

雷の光が原子核の反応を引き起こす!?

京都大学白眉センター・宇宙物理学教室 特定准教授 榎戸 輝揚

1. 雷雲と雷の高エネルギー大気物理現象

四季のうつろいが美しい日本列島では、空を見上げると、季節に応じた自然現象を楽しめます。太平洋側では夏の青空を背景にもくもくと立ち上る積乱雲を見ることができ、日本海沿岸ではシベリア寒気団から吹き付ける季節風が日本海を渡って、雷雲がやってきます。やがて雲が低く垂れ込めて空が暗くなると、大気を切り裂いて閃光と轟音を放つ雷が発生します。この雷放電は子どもの頃から誰しもが目にする現象ですが、最近になって、その不思議な性質が次々と明らかになってきました。

発達した積乱雲の中では、上昇気流の中で大小の水の粒が衝突して電荷を渡し合い、プラスとマイナスの電荷層ができ、その間に電氣的な力がはたらく電場ができます。符号の同じ電荷どうしは反発し、違うものは引き合いますから、雲の中の電荷は中和して消えようとするのですが、大気中では電気は流れにくいので、なかなか中和できません。雷はそれを突き破って大電流を流して閃光と轟音を起こし、電荷を移動させて不均衡を解消します。

雷はリターンストロークと呼ばれる大電流が流れるプロセスで閃光を放ちますが、その前に、電流が流れやすい道をつくるリーダーという過程があります。このリーダーで放電路ができる際に、強い電場が先端部に生じ、そこで電子が加速され、大気にぶつかって制動放射という仕組みでガンマ線が出るのではと考えられるようになりました。ガンマ線は可視光よりエネルギーが高く、日常生活ではなかなかお目にかかることはありません。しかし、こういった雷から放たれるガンマ線は実験で検出されつつあります。

最近の驚くべき発見のひとつは、宇宙空間で遠方の宇宙を観測している天文衛星が、なんと地球方向からやってくるガンマ線のバースト現象を捉えたことです²⁾。しかもガンマ線は雷放電に伴って発生しているらしいのです。これも、電場のはたらきで電子が高いエネルギーまで加速されて宇宙空間に向

かって進み、大気にぶつかることで進行方向にガンマ線を放っているためと考えられています。この現象は、地球からやってくるガンマ線なので、Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF)と呼ばれています。このような雷が起こすガンマ線は、TGFのみならず、自然雷や人工的な誘雷実験でも検出され、関心を集めています。

2. 日本の冬季雷雲での放射線観測

日本海岸の冬季雷雲は、強力な雷放電を伴い、高度も低く、世界的にも理想的な観測条件をそろえています。実際、雷雲が通過すると原子力発電所の放射線モニタリングポストが反応する例が報告されていました³⁾。これは雷放電のようなミリ秒の時間スケールではなく、数秒以上にわたって続きます。この現象を詳しく調べるため、私たちはGROWTH (Gamma-Ray Observations of Winter Thundercloud) という研究グループを立ち上げ、2006年から新潟県で観測を行ってきました⁴⁾。その結果、雷雲の中に強い電場の領域が存在し、そこで定常的に、じわじわと電子が加速され、大気にぶつかってガンマ線を放つことがわかってきました。これをガンマ線ビームとよびます。雷雲がサーチライトのようにガンマ線で地上を照らして風で流れていくのです。



図1 柏崎での2006年当時の放射線検出器の様子(左)と2016年のマッピング観測の様子(右)。

このような「雷雲と雷での高エネルギー大気現象」を詳しく調べるため、私たちは観測網を広げることになりました。これまでは1箇所での観測を行っていましたが、それでは現象の空間的な広がりや、時間的な発展を追うことはできません。そこで、たくさんの観測装置を全国に設置して、マッピング観測を狙

いました。限られた予算でたくさんの装置をつくるには1台ずつはなるべく安くする必要があり、やはり研究費が必要です。普通は政府に申請して科学研究費補助金を獲得しますが競争は激しく、若手ばかりの私たちのチームは当初、予算を得られませんでした。

そこで新しい試みとして学術系クラウドファンディングを活用することにしました。これは限られた期間で市民から直接に研究費の寄付を募るものです。2ヶ月にわたって研究の面白さを伝え、160万円の寄付をいただくことができました。サポーターの皆さんには深く感謝しています。そして、これらを手始めに新しい小型の観測装置をつくり、図1のように金沢、小松、珠洲、柏崎、富山の、大学、高校、科学館、民間企業と協力して観測網を広げました。

3. 雷が起こす光核反応の発見

この新しい観測網で思わぬ発見がありました。柏崎の検出器の近くで2017年2月6日に落雷があり、その瞬間に強力なガンマ線のバーストが数ミリ秒以下で発生し、それから100ミリ秒ほどにわたって、10MeV (メガ電子ボルト)に達する高エネルギーのガンマ線の残光が生じました。さらに面白いことに、落雷地点より風下で0.511MeVの単色エネルギーのガンマ線が検出されました⁵⁾。これは、電子や陽電子(電子の反粒子)の静止質量エネルギーに対応し、陽電子がなんらかのプロセスで発生し、電子と対消滅して0.511MeVの光が生じたことを意味します。チームみんなが興奮しました。

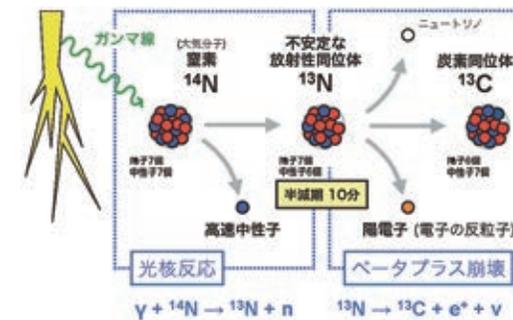


図2 雷が起こす光核反応の模式図⁵⁾。

活発な議論の後、私たちは「雷が光核反応を起こした」と考えれば、統一的に説明できると気が付き

ました。図2にその様子が描かれています。前述のように、落雷が起きると、わずか数ミリ秒の強力なガンマ線の放出が生じます。そして、このガンマ線エネルギーが10MeVを超えると、大気中の窒素¹⁴Nや酸素¹⁶Oの原子核から中性子をはじき出す「光核反応」を起こします⁶⁾。

光核反応で原子核を飛び出した中性子は、大気中で何度も散乱を繰り返し、徐々にエネルギーを失い、大気中の原子核¹⁴Nに吸収されます。その結果、大部分は、中性子が原子核中の陽子を置き換える核反応((n,p)反応)で炭素の同位体¹⁴Cになりますが、一部は中性子捕獲で¹⁵Nになります。この¹⁵Nの原子核はエネルギーの高い励起状態なので、より安定な低エネルギー状態に移る際にガンマ線を放出します。雷が起きてから100ミリ秒ほど続くガンマ線の残光は、このような「即発ガンマ線」と考えられます。一方で、光核反応で中性子を失った¹³N原子核は不安定で、約10分で徐々にベータプラス崩壊をし、安定な¹³Cという原子核になります。このベータプラス崩壊では、原子核中の陽子は中性子に変換され、陽電子とニュートリノが放出されます。陽電子は大気中ですぐに電子と対消滅して0.511MeVの光となります。雷の周辺で生成された¹³Nは、陽電子を撒き散らしながら徐々に風下に流れ、観測にかかったわけです。

私たちはこんな素敵な新発見に出会いましたが、これで終わりではありません。どんな雷がどの程度の光核反応を起こすかはよくわかっていません。雷雲からのガンマ線ビームも雷の発生に関係があるのではと疑われています。こういった謎に挑むために、私たちは金沢市で市民とともに観測網を広げるプロジェクトを構想しています。また、放射線に限らず、大気電場の計測や、雷が放射する電波の観測などとの連携も進め、実際に成果が出始めています⁷⁾。

参考文献

- 1) Dwyer et al., *Space Sci. Rev.*, 173, 133-196 (2012)
- 2) Fishman et al., *Science*, 264, 1313-1316 (1994)
- 3) Torii et al., *J. Geophys. Res.*, 107, 4324 (2002)
- 4) Tsuchiya et al., *Phys. Rev. Lett.*, 99, 165002 (2007)
- 5) Enoto et al., *Nature*, 551, 481-484 (2017)
- 6) Babich, *Sov. JETP Lett.*, 84, 285-288 (2006)
- 7) Wada et al., *Geophys. Res. Lett.*, accepted (2018)