



【様式 1】

夏期観測 2022 研究速報(プロジェクト報告書)

1.氏名

(和文) David Smith

(英文) Takeshi Kudo

2.所属

(和文) David Smith

(英文) University of California, Santa Cruz

3.共同研究者氏名・所属

(和文) 鴨川仁・静岡県立大学

(英文) Masashi Kamogawa, University of Shizuoka

4.研究テーマ

(和文) 雷放電・雷雲活動において発生する高エネルギー放射線

(成果)

カリフォルニア大学サンタクルーズ校 (UCSC) と静岡県立大学の鴨川仁特任准教授との共同研究で、2022 年夏、旧富士山測候所に 2 台のガンマ線検出器を設置し、ドラマチックだがあまり理解されていない現象、地球ガンマ線フラッシュ (TGFs: 一部の雷放電で生じる短時間のガンマ線のフラッシュ) を研究することになった。TGF は非常に"明るい"ため、放射線が発生する現象の中心部にいる人は、放射線による重大な健康被害を受ける可能性がある (Dwyer et al.)。しかし、幸いなことに、TGF は比較的まれな現象である。

衛星の場合、一度に 100 万 km² もの地表を観測できるため、私たちが知っている TGF のほとんどは、衛星から観測されたものです (Fishman et al. 1994)。しかし、これらの TGF はほとんどすべて上向きの雲内雷によるもので、TGF がいつ、どれくらいの頻度で大気深部で発生し、地上に向けられるか (下向き TGF) については何もわかっていない。

富士山のように雷雲の多い山頂では、雷雲の中心に近く、ガンマ線が距離や空気中の吸収で減衰しないため、下向き TGF を探すには理想的な場所である。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が (例えば、Umemoto et al. 2016, Wada et al. 2021, Enoto et al. 2017, Bowers et al. 2017)、これらのイベントは北陸沿岸の強力な冬の雷雲の中で検出されたものである。共同プロジェクトの 4 シーズン目となる今回のプロジェクトは、富士山の夏の雷雲における下向き TGF の初めての調査となる。2 つの検出器システムは、GODOT (for Gamma-ray Observations During Overhead Thunderstorms) と THOR (Terrestrial High-energy Observations of Radiation) と名付けられている。GODOT の方が古いシステムで (2015 年に初めて日本に導入された)、今年はいくつかの改良が施された THOR の初年度となる。

今年 は初めて、キャンペーン中に 3 つの TGF を観測した。これらは、非常に強力なリターンストロークを持つ負極の対地雷に関連していた。岐阜大学の Ting Wu 准教授と Daohong Wang 教授の協力により、遠くから雷の種類と強度を特定することができる FALMA という雷放電位置評定および波形観測機器によって現象が明らかになった。これらの雷放電は、彼らが「コンパクトリターンストローク」と呼ぶタイプのもので、地表 (山の頂上とみられる) からわずか 1km ほどの高さで発生した。この雷放電は、北陸沿岸の冬の雷雲で TGF を発生させるものと似ていますが、夏の富士山の環境でも TGF を発生させるというのは新しい発見である。

今回の観測でさらに嬉しいのは、TGF が関連する現象と一緒に見られることが初めて確認されたことである。対地雷は、「ステップリーダー」と呼ばれる現象によって雲から地上へと電荷を運び、導電性の経路を残しながら短時間で急激に進行する。ステップリーダーが地上に到達すると、「リターン・ストローク」と呼ばれる大電流がこの経路を通して雲に到達し、雲の電荷を大地に運ぶ。以前にも他の場所で観測されたように、この「ステップ」はしばしば X 線のバーストを放出しますが、それは TGF よりもはるかに弱く、短く、低いエネルギーです。一部の科学者は、これらのステップ現象と TGF の間に関連



性があると考えていますが、まだ確実ではない。我々は、この富士山で初めて、この2つの現象が同時に現れる現象を観測した。すなわち、リーダーステップに伴う一連のX線バーストと、その最後、リターンストロークの時間に近いところで発生するTGFである。

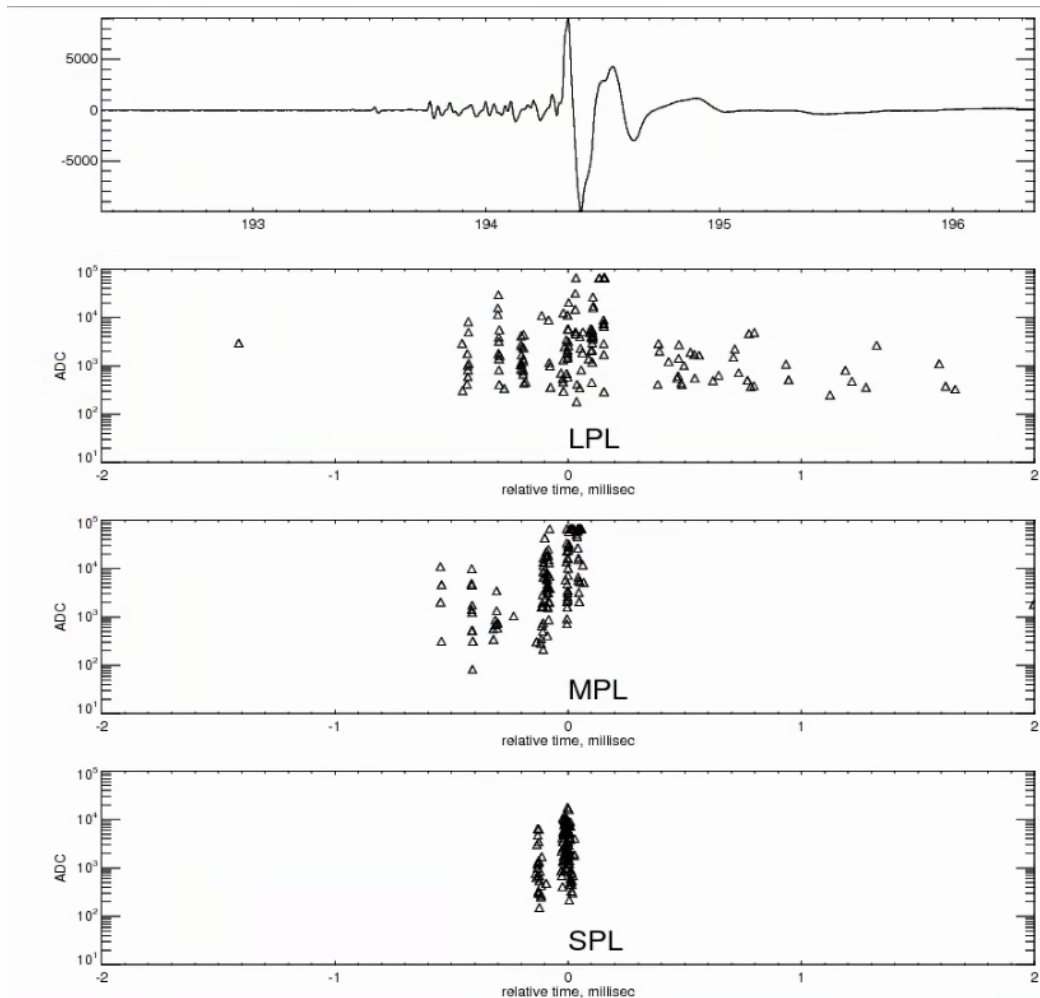


図1 2022年7月26日に富士山頂で観測されたステップリーダーX線/TGF複合現象からのVLF電波信号とX線の時間/エネルギー散布図。FALMAのデータは、岐阜大学のTIng Wu博士とDaohong Wang博士のご好意により提供されたものです。

図1は、この現象を示したものである。上段は100km以上離れたFALMAセンサが検出した雷放電起源の電波信号で、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るものである。下図は、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FALMA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るが、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。下の3つのパネルは、THORの中の大型、中型、小型のガンマ線検出器(LPL、MPL、SPL)のデータをそれぞれ示している。TGFの間、2つの大きな検出器は多かれ少なかれ圧倒され、小さな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、大きな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)のリターンストロークのよく後のカウントの散布は、中性子によって生成される。TGFのガンマ線は、空気分子の原子核と衝突してこれらの電子を放出することができ、検出する前に、電子は空気中をガタガタと動き回り、速度を落としてしばらく過ごす。

(英文) Energetic radiation associated with lightning and thunderstorm

Our collaboration between the University of California, Santa Cruz (UCSC) and Prof. Masashi Kamogawa at University of Shizuoka has deployed two gamma-ray detector systems at the Mt. Fuji research station in the summer of 2022 to study the dramatic but poorly understood phenomenon of Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs), brief flashes of gamma rays produced in some lightning flashes. TGFs can be so bright that there would be a significant health risk from the radiation for someone located right at the central part of the event where the radiation is generated (Dwyer et al. 2010). Fortunately, TGFs are relatively rare.

Most TGFs that we know about have been observed from spacecraft, because they can observe up to 1 million km² of Earth's surface at a time (Fishman et al. 1994). But these TGFs are nearly all from upward intracloud lightning, and tell us nothing about when and how often TGFs are produced deep in the atmosphere and pointing downward at the ground.

A mountaintop site like Mt. Fuji that hosts many thunderstorms is an ideal place to look for downward TGFs, since the high altitude puts you close to the center of the storm and the gamma rays aren't attenuated by distance and absorption in air. While Japan has been the biggest world center for TGF detection from the ground in recent years (see, for example, Umemoto et al. 2016, Wada et al. 20??, Enoto et al. 2017, Bowers et al. 2017), these events were detected during powerful winter thunderstorms in the northern coast of the Chubu region. This project (in its 4th season) is the first search for downward TGFs in summer thunderstorms at Mt. Fuji. The two detector systems are named GODOT (for Gamma-ray Observations During Overhead Thunderstorms) and THOR (Terrestrial High-energy Observations of Radiation). GODOT is the older system (having first come to Japan in 2015), and this is the first year for THOR, which has several improvements.

This year, for the first time, we have observed TGFs during the campaign -- three of them. They were associated with negative cloud-to-ground lightning with extremely powerful return strokes. We learn this thanks to the cooperation of Profs. Ting Wu and Daohong Wang of Gifu University, who provided data from the FALMA array of radio detectors, which can characterize the type and intensity of lightning from a distance. These flashes are of a type they call "compact return strokes," which originate only a kilometer or so above Earth's surface (which could be the top of the mountain). These flashes are similar to the ones producing TGFs in winter thunderstorms on the coast, but it is a new discovery that they also produce TGFs in the summer environment of Mt. Fuji.

An even more exciting result of these new observations is that TGFs have been seen together with a related phenomenon for the first time. Lightning proceeds from the cloud to the ground through a process called a "stepped leader", which carries electrical charge from the cloud in short, sudden steps, leaving a conductive path behind it. When the leader finally reaches the ground, a huge surge of current, the return stroke, passes through this path up to the cloud, eventually carrying the cloud's charge to the Earth. As has been observed previously at other sites, these "steps" often release bursts of x-rays, much weaker, briefer, and lower in energy than a TGF. Some scientists believe that there is a connection between these stepping events and TGFs, but it is not yet certain. We have observed, for the first time, here on Mt. Fuji, two events where the two phenomena appear together: a series of x-ray bursts that are associated with leader steps, with a TGF occurring at the end of the sequence, close to the time of the return stroke.

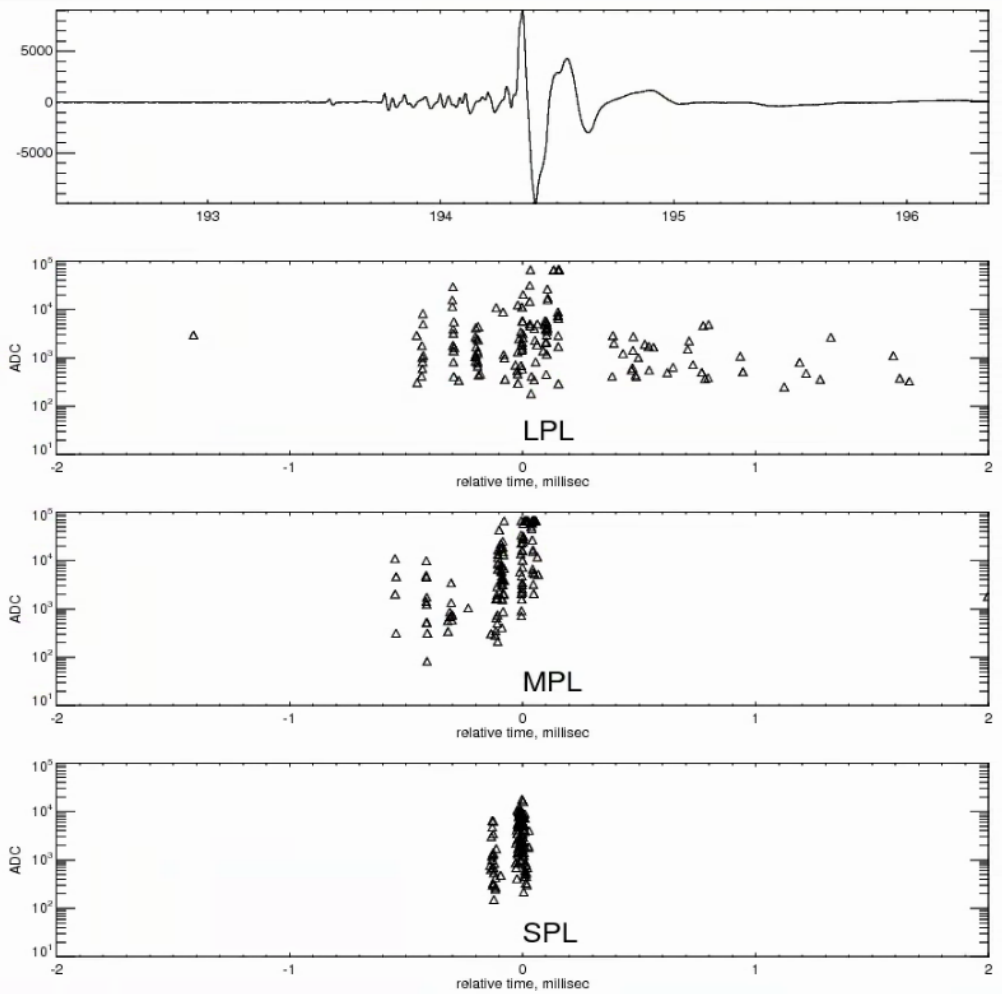


Figure 1 VLF radio signal and x-ray time/energy scatter plots from a combined stepped leader x-ray / TGF event observed at the summit of Mt. Fuji on 26 July 2022. The radio data from the FALMA array are provided courtesy of Dr. Ting Wu and Dr. Daohong Wang of Gifu University.

Figure 1 shows this phenomenon. The top panel shows the radio signal detected by the FALMA sensors over 100km away; the series of small pulses represent the steps of the leader as it approaches the ground, and the largest signal is caused by the currents of the return stroke. The lower panels represent the x-ray/gamma-ray detections from three radiation detectors in the THOR instrument. The energy of each high-energy photon is shown by a point on the y axis, and the x axis is time, on the same scale as the radio data in the first panel. You can see weaker bursts of photons associated with the steps, with the brightest (the TGF) happening close to the return stroke at the end. The lower three panels show the data from a large, medium-sized, and small gamma-ray detector within THOR, respectively (LPL, MPL, SPL). During the TGF the two larger detectors are more or less overwhelmed, and only the small detector gives an unbiased view of the last two steps; but only the larger detectors are big enough to detect the x-rays during the stepping. The sprinkling of counts well after the return stroke in the large detector (LPL) are produced by neutrons. The gamma-rays of the TGF can collide with the atomic nuclei in air molecules to eject these electrons, which spend some time rattling around in the air, slowing down, before we detect them.