることがはっきりとし、雷雲が粒子加速器であることが判明した。

(2) 夏の雷雲から10 MeVガンマ線と加速電子の同時検出 [Phys. Rev. Lett. 102, 255003 (2009)]

電子が冬の雷雲で相対論的なエネルギーに加速されていることが明らかになった。ところが、夏の雷雲も同様に粒子加速器どうかは不明であった。そこで、乗鞍岳のある標高2770mの東京大学附属乗鞍観測所で、ガンマ線観測を行った。その結果、2008年9月20日、台風の接近にともない荒天であった乗鞍岳の上空に発生した雷雲から10 MeVにおよぶガンマ線を捉えることに成功した。さらには、雷雲で加速された電子そのものも検出していた。これらのことから、冬の雷雲と同じく夏の雷雲も粒子加速器であることが明らかになった。また、図2にしめすガンマ線スペ

クトラムのモデルフィットの結果、ガンマ線源は、90 m という至近距離にあったという説明がもつとももらしかった。実際、そう考えることで、加速電子そのものが同時に捉えられたことも説明できた。

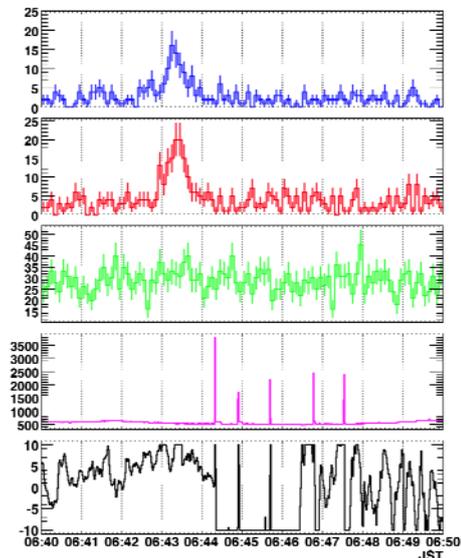


図1:2007年1月6日に得られたガンマ線イベント。上の三つのパネルは6秒値で残り二つは一秒値(詳細は文中)。

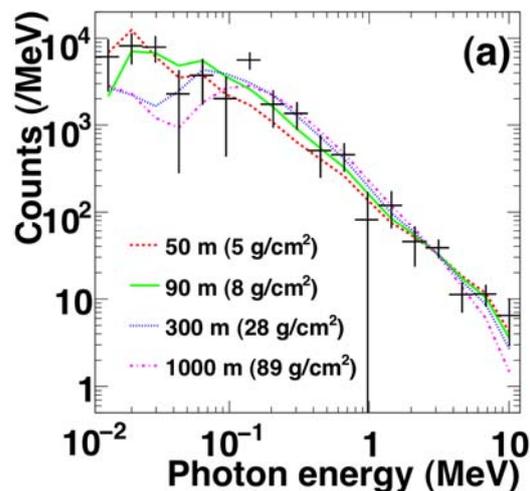


図2:2008年9月20日に得られたガンマ線のエネルギースペクトラム。黒のクロスがデータで、エラーは統計の1σを示す。

(3) 8例の雷雲からのガンマ線イベントを取得。

2010年2月までに、(1)や(2)を含めて8例の雷雲からのガンマ線を検出した。その結果、雷雲が粒子加速器であることを疑いないものにするるとともに、最低でも15 MeVまで電子を加速できることを明かした。

表1:今までに得た雷雲ガンマ線イベント

年 月 日 (YYMMDD)	継 続 時 間 (秒)	最高ガンマ 線エネルギー (MeV)
070106	36	10
071213	84	12
080920	90	10
081225	72	10
090125	137	15
090211	12	10
100108a	90	10
100108b	60	10

(4) 5例の雷に同期するガンマ線イベントを検出。

雷の発生にともない発生したガンマ線を捉えることは、過去の別の実験においてもなされていた。ただし、10 MeVまでのガンマ線が検出されたり、ガンマ線と電子が同時に観測されたりするなど、本研究ではじめてなされたことも多くある。

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)

① Observation of an energetic radiation burst from mountain-top thunderclouds, H. Tsuchiya, T. Enoto, T. Torii, K. Nakazawa, T. Yuasa, S. Torii, T. Fukuyama, T. Yamaguchi, H. Kato, M. Okano, M. Takita, K. Makishima, Phys. Rev. Lett. 102,

255003 (2009) 査読有り

② Detection of High-Energy Gamma Rays from Winter Thunderclouds, H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, S. Nakamura, K. Makishima, Phys. Rev. Lett. 99, 165002 (2007) 査読有り

③ Detection of gamma rays from winter thunderclouds along the coast of Japan Sea
T. Enoto, H. Tsuchiya, K. Makishima, et al., Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf. (2007) 査読なし

④ 雷雲γ線の生成と粒子加速

土屋晴文, 榎戸輝揚

プラズマ核融合学会誌 84, 410-416 (2008) 査読なし

⑤ 雷雲は粒子加速器か?

榎戸輝揚, 土屋晴文,

天文月報 11, 667-676 (2008) 査読なし

[学会発表] (計15件)

① 土屋晴文 雷や雷雲からのγ線と宇宙線との関わり 理研シンポジウム「雷活動に関わる高エネルギー物理現象の新しい展開 2009年10月9日(東京大学)

② 土屋晴文, 榎戸輝揚, 他(10人中1番目), 2008年度における冬季雷活動からの高エネルギー放射線の観測, 日本物理学会 2009年秋季大会 2009年9月10日(甲南大学)

③ 土屋晴文, 榎戸輝揚, 他(13人中1番目), 雷や雷雲に付随する高エネルギー放射線バーストの測定, 第46回アイソトープ・放射線研究発表会, 2009年7月3日(日本科学未来館)

④ H. Tsuchiya, T. Enoto, T. et al., (12人中1番目), High-altitude observations of high-energy gamma rays and electrons from thunder

activity , Japan Geoscience Union Meeting 2009, 2009年5月18日 (Makuhari)

⑤H. Tsuchiya, T. Enoto, et al.,(10人中1番目), Observations of energetic radiation bursts from thunder activities, European Geophysical Union, General Assembly 2009, 2009年4月23日 (Vienna, Austria)

⑥土屋晴文, 榎戸輝揚,他 (11人中1番目) 高山における雷雲からの高エネルギー放射線の観測,

日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日(立教大学)

⑦H. Tsuchiya, Energetic radiation bursts associated with terrestrial thunder activity , International Workshop on Variabilities of Solar-Cosmic and Terrestrial Environment, 2008年12月5日 (JAMSTEC)

⑧土屋晴文, 榎戸輝揚, 他(11人中1番目), 2007年中における冬季雷雲からのガンマ線観測, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008年9月23日 (山形大学)

⑨H. Tsuchiya, Recent progresses in research of non-thermal processes in lightning and thunderclouds, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月9日 (Fukuoka International Congress Center)

⑩土屋晴文, 榎戸輝揚, 他(11人中1番目), 日本海側の冬季に発生する雷雲からの高エネルギーガンマ線の観測, 平成20年度電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2008年8月21日 (千葉工大)

⑪H. Tsuchiya, T. Enoto, et al.,(11人中1番目), Observations of high-energy gamma rays from winter thunderclouds on the Japan Sea (1), 日本地球惑星連合大会2008, 2008年5月30日 (幕張メッセ)

⑫H. Tsuchiya, T. Enoto, et al.,(11人中1番目) Observations of non-thermal gamma-ray emission from winter thunderclouds, American Geophysical Union 2007 Fall Meeting, 2007年12月14日 (San Francisco)

⑬土屋晴文, 榎戸輝揚, 他 (11人中1番目) 日本海の冬の雷雲に付随したX線およびガンマ線の観測, 日本物理学会 第62回年次大会, 2007年9月24日 (北海道大学)

⑭土屋晴文, 榎戸輝揚, 他 (11人中1番目), 日本海側の冬季雷雲活動に由来した高エネルギーガンマ線の観測, 日本大気電気学会第77回研究発表会, 2007年7月20日 (名古屋大学)

⑮土屋晴文, 榎戸輝揚, 他(11人中1番目), 日本海側の冬季雷雲に伴うX線/γ線の観測(2), 日本地球惑星科学連合大会2007, 2007年5月24日 (幕張メッセ)

[その他]

ホームページ

① <http://cosmic.riken.jp/harufumi/>

授賞

②平成21年度(独)理化学研究所 研究奨励賞「雷雲からのガンマ線放射の検出と粒子加速の実験的検証」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 晴文 (Tsuchiya Harufumi)

独立行政法人理化学研究所・牧島宇宙放射線研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号: 70415230

(2) 研究分担者

該当しません

(3) 連携研究者

該当しません

(4) 研究協力者

①榎戸 輝揚 (Enoto Teruaki)

東京大学東京大学大学院・理学系研究科・日本学術振興会 特別研究員 (DC1)

②加藤 博 (Kato Hiroshi)

独立行政法人理化学研究所・牧島宇宙放射線研究室・前任技師