

# 雷が引き起こす原子核反応 —冬の北陸が舞台の高エネルギー大気物理学—

東京大学 大学院理学系研究科 / 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター  
和田 有希

## はじめに

「カミナリ」は人間生活に身近な自然現象である。強烈な閃光と轟音、そして落雷による甚大な被害から、太古より恐れられてきた。一方で近年の研究により雷や雷雲に由来する高エネルギー現象が発見され、「高エネルギー大気物理学」と名付けられた新しい学問分野が発展しようとしている。本記事では我々が冬の北陸地方で観測に成功し、高エネルギー大気物理学を牽引する成果となった「雷による原子核反応」を紹介したい。

## 雷・雷雲に由来する X 線・ガンマ線

X 線・ガンマ線は電磁波の一種で、高エネルギー現象で放出されるものの一つである。可視光線や赤外線と同じ「光」であるが、X 線・ガンマ線のほうがエネルギーが高く、性質が異なってくる。この先、エネルギーの単位として「電子ボルト」(eV)を用いる。例えば赤色の LED が発する光の波長 (630 ナノメートル) は電子ボルト換算で

おおよそ 2 eV である。X 線の場合、例えば医療用の X 線撮影 (レントゲン検査) では 100 keV 程度 (k はキロで 1000 倍を表す単位) の X 線が用いられることが多い。これは赤色の可視光線の約 5 万倍のエネルギーである。このように X 線やガンマ線は、我々が目で見ることのできる可視光線に対して、おおよそ数千倍から数千万倍以上のエネルギーをもつ光のことを指す (「コラム: X 線とガンマ線の違い」も参照されたい)。

このような X 線・ガンマ線を得る方法として「電子を加速する」ということが挙げられる。例えばレントゲン検査の場合、真空管の中で 100 kV の高電圧をかけて電子を加速することで、100 keV の X 線を得る。ところで B. フランクリンが 1752 年に示したように、雷雲の中は電気を帯びており、高い電圧がかかっている。この雷雲の高電圧で電子を加速することができるのではないかと、という素案が 1925 年に C.T.R. ウィルソンによって発表されている。

## コラム: X 線とガンマ線の違い

一般に X 線とガンマ線は発生源の違いで区別される。X 線は原子核の周りに存在する電子の軌道遷移によるものや、制動放射によるものを指し、ガンマ線は不安定同位体の放射性崩壊に伴って放出されるものや、原子核での反応で放出されるものを指す。総じて X 線よりもガンマ線のエネルギーのほうが高いが、ガンマ線よりもエネルギーの高い X 線も存在する。一方で、とくに高エネルギー宇宙物理学・天文学の分野では X 線とガンマ線をエネルギーで区別する。これは遠方の天体で放出された光子がどのような発生源によるものなのか、特定することが簡単ではないためである。おおよそ 0.1 keV から 100 keV を X 線、それ以上をガンマ線と呼ぶことが多い。雷雲からのガンマ線や TGF は加速された電子からの制動放射と考えられており、前者の分類では X 線と呼ばれるべきである。しかし TGF がガンマ線天文衛星で発見された側面もあり、高エネルギー大気物理学では後者の分類が使用されている。

実際に雷雲から X 線・ガンマ線が検出されたのは 1980 年のことである。G.K. パークスらが戦闘機に X 線検出器を搭載してアメリカ・オクラホマ州で発生した雷雲を突っ切ったところ、数十秒にわたって X 線の増加を検知した。この成功例を皮切りに、飛行機や気球を使って雷雲の中に入ったり、標高の高い山に検出器を置いて雷雲に接近したりといった観測が盛んに行われ、世界各地で雷雲から放たれる X 線・ガンマ線が検出されている。

一方で、落雷や雲間放電など「雷放電」に同期した X 線・ガンマ線を初めて検出したのは、驚くべきことに人工衛星であった。宇宙の天体をガンマ線で観測するアメリカの人工衛星が、地球からやってくる突発的なガンマ線を 1991 年に初めて検出した。「地球ガンマ線フラッシュ」(Terrestrial Gamma-ray Flash: TGF) と名付けられたこの現象は、数ミリ秒ほどの継続時間を持ち、雷が頻発する地域の上空で検出されていることがわかった。さらに後継のガンマ線観測衛星によっても TGF は続々と観測され、雷放電と同時に発生すること、ガンマ線の最高エネルギーが 20 MeV (M はメガで 100 万倍を示す単位) を超えることなどが明らかになってきた。すなわち、雷放電によって電子が宇宙に向かって、一瞬で数十 MeV という高いエネルギーまで加速され、その電子から放出されたガンマ線が人工衛星にまで到達していた、というのである。

## 日本の冬季雷と高エネルギー現象

上記の雷雲や雷放電からの X 線・ガンマ線は、北陸地方で頻発する冬の雷でも観測されている。雷というと、多くの方にとっては夏に発達する積乱雲、あるいは都市圏のゲリラ豪雨とともに発生する、という印象であろう。しかし冬の日本海沿岸部では頻りに雷が発生する。冬季雷は日本海を北上する暖かい対馬海流と、ユーラシア大陸から日本列島へ吹き付ける強力な寒気が、北陸地方の沿岸部で合流することで引き起こされる。またそのときに水分を得た寒気は、日本列島へ上陸すると豪雪をもたらすのである。特に冬シーズン序盤の雷は大雪の前触れとなることや、ブリ漁が盛んとなることを告げるといった意味から、地元では「雪おこし」あるいは「ブリおこし」と呼ばれている。冬季雷は世界的に見ても珍しい現象であり、日本以外では北欧の大西洋沿岸部など、気象条件を満たす限られた地域でしか見られない。

冬季雷は夏季雷と異なる特徴をいくつかもつ。その中でもガンマ線の観測に重要なのが雷雲の高度である。夏の雷雲では典型的に雷雲の底が 3 km に位置するが、冬季の雷雲になると気温が低いため、1 km 未満まで垂れ込めてくる。雷雲や雷から発せられるガンマ線でも、空气中をせいぜい数百 m から 1 km ほどしか飛行できない。そのため夏の雷雲でガンマ線が発生していても地上まで到達できず、飛行機や気球、あるいは高山での観測を行う必要がある。しかし冬季の雷雲であれば、こういった高エネルギー現象を標高の低い場所で

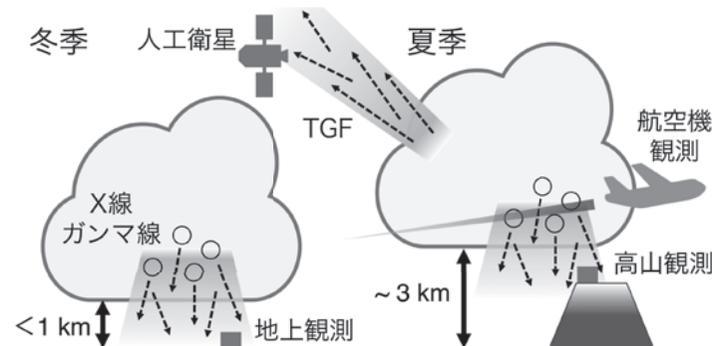


図 1：夏季と冬季の雷雲の模式図

観測することが可能となってくる。

北陸の冬季雷に由来した高エネルギー現象は、鳥居建男らが福井県の敦賀半島に建設された研究用原子炉「もんじゅ」を取り囲む放射線モニターを用いて1997年に発見した。この結果を踏まえ、土屋晴文・榎戸輝揚らを中心に、2006年より新潟県の柏崎刈羽原子力発電所においてGamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds (GROWTH) 実験を行っており、2015年より私も参加している。2007年1月にはGROWTH実験として初めて、雷雲の通過にともなう数分のガンマ線増光（ロングバースト）を検出し、そのエネルギーが10 MeVに達していることを明らかにした。このことから、雷雲内の強電場で電子が加速されて地上方向にガンマ線を放出し、スポットライトのようにガンマ線で地上を照らしながら検出器の上空を通過した、と結論づけた。

柏崎では2006年から現在まで継続して観測を行っており、上述の「ロングバースト」に加えて、雷放電と同時に起きる1秒未満のガンマ線放射「ショートバースト」も捉えている。ロングバーストについては放射メカニズムの足掛かりを掴むことができた一方で、ショートバーストは手がかりが全く得られていない状況であった。しかし、2016年11月より発電所内の検出器を4台に増やし、体制を強化して観測を行ったことによって、ショートバーストが雷での光核反応に由来することであることを突き止めることができた。

## 雷での光核反応

日本列島を低気圧が通過して寒気が入り込んだ2017年2月6日、柏崎刈羽原子力発電所の近くで落雷が報告された。この落雷と同時刻に、我々が設置した4台の検出器が同時にショートバーストを捉えた。ショートバーストそのものは、これまでに観測されたのと同じ現象であったが、4台のうち1台がショートバーストに続いて、さらに60秒ほど続くガンマ線放射を検出した。驚くべきことに、その放射は時間が経過するとともに強くなり、落雷から30秒経過した時点でピークを迎えたのである。

この「落雷から遅れてやって来た放射」は、これまで観測してきたショートバーストやロングバーストとは異なり、0.511 MeVという特徴的なエネルギーのガンマ線で占められていた。0.511 MeVのガンマ線は、電子の反粒子である「陽電子」の存在を意味する。すなわち落雷が多数の陽電子を作り出すような反応を引き起こしたと考えられる。「落雷」「ショートバースト」「60秒以上も陽電子を出し続けるメカニズム」という3つのキーポイントから、我々は雷によって「光核反応」とよばれる原子核反応が発生したと結論づけた。

すでに述べたように、人工衛星によって雷から放出されるTGFが観測されている。今回の事例では、ガンマ線が宇宙方向に飛び出たのではなく、地上方向へ放出されたのだと考えられる。放出されたガンマ線は大気で様々な反応を起こすが、エ

ネルギーがおよそ10 MeVを超えてくると、原子核と反応を起こし、原子核に含まれる中性子を弾き飛ばすことも可能となる。これが「光核反応」である。TGFは10 MeVを超えるガンマ線も多く存在し、光核反応を引き起こすことが可能である。

光核反応のターゲットとしては、大気中に最も多く含まれる $^{14}\text{N}$ (窒素14)が大半を占めると考えら

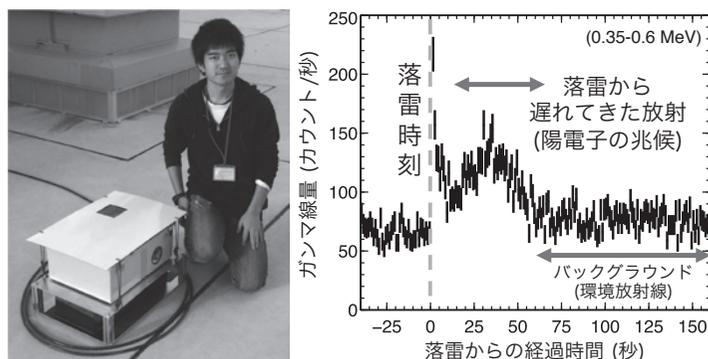


図2：発電所構内に設置した自作のガンマ線検出器と筆者（左）とその検出器で観測した陽電子の存在を示すガンマ線の信号（右）

れる。窒素の原子核は陽子7個を含み、 $^{14}\text{N}$ の場合は加えて中性子を7個もつ。 $^{14}\text{N}$ は光核反応でガンマ線によって中性子を1つ叩き出されることにより、中性子が6個となる。すなわち中性子が1つ少ない $^{13}\text{N}$ へと姿を変える。

$^{13}\text{N}$ は「放射性同位体」の一種で、約10分の半減期で崩壊する。すなわち100個の窒素13があると、10分後には50個が崩壊し、残る50個はまだ $^{13}\text{N}$ のまま、ということである。 $^{13}\text{N}$ は陽電子を1つ放出して $^{13}\text{C}$ （炭素13）に崩壊する。放出された陽電子は電子の反粒子であるため、極めて短い時間で周囲に存在する電子とペアを作って消滅し、0.511 MeVのガンマ線を放出する。これが「落雷から遅れてやって来た放射」の正体である。

では、0.511 MeVのガンマ線放射はなぜ遅れてやってきたのか。 $^{13}\text{N}$ は落雷と同時に起きたTGFで大量に作られた。すなわち「陽電子を放出する空気塊」が落雷の周囲で作られ、それが冬の北風で流されて検出器の上空を通過したとすれば、ガンマ線が遅れてやってきたことを説明できる。落雷と検出器との距離、発電所上空の風向・風速から計算しても、30秒の遅れは矛盾しない。

謎として残ったショートバーストは、中性子に由来すると解釈できた。光核反応で叩き出された中性子は高速で大気中を飛行する。しかし濃密な大気中ではまっすぐ進むことは難しく、大気中の

原子核にぶつかっては進む向きを変え、速度も落ちる。何回も原子核にぶつかって止まりそうな速度になると、大気中に豊富に存在する $^{14}\text{N}$ に吸着される。 $^{14}\text{N}$ が中性子を吸着すると、陽子7個、中性子8個の $^{15}\text{N}$ が誕生する。 $^{15}\text{N}$ そのものは安定な同位体であるが、中性子を吸着すると余分なエネルギーが発生するため、それを二つの方法で排出する。一つは、中性子を捕獲した代わりに陽子を放出して $^{14}\text{C}$ に変化する。このときガンマ線は放出されないため、我々の検出器ではこの反応を捉えることができない。もう一つは $^{15}\text{N}$ のまま、余剰なエネルギーをガンマ線として放出する。ショートバーストの正体は $^{15}\text{N}$ から放出されたガンマ線だったのである。

このように、本研究では雷が光核反応を引き起こしたという確証を世界で初めて得ることができた。光核反応を始めとした原子核反応を起こすには高いエネルギーが必要なため、太陽など宇宙の天体における高温な状態、あるいは加速器を使って人工的に電子や陽子などを加速して原子核にぶつけるなど、特殊な条件でしか発生しない。しかし身近な気象現象である雷が原子核反応の舞台となり、またその過程で $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{N}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ といった様々な同位体や陽電子が放出されることは驚くべき事実である。今回の事例では発電所内の検出器を増やしたことにより、「陽電子を出す $^{13}\text{N}$ の

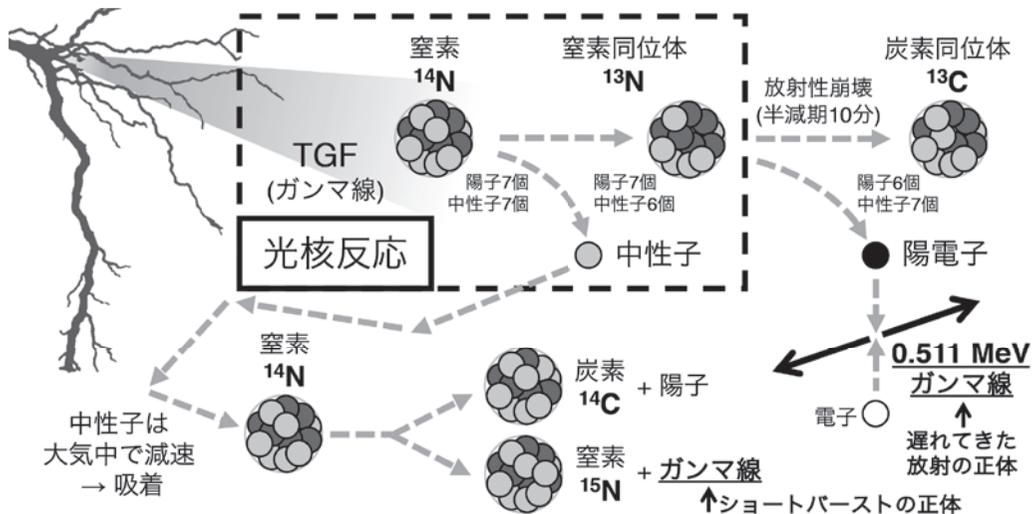


図3：雷による光核反応とそれに続く一連の反応の模式図

雲」が風で流されていく様子を捉えることができたのが決定打となった。

## 今後の展望

光核反応を起こしたのは落雷に同期したガンマ線放射 TGF である。しかし、どのような雷で TGF が起きるのか、どのようにして大量のガンマ線を瞬時に発生させるのか、その詳細なメカニズムは世界中で活発に議論がなされているが、未だに答えが得られていない。今回の観測は、これまで人工衛星による観測が主導してきた TGF の研究に、地上観測から切り込んでいく重要なターニングポイントになるだろう。そのためには、さらに検出器を増やし、データの数や質を高めることが必要である。我々は柏崎に加え、石川県金沢市や小松市などもターゲットエリアとし、現地の高校、大学、科学館、企業と協力して観測ネットワークを作りつつある。加えて雷や雷雲そのもの研究は、雷放電から放たれる強力な電波や稲妻の

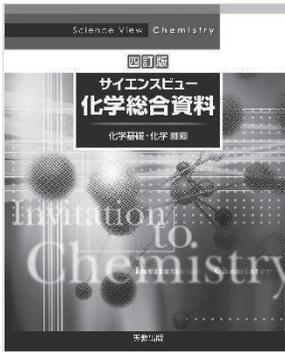
可視光撮影、雷雲内の電場の測定、気象レーダー、雷雲構造のシミュレーションなど、様々な手法で行われている。これらとガンマ線の観測ネットワークを連携し、分野融合的な視点から「高エネルギー大気物理学」の謎に挑みたい。

ところで、中性子の反応過程で生成された<sup>14</sup>Cは5370年の半減期をもつ放射性同位体であり、地学分野では地層から産出した木片や貝殻など有機物の年代測定に用いられる重要な同位体である。これまで地球上に存在する<sup>14</sup>Cは、そのほとんどが宇宙から降り注ぐ高エネルギー粒子（宇宙線）でのみ作られると考えられてきた。しかし、今回の研究で雷も<sup>14</sup>Cを作る重要な現象であることが示された。ではどれくらいの割合の<sup>14</sup>Cが雷で作られているのか、もし宇宙線で作られる量に比べて無視できない量であるならば、年代測定の結果に影響を及ぼす可能性もある。この点は今後の観測で明らかにしていきたいと考えている。

## コラム：宇宙物理学者がなぜ雷の研究を？

私が所属する研究室はX線・ガンマ線による高エネルギー宇宙物理学を主題としている。一見して今回の研究とは関係なさそうであるが、実は次の3点で深く関係している。1つ目は検出の技術が同じという点である。研究室では宇宙観測用のX線・ガンマ線検出器を開発しており、2006年にGROWTH実験を始めた時から、その技術や資産を活用してガンマ線検出器を開発している。2つ目は検出器の運用ノウハウが同じという点である。宇宙X線・ガンマ線観測では、天体からのX線・ガンマ線が地球大気を突き抜けることができないため、人工衛星を用いて観測が行われる。そのため遠隔で長期にわたり、修理なしで観測を続けるための技術が蓄積されてきた。GROWTH実験も遠隔観測で起きうる事態を想定して対策を行っている。そして3つ目が、雷と宇宙は「天然の加速器」という点で共通する、ということである。天体の中には、中性子星や超新星残骸など磁場で電子や陽子などを加速しているものがあり、いわば宇宙に存在する強力な加速器である。雷や雷雲も強力な電場で電子を加速することでガンマ線を出しており、同じく天然の加速器である。対象物が近い・遠いというのはあるにせよ、我々は自然界に存在する加速器に興味をもっており、雷と天体のどちらも物理学の対象として極めて面白いのである。

ところで私は高校2年生のときに全国物理コンテスト「物理チャレンジ」に参加し、また同じ年に南部・小林・益川の三博士がノーベル物理学賞を受賞され、その研究内容に触れたことがきっかけで、物理学、特に素粒子や原子核といった分野に興味を持った。大学で物理学科に進学してからはガンマ線や高エネルギー粒子の計測方法を学び、自然界で起きている物理現象を自ら観測することで解明したいと強く思うようになった。そうして門を叩いたのが、宇宙で起きている高エネルギー現象を観測で解明しようとする今の研究室である。しかし私は「天文愛好家」というわけではなかったため、宇宙だけでなく雷で起きている高エネルギー現象にも魅了されてしまったのである。



# サイエンスビュー 化学総合資料

デジタル版

サイエンスビュー化学総合資料の電子ブック版です。  
豊富なデジタルコンテンツで学習をサポート。  
化学の理解が深まり、効果的に学習できます。



ペン機能と付箋機能で  
マーカーやメモが可能

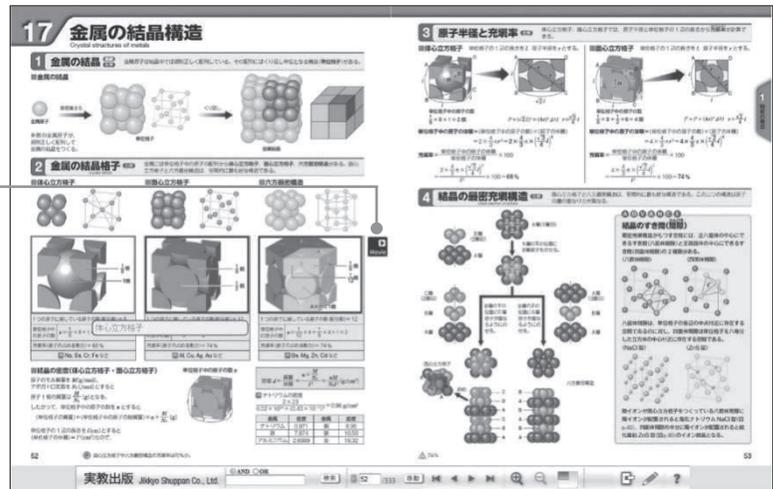
検索機能で目的の  
ページにジャンプ

図やアイコンをタップ  
するとそれぞれのコン  
テンツへ移動。

**Movie** 実験動画  
51 クリップ

**Movie** アニメーション  
25 クリップ

**3Dモデル**  
全 87 種



サイエンスビュー 化学総合資料 デジタル版

学習者用 (Windows タブレット版・iPad 版) 1 端末あたり定価 (本体 1,000 円+税)

※本製品は学校での一括採用のみの販売です。詳細はお問い合わせください。