

富士山で観測された地球ガンマ線フラッシュ

David M. Smith¹, 鴨川仁², J. Ortberg¹, J. Chaffin³, 王道洪⁴, Ting Wu⁴, 鈴木智幸²

1. カリフォルニア大学サンタクルーズ校, 2. 静岡県立大学, 3. Air Force Institute of Technology, 4. 岐阜大学

1. はじめに

地球ガンマ線フラッシュ(TGF)は、ごく一部の稲妻に付随するミリ秒以下のガンマ線のバーストである。NASAのコンプトンガンマ線観測のBATSE (Burst and Transient Source Experiment)装置によって発見された¹⁾。現在でも、我々が知っているTGFのほとんどは、人工衛星から観測されている。なぜなら、衛星は一度に100万km²までの地球表面を観測することができるからである。軌道上の発生源から600 kmの距離でも、TGFはガンマ線検出器の計数能力を飽和させ、その強度を発生源まで外挿すると、放射線が発生する事象のちょうど中心部にいる人に大きな健康リスクがあると予測される^{2),3)}。

しかし、これまでに様々な衛星から観測された何千ものTGFは、ほぼ全て上向きリーダーの雲放電によるもので、ガンマ線が十分に宇宙に出て行きにくい高度8~10km未満でTGFがいつ、どのくらいの頻度で発生するかについては何もわかっておらず、加速電子と制動ガンマ線が地上に向かって下降するTGFについては何もわかっていない。米国フロリダでの最初の発見⁴⁾を皮切りに、いくつかの下向きTGFが様々な地点で観測されている。近年、地上からのTGF検出では日本が世界最大の拠点となっている⁵⁻⁸⁾。これらの事象は、北陸地方沿岸の強力な冬季雷の際に検出された。

ここでは、日本で初めて夏期に観測されたTGFを報告する。また、スイスのサンティス山で発見された3つのTGF⁹⁾と共に、孤立した山の気象環境で見られた最初のTGFでもある。最後に、以後の3つのイベントのうち2つは、下降するステップリーダーのステップに伴う、弱いX線のバーストが先行していた。この種のステップリーダー-X線バーストは負極性落雷のステップリーダーで何度も報告されている^{10,11)}。このX線のエネルギーはTGF光子より1桁低く、加速される電子の数はTGFパルスより4-5桁低い傾向がある。ステップリーダーが高エネルギー電子を十分に高い背景電場に射出すると、電子はさらなる逃走加速を起こし、スペクトル的にはTGFに似ているが、より短いバーストで低輝度で放射される事象が発生することがある¹²⁾。

2. 観測

ガンマ線検出器システムは、直近では2022年の夏のキャンペーンで、4回にわたって富士山頂に配備された。北陸の冬季雷と同じように、夏の富士山では、雲の高電場領域が地表から2 km程度以内であり、介在する空気によるガンマ線の吸収を最小限に抑えることができる。2022年は、カリフォルニア

大学サンタクルーズ校で開発されたGODOT (for Gamma-ray Observations During Overhead Thunderstorms) と THOR (Terrestrial High-energy Observations of Radiation) という2つの検出器システムを用意した。GODOTの方が古いシステムで(日本には2015年に初稼働)、THORは2022年が初年度であり、いくつかの改良が加えられている。

2022年は初めてTGFを3回観測した。これらは「コンパクトリターンストローク」と呼ばれる、地面から2 km以内に発生する雲から地面への負極製対地雷で、一般的に非常に強力なリターンストロークを有していた¹³⁾。

FALMA 呼ばれる LF 帯電波観測アレイのデータ¹⁴⁾を用いて、冬季雷におけるコンパクトなリターンストロークと TGF の関連付けが行われている¹⁵⁾。

3. 結果

図1から図3は、FALMAによるLFの電界波形と、THORの3つの検出器(体積3350 cm³(大型プラスチック, LPL), 261 cm³(中型プラスチック, MPL), 6.5 cm³(小型プラスチック, SPL))のガンマ線データとの関係を示しています。各三角形のシンボルは、記録された1つのカウントを表し、それは1つの光子であることもあれば、互いに300 ns未満で発生した、より多くの光子を表すこともあります。THORはこのように検出器の体積に幅を持たせているため、大きな検出器ではカウント数が多いためにデッドタイムやパイルアップの影響が大きくなる場合でも、小さな検出器ならそれほど歪むことなく観測することができる。将来の論文では、3つの検出器すべてのデータを使って、検出器に入射する放射線の真の時間プロファイルを推測する予定である。このモードでは、光電子増倍管の出力電流(トレース)を80 MHzでデジタル化し、事象の約300 μsを記録している。このデータモードは、我々が見ている事象が、電磁波ノイズによって引き起こされたのではなく、シンチレータからの光のバーストとして正しいパルス形状を持っていることを保証し、放射線のカウントレートの履歴とエネルギースペクトルをよりよく拘束するために使用することができる。このモードについては、将来の論文で紹介し、分析する予定である。

図1から図3では、FALMAの波形はコンパクトなリターンストロークの典型的な挙動を示している。ステップリーダーの典型的な信号が数百マイクロ秒続き、その後強力なリターンストロークが続く。図3のステップリーダーの振幅はかなり小さく、この事象ではステップに関連するX線は見られず、TGFパルスもかなり弱く、小型プラスチック検出器ではほとんど

ど応答がない。しかし、FALMA のアレイ観測点は北陸地方にあるため富士山からは数百キロ離れており、富士山付近で起きた事象は、FALMA のどの観測点もほぼ同じ距離にあり、電磁波においては抑制されたステップリーダーであったということが物理的にも重要であるがわかる。

図1 から図3 における各図の下の3つの図は、それぞれ THOR 内の大型、中型、小型ガンマ線検出器(LPL, MPL, SPL)のデータを示している。TGFの間、2つの大型検出器は多かれ少なかれ圧倒され、小型検出器だけが最後の2ステップを偏りなく見ることができる。しかし、大型検出器だけがステップの間の X 線を検出するのに十分な大きさを持っている。大型検出器(LPL)でのリターンストロークのよく後のカウントの散布は、検出器と近隣の物質で捕獲される中性子によって生成され、ガンマ線とベータ線をもたらす⁸⁾。時間遅れは、(非相対論的)中性子が大気中を移動・散乱し、検出器に到達するまでの時間に由来する。

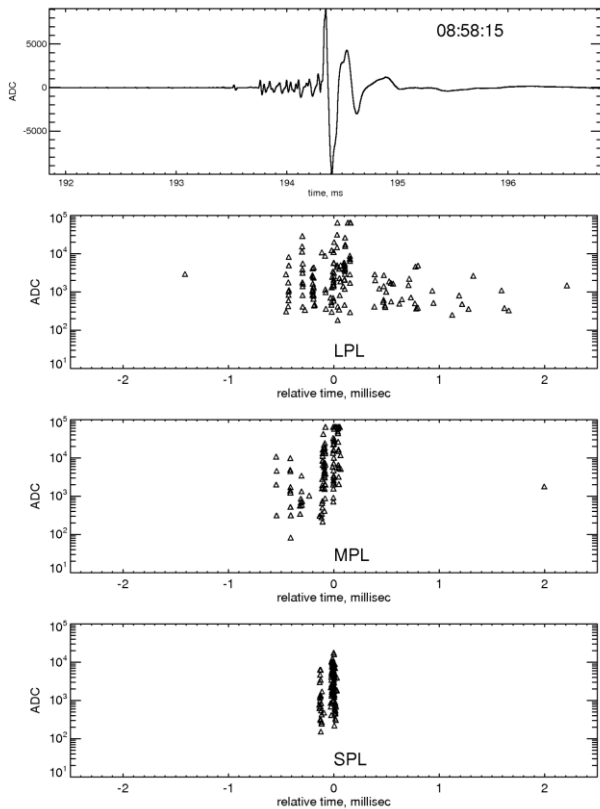


図1 2022年7月26日に富士山頂で観測されたステップリーダーX線/TGF複合イベントのVLF電波信号とX線時間/エネルギー散布図(時刻は日本時間)。

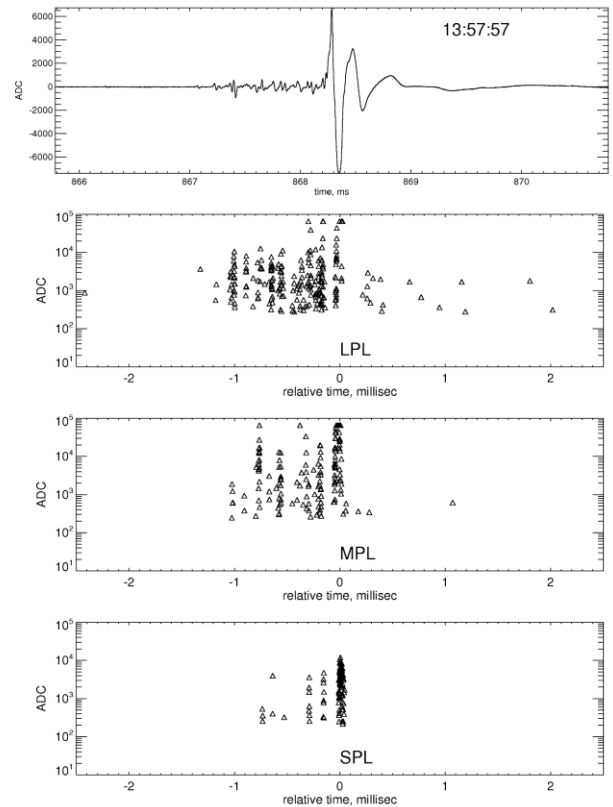


図2 TGF に至るまでのリーダーステップを示す2回目のイベント。

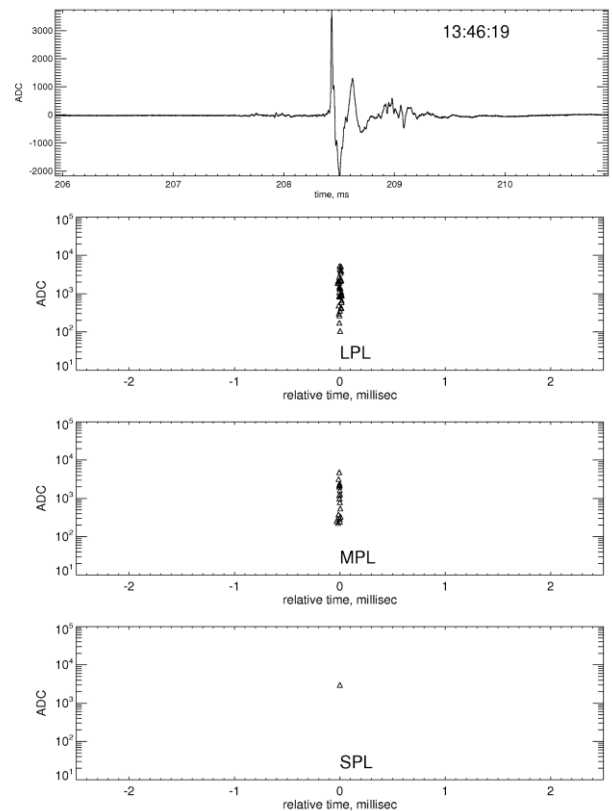


図3 2022年7月26日のコンパクトなリターンストロークに伴う別のTGF。TGFはずっと弱く、その後の中性子も見られない。段差は電波でより弱く、段差のあるX線は見えない。

図1の上段は、100km以上離れたFALMAが検出した電波信号で、一連の小さなパルスは、地上に近づくリーダーのステップを表し、最大の信号は、リターンストロークの電流によって引き起こされるものである。下の3つの図は、THORに搭載された3つの放射線検出器によるX線・ガンマ線の検出結果を示している。高エネルギー光子のエネルギーは縦軸の点で示され、横軸は時間であり、最初のパネルの電波データと同じスケールである。ステップに付随する弱い光子のバーストが見えますが、最も明るいもの(TGF)は、最後のリターンストロークの近くで起こっていることがわかる。TGFのガンマ線は、空気分子の原子核に衝突して電子を放出する。約9 MeV以上のエネルギーのガンマ線だけが空気との衝突時に中性子を生成するので、中性子の存在は、TGFのエネルギースペクトルがX線ステップリーダーの低エネルギースペクトル¹¹⁾よりもTGFの相対論的逃走スペクトル¹⁶⁾の典型であることを確認している。

4. まとめ

今後は、TGFと大気や検出器との相互作用のシミュレーション、検出器の電子回路のシミュレーション、およびトレースモードデータの断片を使用して、各フラッシュにおけるステップと最終TGFの相対スペクトルと強度を導出する予定である。これにより、ステップリーダーとTGFが全く別の現象なのか、あるいは、ステップが地上に近づくにつれて「TGF的」(より明るく、より長く、より硬いスペクトル)になっていくのかを判断することができる。

参考文献

- 1) Fishman, J. et al. (1994), Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin, *Science*, **264**, 1313-1316.
- 2) Dwyer, J. et al. (2010), Estimation of the fluence of high-energy electron bursts produced by thunderclouds and the resulting radiation doses received in aircraft, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D9, D09206.
- 3) Pallu, M., Celestin, S., Trompier, F., Klerlein, M. (2021) Estimation of Radiation Doses Delivered by Terrestrial Gamma Ray Flashes Within Leader-Based Production Models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, e2020JD033907.
- 4) Dwyer, J. R. et al. (2004), A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05119.
- 5) Umemoto, D. et al. (2016), On-ground detection of an electron-positron annihilation line from thunderclouds, *Phys. Rev. E*, **93**, 021201.
- 6) Wada, Y. et al. (2019), Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 061103.
- 7) Enoto, T. et al. (2017), Photonuclear reactions triggered by lightning discharge, *Nature*, **551**, 481-484.
- 8) Bowers, G. et al. (2017), Gamma Ray Signatures of Neutrons From a Terrestrial Gamma Ray Flash, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 10,063-10,070.
- 9) Chaffin, J. et al. (2023), in progress
- 10) Moore, C. B., K. B. Eack, G. D. Aulich, and W. Rison (2001), Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2141-2144.
- 11) Dwyer, J. R. et al. (2005), X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01803.
- 12) Abbasi, R. et al. (2018), Gamma Ray Showers Observed at Ground Level in Coincidence With Downward Lightning Leaders, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 6864.
- 13) Wu, T. et al. (2021), The Strongest Negative Lightning Strokes in Winter Thunderstorms in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e95525.
- 14) Wu, T., Wang, D., and Takagi, N. (2018), Lightning Mapping With an Array of Fast Antennas, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 3698-3705.
- 15) Wada, Y. et al. (2022), Characteristics of Low-Frequency Pulses Associated With Downward Terrestrial Gamma-Ray Flashes, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL097348.
- 16) Smith, D. M. et al. (2005), Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV, *Science*, **307**, 1085.