

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00683

研究課題名（和文）ガンマ線と電波の同時マッピング観測で挑む雷が起こす光核反応の物理

研究課題名（英文）Physics of photonuclear reactions triggered by lightning discharges studied by simultaneous mapping observations of gamma rays and radio

研究代表者

榎戸 輝揚（Enoto, Teruaki）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・理研白眉研究チームリーダー

研究者番号：20748123

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 27,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は近年発見された雷雲や雷放電に伴う放射線を観測し、大気中で発生する高エネルギー物理現象の解明を目指している。特に、雷放電の進展と電子加速の比較、雷に伴うガンマ線での光核反応の研究、雷放電のトリガー機構の研究を行う。3年間の研究期間で冬季雷で有名な金沢の周辺に、シチズンサイエンスの枠組みを活用した小型の放射線モニタを70個ほどを設置する体制を構築した。その結果、雷雲からのガンマ線照射領域（電子加速域）と電波で測定した雷放電のトリガーが同じ領域で起きる現象を見つけ論文で発表した。今後、光核反応の理解にもつながる観測網になると期待している。これは雷トリガーの謎に迫る次の基盤研究Aを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放電は強い電場で発生するが、雷雲内で放電を開始するだけの強電場が観測できないことから、雷がどのように始まるかは大気科学における長年の未解決問題である。本研究は宇宙線空気シャワーと雷雲の相互作用が雷放電のトリガーに関わるのではないかとという作業仮説を観測的に研究する学術的な意義がある。また、その実施においては金沢の市民サポーターと連携したシチズンサイエンスという手法を持ち込んでおり、科学をその成果創出だけでなく、科学そのものを市民とともに楽しむという社会的意義がある。実際、2022年度には市民サポーターを巻き込んだワークショップを金沢で実施し、科学と文化の融合を狙っている。

研究成果の概要（英文）：This research aims to elucidate high-energy atmospheric physics by observing the radiation associated with thunderclouds and lightning discharges, which have become increasingly found in recent years. In particular, we study the evolution of lightning discharges and electron acceleration, photonuclear reactions associated with lightning, and the triggering mechanism of lightning discharges. During the three-year research period, we established a new observation system of more than 70 small radiation monitors around Kanazawa, famous for its winter lightning, using the Citizen Science framework. As a result, we found an association between the gamma-ray glow from a thundercloud (electron acceleration area) and the initiation of lightning discharges by the gamma-ray and radio measurements. This is one of the attractive evidence of our efforts to solve the mystery of the lightning trigger, and we proposed the subsequent Fundamental Research A.

研究分野：High-energy atmospheric physics

キーワード：photonuclear reaction gamma-ray glow atmospheric physics radiation measurement lightning discharge neutron citizen science

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

雷や雷雲からMeVを超えるガンマ線が観測されている。これは雷雲中の準安定な強電場や、雷の放電路で突発的に現れる強電場の領域で、大気電場が電子の相対論的な加速と雪崩増幅を起こし、大気に衝突して生じる制動放射ガンマ線と考えられている (Gurevich et al., Phys. Lett. A 1992)。雷からのミリ秒ほどのスケールのガンマ線バースト現象は、地上での観測は自然雷 (Moore et al., Geophys. Res. Lett 2001) や、ロケット誘雷実験 (Dwyer et al., Geophys. Res. Lett 2004)などに事例に限られていた。一方で、雷放電に伴って上空に放出される Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF) は宇宙観測衛星によって年間に数百個以上観測され、注目の研究分野となっている。実は日本でも、日本海沿岸に冬季雷雲が発生すると、原子力発電所のモニタリングポストが数分間にわたって放射線を検出する例が報告され (Torii et al., JGR Atmosphere 2002)、物理学と地球科学、気象学にまたがる学際的な研究が始まりつつある。

我々は雷雲からの放射線を地上で観測するプロジェクトGamma-Ray Observation of Winter THunderclouds (GROWTH)を2006年に立ち上げ、新潟県の柏崎で観測を行ってきた。その結果、雷雲の通過に伴って数分間にわたり ~20 MeV に達するガンマ線が地上に降り注ぐ「ロングバースト」現象 (雷雲ガンマ線、gamma-ray glow)を毎年検出してきた。これは、雲中の強電場の領域で、宇宙線シャワーを種にした電子の電場加速と雪崩増幅が発生し、加速電子からの制動放射ガンマ線が、地上をサーチライトのように照らしつつ風に流されていく現象である。しかし、ガンマ線は大気中で数百 m しか飛ばないため、粒子加速の全貌を捉えるには多地点マッピング観測が本質的に重要であると気がついた。そこで2015年から、柏崎に加え、強力な冬季雷や雷雲が到来する金沢を中心に、新たに多数の放射線測定器を展開した観測プロジェクトを開始した。可搬型で製造コストを抑えた分散型の測定システムを新たに開発し、日本海沿岸の各地に観測網を構築してきた。

この新しい手法で「雷が起こす光核反応」の発見に至った (Enoto et al., Nature 2017)。2017年2月6日に検出器から 1 km の地点で雷が発生し (図1)、数ミリ秒にわたって検出器を飽和させる強烈なガンマ線が到来し、下向き TGF の地上観測に成功した。これに引き続いて、我々が「ショートバースト」と呼んでいる 10 MeV に達する明るいガンマ線残光 (~0.2秒ほどで減衰)を検出できた (図1a)。さらに雷の下流で35秒ほど遅れて 0.511 MeV の電子陽電子の対消滅線が明確に検出できた (図1b)。詳しい解析から、この一連の現象は、TGF のガンマ線が大気中の窒素や酸素の原子核と光核反応を起こしたと解明できた (図1c)。光核反応で飛び出した中性子は大気中で散乱を繰り返しつつ減速・拡散し、窒素原子核に吸収される。ほとんどは荷

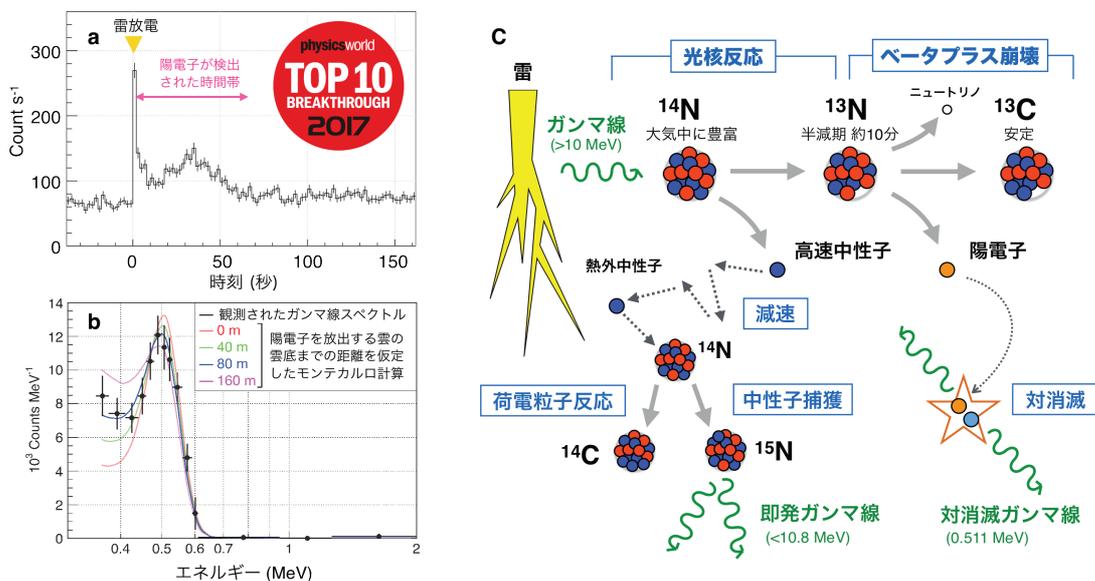


図1. (a) 図1の雷放電から風下にある検出器での 0.511 MeV (正確には 0.35–0.60 MeV) 信号の時間変動 (Enoto et al., Nature 2017)。 (b) パネル a の矢印の時間帯に得られた 0.511 MeV 対消滅線のガンマ線スペクトルとモンテカルロ計算の比較。 (c) 雷からのガンマ線が窒素の原子核と起こす光核反応と、その後の一連の物理現象の模式図。

電粒子反応で ^{14}C になり痕跡を残さないが、一部は中性子捕獲で即発ガンマ線を生じ、これが0.2秒ほど続くガンマ線残光となる。一方、光核反応で窒素原子から中性子が溢れ落ちると、不安定な放射性同位体である ^{13}N になり、さらに半減期10分ほどで安定な ^{13}C に徐々に変わる。この際、陽電子を大気中に放出し即座に対消滅を起し、0.511 MeV 輝線になった。この結果は雷が原子核反応を起こすことを世界に先駆けて明らかにしており、中性子や陽電子による高エネルギー物理学の観測手法を雷に応用できる道を拓いた。

2. 研究の目的

本研究では金沢市街地に展開してきた放射線マッピング観測網を拡充しつつ、以下のように「雷からの電波」と「雷雲からの電場変動」の計測も新た追加し、金沢の周辺で発生する雷雲や雷での高エネルギー大気物理現象の解明を目指すものである(図2)。特に、以下のような視点も新たに考慮する。

- (1)[雷放電の進展との比較] 広帯域な Low-frequency (LF, 0.8-500 kHz) の雷観測ネットワークを新たに整備し、雷放電の時空間的な発展と放射線バースト現象とを高い時間分解能で比較することで、光核反応がどのような種類の雷のどの過程・時空間で生じるかを解明する。
- (2)[光核反応の定量化] 光核反応で発生した、ほぼ球対象に拡散する中性子が原子核に捕獲されて放つ即発ガンマ線(ショートバースト)を多地点で検出し、その強度から一回の雷放電での核反応量を定量評価する。中性子の直接検出と即発ガンマ線の輝線検出にむけた技術的改良を施す。
- (3)[雷放電の発生条件の解明] 雷放電の前駆現象とみなされている雷雲内の電場加速(ロングバースト)の発生条件を調べるため、新たにフィールドミルによる地上での電場計測も加え、雷雲内の電場構造を推定し、ロングバーストと雷放電の関係性の解明の手がかりを探る。

これらの高エネルギー物理学の観測手法の雷への応用は、大気科学における長らくの未解決問題である「雷の発生条件(トリガー)は良く分かっていない」という根源的な問いに答えられる可能性がある。古くは雷は大気中の絶縁破壊電場を超えるような電場により引き起こされると考えられてきたが、近年の研究ではそのような「強すぎる電場」は雷雲中には観測されないことが知られるようになった。そのため、放電のトリガーには、宇宙線シャワーやロングバーストの電場加速で生じる高エネルギー粒子の関与が疑われている。本研究はこういった未解決問題の解明も射程に入れる。

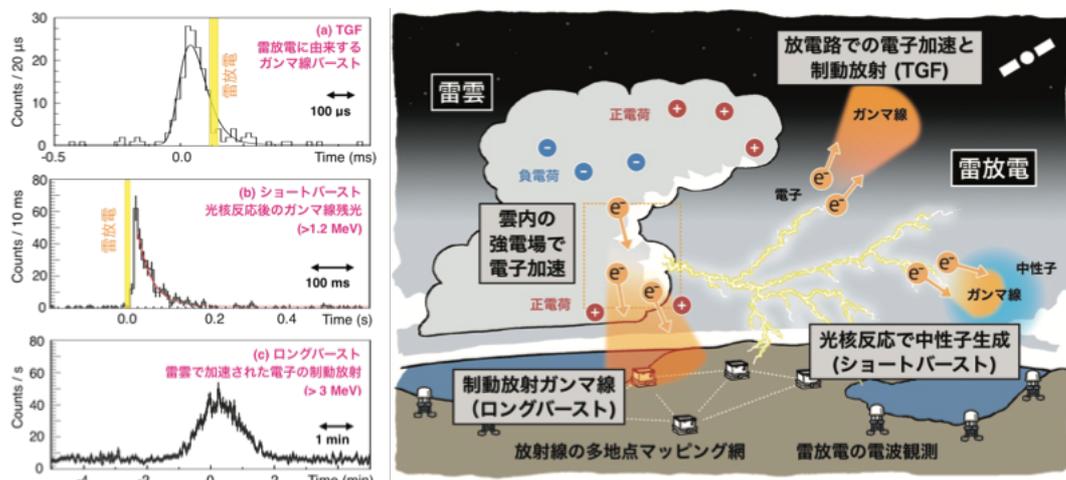


図2. 左の3つのパネルは、雷活動に関係した3種類の放射線の時間変動。上から順に、ミリ秒の Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF)、我々が雷放電の後に検出したサブ秒で指数減衰するショートバースト(光核反応のガンマ線残光)、数分間の継続時間で雷雲からガンマ線が降り注ぐロングバースト(雷雲ガンマ線、Gamma-ray glow)。右図は高エネルギー大気物理の概念図。(榎戸ほか, 日本物理学会誌, 2019)。



図3. (左) 本プロジェクトで開発してきた、シチズンサイエンスで市民サポーターに展開するコガモ検出器(Compact Gamma-ray Monitor, CoGaMo)の写真。(右) コガモから自動で送信されてくる環境センサーの信号や放射線強度の自動表示サーバーの様子 (時間変動の図) と、雷雲からのガンマ線

3. 研究の方法

これまで、金沢市街地に高等学校の屋上などを借りて8台の放射線の測定器が稼働しているが、さらに台数が増えた体制になると置と運用を研究者だけで維持するのは難しくなる。そこで本研究では、科学研究を市民と連携して行う「シチズンサイエンス」の流れを活用し、放射線測定装置を郵送・貸し出し、民家の軒下を借りた観測体制の構築にも挑んだ。京都のTAC Inc.社と共同開発した、シチズンサイエンスの市民サポーターが手軽に扱うことのできる放射線モニタ、コガモ検出器(Compact Gamma-ray Monitor, CoGaMo)を開発した。これはボタン一つで放射線の自動測定と、ネットを使ってデータを自動送信できる。このコガモ検出器は金沢の市民サポーターに送付して、庭先に設置して観測を実施していただく。観測に参加する市民サポーターは、観測場所の提供だけでなく、ウェブ上のサイトでデータの閲覧、解析に参加でき、現地の気象の目撃情報も収集できる。ちなみに、米国では Zooniverse というサイトで市民が研究に参加できるオープンサイエンスの枠組みがあり、銀河の分類をする Galaxy Zoo プロジェクトでは 57 本もの査読論文が出ている。我が国でも市民と連携した科学研究のできるフレームワークの構築を目指し、研究代表者は 2016年に「京都オープンサイエンス勉強会」を立ち上げ、物理学に限らず、生物学、地震学を始めとする多様な分野の研究者と交流し、オープンサイエンスを実施するノウハウを蓄積してきた。本研究ではその成果も取り込んで実施するものである。これらの多地点の放射線観測網は、さらに電波や電場の観測結果と比較して研究を実施する。

4. 研究成果

我々は多地点観測を実現するためにシチズンサイエンスの技法を導入し、市民サポーターが手軽に観測を行える「コガモ」を開発し観測体制を構築できた。これはボタンを入れれば全自動でデータを取得し、遠隔にサーバーにデータを送る仕様になっている。研究期間を通してコガモ検出器の追加製作を続け、最終的に約70個のコガモを金沢周辺の市民サポーターのご自宅に配送して庭先に設置できる体制を整えた。これをシチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」として運用し、毎年度の冬季に11月から2月ころまで観測を行い、雷雲からのガンマ線を複数観測することに成功した。さらに、雷雲からのガンマ線をサーバー上で監視し、ある閾値を超える現象を捉えた場合には、自動アラートを twitter に配信するシステムを整えた。このアラートを研究メンバーが確認し、実際にノイズではなく雷雲からのガンマ線であることが確認できた場合、図3のようにtwitter に公開して、市民サポーターに金沢市での気象状況を確認してもらう体制を組み上げた。

これらの観測結果のひとつとして、2021年12月30日に金沢市でロングバーストを複数のコガモ検出器が検出した。さらに、FALMA や DALMA などの雷放電の測定システムと連携するこ

とで、ロングバーストが雷放電に同期して途絶していることが明らかになった。この際、雲の流れを考慮すると、ロングバーストの上空、すなわち電子の相対論的な電場加速が発生している強電場領域の周辺ないし内部で雷放電が始まっている可能性が示唆された。ただし、高度方向にはMeVエネルギーの電子が多数発生している高度よりも、より高い位置から雷放電が発生していたことから、雪崩増幅で発生した電子ではなく、それ以前に強電場領域と宇宙線の空気シャワーの相互作用が雷放電の開始に関わっている可能性もある。本成果は、Tsurumi, Enoto et al., *Geophysical Research Letter*, 2023として論文として発表された。

これらの結果をもとに、本研究は雷のトリガーの謎により軸足を移した科学研究費補助金・基盤研究A・22H00145「高エネルギー大気物理学の手法で挑む雷トリガー機構の解明」に継続されることになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

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 e97348
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 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 e35958
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., 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 43117
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 e34543
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 102007
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 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 e33193
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., 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 e33194
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 Yuasa Takayuki, Wada Yuuki, Enoto Teruaki, Furuta Yoshihiro, Tsuchiya Harufumi, Hisadomi Shohei, Tsuji Yuna, Okuda Kazufumi, Matsumoto Takahiro, Nakazawa Kazuhiro, Makishima Kazuo, Miyake Shoko, Ikkatai Yuko	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 103H01
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 Diniz G. S., Ferreira I. S., Wada Y., Enoto T.	4. 巻 126
2. 論文標題 Generation Possibility of Gamma Ray Glows Induced by Photonuclear Reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e34101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JD034101	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 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., 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 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 M. Tsurumi, T. Enoto, Y. Ikkatai, T. Wu, D. Wang, T. Shinoda, K. Nakazawa, N. Tsuji, G. S. Diniz, J. Kataoka, N. Koshikawa, R. Iwashita, M. Kamogawa, T. Takagak, S. Miyake, D. Tomioka, T. Morimoto, Y. Nakamura, H. Tsuchiya	4. 巻 NA
2. 論文標題 Citizen science observation of a gamma-ray glow associated with the initiation of a lightning flash	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 NA
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 -

〔学会発表〕 計34件（うち招待講演 19件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 中性子測定の世界への新展開: 雷の核反応と月の水資源
3. 学会等名 RANSシンポジウム 「いよいよ見えてきた小型中性子源の現場利用と拓けて来たさらなる応用 -コンクリート反射イメージングから宇宙へ-」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎戸輝揚
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 Japan Geoscience Union Meeting (JpGU)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Photonuclear Reactions Triggered by Lightning
3. 学会等名 3rd International Conference on Nuclear Photonics (NP2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 共創型サイエンスによる高エネルギー大気物理学の開拓
3. 学会等名 原子・分子・光科学 (AMO) 討論会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 オープンサイエンスも活用した雷と雷雲からの放射線計測
3. 学会等名 第59回 JAEA核化学夏の学校（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷と雷雲の高エネルギー大気物理学
3. 学会等名 宇宙地球惑星科学会・若手会「夏の学校」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Citizen science approach for observation of gamma-ray glows at Kanazawa
3. 学会等名 Workshop on Thunderstorm Radiation（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 シチズンサイエンスを活用した金沢での放射線マッピング「雷雲プロジェクト」
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 榎戸輝揚
2. 発表標題 シンチレータを用いた自然放射線の科学観測
3. 学会等名 第69回応用物理学会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷トリガーの謎に挑むシチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」のプラットフォーム構築
3. 学会等名 理研シンポジウム：理研ハッカソン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Enoto, Yuuki Wada, Takayuki Yuasa, Yuko Ikkatai, Kazuhiro Nakazawa, Shohei Hisadomi, Yuna Tsuji, Harufumi Tsuchiya, Takeshi Morimoto, Yoshitaka Nakamura, Masashi Kamogawa, Yousuke Sato
2. 発表標題 Thunder Cloud Project : Ground-based multipoint radiation measurement campaign of high-energy atmospheric phenomena
3. 学会等名 the JpGU-AGU Joint Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎戸輝揚, 和田有希, 久富富平, 辻結菜, 中澤知洋, 湯浅孝行, 一方井裕子, 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 榎戸輝揚, 志岐真
2. 発表標題 みんなで探る雷の不思議
3. 学会等名 理研DAY: 研究者と話そう!(招待講演)(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 High-Energy Atmospheric Physics of Lightning and Thunderstorms Observed along the Sea of Japan
3. 学会等名 Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Enoto, Yuuki Wada, Takayuki Yuasa, Yuko Ikkatai, Shohei Hisadomi, Yuna Tsuji, Kazuhiro Nakazawa, Gabriel Sousa Diniz, Harufumi Tsuchiya, Takeshi Morimoto, Yoshitaka Nakamura, Masashi Kamogawa, Yousuke Sato
2. 発表標題 Thundercloud Project: Citizen Science Observation Campaign of High-energy Atmospheric Phenomena from Lightning and Thunderstorms in Japan
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 榎戸輝揚, 早野龍五
2. 発表標題 X線天文学者が挑む雷の不思議
3. 学会等名 おうちでアストロノミー・バ(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	榎戸輝揚, 和田有希, Gabriel Diniz, 沼澤正樹, 加藤陽, 中澤知洋, 久富富平, 辻結菜, 一方井祐子, 三宅晶子, 土屋晴文, 湯浅孝行, 高垣徹, 森本健志, 中村佳敬, 鴨川仁, 佐藤陽祐, 篠田太郎, 小野英理
2. 発表標題	雷雲電場における粒子加速と宇宙線シャワーへの影響の観測的研究
3. 学会等名	東京大学宇宙線研究所・2020年度共同利用成果報告会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Eiri Ono, Yuko Ikkatai
2. 発表標題	Internet-based services used for obtaining scientific information according to the degrees of interests in science and technology
3. 学会等名	2020 9th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	田尻貴浩, 森本健志, 中村佳敬, 酒井英男, 清水雅仁
2. 発表標題	冬季に観測された広範囲に進展する雷放電の放電様相
3. 学会等名	日本大気電気学会第99回研究発表会
4. 発表年	2021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の新展開
3. 学会等名	2019年度 音羽電機工業株式会社・日刊工業新聞社主催・雷と雷保護技術セミナー(大阪会場) (招待講演)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷のガンマ線！？オープンサイエンスで挑戦
3. 学会等名 SPIRITS 成果報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 宇宙観測の技術で雷の謎に挑む
3. 学会等名 京都産業大学理学部宇宙物理・気象学科談話会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 オープンサイエンスを活用して挑む雷の高エネルギー大気物理学
3. 学会等名 ナイスステップな研究者2018講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Photonuclear Reactions Triggered by Lightning
3. 学会等名 1st Symposium on Evolution of Matter in the Universe（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 X線天文学者が挑む雷の謎
3. 学会等名 京都大学金曜天文講座2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷がつくる反粒子
3. 学会等名 朝日カルチャーセンター新宿「反物質シリーズ講座」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 X-ray astronomers are trying to work out a mystery of lightning
3. 学会等名 国立天文台科学研究部コロキウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷でおきる核反応
3. 学会等名 原子核物理分野の若手放談会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 シチズンサイエンスで挑む雷の謎
3. 学会等名 理化学研究所・和光キャンパス一般公開 サイエンスレクチャー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 シチズンサイエンスの未来 --科学を文化に!--
3. 学会等名 TEDxTokyo（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 シチズンサイエンス・雷雲プロジェクト報告
3. 学会等名 シチズンサイエンス・ワークショップ「雷から文化を創造する」~雷の見える化でわかる価値~
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Enoto
2. 発表標題 Citizen science observation campaign of gamma-ray glows from winter thunderstorms in Japan
3. 学会等名 Thundercloud & Elementary Particle Accelerator (TEPA) 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 シチズンサイエンスで挑む雷の謎
3. 学会等名 北陸先端科学技術大学院大学 自然との共感・共生国際シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎戸輝揚
2. 発表標題 雷発生の謎に挑むシチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」
3. 学会等名 理研シンポジウム：理研ハッカソン 公開シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鴨川 仁、吉田 智、森本健志	4. 発行年 2021年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 238
3. 書名 雷の疑問56	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>雷雲プロジェクト：ふしぎな雷雲ガンモを探せ！ https://fabcafe.com/jp/labs/kyoto/thunderstorm/ 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム http://enotolab.com Thundercloud Project https://thdr.info 雷雲プロジェクト：ふしぎな雷雲ガンモを探せ！ https://fabcafe.com/jp/labs/%25branch%25/thunderstorm/ 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム http://enotolab.com Nature NEWS FEATURE https://www.nature.com/articles/d41586-021-00395-3?utm_source=tw_t_nnc&utm_medium=social&utm_campaign=naturenews</p>
--

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	鴨川 仁 (Kamogawa Masashi) (00329111)	静岡県立大学・その他部局等・特任准教授 (23803)	
研究分担者	森本 健志 (Morimoto Takeshi) (60403169)	近畿大学・理工学部・教授 (34419)	
研究分担者	小野 英理 (Ono Eiri) (80827460)	京都大学・学術情報メディアセンター・特定講師 (14301)	

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