

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22354

研究課題名（和文）小型線量計を用いた地上メッシュ観測による雷放電での電子加速・増幅機構の解明

研究課題名（英文）Studies on electron acceleration and multiplication in lightning by a ground-based array of small dosimeters

研究代表者

和田 有希（WADA, YUUKI）

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：40879144

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：雷放電はときに高エネルギー現象を引き起こすことが知られている。地球ガンマ線フラッシュ（TGF）は雷放電と同期した数百マイクロ秒の瞬間的なガンマ線放射であり、電子が相対論的なエネルギーまで加速・増幅される現象である。しかし濃密な大気中で電子を加速増幅するメカニズムは未だ明らかになっていない。本課題では北陸地方の冬季雷をターゲットに、TGFを地上観測する小型な検出器を開発し、実際にTGFを観測することに成功した。またこれまでのTGFの観測と広帯域長波帯電波の観測を比較することで、どのような雷放電でTGFが発生しているか、その種別の分類が可能となり、電子の加速・増幅メカニズムに対する示唆を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TGFは雷放電の初期で発生しており、発生や進展のメカニズムが未だよく理解されていない雷放電に対し、TGFがどのような影響を与えるか、といった点も今後の研究として期待される。またTGFでは大量のガンマ線が発生することから、特に航空機で飛行中に直撃した場合に乗客・乗員の被ばく量が懸念される。現在ではどのような雷でTGFが起きているか解明されていないものの、本研究でその手がかりが得られており、将来的な被ばく量推定に役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Thunderclouds and lightning discharges are known to sometimes cause high-energy atmospheric phenomena. Terrestrial gamma-ray flashes (TGFs) are an instantaneous gamma-ray emission of several hundred microseconds synchronized with a lightning discharge, a phenomenon in which electrons are accelerated and multiplied to relativistic energies by lightning discharges. However, the mechanism of electron acceleration and multiplication in a dense atmosphere has not yet been clarified. In this work, we developed a small detector for ground-based observation of TGFs focusing on winter thunderstorms in the Hokuriku region, and succeeded in observing a TGF. In addition, by comparing TGFs and broadband low-frequency radio observations, we clarified what types of lightning discharges can trigger TGFs, and obtained a suggestion for the mechanism of electron acceleration and multiplication.

研究分野：高エネルギー大気物理学

キーワード：地球ガンマ線フラッシュ 雷放電 電場加速 雷雲 高エネルギー大気現象 放射線

1. 研究開始当初の背景

自然界では荷電粒子を相対論的なエネルギーまで加速する、いわば天然の加速機構が存在する。宇宙線の起源である太陽や超新星残骸など宇宙の高エネルギー天体が天然の加速器として知られているが、我々に身近である雷放電も天然の加速器であることが近年の研究で明らかになってきた。1994年に宇宙ガンマ線衛星CGROが地球から放出されるミリ秒のガンマ線を捉えた (Fishman et al., Science, 1994)。今日では地球ガンマ線フラッシュ (terrestrial gamma-ray flash: TGF) と呼ばれ、雷放電に同期して 10 MeV 以上に達するガンマ線が放出されている (Smith et al., Science, 2005)。これは雷放電における強電場領域によって電子が瞬間的に MeV のエネルギーまで加速され、制動放射を出していると考えられている。

濃密な大気中でも電子が高エネルギーまで加速されるメカニズムとして「相対論的逃走電子なだれ増幅モデル」(Gurevich et al., Phys. Lett. A, 1992) が提唱されている (図 1)。1 気圧の大気中において約 300 keV/m 以上の電場がかかっている場合、数百 keV の電子が電場領域に飛び込んでくると電離損失で二次電子を生み出しながら数十 MeV まで加速される。二次電子も数百 keV のエネルギーを持っていれば加速されるため、電場中で雪崩増幅が発生する。

一方で近年の研究では、この雪崩増幅モデルだけでは TGF のフラックスを説明できないことがわかってきた。雪崩増幅が発生するために必要な数百 keV の種電子は二次宇宙線から供給されると考えられてきたが、TGF の明るさを説明するためには宇宙線強度が 10^5 - 10^6 倍も足りない (Dwyer and Smith, JGR, 2008)。したがって TGF には宇宙線の他に種電子を生み出す機構、またはなだれ増幅モデルよりも更に効率的な増幅機構が働いている可能性が高い。これまで高温の放電路の先端が種電子を生み出す「リーダー種電子モデル」や、制動放射の光子による対生成で生み出された陽電子が電場を逆流して二次電子を生み出す「相対論的フィードバックモデル」の 2 つが提唱されているが、そのどちらが効いているのか、それとも別の未知の機構が働いているのか、現在の観測データでは決定打が得られていない。

2. 研究の目的

本研究では TGF の地上観測から、TGF における電子の加速・増幅機構として提唱されている 2 つのモデルを検証することが目的である。TGF では大気中であっても大量の電子を相対論的なエネルギーまで加速・増幅しており、極めて効率的な粒子機構が働いていると考えられる。このような機構は例えば木星など地球以外の惑星でも働いている可能性がある他、宇宙における希薄なガス中での電場加速にも応用できる可能性があり、他の分野へ波及していく可能性がある。

このような効率的な加速機構がどのような条件で発生しているかを解明することももう一つの目的である。これまでの研究ではすべての雷放電が TGF を発生しているわけではないことが示唆されている。一方でどのような雷放電で、あるいは雷放電のどのプロセスで TGF が発生しているかは、未だによく理解されていない。TGF が地上付近で発生すると、そのガンマ線による地上での空間線量は数 μGy に達するとも試算されており (Wada et al., PRL, 2019)、住民の被曝量の推定という観点からも、どのような雷放電で TGF が発生するかを知ることは重要である。

3. 研究の方法

本研究では TGF の発生機構の解明に向けて (1) 小型 TGF 検出器の開発とその展開 (2) 波形取得 ADC を用いた高速ガンマ線・電波検出器による鉄塔落雷の観測 (3) 過去の TGF 観測とそれに同期した長波帯電波観測の比較による、TGF を発生させた雷放電の分類、の 3 つの方法で研究を実施した。

本研究では冬に雷放電が多発する石川県金沢市を観測地とし、冬の雷放電で発生する TGF の観測を行った。冬季の日本海沿岸地域においては、日本海から本州に吹き付ける季節風が暖流である対馬海流より水蒸気供給を受けて変質し、さらに上層に入り込んだ寒気によって大気が不

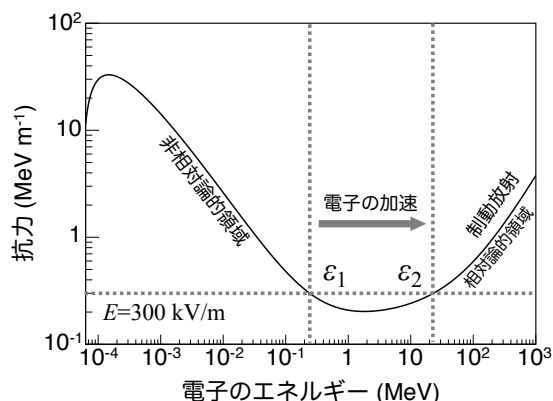


図 1: 電子が電離損失及び制動放射によって受ける抗力。ε₁ よりエネルギーの高い電子は強電場で ε₂ まで加速される。

安定となることで積乱雲が発生し、世界的にも珍しい冬季雷が頻発する。冬季雷は雷雲の形成高度が夏季雷よりも低いという特徴をもち、大気に吸収されやすい放射線が地上に到達しやすいことから、TGFを始めとした高エネルギー大気現象の観測に適している。特にTGFはこれまで宇宙からガンマ線観測衛星などで検出されており、地上での観測事例は世界的に見ても少ないが、これまで北陸地方で複数のTGFが地上観測されており、世界的にも注目されている。

雷雲の発達高度が低い冬の雷においてはTGFがもたらす地上でのガンマ線フラックスも 10^6 - 10^8 photons/cm/s程度、吸収線量も0.1-10 μ Gyと、環境放射線と比べて極めて大きく、通常のガンマ線測定器では飽和してしまう(Wada et al., PRL, 2019)。そこで(1)では小型なシンチレータを用いることで検出器の飽和を防ぎつつ、多点展開できる検出器を開発し、(2)ではより高度な情報が取得できるように放射線と電波の波形を同時に全取得できる検出器を使用した。

また研究代表者らは2016年より石川県金沢市および新潟県柏崎市で雷雲・雷を対象としたガンマ線観測を実施しており、これまで7例のTGFを検出している。これらのガンマ線による観測結果を、近畿大学・神戸高専との共同研究にて実施している長波帯電波観測による雷放電の電波波形と比較することで、TGFがどのような電波パルス、ひいてはどのような種類の雷放電と同期して発生しているかを議論した。

4. 研究成果

(1) 小型TGF検出器の開発とその展開においては、TGFを飽和なく検出するため、1 cm立方のプラスチックシンチレータおよびGAGGシンチレータを採用し、MPPCで読み出す小型検出器の開発を実施した。10 cm立方という小型サイズでありながら、回路系の改良により500 kHz以上のカウントレートでの放射線計測が可能となった他、MPPCの温度変動によるゲイン変動も補償する制御機構を開発し、安定して動作する検出器を開発できた。2021年度には2台の検出器を金沢大学角間キャンパスに設置して冬季の観測を行った。2021年12月30日4時8分に、雷放電に同期してTGFの検出に成功した(図2)。検出器は正常に動作しており、開発した機器がTGFを高精度に捉えることを確認できた。

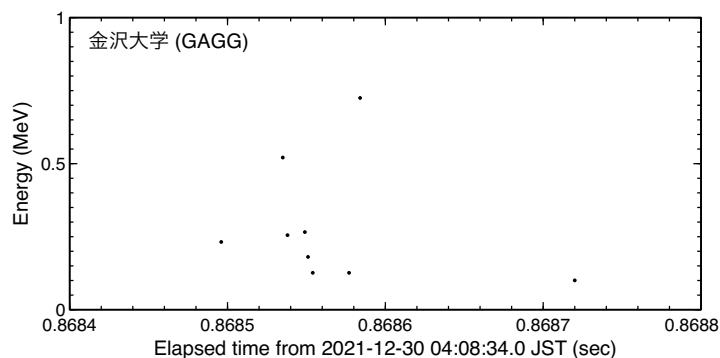


図2: 新規開発した小型TGF検出器で観測した2021年12月30日のTGFの到来時間-エネルギー分布。

(2) 波形取得ADCを用いた高速ガンマ線・電波検出器による鉄塔落雷の観測においては、高速な放射線計測が可能なCeBr₃シンチレータとプラスチックシンチレータを搭載した検出器を石川県金沢産業技術専門校に設置した。設置場所から数百メートルのところに金沢近郊をカバーするテレビ電波送信塔があり、その鉄塔への落雷を対象とした観測を実施した。またガンマ線の観測のみならず、雷放電に放射される30 MHz付近の超短波帯の電波も同時記録することで、ガンマ線と電波の対応関係も調査した。

2021年1月18日14時9分および2021年2月22日21時19分に、テレビ電波送信塔周辺の雷放電に付随すると見られるTGFを検出した。前者においてはガンマ線のフラックスが極めて高く、高速計測可能な本検出器でも飽和してしまっていた。一方で後者はTGFの光子を1つ1つ分解できており、正常に観測できていた。また同時取得した超短波帯の波形も2つの事象で違いが見られた。これらの観測結果から、放電の種類とTGFの強度についての関係が明らかになる可能性があり、解析を続けている。

(3) 過去のTGFの解析については、2016年10月から2020年3月までに観測されたイベントを対象としてイベントを抽出したところ、新潟県柏崎市で4例、石川県金沢市で3例のTGFが解析対象となった。これら7例のイベントについて、富山県入善町で取得できた広帯域長波帯(LF: 0.8-500 kHz)電波の波形と比較を行った(図3)。

その結果、TGFを発生させた雷放電は2つに大別することができるとわかった。1つは数十kA程度のピーク電流をもつ対地雷である。このようなケースは7つのTGFのうち4例が該当した。特徴としていずれも対地電流に伴うメインのLFパルスから数十マイクロ秒から数百マイ

クロ秒ほど TGF が先行しており、対地電流ではなく、先行するステップとリーダーの進展の最終段階に同期して TGF が発生していることが明らかとなった。またこのケースにおいては 4 例中 3 例が 1 回の雷放電で複数の TGF が発生するマルチパルス TGF であった。

もう一つは 100 kA 以上の大きな対地電流を伴う雷放電と TGF が同期しているケースである。このケースには 7 例中 3 例が該当した。このケースの特徴は TGF の発生タイミングと対地電流による LF パルスがマイクロ秒レベルで同期しており、対地電流そのものが TGF の発生に関与している可能性が示されたことである。加えて 3 例はすべて 1 回の雷放電で 1 つのみの TGF が発生しているシングルパルス TGF であった。

近年の理論的研究によって、TGF によって生成される大量の高エネルギー電子そのものが電波を放射する可能性が示唆されている (Pu et al., GRL, 2019)。本研究では TGF が電波パルスに同期していたケースと先行していたケースとがあり、高エネルギー電子からの電波放射は TGF の一般的な特徴ではないと考えられる。一方で本研究のように TGF と同期する雷放電が 2 つに大別されたことから、それらが TGF の発生メカニズム、具体的に「リーダー種電子モデル」と「相対論的フィードバックモデル」にそれぞれ対応しているという可能性が示された。本研究成果はアメリカ地球物理学連合の秋季大会で発表し、また同連合の速報誌 *Geophysical Research Letters* に掲載された。

TGF は主に宇宙からの観測が行われている。人工衛星での観測ではガンマ線が雷雲から衛星高度まで到達するまでのタイムラグや衛星そのものの時刻同期の難しさから、地上の雷放電観測と時刻を高精度に同期させることが難しかった。一方で本研究ではガンマ線検出器も電波観測機器も 1 マイクロ秒以上の精度で時刻同期されていることで、雷放電の電波パルスと TGF の発生タイミングの時間関係を高精度に検証することが出来た。また衛星とは異なり、開発した小型な放射線検出器は多点への展開が容易なため、今後、世界的にも地上観測による TGF 研究が加速すると考えられ、その際には本研究成果が大きな足がかりになると期待される。

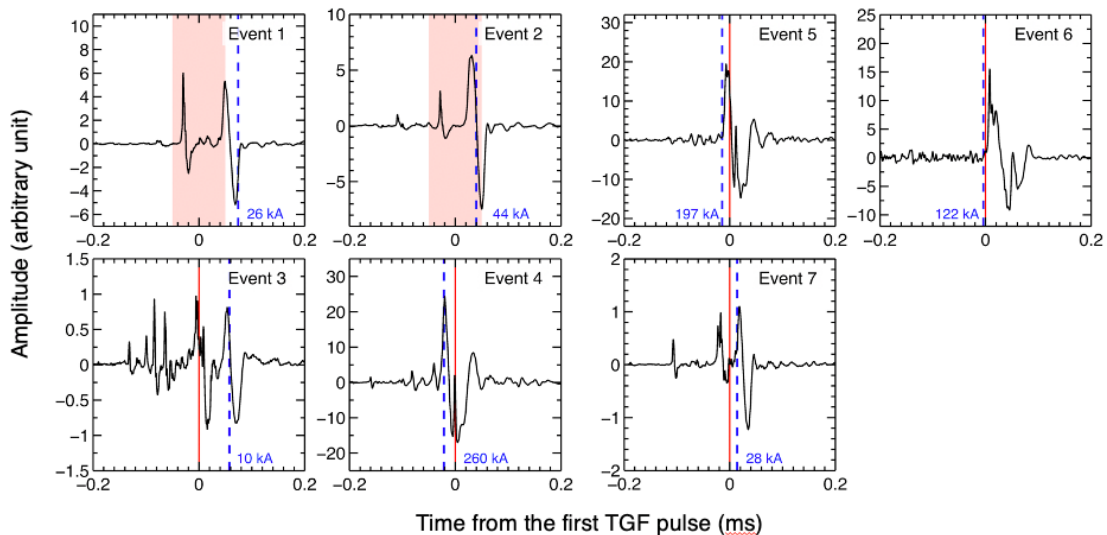


図 3: 7 例の TGF に同期した LF 波形と TGF の発生タイミング。赤線または赤帯は TGF の発生時刻を示す。青点線は対地雷の検知時刻を示す。

<引用文献>

Dwyer and Smith (2005), *Geophysical Research Letters*, 32, L22804
 Fishman et al. (1994), *Science*, 264(5163), 1313–1316
 Gurevich et al. (1992), *Physics Letters A*, 165(5–6), 463–468
 Smith et al. (2005), *Science*, 307(5712), 1085–1088
 Pu et al. (2019), *Geophysical Research Letters*, 46, 6990–6997
 Wada et al. (2019), *Physical Review Letters*, 123(6).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6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 e2020GL091910
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 -
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 -
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 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 -
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 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 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 和田有希, 中村裕子, 榎戸輝揚	4. 巻 100
2. 論文標題 ドローンを用いた雷雲直下での放射線観測の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 大気電気学会誌	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yuuki Wada, Teruaki Enoto, Mamoru Kubo, Kazuhiro Nakazawa, Takayuki Yuasa, Daisuke Yonetoku, Tatsuya Sawano, Tomoo Ushio, Taro Shinoda, Yousuke Sato, Gabriel Sousa Diniz, Harufumi Tsuchiya
2. 発表標題 Radar diagnosis of winter thunderclouds in Japan originating gamma-ray glows
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田有希
2. 発表標題 雷放電による光核反応の観測的研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (招待講演)
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 Gabriel Sousa Diniz, Yuuki Wada, Yutaka Ohira, Kazuhiro Nakazawa, Teruaki Enoto
2. 発表標題 Atmospheric electron range extended by thundercloud electric field below the relativistic runaway electron avalanche threshold
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Duan Maomao, Takanori Sakamoto, Teruaki Enoto, Yuuki Wada
2. 発表標題 Study on temporal and positional correlation between sprites and gamma-ray radiations by thunderclouds between 2016 and 2021
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田有希
2. 発表標題 高エネルギー大気物理学の新展開
3. 学会等名 第6回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会（招待講演）
4. 発表年 2021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 和田有希, 中村裕子, 榎戸輝揚
2. 発表標題 ドローンを用いた雷雲直下での放射線観測の検討
3. 学会等名 日本大気電気学会第100回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田有希, 榎戸輝揚, 久保守, 中澤知洋, 篠田太郎, 米徳大輔, 澤野達哉, 湯浅孝行, 牛尾知雄, 佐藤陽祐, ガブリエル・ディニズ, 土屋晴文
2. 発表標題 ガンマ線を放出する冬季雷雲のXバンドレーダーおよび降水粒子観測
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎戸輝揚, 一方井祐子, 和田有希, Diniz Gabriel, 沼澤正樹, 加藤陽, 三宅晶子, 中澤知洋, 久富富平, 辻結菜, 湯浅孝行, 土屋晴文, 森本健志, 中村佳敬, 鴨川仁
2. 発表標題 雷雲ガンマ線のマッピング観測を狙うシチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」の進捗
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021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, 榎戸輝揚, 和田有希, 湯浅孝行, 土屋晴文, 篠田太郎, 大熊佳吾, Diniz Gabriel
2. 発表標題 2020年度雷雲ガンマ線観測における高度測定用検出器GOOSEの展開と観測
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武元清達, 篠田太郎, 加藤雅也, 久富章平, 辻結菜, 中澤知洋, 和田有希, 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷活動に由来したガンマ線放射時の雲内の降水粒子分布
3. 学会等名 JpGU2021
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
4. 発表年 2021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, 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

〔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 (Springer Theses)	

〔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
---------	---------

フランス	フランス国立科学研究センター	フランス国立宇宙研究センター	原子力・代替エネルギー庁	
チェコ	チェコ科学アカデミー			