

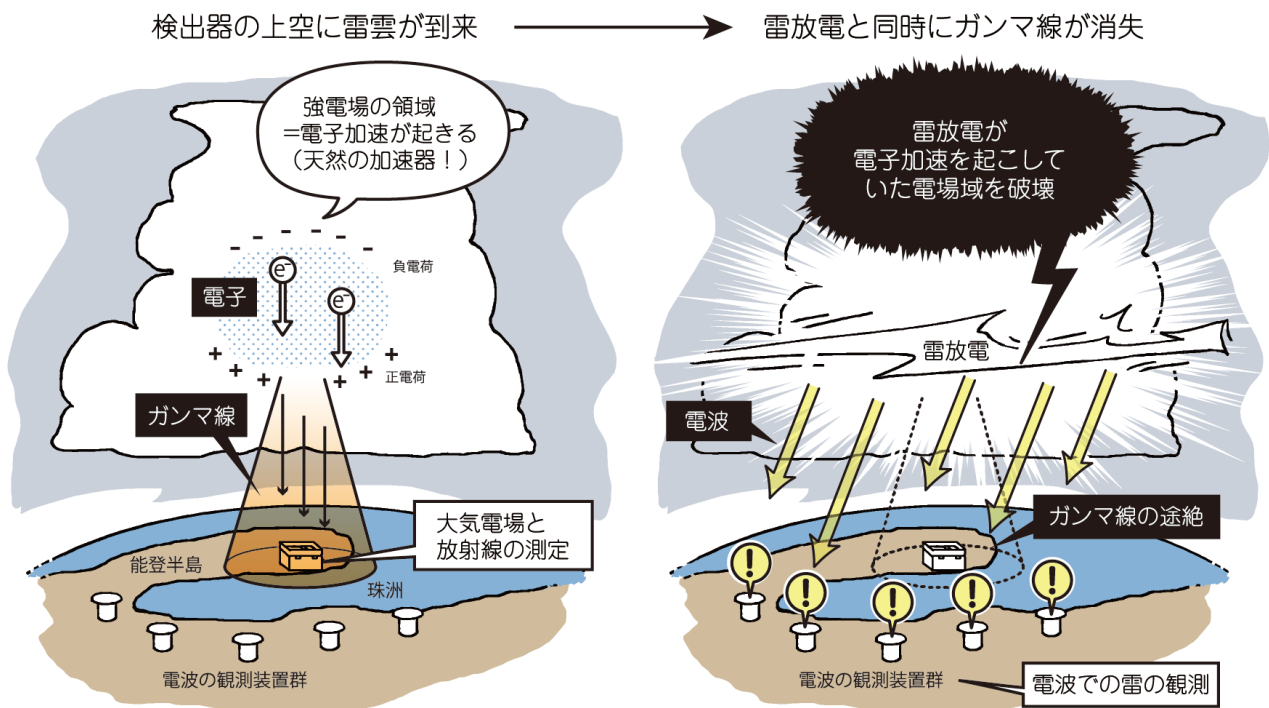
# 雷雲に隠れた天然の加速器を雷が破壊する瞬間を捉えた —放射線・大気電場・電波による高エネルギー大気現象の観測—

## 概要

和田有希 東京大学大学院理学系研究科博士課程学生（理化学研究所仁科加速器科学研究センター研修生）、Gregory Bowers 米国ロスアラモス国立研究所研究員、榎戸輝揚 京都大学白眉センター特定准教授、鴨川仁 東京学芸大学教育学部准教授、中村佳敬 神戸市立工業高等専門学校電気工学科准教授、森本健志 近畿大学理工学部准教授、David Smith カリフォルニア大学サンタクルーズ校教授、中澤知洋 名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構准教授、松木篤 金沢大学環日本海域環境研究センター准教授、久保守 同理工研究域フロンティア工学系助教らの国際共同研究グループは、雷雲中に発達した電場加速機構が雷放電によって破壊される様子を観測することに成功しました。

本研究では石川県珠洲市に放射線検出器と大気電場計を設置し、雷雲の通過と同期した1分ほど継続するガンマ線のバースト放射(\*1)が、雷とともに途絶する様子を観測しました。この雷放電は富山湾に設置された長波帯（LF）電波受信機(\*2)により観測され、バースト放射が途絶した瞬間に、放電路(\*3)が放射線検出器の上空を通過したことが確認されました。これにより雷雲中に存在していた電子の加速機構が、雲中の放電によって直接的に破壊されたことが示されました。

論文は日本時間 2018 年 5 月 17 日、米国の学術誌「Geophysical Research Letters」にオンライン掲載されました。



Wada et al., "Termination of Electron Acceleration in Thundercloud by Intra/Inter-cloud Discharge", *Geophys. Res. Lett.* (2018)

Illustration by Hayanon's Science Manga Studio

## 1. 背景

雷は我々にとって身近な気象現象でありながら、放電のきっかけや雷雲の形成メカニズムなど、未解明な問題が多く残されています。その未解決問題の一つが、雷や雷雲から放出される高エネルギー放射線です。近年、雷や雷雲が強い電場構造を持つことから、自然界における天然の加速器として働き、電子を光速近くまで加速できると指摘されています。最近では、加速された電子が大気分子に衝突して放出される高エネルギーのガンマ線を、最先端の装置で観測できるようになりました。特に、雷雲の上空から宇宙に向かって駆け上がる高エネルギーのガンマ線が人工衛星で検出されるようになり、地球ガンマ線フラッシュと呼ばれ、活発な研究の対象になっています。

冬の北陸の日本海沿岸には毎年、強力な雷雲が押し寄せ、世界的にも数少ない恵まれた雷の観測場所になります。これまでも本研究グループでは、雷雲や雷の高エネルギー放射を地上から観測してきました。その過程で、雷雲によって電子が加速されて強力なガンマ線が発生し、大気中で原子核反応を起こす現象「ショートバースト」を解明しました。また雷雲の中で加速された電子が放出するガンマ線が数分間にわたって地上に降り注ぐ現象「ロングバースト」も既に発見し、雷の前駆現象として注目されています。

## 2. 研究手法・成果

今回の成果は、冬季雷における放射線測定と大気電場、電波観測の連携から生まれました。本研究グループでは冬季の雷とともに発生する高エネルギー放射線を多地点で観測する「マッピング観測」計画を推進しています。計画の初期には学術系クラウドファンディング academist により資金調達を行い<sup>[1]</sup>、小型で高性能な放射線検出器の開発を完了しました。2015 年より始動した本計画により、すでに 10 台以上の検出器を金沢市、小松市、柏崎市などへ設置しています。

今回の観測は能登半島の先端部(石川県珠洲市)に位置する能登大気観測スーパーサイト(金沢大学能登学舎内に設置)にて行われました。観測地には放射線検出器と大気電場計を設置し、雷雲接近時の高エネルギー現象が取得できる観測拠点として整備を行いました。これに加え、富山県氷見市から入善町にかけての富山湾沿岸に 5 台の長波帯(LF)電波受信機を設置し、富山湾から能登半島にかけての広範囲における雷活動を高精度で測定できる LF 観測ネットワークを構築しました。

2017 年 2 月 11 日、大気電場計が雷雲の接近を検知したのと同時に、放射線検出器がガンマ線量の増大、すなわち「ロングバースト」を観測しました。ロングバーストは約 1 分間継続した後、雷放電によって一瞬で途絶しました。LF 観測ネットワークはこの雷放電が能登学舎の西 15 km で開始し、約 300 ミリ秒かけて水平方向に 70 km 進展したことを検出しました。この放電路の進展は能登学舎の南東わずか 0.7 km のところを通過したとともに、その通過時刻はロングバーストが途絶した時刻と一致しました。このことから、放射線検出器の上空に存在した雷雲中の電場加速機構が、水平方向に進展した雷放電の通過によって破壊されたことが直接的に示されました。

これまでも雷放電とともにロングバーストが途絶する事象は世界各地の地上実験・航空機実験などで確認されていました。しかし、従来の雷検出技術では対地雷(\*4)の瞬間など、放電プロセスの一部しか観測することができず、特に雷雲内における放電路の進展といった微弱な事象を観測するには至っていませんでした。今回、十分な時刻精度を持った放射線検出器と、放電路の進展を検出できる LF 帯域の観測技術を組み合わせることにより、加速機構の破壊と雷放電との関連を明確にすることに世界で初めて成功しました。

ロングバーストは世界各地で観測されている事象でありながら、発生する条件などが明らかになっていません。また雷の前駆現象として注目されながらも、雷放電が開始する「きっかけ」とどのような関係にある

かもわかっていません。今回の観測事象では放電そのものはロングバーストが観測された地点から 15 km 離れたところで開始していたため、放電のきっかけにロングバーストは関与していませんでした。一方で電子の加速機構が破壊される瞬間の雷放電と加速機構との位置関係を、電波観測で比較できることを実証しました。今後さらに放射線と雷放電の観測を継続することにより、放電の開始とロングバーストとの関係性が明らかになると考えられます。

### 3. 波及効果、今後の予定

日本の北陸沿岸の雷雲や雷は放出エネルギーが大きく、地上付近で発生するなど、世界的に見ても絶好の観測地点のひとつです。これまでの雷や雷雲の研究では、高エネルギー放射線と電波・大気電場による観測が独立して行われてきましたが、本研究ではこれらを組み合わせることで、雷雲中で発生している電子加速の領域が雷によって破壊されている物理過程を、詳細に観測することができました。これまでは異なる観測手法、分野・学会で行われていた研究を横断して、「雷雲と雷の高エネルギー大気物理学」という新しい学術分野が学際的に展開されていくと期待できます。本研究は、その嚆矢となる結果です。

今後は雷のメッカである金沢市の周辺に、多数の放射線検出器を配置し、マッピング観測を本格化させていきたいと考えています。能登半島の先端で今回観測されたような現象は、金沢市周辺でも十分に検出されると期待できます。放射線検出器の小型化と最適化は進んでおり、今後は市民サポーターと連携した観測体制を模索していくなど、オープンサイエンスの視点<sup>[2]</sup>も取り入れた研究を進めます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は放射線に限らず、遠方からの雷放電の電波観測や、雷雲到来時の地上での電場計測など、多様な観測手法を取り入れるため、国内外の研究グループとの連携により進めてきました。能登大気観測スーパーサイトでの大気電場・放射線観測は金沢大学とともに鴨川らが主導し、米国を中心に雷雲や雷での放射線観測を行ってきた Bowers、Smith らの測定器 GODOT も使った観測を行ってきました。2016 年より榎戸、和田らの Gamma-Ray Observation of Winter THundercloud (GROWTH) コラボレーション<sup>[3]</sup>も参画し、共同での放射線観測を行っています。さらに森本、中村らの電波観測を組み合わせることで、雷放電の進展過程を高エネルギー放射線と詳細に比較することができるようになり、今回、日本の冬季雲での大気電場・電波・放射線の同時観測に成功したと言えます。

本研究は、学術系クラウドファンディング academist とサポーターの皆様、理化学研究所若手研究者育成制度、京都大学白眉プロジェクト、京都大学「知の越境」融合チーム研究プログラム SPIRITS 学際型、日本学術振興会・科学研究費助成事業・若手研究 A (16H06006)、同基盤研究 C (16K05555)、東京大学宇宙線研究所・共同利用研究、金沢大学環日本海域環境研究センター共同研究 (16004、17008) の支援を受けて行われました。また観測拠点の構築には、金沢大学能登学舎、魚津市、氷見市、入善町の支援を受けて行われました。この場を借りて、改めてお礼申し上げます。

#### <注>

[1] カミナリ雲からの謎のガンマ線ビームを終え！<https://academist-cf.com/projects/16>

[2] KYOTO-OPEN.SCIENCE (京都オープンサイエンス・ミートアップ) <http://kyoto-open.science>

[3] Thundercloud project <https://thdr.info>

### <キーワード>

- \*1: 1分ほど継続するガンマ線のバースト放射：通常環境放射線とは別に、一時的に増大するガンマ線放射のことで、雷雲に由来する。
- \*2: 長波帯（LF）電波受信機：長波を中心とする広帯域（800 Hz - 500 kHz）な波長に感度を持つ電波の受信機。
- \*3: 放電路：雷放電が空を横切るその経路のこと
- \*4: 対地雷：雷放電は、雲から地上へ放電する対地雷のほかに、地上に落ちない雲中雷などがある。

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Termination of Electron Acceleration in Thundercloud by Intra/Inter-cloud Discharge

著者：Yuuki Wada、Gregory S. Bowers、Teruaki Enoto、Masashi Kamogawa、Yoshitaka Nakamura、Takeshi Morimoto、David M. Smith、Yoshihiro Furuta、Kazuhiro Nakazawa、Takayuki Yuasa、Atsushi Matsuki、Mamoru Kubo、Toru Tamagawa、Kazuo Makishima、Harufumi Tsuchiya

掲載誌：Geophysical Research Letters DOI：10.1029/2018GL077784