

2013年7月26日の放射線検知時の雷雲内電荷値推定

庄司智美¹、齋藤将監¹、高橋周作¹、鈴木裕子¹、鴨川仁¹

1. 東京学芸大学

1. はじめに

雷活動及び雷雲に伴う高エネルギー放射線、つまりガンマ線が発生していることが近年わかってきた (Dwyer et al., 2012)。コンプトンガンマ線観測衛星 (Fishman et al., 1994) や RHESSI 衛星によって (Smith et al., 2005)、Terrestrial gamma-ray flashes (TGFs) と呼ばれる数ミリ秒オーダーのガンマ線バーストがとらえられた。この TGFs の発生高度は 15 ~ 20 km と推定され、雷雲から発せられる数百 Hz~数十 kHz 帯の電波と同期がみられる (Grefenstette et al., 2009) ことと、誘導雷からステップリーダに同期する数ミリ秒の X 線バーストが地上で観測された (Dwyer et al., 2003) ことから、雷放電路の強電場での制動放射でバーストが発生するメカニズムが考えられている (Babich et al., 2013)。一方、雷放電を伴わない雷雲の通過時においてもガンマ線が観測されている。冬季雷雲 (Torii et al., 2002; Tsuchiya et al., 2007; Torii et al., 2011)、夏季雷雲 (Torii et al., 2009; Tsuchiya et al., 2009) いずれも地上ないしは山岳でガンマ線が観測されている。ガンマ線の継続時間は 10 秒程~数分で雷雲の通過とは同期しているが、雷放電とは同期していない。雷雲に伴うガンマ線の発生は短いバーストと異なる現象であるが、この雷雲に伴うガンマ線の発生するメカニズムでも Relativistic runaway electron avalanche (RREA) 説が提案されている (Gurevich, 1992)。雷雲では激しい上昇気流によって雲を形成する粒子が摩擦を起こす関係で電荷をもつ領域が形成され、強い電場を帯びている。RREA はその強電場内でエネルギーを得てある速度まで加速した電子が空気分子と衝突し、次々と電子を生じ、新しく生成された電子がまた次々と空気分子と衝突することで、雪崩的に制動放射が起き高エネルギーの放射線を放出するというメカニズムである。RREA が起こるために必要な電場値はモンテカルロ計算では 1 気圧において約 280 kV/m と報告されている (Dwyer, 2012; Torii, 2013)。本研究ではこれらのガンマ線の発生源および仕組みを解明するために富士山頂においてガンマ線と大気電場の観測を行った。

2. 観測方法

2013 年の夏季に、標高 3,776 m の富士山山頂に位置する富士山測候所 (FJS) と 10 合目の施設 (FJT; FJS から西南西に 350 m) ではガンマ線の測定を行った。ガンマ線測定器として、測候所内と 10 合目の施設の 2 か所に 4 および 3 インチ NaI シンチレーターを設置した。測候所では、フィールドミルによる大気電場観測、天頂カメラによる雲量画像取得を行った。電場測定値の校正については、設置箇所及び測定器の形状による電場補正を行うため、測定地点から北 200 m の火口縁において準平面校正を行った。このことにより、補正值は富士山の火口縁での大気電場値を示す。富士山周辺の雲の様子は X バンドレーダ (国土交通省) のデータで解析を行った。また、観測された放射線が落雷によるものであるかどうかを確かめるために Docomo と Franklin Japan の落雷データを使用した。

3. 解析結果

Fig. 2 に示されているように、2013 年 7 月 26 日の FJS での大気電場強度とガンマ線の計数の時系列において、大気電場は 17:00 頃から徐々に変動し、18:30 から 18:40 頃には負の大気電場の最大値を示している。またこの時、全エネルギー領域のガンマ線と 3 MeV 以上のガンマ線はともに急増している。3 MeV 以上を考慮した理由は、天然放射線性核種により放出されるエネルギーが 3 MeV より小さいからである。Fig.1 の X バンドレーダー図の反射強度からは、二重丸で示した観測地点を雲が通過していることがわかる。これらのことから、測定地点に雷雲が近づき、山頂が雷雲内に入っているときに、雷雲要因のよってガンマ線量が増加したと考えられる。18:00 から 19:30 の FJS における全エネルギー領域のガンマ線を見ると (Fig. 2)、18:30 頃の急増している部分を除き、緩やかに増加、のちに緩やかに減少している。3 MeV 以上のガンマ線にはこのような傾向が見られないことから、これは自然放射性核種のラドンが雨滴中に溶け

出し、一時的に放射線量が増加したことよると考えられる。Fig. 3.B は、ガンマ線が急増した 18:35 の X バンドレーダーの偏波間相関係数をカラーコンターで示した図で、横軸は富士山頂からの距離を雷雲の進行方向を正としてとったときの距離であり (Fig. 1 の点線)、縦軸は高度を示している。偏波関位相差は水平偏波と垂直偏波の位相差を示し、値が 0 付近を示すとき乾霰の可能性が高い (Liu and Chandrasekar 2000; Straka et al. 2000)。Fig.3.B から乾霰は 5.5 ~ 7.5 km あたりにみられる。その日の高層気象データ (Tateno; N36.06, E140.13; Distance 148.75 km) から、高度 6.6 km あたりで約 -10°C が観測されている (Fig.3. の点線)。雲内の -10°C 層では負に帯電した霰や氷晶が存在すること (Takahashi, 1978) 電場計測値の符号から高度 5.8 km ~ 7.2 km あたりで負の帯電領域があると考えられる。ガンマ線検知時の富士山頂での大気電場値は -30 kV/m 程度であった。そこで、富士山頂上空の高度 5.8 ~ 7.2 km に 1 つの負の球電荷を想定し、富士山頂の高度を 4km とし、その電場の大きさが 30kV/m となるように、負の球電荷表面の電場の大きさを算出したところ 103 kV/m となった。一方、RREA が生じるとされる電場は空気中の分子密度に依存するので、高度 5.5 km では 145 kV/m になる。

4. おわりに

2013 年夏季に富士山頂にてガンマ線、および雷雲が作る大気電場の測定を行ったところ、雷雲が上空を通過した 7 月 26 日には放射線量の急増とともに大気電場値が大きく変動した。これは、雨滴中に溶け出したラドンによる変動とは検知エネルギー領域が異なるため、雷雲起因の高エネルギーガンマ線である。また、X バンドレーダー解析によると、このとき発生した雷雲は通常の積乱雲と比べ、規模は小さいながらも三極構造をとっていると推測される。ガンマ線検知時の富士山頂での大気電場値は -30 kV/m 程度であった。X バンドレーダーの解析より、富士山頂上空の高度 5.8 ~ 7.2 km に 1 つの負の球電荷を想定したシミュレーションを行ったところ、RREA が生じると考えられている電場を下回る値でも放射線の増加がみられるという結果になった。

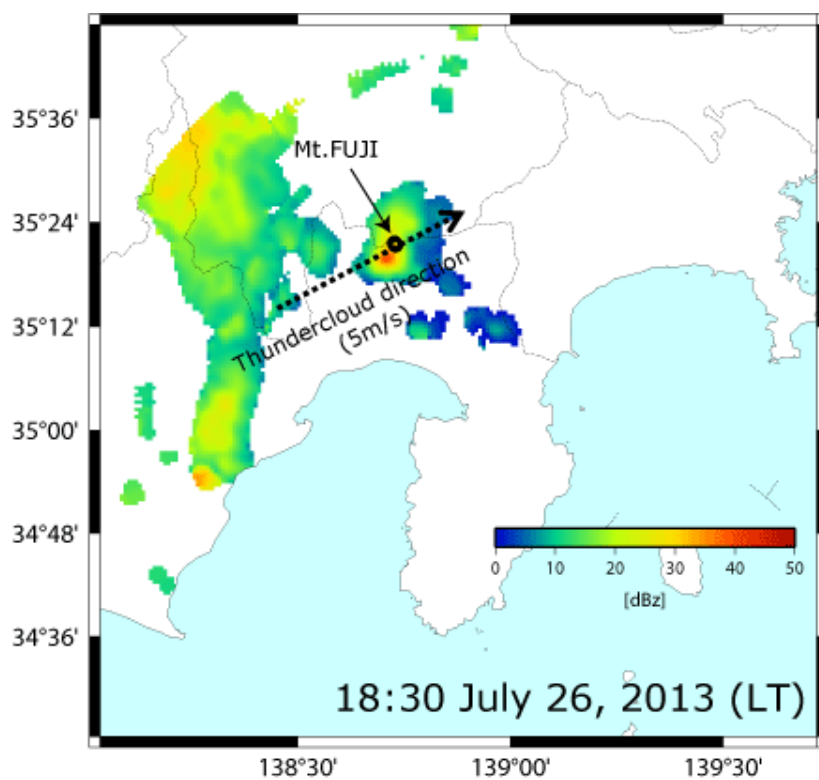


Fig. 1. 2013年7月26日18:30 (LT)のXバンドレーダーの反射強度

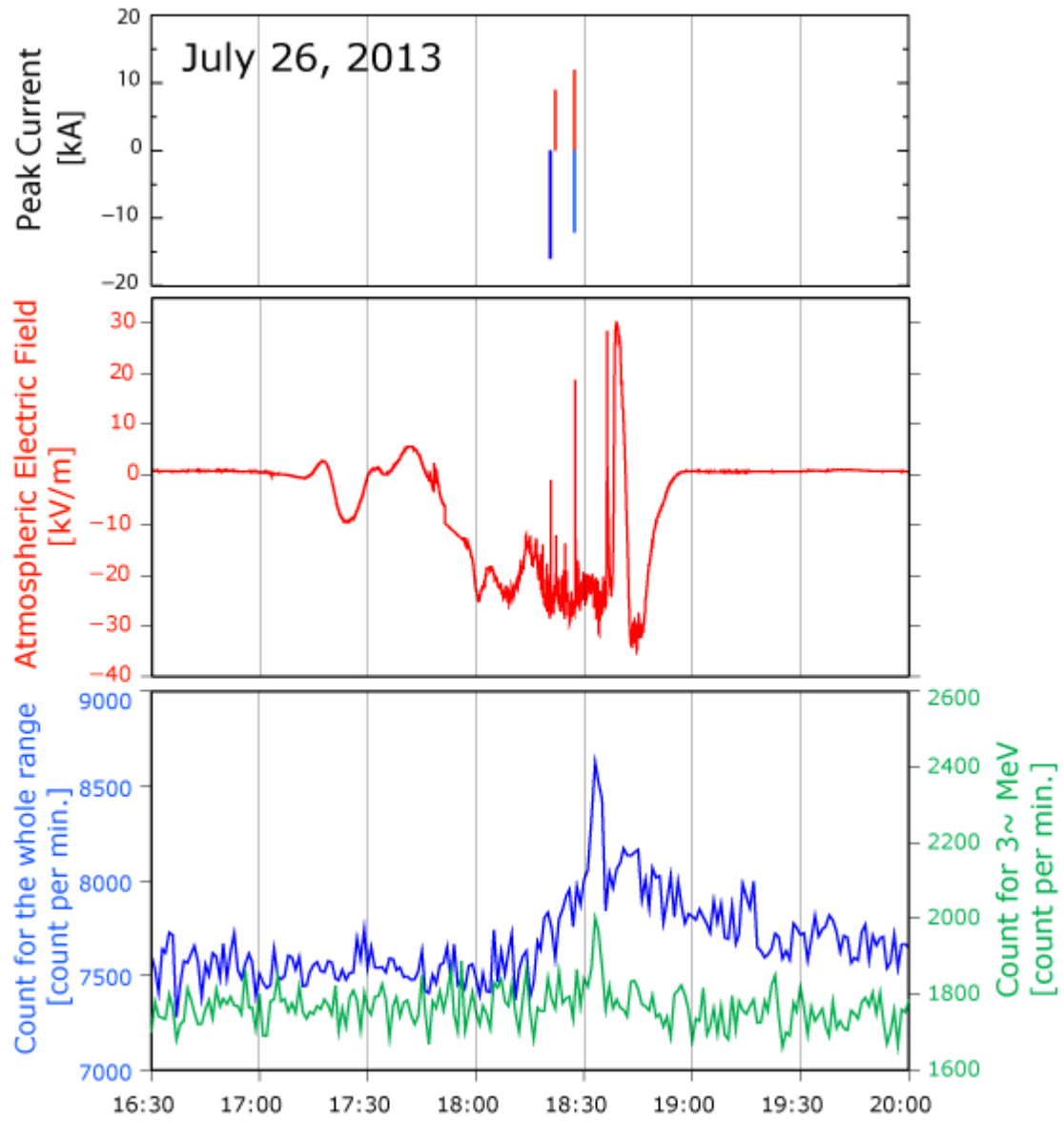


Fig. 2. 下のグラフは2013年7月26日16:30-20:00の大気電場(赤)と全エネルギー(緑)・3MeV以上のエネルギー(青)の放射線カウント数を示している。1番上の段は同時系列の雷放電の電流値を示していて、赤が正、青が負の電流値である。

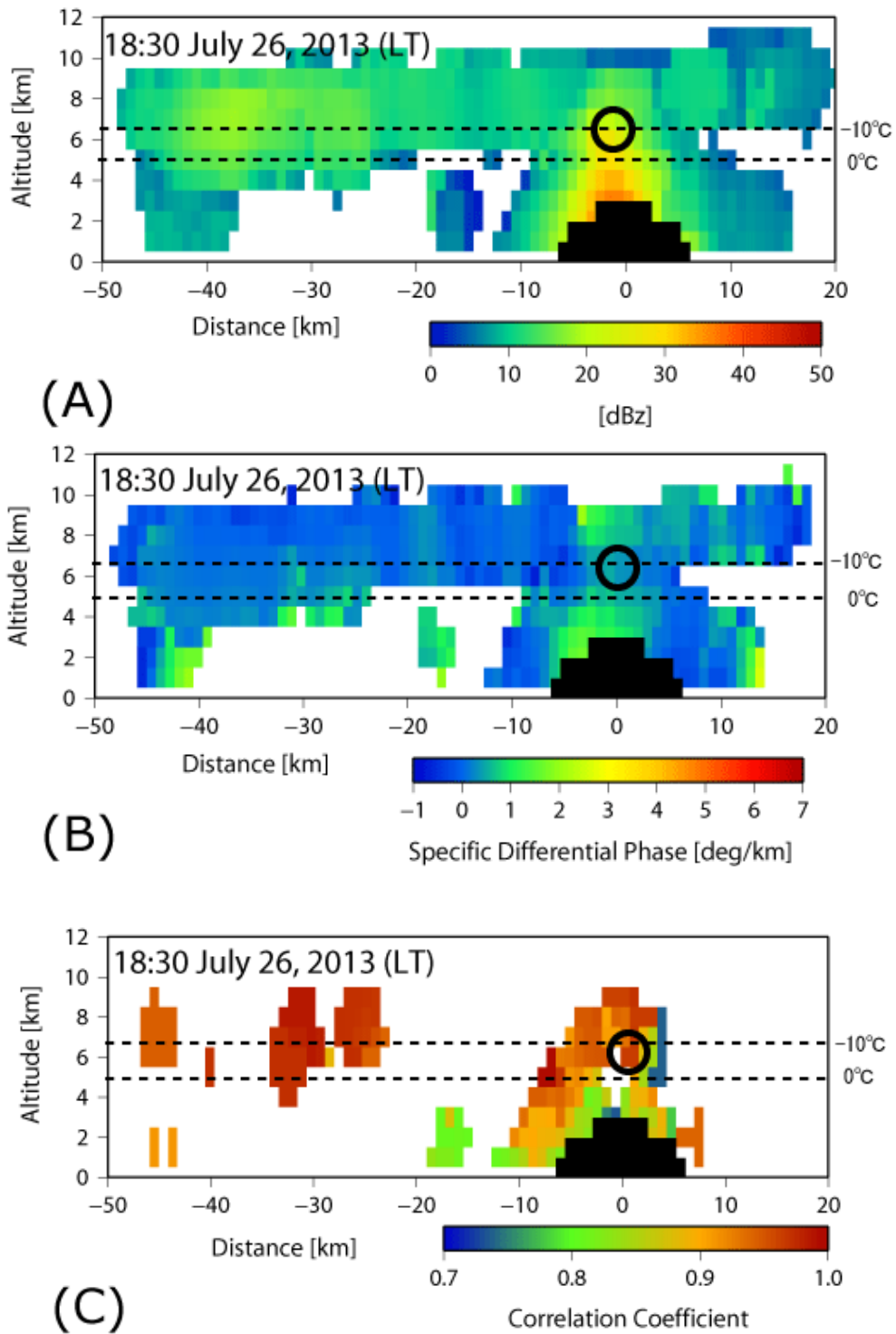


Fig. 3. 2013年7月26日18:30のXバンドレーダーの垂直断面図で横軸はFig.1の点線上にとり、富士山頂からの距離を数値としている。黒い影の部分は富士山。(A)が反射強度、(B)が偏波間位相差、(C)が偏波間相関係数のパラメータ。0°Cと-10°Cの高度は館野の高層気象データを用いた。

参考文献

- Joseph R. Dwyer, David M. Smith, Steven A. Cummer (2012) High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, *Space Sci. Rev.* 173, 133-196
- G.J. Fishman, P.N. Bhat, R. Mallozzi, J.M. Horack, T. Koshut C. Kouveliotou, G.N. Pendleton, C.A. Meegan, R.B. Wilson, W.S. Paciesas, S.J. Goodman, H.J. Christian(1994) Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin, *Science*, 264, 1313-1316
- D.M. Smith, L.I. Lopez, R.P. Lin, C.P. Barrington-Leigh (2005) Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV, *Science* 307, 1085-1088
- B. W. Grefenstette, D. M. Smith, B. J. Hazelton, L. I. Lopez (2009) First RHESSI terrestrial gamma ray flash catalog, *J. Geophys. Res.*
- Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman, Hamid K. Rassoul, Maher Al-Dayeh, Lee Caraway, Jason Jerauld, Vladimir A. Rakov, Douglas M. Jordan, Keith J. Rambo, Vincent Corbin, Brian Wright (2003) Energetic Radiation Produced During Rocket Triggered Lightning, *Science* 299, 694-697
- Leonid P. Babich, Igor M. Kutsyk, Evgeni N. Donsko, Joseph R. Dwyer (2013) Analysis of the experiment on registration of X-rays from the stepped leader of a cloud-to-ground lightning discharge, *J. Geophys. Res.* 118, 2573–2582
- T. Torii, M. Takeishi, T. Hosono (2002) Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity, *J. Geophys. Res.*107, 4324-4332
- Tsuchiya, H., T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, S. Nakamura, K. Makishima (2007) Detection of high-energy gamma rays from winter thunderclouds, *Phys. Rev. Lett.* 99, 165002
- T. Torii, Takeshi Sugita, Masashi Kamogawa, Yasuyuki Watanabe, Kenichi Kusunoki (2011) Migrating source of energetic radiation generated by thunderstorm activity, *Geophys. Res. Lett.* 38, L24801
- T. Torii, T. Sugita, S. Tanabe, Y. Kimura, M. Kamogawa, K. Yajima, H. Yasuda (2009) Gradual increase of energetic radiation associated with thunderstorm activity at the top of Mt. Fuji, *Geophys. Res. Lett.* 36, L13804
- Tsuchiya, H., T. Enoto, T. Torii, K. Nakazawa, T. Yuasa, S. Torii, T. Fukuyama, T. Yamaguchi, H. Kato, M. Okano, M. Takita, K. Makishima (2009) Observation of an energetic radiation burst from mountain-top thunderclouds, *Phys. Rev. Lett.* 102, 255003
- A.V. Gurevich, G.M. Milikh, R. Roussel-Dupre (1992) Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm, *Phys. Lett. A* 165, 463-468
- J. R. Dwyer (2003) A fundamental limit on electric fields in air, *Geophys. Res. Lett.* 30, 2055-2058
- Liu, H., V. Chandrasekar (2000) Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 17, 140–164
- Straka, J. M., D. S. Zrnich, A. V. Ryzekov (2000) Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations, *J. Appl. Meteor.* 39, 1341–1372
- T. Takahashi (1978) Riming Electrification as a Charge generation Mechanism in Thunderstorms, *J. Atmos. Sci.* 35, 1536-1548

*連絡先: 庄司智美 (Tomomi Shoji), b112321m@st.u-gakugei.ac.jp