

テーマ2「最先端研究報告（学生、若手研究者による）」

# ③

## 北陸冬季雷で発生する大気中での 電子加速と光核反応

大阪大学 大学院工学研究科  
助教 和田 有希

近年の研究によって、雷雲あるいは雷の放電路に存在する強電場領域において、電子が大気中で高エネルギーまで加速され、制動放射で高エネルギー光子を放出することが知られてきた。特に 10 MeV を超える光子が大気中で光核反応を引き起こし、中性子や陽電子を放出することも明らかとなった。

本講演では雷放電や雷雲で生じる高エネルギー現象について、特に北陸地方で発生する冬季雷での観測研究を中心に紹介する。

# 北陸冬季雷で発生する大気中での電子加速と光核反応

大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

和田 有希

## 1. はじめに

雷はよく知られた気象現象であり、閃光と轟音が印象的である。一方、落雷による火災や感電など、人類社会への被害もこれまで数多く引き起こしてきた。雷はこれまで光・音・電波を発すると考えられていたが、1980年代より、それらの3要素に加えて新たに放射線が発せられる可能性が議論されてきた。今日においては、雷放電あるいは雷雲内の強電場領域において電子が MeV のような相対論的なエネルギーまで加速され、制動放射によって高エネルギー光子を生成していることが観測的に明らかになりつつある。さらに生成された 10 MeV を超える光子が、大気中で光核反応を起こしていることも明らかとなってきた。これら雷放電や雷雲で生じる高エネルギー現象は学際的な研究対象として近年注目を集め、高エネルギー大気物理学と呼ばれる分野に発展しつつある。本講演では筆者らが北陸冬季雷を対象として実施してきた観測結果を中心に、雷雲・雷放電で生じる高エネルギー現象について紹介する。

## 2. 大気中での電子加速

一般に濃密な大気中では電子は抗力を受けやすく、電子がエネルギーを獲得するのは難しい。実際、素粒子・原子核実験や医療用の放射線発生装置で用いられる加速器では、真空中で荷電粒子を加速させるのが常識である。しかし霧箱の発明で有名な C.T.R Wilson は、1925年に大気中で電子が加速される可能性について指摘している[1]。

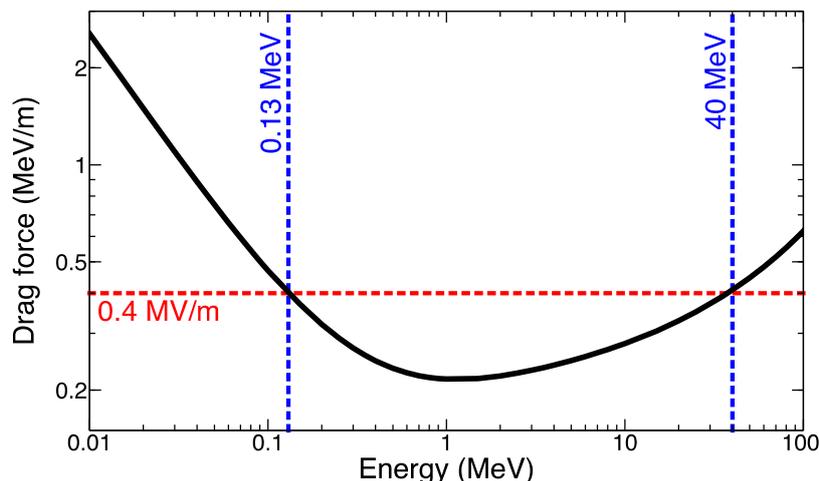


図 1：電子にかかる抗力

雷雲中に存在する電場は 0.2 MV/m から 0.3 MV/m にも達すると考えられている[2]。図 1 に 1 気圧下における電子にかかる抗力を示す。抗力は 1 MeV 以下で非相対論的な電子損失が支配的で、0.1 keV で最大値をとり、1 MeV 付近で極小値をとる。1 MeV を超えると相対論的な電離損失が支配的となり、また制動放射による損失も加わり、抗力は単調増加する。この極

小値は 1 気圧下で 0.22 MeV/m である。すなわち 0.22 MV/m 以上の電場がかかっていると潜在的に電子が加速されるエネルギー領域が生じる。例えば 0.4 MV/m の強電場が存在しているとき、0.13 MeV から 40 MeV の範囲について、電場による加速力が大気による抗力に勝り、電子は加速される。このような状況では、0.13 MeV 以上のエネルギーをもつ電子が最大で 40 MeV まで加速され、相対論的逃走電子加速と呼ばれる。そのような高エネルギーの種電子は二次宇宙線などから供給されると考えられている。

相対論的逃走電子加速によって加速された電子は電離損失で二次電子を生み出す。この二次電子のエネルギーが十分に高ければ、それらもまた種電子となり、加速される。Gurevich らはこのような逃走電子加速が連鎖的に起こり、電子の数が加速距離に対して指数関数的に増える「逃走電子なだれ増幅モデル」を提唱した[3]。1 気圧下では 0.28 MV/m を超える電場がかかったときに、なだれ増幅が発生すると考えられている。

### 3. 北陸冬季雷

雷は夏の季語であり、世界的に見ても夏に多発する現象である。雷放電を引き起こす積乱雲（雷雲）は、地表付近の高温多湿な大気と上空の低温な大気との間で起こる対流によって成長するため、気温の高い時期に発生するのが一般的である。一方で、世界的に見ても珍しい冬の雷が世界のいくつかの地域で見られ、特に北陸地方の日本海沿岸部は活発な冬季雷で有名である。日本海には南からの暖流である対馬海流が流れ込む。この温暖な対馬海流と並走する西風は、温暖で湿潤な大気として北陸地方に吹き付ける。このとき上空に強い寒気が入り込んでいると、大気の状態が不安定となって積乱雲が発達し、冬であっても雷が発生しやすくなる。

夏季雷と冬季雷ではその性質も大きく異なる。特に高エネルギー大気物理学で重要なのは雷雲の形成高度である。雷雲内で強電場が生じる領域は、雷雲内のあられと氷晶が対流によって激しくぶつかりあう領域であり、気温が $-10^{\circ}\text{C}$ 付近の高度が中心となる。夏の場合、 $-10^{\circ}\text{C}$  高度は 5 km から 7 km くらいに対応するのに対し、冬の場合は 1 km から 2 km に位置する[4]。雷雲内で加速された電子は大気中の原子核と相互作用し、制動放射によって高エネルギー光子を生み出す。しかし MeV のエネルギーをもつ光子は、大気中において典型的に数百メートルで減衰してしまうため、夏季の雷雲では地上に到達しない。一方で冬季雷雲の場合、強電場領域が 1 km 未満に下がってくることもあり、その場合には地上で高エネルギー現象を観測することができる。そのため、海外では夏の雷雲を対象にした 3000 m 級の高山観測や航空機・気球などを用いた飛行体観測が行われているが、北陸冬季雷では地上に検出器を置くだけで観測することが可能である。我々は 2007 年から Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds (GROWTH) 実験として、北陸冬季雷での高エネルギー現象の観測を行っており[5]、特に 2016 年からは石川県金沢市を中心とした複数の高校や大学、一般企業などに検出器を設置して、10 箇所以上の多地点での放射線観測を実施している。

### 4. ガンマ線グロー

雷雲や雷放電に伴う高エネルギー現象にはいくつか種類があることが知られているが、本稿ではガンマ線グローと地球ガンマ線フラッシュを紹介したい。ガンマ線グローは数秒から数分にわたる MeV 光子のバーストであり、雷雲内の強電場で加速された電子からの制動放射に由来すると考えられている。1980 年代に NASA の航空機が放射線検出器を搭載して雷雲内を飛行した際に初めて観測された[6]。日本では 1997 年に福井県の高速増殖炉もんじゅに設

置されたモニタリングポストが異常値を示し、後に上空を雷雲が通過してガンマ線グローを検出したことが判明した[7]。なおガンマ線グローの光子は制動放射と考えられており、一般的にはガンマ線ではなく X 線と呼ばれるべきである。一方で宇宙物理学や高エネルギー大気物理学など一部の分野では光子の発生メカニズムを特定することが難しいことから、およそ 0.1 keV から 100 keV の光子を X 線、100 keV 以上の光子をガンマ線と呼ぶことが多い。ガンマ線グローや後述の地球ガンマ線フラッシュもこの慣習に基づいて名付けられている。

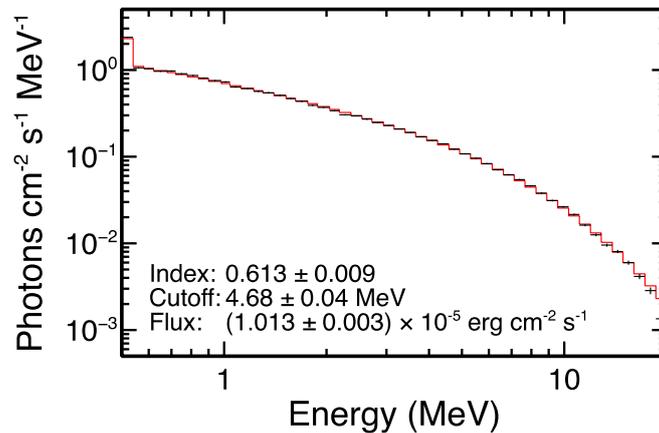


図 2：金沢市で観測したガンマ線グローの平均エネルギースペクトル[11]

前述のとおり夏季雷雲でのガンマ線グローの研究は高所で行う必要があり、欧米による航空機観測[8,9]やアルメニアでの高山観測[10]などが精力的に行われている。一方で北陸冬季雷での地上観測はより簡単に高品質な観測を行うことができるため、この分野をリードしている。2016 年から石川県金沢市に展開している GRWOTH 実験では、2016 年 10 月から 2020 年 3 月までに合計 70 例のガンマ線グローを検出している[11]。検出したガンマ線グローの平均エネルギースペクトルを図 2 に示す。スペクトルは指数関数カットオフをもつべき関数で近似でき、べきは-0.6、カットオフエネルギーは 4.7 MeV であった。

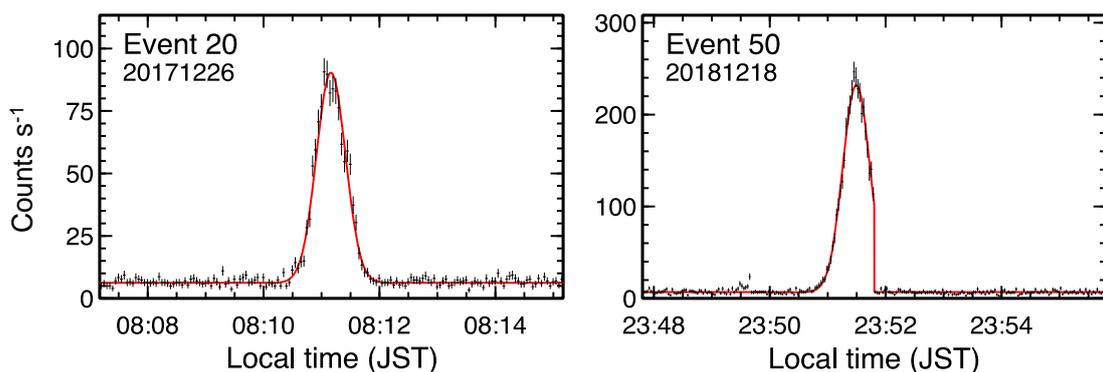


図 3：金沢市で観測したガンマ線グローのカウントレート変動[11]

左：時間対称型の変動 右：瞬間途絶型

カウントレートの変動 2 事例を図 3 に示す。70 例のうち 34 例は時間的に対称なカウントレートの変動を示している。これは雷雲内に存在する準安定な電子加速機構が雷雲とともに移動し、検出器の上空を通過していったと解釈できる。また 19 事例はカウントレートが急激

にバックグラウンドレベルに戻る瞬間途絶型である。瞬間途絶型では途絶する瞬間に雷放電が観測されており、雷によって強電場領域が放電することで、電子加速が急激に停止すると考えられている。途絶に対応する雷放電は複数の電波アンテナによる放電伸展の可視化装置で観測されており、実際に瞬間途絶が起きた際に検出器上空を放電路が進展した事例も観測されている[12]。

ガンマ線グローの謎は雷雲内のどこでどのようにして電子加速領域が形成されるか、ということである。この謎を明らかにするためには、複数の放射線検出器によるガンマ線グローの追跡が重要である。加えて雷雲の構造を観測する気象レーダーや、雷雲によって形成される地上電場の計測も有益な情報である。実際、金沢大学でのガンマ線グローの検出時には、気象レーダーによって金沢大学上空に発達した雷雲の存在が確認され、また地上では降雹が観測されていた[13]。

## 5. 地球ガンマ線フラッシュと光核反応

雷雲から放出されるガンマ線グローとは異なり、雷放電と同期して発生するのが地球ガンマ線フラッシュ (Terrestrial Gamma-ray Flash: TGF) である。TGF は雷放電と同期した数百マイクロ秒の瞬間的な現象であり、光子のエネルギーは 20 MeV 以上に達すると考えられている[14]。雷放電の継続時間は典型的に数百ミリ秒であり、TGF は雷放電のごく一部のプロセスに付随して生じる現象だと考えられている。

地球ガンマ線フラッシュは「地球」と名がついているが、人工衛星による観測で発見された。1991年に打ち上げられた NASA のコンプトンガンマ線衛星が、元々は宇宙の高エネルギー天体から到来するガンマ線を観測するはずが、意図せず地球からの瞬間的なバーストを捉えた。その後、そのバーストは雷放電と同期していることが地上での雷放電観測から明らかとなった。

雷雲中で生成した MeV 光子が軌道高度 450 km の人工衛星まで到達していることから、TGF では大量の高エネルギー電子が生成されていると考えられている。これまで相対論的逃走電子なだれ増幅によって TGF を説明出来ないか、様々な研究がなされてきたが、なだれ増幅モデルで生成できる MeV 光子の数は TGF で発せられる数に桁で足りないということが明らかとなり、雷放電で未知の電子増幅メカニズムが働いていると考えられている[15]。

TGF の光子は 10 MeV を超えるため、窒素 14 や酸素 16 といった大気中の原子核と光核反応 ( $^{14}\text{N}+\gamma\rightarrow^{13}\text{N}+\text{n}$  や  $^{16}\text{O}+\gamma\rightarrow^{15}\text{O}+\text{n}$ ) を起こすことが指摘されていた。例えば窒素 14 の場合、中性子 1 個と窒素 13 が生成され、酸素 16 の場合は中性子と酸素 15 が生成される。これまで雷放電に伴う地上での中性子の検出事例が報告されており[16]、光核反応の発生が議論されている一方で、プラズマ化した放電路において重水素同士の核融合反応 (DD 反応:  $\text{D}+\text{D}\rightarrow^3\text{He}+\text{n}$ ) が起きるのではないかという議論もあり、確定的な証拠は得られていなかった。

我々は 2017 年 2 月 6 日に新潟県柏崎市・刈羽村の東京電力柏崎刈羽原子力発電所内に設置した放射線検出器で、TGF を捉えた。地上付近で発生した TGF のため検出器は数ミリ秒ほど強く飽和していたが、その後に 200 ミリ秒ほど続くガンマ線のバーストを捉えた。さらにその後、1 分ほど続くガンマ線バーストが検出され、この主成分は図 4 に示すように 511 keV、すなわち陽電子の対消滅に由来することがわかった。

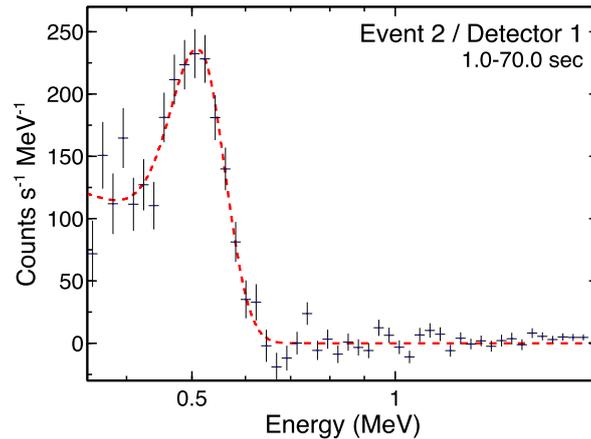


図 4: 柏崎刈羽原子力発電所内で観測した対消滅輝線のエネルギースペクトル[17]

我々はこれらの観測結果から以下のような描像を得た。

- TGF が発生して大量の光子によって放射線検出器は飽和した。
- 10 MeV 以上の光子が窒素 14 や酸素 16 などと光核反応を起こし、高速中性子や窒素 13、酸素 15などを生成した。
- 高速中性子は大気中の原子核との弾性散乱によって数百ミリ秒かけて減速され、熱化した段階で窒素 14 に中性子捕獲反応で吸着される。このとき生成した窒素 15 は励起状態で脱励起ガンマ線を放出する。これが 200 ミリ秒続くガンマ線バーストである。
- 残された窒素 13 および酸素 15 はそれぞれ 2 分、10 分の半減期でベータプラス崩壊を起こして陽電子を放出する。これらの陽子過剰核はゆっくりと陽電子を放出しながら周囲の風によって流され、検出器の上空を通過した。このときに放射線検出器で 511 KeV のガンマ線が強く放出されたと考えられる。

中性子のみならず陽電子が検出されたことから、雷放電で光核反応が起きていることを示すことができ、気象現象である雷放電が原子核反応を引き起こしていることが明らかになった [17,18,19]。一連の反応の模式図を図 5 に示した。

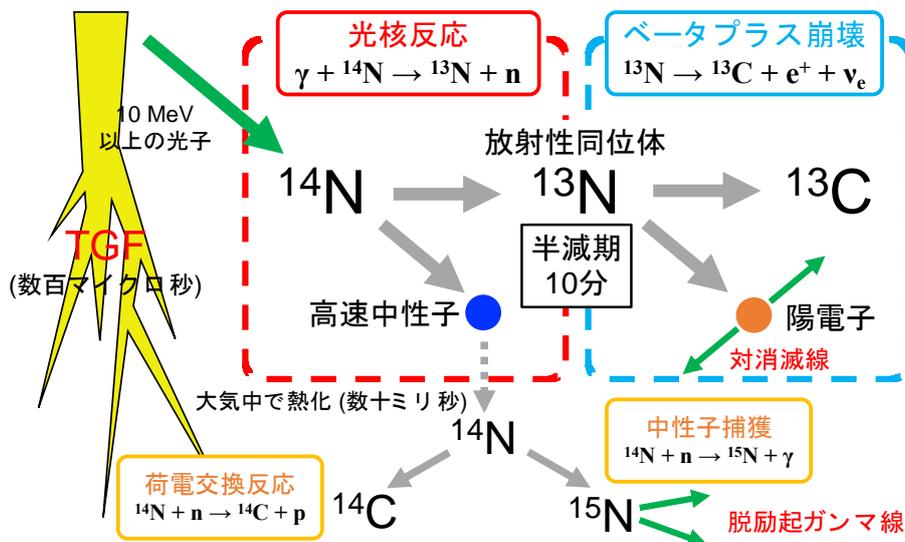


図 5: 雷放電による光核反応と二次粒子の一連の反応

雷による原子核反応は実は炭素 14 も生成する。熱化した中性子が窒素 14 に捕獲されると、一部は窒素 15 となって脱励起ガンマ線を放出するが、大半は陽子を放出する荷電交換反応を引き起こし、炭素 14 を生み出す。炭素 14 は半減期 5700 年の長寿命核種で宇宙線でも生成されるため、年代測定で用いられる重要な核種である。宇宙線での生成量に比べると雷の影響は微々たるものであるが、炭素 14 の新たな生成経路も明らかとなった。

## 6. まとめ

雷雲や雷放電に由来する高エネルギー現象はこの 20-30 年で急速に研究が進んできた分野である。上述のように観測によって雷雲・雷放電の新しい側面が明らかになりつつある。しかし電子加速メカニズムの詳細やどのような条件で電子加速が成立するかなど、未だに本質的な理解に到達していないのが現状である。加えてこのような高エネルギー現象が雷雲の発達や雷放電の開始といった気象にどのようなフィードバック・インパクトを与えているかは全く明らかとなっていない。これはやはり高エネルギー大気現象の詳細な観測が難しいことに起因するが、一方で北陸冬季雷は世界的に見ても最も適した観測対象である。今後も北陸での観測で雷の新しい描像を明らかにすることを目指している。

## 参考文献

- [1] Wilson, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 22, 534-538 (1925)
- [2] Stolzenburg et al, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103, 14059-14078 (1998)
- [3] Gurevich et al., *Physics Letters A*, 165, 463-468 (1992)
- [4] Kitagawa and Michimoto, *Journal of Geophysical Research*, 99, 10713-10721 (1994)
- [5] Tsuchiya et al., *Physical Review Letters*, 99, 165002 (2007)
- [6] McCarthy and Parks, *Geophysical Research Letters*, 12, 393-396 (1985)
- [7] Torii et al., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107, 4324 (2002)
- [8] Kelley et al., *Nature Communications*, 6, 7845 (2015)
- [9] Østgaard et al., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 7236–7254 (2019)
- [10] Chilingarian et al., *Physical Review D*, 82, 043009 (2010)
- [11] Wada et al., *Physical Review Research*, 3, 043117 (2021)
- [12] Wada et al., *Geophysical Research Letters*, 45, 5700–5707 (2018)
- [13] Wada et al., *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091910 (2021)
- [14] Smith et al., *Science*, 307, 1085-1088 (2005)
- [15] Dwyer and Smith, *Geophysical Research Letters*, 32, L22804 (2005)
- [16] Shah et al., *Nature*, 313, 773–775 (1985)
- [17] Enoto et al., *Nature*, 551, 481-484 (2018)
- [18] Wada et al., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD033193 (2020)
- [19] Wada et al., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD033194 (2020)

## 講演者略歴



### 和田 有希 (わだ ゆうき)

所 属 大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 助教  
住 所 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学工学研究科 E2-411  
連 絡 先 TEL : 06-6879-4089、E-mail: ywada@eei.eng.osaka-u.ac.jp  
学 職 歴 2015年 東京大学 理学部 物理学科 卒業  
2020年 東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 博士課程 修了  
博士 (理学) 「雷放電による光核反応の観測的研究」  
2020年 国立研究開発法人理化学研究所 基礎科学特別研究員  
2021年 大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 助教  
現在に至る

研究・活動 分野など これまで雷放電や雷雲で生じる放射線を対象とし、放射線検出器の開発や  
冬季の北陸地方における地上観測を実施してきた。また放射線のみならず、  
雷放電を観測する電波観測、雷雲を観測する大気電場や気象レーダー、降水  
粒子観測などとの協同観測を実施している。大阪大学に着任後は気象レー  
ダーを中心とした気象観測システムの研究開発にも取り組んでいる。