

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01116

研究課題名（和文）地上や高山における放射線観測で明かす雷や雷雲中の非熱的プロセス

研究課題名（英文）Nonthermal processes in lightning and thunderclouds revealed by observations at ground and high mountains

研究代表者

土屋 晴文（Tsuchiya, Harufumi）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹

研究者番号：70415230

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、北陸地域で展開する小型放射線装置群と4300mのチベット高山にある宇宙線観測装置を用いて、雷雲から発生する放射線（ガンマ線グロー）の発生メカニズムの解明を目指した。北陸地域にて雷が頻発する冬季において、電波や電場の観測によりガンマ線グローの発生時には雷雲中の氷晶やあられなどが、電子を雷雲から地表面に加速する向きに電場を発生させる分布となることが分かった。チベット高山の観測では、北陸地域と違い、夏の雨季にガンマ線グローが観測されやすく、10 - 40分ほど継続することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射線観測とともに、電波や電場観測との連携により、ガンマ線グローの生成メカニズムの解明に重要となる電子加速を決定する雷雲内の電荷分布や構造を評価した。チベット高山（高度4300 m）では、北陸地域とは異なるガンマ線グローの描像が得られた。とくに、チベット高山の長期観測データからガンマ線グローの発生が太陽活動あるいは宇宙線と関連があるかもしれない可能性が示された。今後、得られた新たな描像の解明のため、宇宙線分野や気象分野との連携が進むことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to understand how radiation (gamma-ray glow) is produced from thunderclouds. For this aim, we used small radiation devices installed in the Hokuriku region and a cosmic ray detector placed on the Tibetan plateau (4300 meters above sea level). The research was conducted during the winter season when thunderstorms frequently occur in the Hokuriku region. Radio wave and electric field observations in the Hokuriku region during winter revealed that when gamma-ray glow occurs, ice crystals and hail within thunderclouds are distributed in such a way that they generate an electric field accelerating electrons toward to the ground. Observations in the Tibetan plateau showed that, unlike in the Hokuriku region, gamma-ray glow is more likely to be observed during the summer rainy season, with durations ranging from 10 to 40 minutes.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：放射線観測 雷雲 制動放射 宇宙線

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2015 年から、北陸地域での雷や雷雲からの放射線観測のために多地点への装置の設置を推進してきた。その結果、雷から 10 MeV を超える制動放射線が発生し、雷の中で光核反応が起こることを明らかにした。これにより、雷から瞬間的に発せられる「ショートバースト」という現象の核心を捉えた (Enoto et al., Nature 2017)。一方、「ガンマ線グロー」と呼ばれ、雷ではなく雷雲から数分以上にわたり放射される現象にはなぞが多いままであった。実際、世界のさまざまな地点で見られるガンマ線グローの特徴は大きく異なる。とくに、継続時間に大きな違いが見られ、北陸地域で観測されるガンマ線グローは、せいぜい数分ほど継続するだけであるが、高山で捉えられるガンマ線グローでは 10 分以上にわたるものがあった。この差異の原因は未解明であった。

(2) 従来、ガンマ線グローの発生に宇宙線が寄与しているという仮説がある。具体的には、宇宙線が地球大気中で生成する高エネルギー電子が雷雲のなかの電場で加速されて、ガンマ線グローを引き起こすというものである。こうした仮説が提唱されているが、ガンマ線グローと宇宙線との関連を検証する取り組みは、ほとんどされていなかった。

(3) ガンマ線グローが発生するには、雷雲中で電子を加速する電場が必要であり、こうした電場は、雷雲内の氷晶やあられの分布に大きく依存していると考えられる。これは、それらの分布が雷雲内の電荷構造を決定するからである。しかしながら、ガンマ線グローが発生している時の電荷構造に関しては、これまでよく理解されていなかった。

### 2. 研究の目的

(1) 高度 4300 m のチベット高山で得られたガンマ線グローの時間特性を検証し、北陸地域などの観測結果と比較することにより、ガンマ線グローの発生条件を解き明かす。

(2) これまでに得られたガンマ線グローのデータを検証し、ガンマ線グローの発生に宇宙線、あるいは太陽活動が影響を与えているかどうかを探る。

(3) 多波長観測を実施することで、ガンマ線グローの発生時の雷雲内の電荷構造の様子を探查する。

### 3. 研究の方法

(1)及び(2) チベット高山では、1998 年から宇宙線観測を目的とした中性子モニタが稼働している。過去の観測から、中性子モニタが宇宙線だけではなくガンマ線グローにも感度をもち、有効な測定手段となることが分かっていた。そこで、1998 年から 2017 年までに得られたデータを解析した結果、中性子モニタが 127 例のガンマ線グローを検出していたことが明らかになった。得られたガンマ線グローの継続時間及び発生日時を分類し、雷や降雨、宇宙線強度変動や太陽活動変動と比較した。

(3) 北陸地域で展開している高エネルギー放射線観測と、同地域で展開されている電波観測との連携観測を実施した。

### 4. 研究成果

(1)及び(2) 図 1 は、得られたガンマ線グローの継続時間分布である。チベット高原で観測されるガンマ線グローは典型的には 10-40 分ほど継続することが分かった。北陸地域で観測されるガンマ線グローの典型的な継続時間はおよそ数分であるので、著しく異なる。これは、ガンマ線グローを発生させる両地域での雷雲の寿命の差であると思われる。実際、北陸地域の冬の雷雲の寿命はおよそ 10 分である一方、チベットの夏の雷雲の寿命は 30-60 分である。

図 2 にチベット高山で得られたガンマ線グローの発生頻度の季節変動を示す。チベット高山の雨季に対応する 5 月から 9 月の間に多くのガンマ線グローが発生している。加えて、ガンマ線グローの発生が降雨や雷の発生とよく一致している。こうしたことから、ガンマ線グローは、雷雲が発生しやすい雨季に発生しやすいことが分かった。

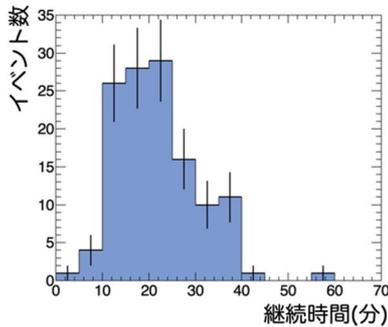


図 1 チベット高山で得られたガンマ線グローの継続時間

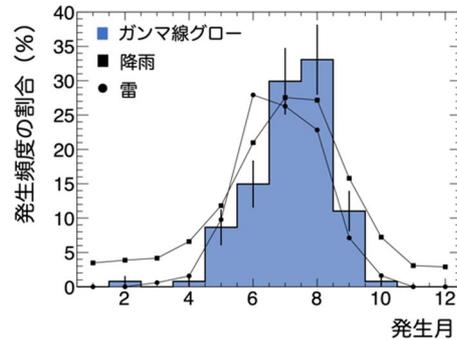


図 2 チベット高山で得られたガンマ線グローの発生月の分布。別の観測 (Qie et al., GRL B2005) で得られたチベット高山の降雨や雷の発生頻度も示す。

地上で観測される宇宙線強度は、太陽からの磁場の影響を受けて、約 11 年周期で変化する。それゆえ、宇宙線がガンマ線グローの発生に影響を与えているのであれば、太陽活動の影響も受けると考えられる。そこで、ガンマ線グローの発生頻度の年変化と太陽活動の指標となる黒点数の変動の比較を行った。その結果を図 3 に示す。ガンマ線グローの発生頻度は、周期がおよそ  $16 \pm 2$  年の周期変動を示し、太陽活動に対して約  $3.3 \pm 1.3$  年ほど遅れていることが示唆された。こうしてガンマ線グローの発生が太陽活動の影響を受けている可能性が推測されたが、さらに長期間のデータや他地域の観測装置による検証が必要であろう。

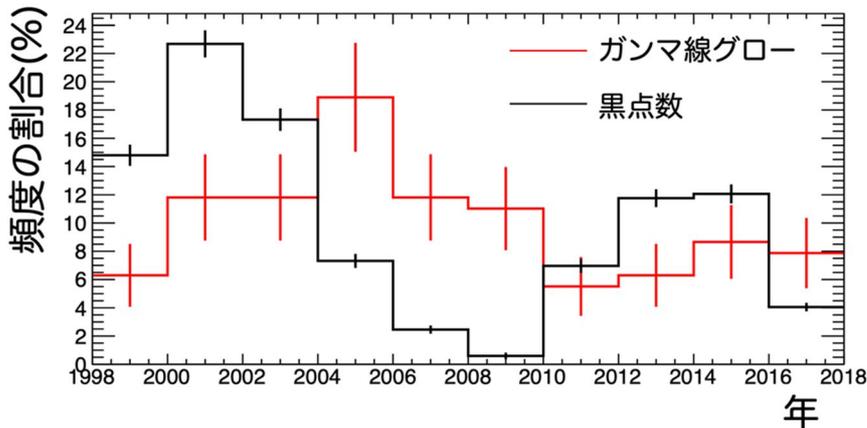


図 3 ガンマ線グローの発生頻度の年変化と黒点数の年変化の比較。

(3) 電波による観測から、ガンマ線グローが発生するさいの氷晶やあれらなどの雷雲内の分布が得られた。それらが多く分布する領域は、電子を加速する電場が強い領域であり、地表面から鉛直方向に 2-3 km まで広がっていることが分かった。また、電場の向きとして電子を地表面に加速している方向であることも推定された。こうした観測と放射線観測との連携により、地面の向きに電子が加速されているときに、ガンマ線グローが観測されていることが明らかになった。このように、放射線観測と電波及び電場加速が連携することで、電子加速の詳細に迫ることが可能と思われる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Wada Yuuki, Tsurumi Miwa, Hayashi Syugo, Michimoto Koichiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Synoptic meteorological conditions of gamma-ray glows in winter thunderstorms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-023-00538-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Wada Y., Matsumoto T., Enoto T., Nakazawa K., Yuasa T., Furuta Y., Yonetoku D., Sawano T., Okada G., Nanto H., Hisadomi S., Tsuji Y., Diniz G. S., Makishima K., Tsuchiya H.	4. 巻 3
2. 論文標題 Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.043117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hisadomi S., Nakazawa K., Wada Y., Tsuji Y., Enoto T., Shinoda T., Morimoto T., Nakamura Y., Yuasa T., Tsuchiya H.	4. 巻 126
2. 論文標題 Multiple Gamma Ray Glows and a Downward TGF Observed From Nearby Thunderclouds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JD034543	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Wada Y., Morimoto T., Nakamura Y., Wu T., Enoto T., Nakazawa K., Ushio T., Yuasa T., Tsuchiya H.	4. 巻 49
2. 論文標題 Characteristics of Low Frequency Pulses Associated With Downward Terrestrial Gamma Ray Flashes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GL097348	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wada Y., Enoto T., Kubo M., Nakazawa K., Shinoda T., Yonetoku D., Sawano T., Yuasa T., Ushio T., Sato Y., Diniz G. S., Tsuchiya H.	4. 巻 48
2. 論文標題 Meteorological Aspects of Gamma Ray Glows in Winter Thunderstorms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL091910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 和田有希	4. 巻 17
2. 論文標題 高エネルギー大気物理学における陽電子の観測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 陽電子科学	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Diniz G., Wada Y., Ohira Y., Nakazawa K., Enoto T.	4. 巻 127
2. 論文標題 Atmospheric Electron Spatial Range Extended by Thundercloud Electric Field Below the Relativistic Runaway Electron Avalanche Threshold	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JD035958	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuchiya Harufumi, Hibino Kinya, Kawata Kazumasa, Ohnishi Munehiro, Takita Masato, Munakata Kazuoki, Kato Chihiro, Shimoda Susumu, Shi Quangqi, Wang Shuo, Han Chenyao, Zhai Liuming	4. 巻 11
2. 論文標題 Characteristics of temporal variability of long-duration bursts of high-energy radiation associated with thunderclouds on the Tibetan plateau	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-024-00625-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wada Y., Kamogawa M., Kubo M., Enoto T., Hayashi S., Sawano T., Yonetoku D., Tsuchiya H.	4. 巻 128
2. 論文標題 Negative Excursion of Surface Electric Fields During Gamma Ray Glows in Winter Thunderstorms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JD039354	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Diniz G. S., Wada Y., Ohira Y., Nakazawa K., Tsurumi M., Enoto T.	4. 巻 50
2. 論文標題 Relativistic Runaway Electron Avalanche Development Near the Electric Field Threshold in Inhomogeneous Air	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023GL105087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wada Y., Wu T., Wang D., Enoto T., Nakazawa K., Morimoto T., Nakamura Y., Shinoda T., Tsuchiya H.	4. 巻 128
2. 論文標題 Termination of Downward Oriented Gamma Ray Glow by Normal Polarity In Cloud Discharge Activity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JD038606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 和田有希, 鶴見美和, 道本光一郎
2. 発表標題 ガンマ線を発生させる北陸冬季雷の総観場解析
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wada Y., Enoto T., Nakazawa K., Kubo M., Yuasa T., Yonetoku D., Sawano T., Okada G., Nanto H., Ushio T., Diniz G.S., Makishima K., Tsuchiya H.
2. 発表標題 Catalog analysis of gamma-ray glows in winter thunderstorms of Japan
3. 学会等名 Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋晴文, 日比野欣也, 川田和正, 大西宗博, 瀧田正人, 宗像一起, 加藤千尋
2. 発表標題 高山での雷雲に由来する放射線の時間特性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 (オンライン)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鶴見美和, 榎戸輝揚, 一方井祐子, 辻直希, Diniz Gabriel, Ting Wu, Daohong Wang, 高垣徹, 三宅晶子, 富岡大, 中澤知洋, 篠田太郎, 森本健志, 中村佳敬, 鴨川仁, 土屋晴文
2. 発表標題 冬季の日本海沿岸におけるガンマ線グロー領域で始まった雷放電の観測
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 (オンライン)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wada Y.
2. 発表標題 Broadband Low-Frequency Views of Downward Terrestrial Gamma-ray Flashes
3. 学会等名 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大熊佳吾, 中澤知洋, 辻結菜, 久富章平, 小谷大貴, 伊神勇作, 榎戸輝揚, 和田有希, 湯浅孝行, 土屋晴文, 篠田太郎, Gabriel Diniz, 山田真也
2. 発表標題 雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト: 2021年1月のgamma-ray glowのコリメータスペクトルの時間変動解析
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田有希, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 久保守, 湯浅孝行, 米徳大輔, 澤野達哉, 岡田豪, 南戸秀仁, 篠田太郎, 佐藤陽祐, Gabriel Sousa Diniz, 牛尾知雄, 牧島一夫, 土屋晴文
2. 発表標題 北陸の冬季雷雲に由来するガンマ線イベントのカタログ解析
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻結菜, 中澤知洋, 久富章平, 伊神勇作, 小谷大貴, 大熊佳吾, 榎戸輝揚, 和田有希, 湯浅孝行, 土屋晴文, 篠田太郎, Gabriel Diniz
2. 発表標題 雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト: 2021年1月に観測されたgamma-ray glowにおけるガンマ線と電子の同時検出
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大熊佳吾, 中澤知洋, 久富章平, 辻結菜, 小谷大貴, 伊神勇作, 榎戸輝揚, 和田有希, 湯浅孝行, 土屋晴文, 篠田太郎, Gabriel Diniz, 山田真也
2. 発表標題 雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト: 2021年1月の gamma-ray glow のコリメータスペクトルの詳細解析
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会プログラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuuki Wada, Takeshi Morimoto, Yoshitaka Nakamura, Teruaki Enoto, Kazuhiro Nakazawa, Ting Wu, Tomoo Ushio, Takayuki Yuasa, Harufumi Tsuchiya
2. 発表標題 Low-frequency pulses associated with downward terrestrial gamma-ray flashes in Japan
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tsuchiya, Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa
2. 発表標題 Observation of a downward terrestrial gamma-ray flash and the flash-induced neutrons
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yuuki Wada	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 176
3. 書名 Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges	

〔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
研究 分担 者	川田 和正  (Kawata Kazumasa)  (10401291)	東京大学・宇宙線研究所・助教   (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	和田 有希  (Wada Yuuki)  (40879144)	大阪大学・大学院工学研究科・助教    (14401)	
研究分担者	小井 辰巳  (Koi Tatsumi)  (60831774)	中部大学・工学部・教授    (33910)	

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