

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06006

研究課題名(和文) 冬季雷雲の放射線マッピング観測で解明する雷雲電場による粒子加速と高エネルギー現象

研究課題名(英文) Mapping radiation measurements of particle acceleration and high-energy atmospheric phenomena in winter thunderstorms

研究代表者

榎戸 輝揚 (Enoto, Teruaki)

京都大学・白眉センター・特定准教授

研究者番号：20748123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：日本海の沿岸は、冬季に活発な雷雲活動が発生し、強烈な冬季雷が起きることで世界的に有名である。この冬季雷雲や冬季雷からガンマ線(エネルギーの高い放射線)が見つかっており、その生成過程は大きな謎であった。本研究では、石川県や新潟県を中心に放射線マッピング観測を新たに展開するため、可搬型で小型の検出器の製作し、多地点マッピング網の構築、冬季の観測、そしてデータ解析を行った。その結果、冬季雷でのガンマ線放射に伴って、大気中で光核反応が起きていることを世界ではじめて明確に示し、冬季雷雲の中で電子加速が起きている現象も多数捉えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金沢市の市街地などで、冬季雷雲の到来時には地上でも雷雲からのガンマ線が検出できることを明らかにし、かつ上空で光核反応が起きていることを明らかにした。今後、シチズンサイエンスの枠組みを取り入れることで新しい枠組みでの研究が展開できることを示しているとともに、自然放射線に関する私たちの理解が深まった。雷が光核反応を起こすことは、本研究で明らかになってきた身近な現象の新しい姿であることは強調したい。

研究成果の概要(英文)：Winter thunderstorms along the Sea of Japan are famous for energetic lightning discharges. We have newly designed compact radiation detectors to observe the high-energy atmospheric phenomena from thunderstorms and lightning. We deployed them in the Ishikawa and Niigata prefectures in Japan, and successfully detected several gamma-ray radiation events from winter thunderclouds. Furthermore, we discovered photonuclear reactions triggered by lightning discharges in 2017.

研究分野：高エネルギー大気物理学

キーワード：雷 光核反応 中性子 陽電子 シチズンサイエンス 雷雲 高エネルギー大気物理学 ガンマ線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

日本海沿岸では、シベリアから吹き付ける季節風により日本海上で発生する冬季雷雲の到来時に、原子力発電所のモニタリングポストが放射線を検出することが知られており、雷雲内の電場による電子加速がおき、大気に衝突して制動放射が地上に降り注いでいると考えられている。私たちのチームでは、新潟県の柏崎刈羽原子力発電所の構内で Gamma-ray Observation of Winter Thunderclouds (GROWTH) コラボレーションとして、放射線の定点観測を 2006 年以降続けてきており、雷雲の到来時に継続時間が数十秒で、 $\sim 20$  MeV に達するガンマ線イベントを複数検出していた (Tsuchiya, Enoto, et al. PRL, 2017)。

一方で、雷雲の上空では、高エネルギー宇宙物理学の研究を目的とした天文衛星などが、雷放電に伴ってミリ秒以下の時間スケールでガンマ線が到来する Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF) という現象が起きることが知られている。これらは、雷放電時に電子が相対論的な領域まで加速されたことによる制動放射の光子が衛星軌道上まで到達していると考えられている。

## 2. 研究の目的

雷雲や雷放電からの放射線はこれまでに測定はできているものの、数地点の観測のみであり、雲の移動に伴う電子の加速領域の誕生、成長、消滅といったライフサイクルの研究や、雷放電時の現象の地上での多地点測定などは行われていなかった。本研究では、世界的にも有名な日本海沿岸の冬季雷雲を観測対象に、多地点での放射線マッピング観測網を構築することを目的としている。これにより、単地点の測定では得られなかった空間的な広がりや、観測イベント数の増大などを狙っている。

## 3. 研究の方法

多地点モニタリング観測を行うために、個々の検出器は安価で高性能、扱いやすく、屋外での観測で長期にわたって安定に動作し、遠隔で検出器をコントロールできる必要がある。そのため、図 1 に示すような小型のシステムを新たに製作した。市販の小型で安価な PC である Raspberry Pi で制御でき、非同期で到来する放射線信号を読み出せるフロントエンドカードと、DAQ (Data Acquisition) カードを本研究のために製作した。放射線信号は理化学研究所から借用した BGO シンチレータや、米国の素粒子実験の中古品である CsI シンチレータを、光電子増倍管などで読み出す設計になっている。これらを見かん箱サイズの防水ボックスに入れ、取得した信号はインターネットで送信でき、測定器の PC にも遠隔ログインできる体制を構築した (Yuasa, Wada et al., to be submitted)。

このような検出器を複数台製作し、石川県の金沢市、珠洲市、小松市、新潟県の柏崎市などに設置した。石川県では、現地の高校や大学、民間企業と協力し、その屋上や敷地の中に電源をお借りして設置した。また、今後、検出器をよりシンプルにして市民サポーターに配布し、シチズンサイエンスの枠組みで進めることも狙い、より小型の放射線測定器の開発も勧めた。

## 4. 研究成果

これらの新しい放射線マッピング網を構築し始めたことで、毎年の冬に雷雲の通過に伴うガンマ線イベント現象を複数捉えることができるようになった。たとえば、雷雲からのガンマ線が雷の放電経路が近傍を通過するのに伴って消失する現象を捉え、電子の加速領域が消失した瞬間を捉えたとして論文 (Wada, Enoto, et al., GRL, 2018) にまとめ、京都大学を中心に記者発表を行った。さらに、雷放電に伴って中性子や陽電子に伴う放射線信号を検出したことで、雷放

電で発生する TGF のガンマ線が、大気中の窒素の原子核と光核反応を起こすことを図 2 のように解明し、論文にまとめた(Enoto, Wada, et al., Nature ,2017)。この結果は、2017 年の Physics World における物理分野の 10 大ブレイクスルーに選ばれるなどした。その後、金沢の市街地で雷雲からのガンマ線と、それに引き続き雷放電と光核反応の現象もとらえ、論文(Wada, Enoto, et al. Communication Physics, 2019)にまとめるとともに記者発表を行った。さらに、地上向きの TGF の観測事例なども論文として発表した(Wada, Enoto, et al., PRL, 2019)。

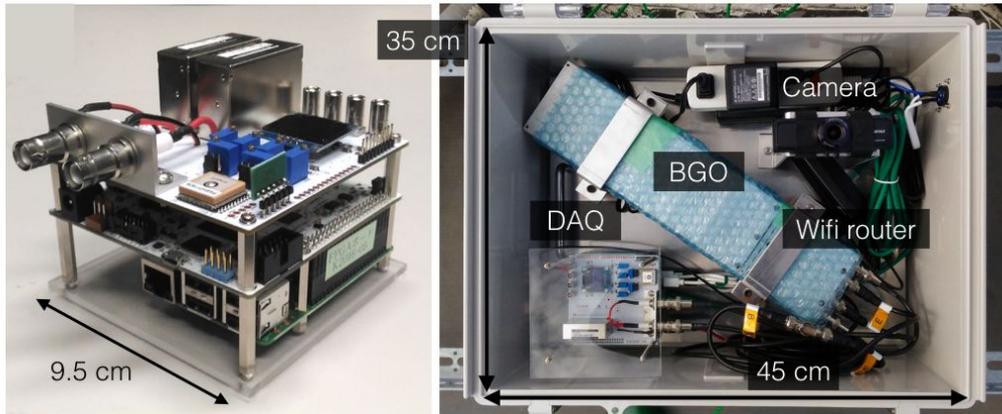


図 1. (左)本研究で開発した読み出しボード。上から順に、結晶シンチレータの光信号を受け取るフロントエンドカード、デジタル信号に変換する DAQ ボード、小型の PC である Raspberry Pi を用いている。(右)検出器システムはみかん箱サイズに収まっている。写真は、Enoto, Wada, et al., “ Multi-point Measurement Campaigns of Gamma Rays from Thunderclouds and Lightning in Japan ”, Proceeding of XVI International Conference on Atmospheric Electricity, 17-22 June 2018, Nara city, Nara, Japan. からの抜粋。

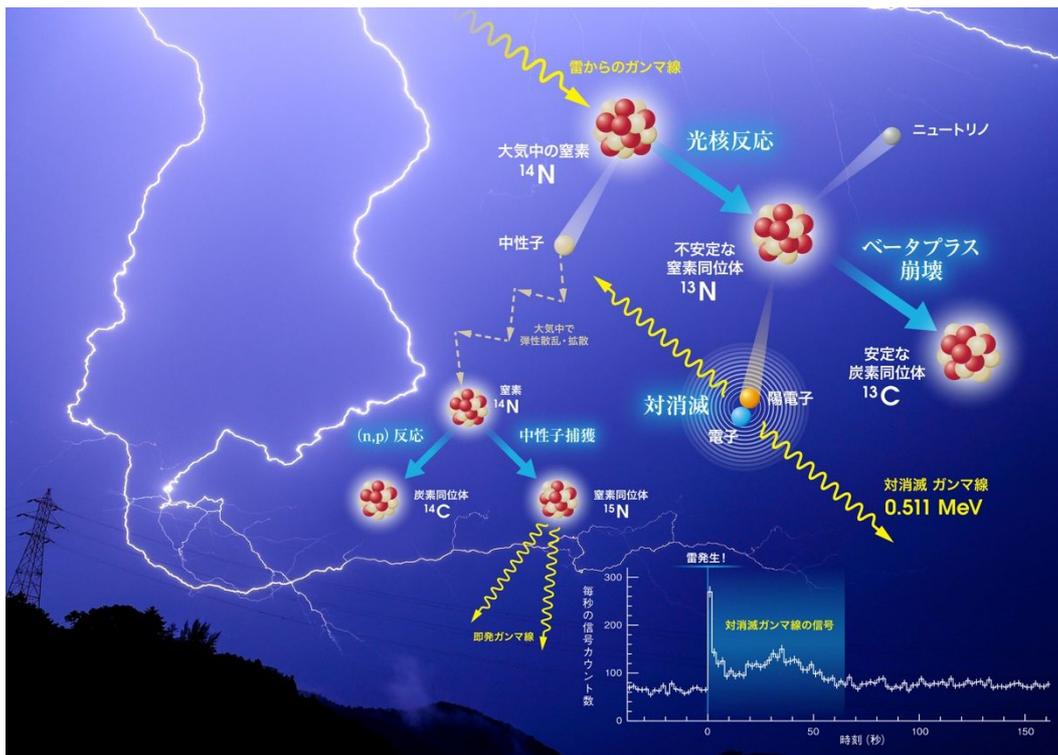


図 2. 雷放電のガンマ線が大気中の窒素の原子核とぶつかって光核反応を起こす様子を描いた模式図(京都大学を中心にした 2017 年 11 月 24 日のプレスリリース「雷が反物質の雲をつくる - 雷の原子核反応を陽電子と中性子で解明 - 」より引用)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Wada Y., Bowers G. S., Enoto T., Kamogawa M., Nakamura Y., Morimoto T., Smith D. M., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Matsuki A., Kubo M., Tamagawa T., Makishima K., Tsuchiya H.	4. 巻 45
2. 論文標題 Termination of Electron Acceleration in Thundercloud by Intracloud/Intercloud Discharge	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 5700 ~ 5707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1029/2018GL077784">https://doi.org/10.1029/2018GL077784</a>	査読の有無 無
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 該当する
1. 著者名 Teruaki Enoto, Yuuki Wada, Yoshihiro Furuta, Kazuhiro Nakazawa, Takayuki Yuasa, Kazufumi Okuda, Kazuo Makishima, Mitsuteru Sato, Yousuke Sato, Toshio Nakano, Daigo Umemoto, Harufumi Tsuchiya, Masashi Kamogawa, Gregory Bowers, David Smith, Takeshi Morimoto, Yoshitaka Nakamura, and Daohong Wang	4. 巻 0
2. 論文標題 Multi-point Measurement Campaigns of Gamma Rays from Thunderclouds and Lightning in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 XVI International Conference on Atmospheric Electricity Proceeding	6. 最初と最後の頁 0 ~ 0
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 無
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 該当する
1. 著者名 和田有希, 榎戸輝揚	4. 巻 758
2. 論文標題 雷による光核反応の発見	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 アイソトープ協会 Isotope News	6. 最初と最後の頁 28 ~ 31
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 無
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 湯浅孝行, 榎戸輝揚	4. 巻 87
2. 論文標題 クラウドファンディングも活用した高エネルギー大気物理の研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 応用物理学会機関紙「応用物理」	6. 最初と最後の頁 0 ~ 0
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 無
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 榎戸輝揚	4. 巻 62
2. 論文標題 雷の光が原子核の反応を引き起こす!?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 数研出版サイエンスネット	6. 最初と最後の頁 0~0
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 無
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 榎戸輝揚, 中澤知洋	4. 巻 33
2. 論文標題 雷が引き起こす大気中核反応で陽電子生成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 物理科学月刊誌パリティ	6. 最初と最後の頁 0~0
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 無
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 榎戸輝揚, 和田有希, 土屋晴文	4. 巻 74
2. 論文標題 雷放電が拓く高エネルギー大気物理学	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 0~0
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 無
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 Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Okuda K., Makishima K., Sato M., Sato Y., Nakano T., Umemoto D., and Tsuchiya H.	4. 巻 551
2. 論文標題 Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharge	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 481-484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1038/nature24630	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 Yuuki, Enoto Teruaki, Nakamura Yoshitaka, Furuta Yoshihiro, Yuasa Takayuki, Nakazawa Kazuhiro, Morimoto Takeshi, Sato Mitsuteru, Matsumoto Takahiro, Yonetoku Daisuke, Sawano Tatsuya, Sakai Hideo, Kamogawa Masashi, Ushio Tomoo, Makishima Kazuo, Tsuchiya Harufumi	4. 巻 2
2. 論文標題 Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-019-0168-y	査読の有無 無
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., Nakazawa K., Furuta Y., Yuasa T., Nakamura Y., Morimoto T., Matsumoto T., Makishima K., Tsuchiya H.	4. 巻 123
2. 論文標題 Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 61103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.061103	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Photonuclear reactions triggered by lightning discharges in a Japanese winter thunderstorm
3. 学会等名 EGU2018, Atmospheric Electricity, Thunderstorms, Lightning and there effects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 オープンサイエンスで挑む雷雲と雷の高エネルギー大気物理学
3. 学会等名 白眉年次報告会「空間と境界」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷からの放射線のシンチレータ観測
3. 学会等名 Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies (SMART2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Ground-based high-energy radiation measurement of photonuclear reaction triggered by lightning discharge
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting (JpGU) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Open Science Approach to High-Energy Atmospheric Phenomena of Japanese Winter Thunderstorm and Lightning
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting (JpGU) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Multi-point Measurement Campaigns of Gamma Rays from Thunderclouds and Lightning in Japan
3. 学会等名 16th International Conference on Atmospheric Electricity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 オープンサイエンスで挑む雷の謎
3. 学会等名 第2回 academist prize
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲と雷放電の高いエネルギー観測と光核反応
3. 学会等名 名大 ISEE 雷雲ガンマ線ミニ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲と雷放電の高エネルギー大気物理学の開拓
3. 学会等名 富山大学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 High-Energy Radiation Phenomena from Winter Thunderstorms and Lightning in Japan
3. 学会等名 The American Geophysical Union (AGU) 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷放電で拓く高エネルギー大気物理学
3. 学会等名 神戸大学 物理学専攻・惑星学専攻合同主催 物理学専攻談話会/CPSセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲ガンマ線の観測プロジェクトと雷での光核反応の検出
3. 学会等名 日本物理学会春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲と雷の高エネルギー大気物理学：雷での光核反応の発見
3. 学会等名 電気学会東海支部研究フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷が起こす光核反応の物理
3. 学会等名 雷雲と宇宙線の相互作用に伴う高エネルギー現象
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲と雷が起こす高エネルギー大気物理現象
3. 学会等名 平成29年度「高高度発光現象の同時観測」研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 カミナリが反物質の雲をつくる?! ~大発見! 雷の意外な能力~
3. 学会等名 雷サミット17 鶴岡市（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Multi-point radiation measurements for gamma-rays from accelerated electrons in winter thunderstorm
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint session M-IS05 (Thunderstorm and Lightning) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 冬季雷雲のガンマ線測定を狙う多地点観測システムの新規開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会・大気電気学セッション
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲電場による電子加速の観測的研究-夏季の高山観測と冬季の多地点観測へ向けた取り組み～
3. 学会等名 平成28年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲電場による電子加速のガンマ線観測コラボレーション
3. 学会等名 MeVガンマ線天文学研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷雲電場による電子加速のガンマ線観測プロジェクト：多地点体制への新展開
3. 学会等名 日本物理学会2017年春季年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

雷雲に隠れた点々の加速器を雷が破壊する瞬間を捉えた <a href="http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/180517_2.html">http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/180517_2.html</a> 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム <a href="http://enotolab.info">http://enotolab.info</a> Thundercloud Project <a href="https://thdr.info">https://thdr.info</a> 雷が反物質の雲をつくる - 雷の原子核反応を陽電子と中性子で解明 - <a href="http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/171123_1.html">http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/171123_1.html</a> Thundercloud Project <a href="https://thdr.info">https://thdr.info</a>
---

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
--	---------------------------	-----------------------	----