

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01236

研究課題名（和文）雷や雷雲中の電子加速に由来する光核反応の検証

研究課題名（英文）Investigation on photonuclear reactions associated with electron acceleration in lightning and thunderclouds

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：雷や雷雲が医療の現場にあるX線発生装置と同様な仕組み（制動放射）でX線を発生させる。加えて、近年では雷で発生した高エネルギー制動放射線が原子核とぶつかり、中性子をはじき出す光核反応を起こすことも明らかになった。本研究では光核反応を引き起こすガンマ線閃光の詳細を調べた。その結果、約100京個の高エネルギー電子がガンマ線閃光の発生に寄与し、光核反応で発生した中性子は発生点から1 kmにわたり広がり、その減衰時間が50ミリ秒ほどと推定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

雷の発生にあわせてガンマ線閃光が発生する。それゆえ、ガンマ線閃光の発生メカニズムを理解することは雷の発生メカニズムの解明にもつながると考えられている。本研究により、その発生に約100京個の電子が寄与していることが分かり、今後の雷の発生モデルの構築に資すると期待される。また、多くのガンマ線閃光が光核反応を起こすことも明らかになった。雷による光核反応の詳細を理解することは、炭素14年代測定や初期地球大気にける元素生成などの研究にも影響を与える可能性もある。

研究成果の概要（英文）：Lightning and thunderclouds generate X rays by bremsstrahlung, similar to X-ray generators in the medical field. Recently, it has been found that in addition to the generation of X rays and gamma rays, high-energy bremsstrahlung photons from lightning collide with atomic nuclei, causing a photonuclear reaction in which neutrons are produced. In this study, we investigated the details of the gamma-ray flashes that cause photonuclear reactions. As a result, it was estimated that quintillion high-energy electrons contribute to the gamma-ray flash, and the produced neutrons spread over 1 km from the production point, with a decay time of about 50 milliseconds.

研究分野：宇宙線物理学、放射線計測学

キーワード：粒子加速 ガンマ線計測 中性子計測 雷 雷雲 光核反応

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国内外における雷や雷雲からの放射線観測により、雷や雷雲が X 線やガンマ線を放射していることが明らかになっていた (Dwyer et al., Space. Scien. Rev., 2012)。そうした X 線やガンマ線は、医療の現場で使われる X 線発生装置と同じ仕組みで作られている。つまり、雷や雷雲がもつ電場により加速された電子からの制動放射線である。制動放射のような「電磁的な相互作用」に加えて、実は雷の中で「光核反応」が起こっていることをわれわれが日本海沿岸で実施した観測ではじめて実証した (Enoto et al., Nature 2017)。光核反応では、10 MeV を超える制動放射線が大気中の窒素原子核 (あるいは酸素やアルゴンなどの原子核) と衝突し、原子核から中性子をはぎ取る。こうした光核反応が特殊な雷だけで起こるのか、あるいは普遍的に起こっているのかは不明であった。また、光核反応を引き起こす強烈な制動放射線は、「下向きガンマ線閃光 (Downward Terrestrial Gamma-ray flashes)」と呼ばれていたが、その発生にどれほどの電子が関わっているのか、あるいはどのような発生環境で生じているのかは不明のままであった。さらに、われわれの観測を含め、光核反応で発生した中性子が直接、観測された例はなかったため、光核反応の証拠となる中性子の直接観測が望まれていた。

2. 研究の目的

雷の中で光核反応が起こっていることを明確にする。その上で、光核反応に由来する中性子や核ガンマ線の空間的・時間的发展を調べ、どのような電子が光核反応を引き起こすのか、光核反応がどのような条件で発生するのかについて検証する。

3. 研究の方法

日本海沿岸は、冬に雷が多発する世界的に見てもめずらしい地域である。この地域にある、もんじゅや柏崎刈羽原子力発電所構内で 2000 年ごろから高エネルギー放射線の観測を続けてきた。その結果、雷や雷雲から 10 MeV を超える制動放射ガンマ線が放射されること、及びそうしたガンマ線が雷雲とともに移動することを実証してきた。

上記のような観測結果をより深く理解するためには、多くの地点に装置を配置し、複眼的な観測が必要となる。また、近年では制動放射線だけではなく中性子や核ガンマ線が雷により生成されることが分かってきた。そこで、観測ネットワークの拡張と高度化を実施した。具体的には、図 1 のような小型で低消費電力な放射線検出器を開発し、金沢市内やその周辺、能登半島などの多数の地点に装置を展開した (Yuasa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2020)。

小型放射線検出器は、X 線やガンマ線に大きな感度を持つ BGO シンチレータや CsI シンチレータを備えている。また、光核反応からの中性子を検出するために、ガドリニウムを含む GSO シンチレータを取り付けた検出器も設置した。シンチレータからの微弱な光は光電子増倍管や MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) で捉えられ、アナログ信号に変換された後に、GPS (Global Positioning System) 時刻とともに記録される。また、小型放射線検出器は周囲の温度、湿度、気圧といった環境データも取得している。こうした観測データの一部は携帯回線を利用して常時、モニターしており、放射線イベントの迅速な発見や異常状態への対応を可能とした。

装置開発や観測ネットワークの拡張に加えて、下向きガンマ線閃光や光核反応の兆候が過去のデータにあるかどうかを精査した。

4. 研究成果

(1) 光核反応中性子や付随する核ガンマ線の挙動

日本海沿岸の観測により、さまざまな雷が下向きガンマ線閃光を発生し、光核反応で中性子や核ガンマ線を生成することが分かってきた。中性子や核ガンマ線は下向きガンマ線閃光に由来するため、それらの観測を通じて下向きガンマ線閃光の発生条件や親電子の物理状態に対する理解を深めることができる。そこで、モンテカルロシミュレーション (GEANT4) により、光核反応に由来する中性子や核ガンマ線が大気中において空間的及び時間的にどのように進展し、地上に到来するのかを検証した。

図 2 に示すように発生した光核反応中性子と核ガンマ線の空間的広がりは似ているが、地上に到来する中性子強度は核ガンマ線強度に比べておよそ 2-8 倍大きいことが分かった。核ガンマ線の時間発展を調べたところ、実際の観測でよく見られる、発生から 100-200 ミリ秒ほどかけて減衰していく時間分布を持つことが分かった。シミュレーションにより得られた時間分布を解

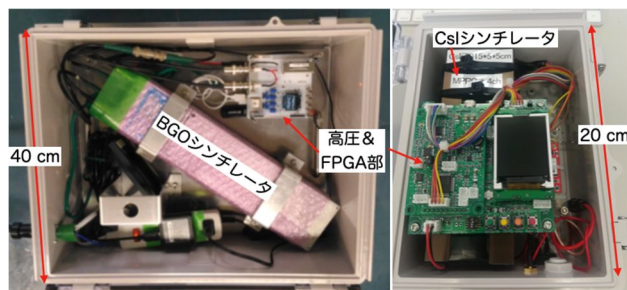


図 1: 小型放射線検出器の写真。左は初期型で、右はさらに小型軽量したもの。

析した結果、減衰の時定数がおよそ50ミリ秒であると見積もられた。これは、2017年2月にはじめて光核反応を発見したイベントにおいて推定した時定数とよく一致しており、推定値が妥当であったことをシミュレーションから確認できた。

(2) 下向きガンマ線閃光の定量評価

図3に示すように、2017年11月に発生した雷とともに、柏崎刈羽原子力発電所構内に展開したわれわれの小型放射線検出器が下向きガンマ線閃光の兆候を捉えた。また、下向きガンマ線閃光が検出された時刻付近において、柏崎刈羽原子力発電所のモニタリングポストも放射線の増大を検出した。とくに南側にあるモニタリングポストで、大きな放射線強度を観測した。われわれの検出器とモニタリングポストの放射線の増大データを用いて、下向きガンマ線閃光の発生地点(地上への射影)を調べた結果、図3の緑星の位置と分かった。

下向きガンマ線閃光にあわせて大量の制動放射ガンマ線が短時間(1ミリ秒以下)で到来したため、われわれの小型放射線検出器は飽和してしまい、下向きガンマ線閃光を詳細に観測できなかった。一方、下向きガンマ線閃光の兆候を検出した10ミリ秒後から数百ミリ秒ほどの間、小型放射線検出器で捉えたガンマ線が徐々に減衰していく様子が見られた。初期に大量のガンマ線が検出器に到達し、その後の数百ミリ秒ほどかけて減衰していく様子は、シミュレーションでも明らかになったように光核反応で発生した中性子や核ガンマ線の特徴的な時間分布である。

モニタリングポストには、電離箱が設置されている。電離箱の時間分解能は荒く、放射線の細かい時間変動を調べることは適さないが、その感度ゆえに大量の放射線に対して飽和することがない。そこで、電離箱のデータを活用し、モンテカルロシミュレーション(GEANT4)の結果と比較することにより、観測された下向きガンマ線閃光は高度 $2500 \pm 500\text{m}$ の位置で発生し、 $(4-16) \times 10^{18}$ 個の1 MeV以上のエネルギーを有する電子がその発生に寄与したことが分かった。推定された電子個数は、衛星で観測される地球大気からのガンマ線閃光と同程度であり、地上の下向きガンマ線閃光の発生に、衛星で観測される地球大気ガンマ線閃光と同程度の数の電子が関与していることが分かった。

下向きガンマ線閃光の詳細観測は世界的にもほとんど例がなく、発生に関わる電子の物理状態や発生点の環境についてよく分かっていない。そうした中、世界に先駆けて下向きガンマ線閃光に対して定量的な評価を行うことに成功した。また、原子力発電所のモニタリングポストの電離箱を利用して下向きガンマ線閃光の定量評価を行う手法を開発したことは、今後の下向きガンマ線閃光の観測に資する成果であった。

(3) 光核反応中性子の検出

光核反応で生じた中性子を捉えるために、柏崎刈羽原子力発電所構内に Gd_2SiO_5 (GSO) シンチレータを取り付けた検出器を設置した。GSO シンチレータに含まれるガドリニウムは低エネルギー中性子に対する捕獲断面積が大きい。とくに1 eV以下のエネルギーの中性子を捕獲しやすい。ガドリニウムは中性子を捕獲すると直ちに特徴的な輝線ガンマ線を放出する。したがって、GSO シンチレータから発生する特徴的な輝線ガンマ線を見ることにより、中性子が到来したかどうかを判断できる。

下向きガンマ線閃光が発生したイベントにおいて GSO シンチレータ検出器のデータを調べた結果、ガドリニウム由来の特徴的な輝線ガンマ線が捉えられていた。また、輝線ガンマ線の時間減衰は100ミリ秒ほどであった。これらの結果より、光核反応が起こり、地上に確かに中性子

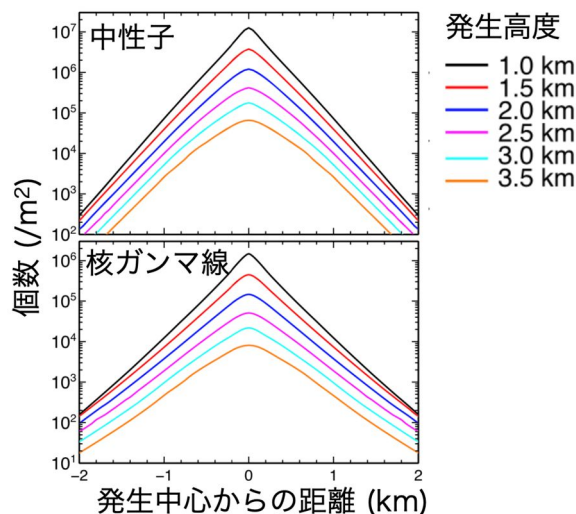


図2 シミュレーションから求めた光核反応由来する中性子と核ガンマ線の空間広がり。Wada et al., JGR Atmosphere 125, e2020JD033193 (2020)を改変。

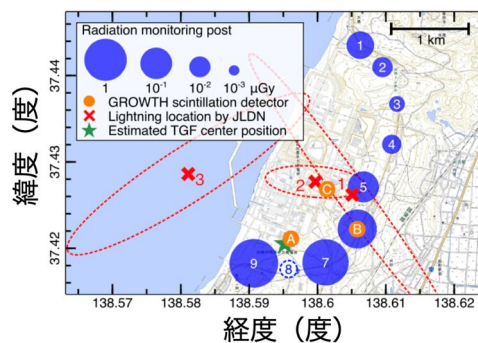


図3 放射線の検出位置。オレンジはわれわれの検出器の位置。1-9の数字は発電所のモニタリングポストの位置。モニタリングポストの丸の大きさは強度を示す。赤バツは雷の発生位置の中心を表し、緑星は推定された下向きガンマ線閃光の中心位置。(Wada et al., Phys.Rev.Lett.123, 061103, 2019を改変)

が到来していたことを実証した。

(4) 雷と高エネルギー放射線の関連

雷から放射される下向きガンマ線閃光に加えて、雷雲そのものから数分にわたり放射されるロングバーストと呼ばれる事象がある。従来、ロングバーストは下向きガンマ線閃光と関連はないと思われていた。ところが2018年、金沢市で実施した観測ではロングバーストが数分続いた後に、下向きガンマ線閃光と雷が発生、それらの発生と同期してロングバーストが終了する事象を捉えた。この現象はロングバーストが雷雲の中で電子を増殖し、それをきっかけとして下向きガンマ線閃光が生まれ、雷も引き起こした結果、雷雲の中の電場領域が破壊されたと解釈できる。興味深いことに、この観測は雷が発生する前にはロングバーストが常に雷雲から放射されている可能性も示唆した。今後の観測により、下向きガンマ線閃光が発生する前、あるいは雷が発生する前にはいつもロングバーストが発生していることを明らかにできれば、ロングバーストが雷を予測する新たなツールとなるかもしれない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 9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., 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 Wada Y., Nakazawa K., Enoto T., Furuta Y., Yuasa T., Makishima K., Tsuchiya H.	4. 巻 101
2. 論文標題 Photoneutron detection in lightning by gadolinium orthosilicate scintillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.102007	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 Yuasa T., Wada Y., Enoto T., Furuta Y., Tsuchiya H., Hisadomi S., Tsuji Y., Okuda K., Matsumoto T., Nakazawa K., Makishima K., Miyake S., Ikkatai Y.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Thundercloud Project: Exploring high-energy phenomena in thundercloud and lightning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa115	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., Enoto T., Nakazawa K., Yuasa T., Furuta Y., Odaka H., Makishima K., Tsuchiya H.	4. 巻 125
2. 論文標題 Photonuclear Reactions in Lightning: 2. Comparison Between Observation and Simulation Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JD033194	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., Nakazawa K., Odaka H., Furuta Y., Tsuchiya H.	4. 巻 125
2. 論文標題 Photonuclear Reactions in Lightning: 1. Verification and Modeling of Reaction and Propagation Processes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JD033193	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., Nakamura Y., Furuta Y., Yuasa T., Nakazawa K., Morimoto T., Sato M., Matsumoto T., Yonetoku D., Sawano T., Sakai H., Kamogawa M., Ushio T., Makishima K., Tsuchiya H.	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 1-9
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 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 H., Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Umemoto D., Makishima K., and the GROWTH collaboration	4. 巻 1163
2. 論文標題 Gamma-ray observations at the coastal area of Japan Sea in winter seasons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2019 ICRC	6. 最初と最後の頁 1-6
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 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 061103 1-6
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 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., Nakamura Y., Morimoto T., Sato M., Ushio T., Nakazawa K., Yuasa T., Yonetoku D., Sawano T., Kamogawa M., Sakai H., Furuta Y., Makishima K., Tsuchiya H.	4. 巻 125
2. 論文標題 High Peak Current Lightning Discharges Associated With Downward Terrestrial Gamma Ray Flashes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e31730 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JD031730	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 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 192-200
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 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) 10.1029/2018GL077784	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 Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Okuda K., Makishima K., Sato M., Sato Y., Nakano T., Umemoto D., Tsuchiya H., Kamogawa M., Bowers G., Smith D., Morimoto T., Nakamura Y., Daohong Wang	4. 巻 -
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 Proceedings of XVI International Conference on Atmospheric Electricity	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) 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

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 辻 結菜, 中澤 知洋, 久富 章平, 榎戸 輝揚, 和田 有希, 湯浅 孝行, 古田 禄大, 土屋 晴文, 楳本 大悟, 篠田 太郎, 加藤 雅也
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: モニタリングポストによる2014年12月に観測されたロングバーストの長距離追跡
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎戸 輝揚, 和田 有希, 久富 章平, 辻 結菜, 中澤 知洋, 湯浅 孝行, 一方井 祐子, 三宅 晶子, 土屋 晴文
2. 発表標題 雷雲プロジェクト: シチズンサイエンスも活用した高エネルギー大気物理現象の観測網
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsuchiya H., Hibino K., Kawata K., Ohnishi M.
2. 発表標題 Observations of energetic radiation due to thunderstorms at an altitude of 4300 m
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wada, Y., Enoto T., Nakazawa K., Furuta Y., Yuasa T., Nakamura Y., Morimoto T., Matsumoto T., Makishima K., Tsuchiya H.
2. 発表標題 Estimated Number of Avalanche Electrons in a Downward TGF during Winter Thunderstorms
3. 学会等名 21st European Geophysical Union General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuchiya H., Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Umemoto D., Makishimai K., and the GROWTH collaboration
2. 発表標題 Gamma-ray observations at the coastal area of Japan Sea in winter seasons
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wada Y., Enoto T., Nakamura Y., Furuta Y., Yuasa T., Nakazawa, K., Morimoto T., Sato M., Matsumoto T., Yonetoku D., Sawano T., Sakai H., Kamogawa M., Ushio T., Makishima K., Tsuchiya H.
2. 発表標題 Simultaneous detection of gamma-ray glow and downward terrestrial gamma-ray flash
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久富 章平, 中澤 知洋, 辻 結菜, Alexia Fabiani, 榎戸 輝揚, 和田 有希, 古田 禄大, 土屋 晴文, 湯浅 孝行, 一方井 祐子, 三宅 晶子
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: 2019年度の多地点観測の進展
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 結菜, 中澤 知洋, 久富 章平, Alexia Fabiani, 榎戸 輝揚, 和田 有希, 湯浅 孝行, 古田 禄大, 土屋 晴文
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: ロングバーストの追跡と電子弁別機能の追加
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田 有希, 榎戸 輝揚, 中澤 知洋, 古田 祿大, 湯浅 孝行, 森本 健志, 中村 佳敬, 松元 崇弘, 牧島 一夫, 土屋 晴文
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：地球ガンマ線フラッシュの地上観測と定量評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中澤 知洋, Fabiani Alexia, 和田 有希, 榎戸 輝揚, 古田 祿大, 土屋 晴文, 湯浅 孝行, 牧島 一夫
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：ロングバーストの電子加速器の高度の観測
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤 知洋, 松元 崇弘, 和田 有希, Fabiani Alexia, 榎戸 輝揚, 奥田 和史, 古田 祿大, 會澤 優輝, 湯浅 孝行, 土屋 晴文, 佐藤 光輝, 牧島 一夫
2. 発表標題 雷ガンマ線観測：2018年度における冬の柏崎でのコリメータ付きガンマ線検出器の観測結果と夏の東京スカイツリーでの観測の試み
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田 有希, 榎戸 輝揚, 松元 崇弘, 中澤 知洋, 古田 祿大, 湯浅 孝行, 土屋 晴文, 米徳 大輔, 澤野 達哉, 牧島 一夫, 鴨川 仁, 中村 佳敬, 森本 健志, 佐藤 光輝, 酒井 英男, 南戸 秀仁, 牛尾 知雄
2. 発表標題 冬季雷における高エネルギー現象の観測プロジェクトの進展
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Wada, G. Bowers, T. Enoto, M. Kamogawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, D. Smith, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, T. Tamagawa, K. Makishima, H. Tsuchiya
2. 発表標題 A gamma-ray glow terminated by leader development of an inter-cloud discharge in Japanese winter thunderstorm
3. 学会等名 European Geoscience Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya
2. 発表標題 Ground-based high-energy radiation measurement of photonuclear reaction triggered by lightning discharge
3. 学会等名 European Geoscience Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田 有希, 榎戸 輝揚, 中澤 知洋, 古田 禄大, 湯浅 孝行, 中村 佳敬, 森本 健志, 松元 崇弘, 牧島 一夫, 土屋 晴文
2. 発表標題 冬季の雷放電と同期したガンマ線フラッシュの定量評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2019年春の学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田 有希, 榎戸 輝揚, 松元崇弘, 中澤知洋, 古田禄大, 湯浅孝行, 鴨川仁, G.S.Bowers, 中村佳敬, 森本 健志, 玉川 徹, 牧島 一夫, 土屋 晴文, 久保 守, 松木 篤, 米徳 大輔, 澤野 達哉, D.M.Smith
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: 多地点観測の進展と大気電場・電波との共同観測
3. 学会等名 日本物理学会 第74回 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松元 崇弘, 和田 有希, 古田 禄大, 中澤 知洋, 榎戸 輝揚, 湯浅 孝行, 土屋 晴文, 牧島 一夫, 小高 裕和, 馬場 彩, 米徳 大輔, 澤野 達哉
2. 発表標題 2015年-2017年冬期の金沢地域における雷雲ガンマ線データの解析
3. 学会等名 日本物理学会 2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松元 崇弘, 和田 有希, 古田 禄大, 中澤 知洋, 榎戸 輝揚, 湯浅 孝行, 土屋 晴文, 牧島 一夫, 小高 裕和, 馬場 彩, 米徳 大輔, 澤野 達哉
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: ロングバーストのフラックス較正とスペクトル系統解析
3. 学会等名 日本物理学会 第74回 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, D. Umemoto, H. Tsuchiya, G. S Bowers, M. Kamogawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, D. Smith
2. 発表標題 High-Energy Radiation Phenomena from Winter Thunderstorms and Lightning In Japan
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Wada, G.S.Bowers, T.Enoto, M.Kamogawa, Y.Nakamura, T.Morimoto, D.M.Smith, Y.Furuta, K.Nakazawa, T.Yuasa, A.Matsuki, M.Kubo, T.Tamagawa, K. Makishima, H. Tsuchiya
2. 発表標題 Lightning-Triggered Termination of a Gamma-ray Glow in a Japanese Winter Thunderstorm
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Wada, T. Enoto, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, T. Matsumoto, D. Umemoto, K. Makishima, H. Tsuchiya
2. 発表標題 Recent Updates from Mapping Observation of High-Energy Phenomena In Japanese Winter Thunderstorms
3. 学会等名 TEPA2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tsuchiya
2. 発表標題 Recent status of the GROWTH experiment -Gamma-ray observations at the coastal area of Japan Sea -
3. 学会等名 23rd Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, M. Kamogawa, G. Bowers, D. Smith, T. Morimoto, Y. Nakamura
2. 発表標題 Multipoint Measurement Campaigns of Gamma rays from Thundercloud and Lightning in Japan
3. 学会等名 2018国際大気電気学会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 榎戸 輝揚、中澤 知洋	4. 発行年 2018年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 4
3. 書名 バリティ	

〔産業財産権〕

〔その他〕

雷雲に隠れた天然の加速器を雷が破壊する瞬間を捉えた
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2018/5907/>

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	鳥居 建男 (Torii Tatsuo) (20421795)	福島大学・環境放射能研究所・特任教授 (11601)	
研究分担者	中澤 知洋 (Nakazawa Kazuhiro) (50342621)	名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授 (13901)	

	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
研究協力者	榎戸 輝揚 (Enoto Teruaki)		
研究協力者	和田 有希 (Wada Yuuki)		

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