

# 雷による光核反応の発見

和田 有希\*<sup>1</sup> 榎戸 輝揚\*<sup>2</sup>  
Wada Yuuki Enoto Teruaki

## 1. はじめに

近年の観測によって、雷放電あるいは雷雲そのものから X 線・γ 線が検出されている。宇宙では軌道上の γ 線天文衛星によって、雷放電と同期して地球から宇宙に向かって放出される「地球 γ 線フラッシュ」(Terrestrial Gamma-ray Flash: TGF) が観測されている。地上では原子力施設のモニタリングポストや高山の宇宙線観測施設が、雷雲の通過に伴う数分程度の γ 線増光「長時間バースト」や雷放電と同期した 1 秒未満の「短時間バースト」を記録している。

雷や雷雲から X 線・γ 線が放出される仕組みは、雷雲内や放電路に存在する強電場中で電子が加速される「相対論的逃走電子なだれ増幅」<sup>1)</sup> が有力と考えられている。一般的に濃密な大気中で電子が相対論的エネルギーまで加速されることは難しいが、強電場中において 200-300 keV 以上のエネルギーを持つ電子に対しては、電離損失よりも電場加速が卓越し、制動放射による損失が寄与し始める数十 MeV まで加速される。加速された電子は電離損失により二次電子を生成し、なだれ増幅する。加速・増幅された電子は最終的に数十 MeV に達する制動 X 線を放出する。

このような雷・雷雲から放出される高エネルギー放射線が大気中でどのような反応を引き起こすかという点についても、X 線・γ 線の観測例が増えるとともに活発に議論されるようになってきた。今回、地上に設置した X 線・γ 線検出器が中性子と陽電子の兆候を捉えたことにより、雷によって放出された X 線・γ 線が光核反応を起こすことを初めて観測的に実証した<sup>2)</sup>。この結果は雷が原子核に作用し、更に同位体の生成経路となることを示すものである。

本稿では 2017 年 11 月の *Nature* 誌に掲載された本成果について解説する。

## 2. 雷による中性子の生成

1985 年、インドの宇宙線観測施設において、雷に起因する中性子を検出したという初めての報告が Shah らによってなされた<sup>3)</sup>。これは雷により放電路が高温になり、主に大気中の水分子に含まれる重水素が核融合する DD 反応  ${}^2\text{H}+{}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}+n$  によって中性子が生成されたという説であった。大気中に存在する重水素は少ないものの、雷に起因する放射線の報告がまだ少なかった当時では、この核融合反応が中性子を生成する唯一の有望な説とされた。

一方で 1994 年に Fishman らによって γ 線天文衛星 CGRO を用いた TGF の発見が報告された<sup>4)</sup>。更に Smith らによる RHESSI 衛星を用いた観測<sup>5)</sup> で TGF のエネルギースペクトルが 10 MeV を超えることが分かってくると、Babich<sup>6,7)</sup> や Carlson ら<sup>8)</sup> によって光核反応による中性子の生成が理論的に予言されるようになる。大気中に豊富に存在する  ${}^{14}\text{N}$  や  ${}^{16}\text{O}$  をターゲットとした光核反応  ${}^{14}\text{N}+\gamma \rightarrow {}^{13}\text{N}+n$  や  ${}^{16}\text{O}+\gamma \rightarrow {}^{15}\text{O}+n$  では、γ 線が原子核から中性子を叩き出し、同位体の  ${}^{13}\text{N}$  や  ${}^{15}\text{O}$  を生成する。例えば  ${}^{14}\text{N}+\gamma \rightarrow {}^{13}\text{N}+n$  を引き起こすには、原子核での核子の束縛エネルギーを超える 10.55 MeV 以上の γ 線が必要となる<sup>9)</sup>。当初は雷が高エネルギーな γ 線を発生させるとは考えられていなかったが、TGF の観測により雷が 10 MeV 以上の γ 線を生成しうると確かめられると、光核反応による中性子の生成が活発に議論されるようになった。

大気中での光核反応で生成される  ${}^{13}\text{N}$  及び  ${}^{15}\text{O}$  は

それぞれ半減期 10 分と 2 分の放射性同位体で、 $\beta$ +崩壊によって陽電子を放出する。したがって光核反応では中性子とともに陽電子も放出される。しかし、これまで雷に同期した中性子、あるいは陽電子の検出はそれぞれ報告されていたものの、同時に検出された例は存在せず、雷によって光核反応が引き起こされているかどうかは実証されていなかった。

### 3. 新潟県柏崎市における GROWTH 実験

筆者らは 2006 年より東京電力の協力のもと、柏崎刈羽原子力発電所構内で Gamma-Ray Observation of Winter Thundercloud (GROWTH) 実験を行っている。冬の日本海沿岸は、日本海を北上する暖流に寒気団がもたらす季節風が吹き付けることで積乱雲が発達し、世界的にも珍しい冬季雷の多発地帯となる。冬季雷は雷雲が生成される高度が夏季雷よりも低いいため、雷雲や雷で発生した $\gamma$ 線が散乱・吸収を受けにくく、地上に届きやすいという特徴がある。筆者らはこの地の利を活かし、雷雲内で長時間バーストが発生していることを明確に捉えた<sup>9)</sup>。以降、2016 年までに柏崎刈羽原発内で長時間バースト 15 件、短時間バースト 7 件を検出している。これら $\gamma$ 線バーストの発生メカニズムをより詳細に探るため、2016

年度の冬季より、これまで発電所内で 2 箇所だった観測地点を 4 箇所に増やし、雷の到来を待った。

2017 年 2 月 6 日、柏崎刈羽原発付近で落雷が発生した。この雷と同期して、構内の検出器 4 台と東京電力のモニタリングポスト 9 台が同時に短時間バーストを捉えた (図 1)。この短時間バーストは線量が落雷から約 50 ms の時定数で指数関数的に減衰することが確認された (図 2a)。この時の $\gamma$ 線スペクトルは 10 MeV で急峻なカットオフを持つ連続スペクトルであった (図 2b)。この急峻なカットオフは、これまで長時間バーストや TGF で観測されていた電子からの制動放射を示唆する冪関数型 $\gamma$ 線スペクトルの緩やかなカットオフとは異なる。

約 50 ms で減衰する短時間バーストの最初期、落雷から数 ms 間は検出器の信号が著しく飽和していた。これは雷に由来するノイズではなく、短時間バーストよりも瞬時的で強力な $\gamma$ 線フラッシュが、落雷と同時に検出器へ入射したことを示唆する。

更に落雷から 35 秒後にピークを持つ 511 keV 輝線 (単色エネルギーのスペクトル形状) が 1 分間にわたって検出された (図 3a)。すなわち落雷により陽電子が生成され、電子と対消滅したと解釈できる。大気中における陽電子の生成経路として、まず $\gamma$ 線

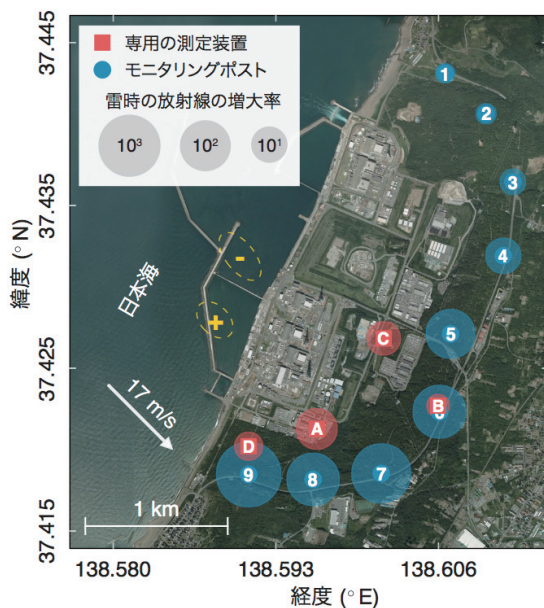


図 1 柏崎刈羽原子力発電所の衛星写真

1-9 は東京電力のモニタリングポスト、A-D は筆者らの検出器が置かれている観測点。日本海上の+と-は同時に発生した正極性・負極性雷の落雷地点を示す。

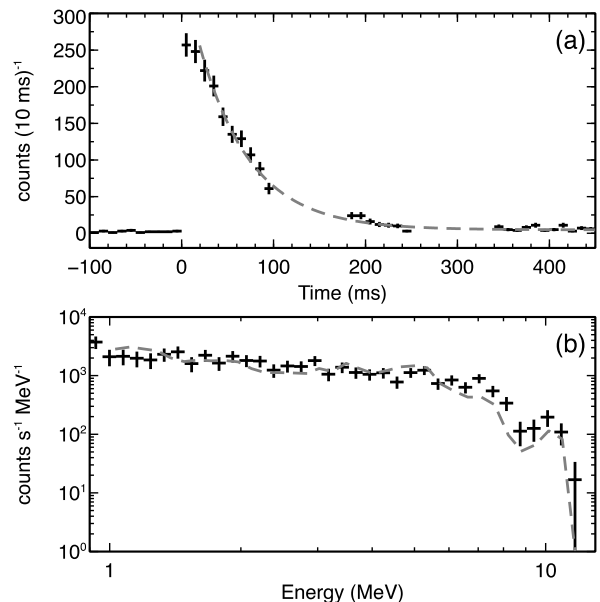


図 2 検出器 A において観測された短時間バースト

(a) 0.35 MeV 以上のカウントレート時系列プロット。点線は指数関数によるフィット結果。時刻原点は落雷の発生時刻。(b) 落雷の 40 ms 後から 100 ms 後までの積算エネルギースペクトル。点線は脱励起 $\gamma$ 線のシミュレーション結果。

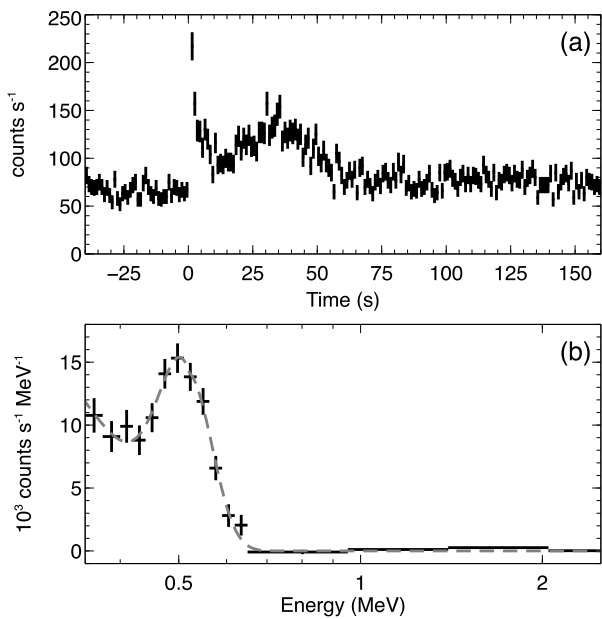


図3 検出器 A で観測された対消滅輝線

(a) 0.35-0.6 MeV でのカウントレート時系列プロット。時刻原点は落雷時刻。(b) 落雷の1秒後から62秒間のエネルギースペクトル。点線はガウス関数のフィット結果。

による対生成が挙げられる。しかし 511 keV 輝線が検出されたときに、対生成を起こしうる 1 MeV 以上の有意な  $\gamma$  線は同時検出されていないため (図 3b), 対生成では観測データを説明できない。

ここまでの観測証拠を整理すると (1) 落雷直後の数 ms 間の強力な  $\gamma$  線フラッシュの兆候, (2) 約 50 ms の時定数で指数関数的に減衰する短時間バースト, (3) 落雷から 35 秒後にピークを迎える陽電子の対消滅輝線, の3つが検出された。これらの観測結果は雷による TGF が光核反応を起こし, 中性子と陽電子を生成したと解釈できる。

まず (1) の強力な  $\gamma$  線フラッシュは,  $\gamma$  線衛星で観測されている TGF が, 地上方向に向かって放出されたものと考えられる。今回の観測では検出器が飽和したため, 光子ごとの到来時間やエネルギー等を正しく計測できず, 「数 ms 未満の継続時間を持つ」ことしか明らかになっていないが, TGF の典型的な継続時間である数百  $\mu$ s - 数 ms に一致する。また近年では高山の宇宙線観測施設でも TGF が観測されており<sup>10)</sup>, 地上方向の TGF が発生したと解釈するのが自然である。

続いて (2) は中性子の反応によるものと解釈できる。光核反応  $^{14}\text{N} + \gamma \rightarrow ^{13}\text{N} + \text{n}$  では平均で約 10 MeV の高速中性子が生成される。高速中性子は大気中で

弾性散乱を繰り返して熱化し, 最終的に大気中の  $^{14}\text{N}$  に吸着される。中性子が  $^{14}\text{N}$  に吸着される際には2つの反応経路がある。1つは中性子-陽子反応  $^{14}\text{N} + \text{n} \rightarrow ^{14}\text{C} + \text{p}$  であり, 陽子を放出して  $^{14}\text{C}$  を生成する。そしてもう1つが中性子捕獲反応  $^{14}\text{N} + \text{n} \rightarrow ^{15}\text{N} + \gamma$  である。この捕獲反応で生成された励起状態の  $^{15}\text{N}$  は, エネルギー準位に対応した脱励起  $\gamma$  線を即時に放出する。 $^{15}\text{N}$  の脱励起  $\gamma$  線は 10.8 MeV を最高エネルギーとする複数の輝線から構成される。そこで筆者らは大気中で発生した脱励起  $\gamma$  線の伝搬シミュレーションを行い, 実際の短時間バーストとエネルギースペクトルを比較した。その結果, 脱励起の複数の  $\gamma$  線輝線が重なり, 更にシンチレータのエネルギー分解能で鈍される影響で, 輝線が連続成分として観測されること, 脱励起  $\gamma$  線の最高エネルギーが 10.8 MeV であることから, 10 MeV 付近で急峻なカットオフが発生することを確認した (図 2a)。

更に  $\gamma$  線量の時間変化の観点では, 中性子が大気中で弾性散乱して最終的に捕獲されるまでの時間を数値計算することにより, 大気中の中性子数は 56 ms の時定数で減少し, 同時に脱励起  $\gamma$  線量も同じ時定数で減衰するという結果が得られた。これは実際に観測された減衰時定数と一致する。このようにスペクトルとカウントレートの時系列データのどちらも, 中性子が発生したと解釈できるものであった。

雷から 35 秒遅れて増光した対消滅輝線は, 光核反応で生成された  $^{13}\text{N}$  や  $^{15}\text{O}$  の  $\beta +$  崩壊  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_e$  及び  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_e$  によって放出された陽電子によるものと考えられる。落雷地点付近では光核反応によって,  $^{13}\text{N}$  や  $^{15}\text{O}$  に満たされた「同位体の雲」が形成されると考えられる。この同位体の雲が  $\beta +$  崩壊で陽電子を放出しながら風に流されて検出器上空を通過すると, 雷放電から遅れて対消滅輝線が観測される。実際に発電所で計測された風速と落雷地点から検出器までの距離から計算すると, 遅延時間の 35 秒を説明することができる。

また筆者らは対消滅線の観測時間と風速から「同位体の雲」の大きさを推定し, 陽電子の大気伝搬シミュレーションと実際に観測された対消滅輝線の光子数・スペクトルとを比較した。その結果, 今回の雷で  $2 \times 10^{12}$  回の光核反応が発生し, 同数の中性子及び陽電子が生成されたと推定した。これは TGF



から理論的に予想されていた発生数  $10^{11-15}$  回<sup>7,8)</sup> と一致した。

## 4. 雷による同位体の生成

雷による一連の反応によって、大気中の<sup>14</sup>Nや<sup>16</sup>Oから放射性同位体<sup>13</sup>Nや<sup>15</sup>O、安定同位体<sup>13</sup>Cや<sup>15</sup>N、更に準安定同位体<sup>14</sup>Cが生成されることが明らかとなった。二次宇宙線の中性子が<sup>14</sup>Cを生成することはよく知られているが、今回の研究によって雷も光核反応を通じて<sup>14</sup>Cを作ることが明らかとなった。

<sup>14</sup>Cは年代測定法に使用される重要な同位体であり、その生成量が年や地域によって異なれば、年代測定に影響を及ぼす可能性がある。例えば雷が多い地域では、他の地域に比べて<sup>14</sup>Cの含有率が有意に高いのか、といった疑問である。これまで検出した短時間バーストの回数と雷の発生回数を比較すると、すべての雷が光核反応を起こしているわけではないと予想している。では実際にどのような種別・特徴の雷がどのような割合で光核反応を起こしているのか、それは今後の筆者らの観測で明らかにしたい点の1つである。継続的な観測によって光核反応の発生率、中性子の平均生成数を明らかにできれば、局所的に発生する<sup>14</sup>Cの数を推定でき、宇宙線による生成量と比較可能になるはずである。また実際に雷が多発する地域としない地域での植物サンプルを採取し、<sup>14</sup>Cの含有率を比較することも有望である。

## 5. 今後の展望

これまで理論的に提唱されてきた雷による光核反応が本成果により実証され、NやO、Cの同位体が生成されることが示された。今後は中性子の複数地点での検出による中性子発生源の位置推定や、中性子の生成数、すなわち光核反応の発生数の正確な計測といった定量的な議論が待たれる。

今回の観測では、光核反応の原因となった $\gamma$ 線ビームの光子ごとのエネルギー・時刻情報は得られていない。この初期の $\gamma$ 線ビーム、すなわち地上方向のTGFこそが一連の反応の源であり、大気中でどのように電子が加速されるかという根本的な謎を解く

鍵である。そのためには高速な光子計測システムによる観測に加え、光核反応の観測によって初期の $\gamma$ 線ビームを定量評価することも重要である。

また雷そのものの観測は様々な波長帯で行われている。 $\gamma$ 線計測に加え、電波観測による雷放電の3次元マッピング、高速度カメラによる放電進展の撮像、気象レーダーによる雷雲構造の可視化、電場計による移動電荷の推定、気象シミュレーション、といった多波長・多手法での研究を国内外の研究者と協力して推進することにより、電子加速のメカニズムはもとより、電子加速が放電開始・放電路進展に及ぼす影響等、電子加速と雷放電そのものとの関係が明らかになることが期待される。本成果が「雷雲と雷の高エネルギー大気物理学」とも呼ぶべき新しい分野の先駆けとなるとともに、様々な分野への波及効果を生み出すことを期待したい。

2016年に観測点を拡張した際の検出器開発は、学術系クラウドファンディングによって市民の皆様からご支援いただいた。今後は観測点を増やすべく、検出器を日本海沿岸地域のサポーターに配布し、市民の皆様と一緒に研究を推進する「オープンサイエンス」にも取り組みたい。石川県や新潟県の日本海沿岸部では冬季雷が身近なものであり、雷が鳴り始めるとブリ漁が盛んになる等、文化として根付いている側面もある。雷がきっかけとして身近に潜む科学の面白さを市民の皆様味わっていただきながら、新たな成果が生まれることを期待したい。

## 参考文献

- 1) Grevich, *et al.*, *Phys. Lett. A*, **165**, 463-468 (1992)
- 2) Enoto, *et al.*, *Nature*, **551**, 481-484 (2017)
- 3) Shah, *et al.*, *Nature*, **313**, 773-775 (1985)
- 4) Fishman, *et al.*, *Science*, **264**, 1313-1316 (1994)
- 5) Smith, *et al.*, *Science*, **307**, 1085-1088 (2005)
- 6) Babich, *JETP Lett.*, **84**, 285-288 (2006)
- 7) Babich, *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **115**, A00E28 (2010)
- 8) Carlson, *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **115**, A00E19 (2010)
- 9) Tsuchiya, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 165002 (2007)
- 10) Abbasi, *et al.*, *Phys. Lett. A*, **381**, 2565-2572 (2017)

(\*1 東京大学大学院理学系研究科,  
\*2 京都大学白眉センター)