P-03: 2016 年夏季観測された雷雲起源の高エネルギー放射線

高橋周作[1], 石川朗子[1], Gregory Bowers[2], David Smith[2], 岩崎杉紀[3], 泉田航[1], 鴨川仁[1]
1.東京学芸大学, 2.UC Santa Cruz 3.防衛大学校

1. はじめに

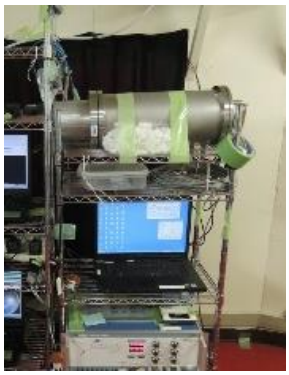
自然に存在する放射線として, 1900 年前後に Becquerel や Curie らが発見した地殻由来のもの(ウラン鉱), 1912 年に Hess が発見した宇宙線がある. そして近年, 雷活動及び雷雲に伴う高エネルギー放射線が発生していることがわかってきた[1)]. この高エネルギー放射線は, 落雷時に発生する数ミリ秒オーダーのショートバーストと, 雷雲の通過時に発生する数秒から数分オーダーのロングバーストとの 2 種類に分類される. これらの放射線バーストの発生機構として, Relativistic runaway electron avalanche(RREA)説が提案されている[2)]. RREA は宇宙線などから生じた電子が, 雷雲内部の強電場で加速され逃走電子(Runaway electron)となり, 空気分子と衝突して雪崩的に電子を生じさせ, 制動放射による高エネルギーの放射線を放出するメカニズムである. 冬季雷時のロングバーストの発生位置は Torii らによって同定されており[3)], Torii らのモンテカルロ計算によると, 地上で検知された放射線量を RREA の理論で説明するには雷雲下部に約-400 kV/m (1 atm 換算) の電場が必要である[4)]. しかし, この電場値は気球を用いた雷雲内電場計測によると絶縁破壊閾値を大幅に超えているとみられるため[5)], 雷活動及び雷雲に伴う高エネルギー放射線の発生メカニズムは未解明と言ってよい.

本研究では, 2013 年及び 2016 年に富士山頂で観測された夏季雷雲起源のロングバーストの観測結果より, ロングバースト発生の場所および発生原因を探る.

2. 観測方法

夏季雷雲の雲底高度は数 km にも及び, 雷活動及び雷雲に伴う高エネルギー放射線を地上で観測することは, 大気中の減衰によりほとんど不可能である. そこで 7 月から 8 月にかけて, 雷雲に接近することのできる高度 3,776m の富士山頂にてロングバースト観測を行った. 2013 年には富士山測候所 1 号庁舎 2 階に放射線測定装置(円筒型 NaI シンチレーター)を設置した(図 1(a)). さらに放射線バーストの源である雷放電や雷雲の挙動を検知するため, 1 号庁舎屋根に大気電場観測装置(Boltek 社製フィールド・ミル) (低感度・高感度)と天頂カメラ(昼間用・夜間用)同期間設置した(図 1(c)). 2016 年には同じく富士山測候所 1 号庁舎 2 階に放射線測定装置(NaI 及びプラスチックシンチレーター; Gamma-ray Observations During Overhead Thunderstorms ; GODOT) (図 1(b)), 1 号庁舎屋根に大気電場測定装置, 各種カメラを設置した. また, 雷雲の挙動をより詳しく知るため, 国土交通省が設置している X バンド MP レーダーの富士宮・静岡北・香貫山局のデータ(DIAS 提供)を利用し, 気象研究所が開発したツールを用いて反射強度等を求めた. さらに, 2 局のデータをデュアルドップラー解析することで雷雲内の上昇流を算出した. 加えて, 富士山周辺で発生した雷を把握するため WWLLN, DOCOMO, 中部電力の雷データを用いた.

(a) (b)



(c)

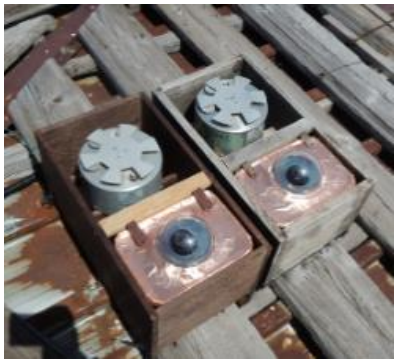


図 1 実験装置. (a)放射線測定装置(円筒型 NaI シンチレータ), (b)放射線測定装置(GODOT), (c)大気電場観測装置と天頂カメラ.

3. 観測結果

2013 年 7 月 23 日 15:20 (LT)頃, 7 月 26 日 15:30 (LT)頃, 8 月 5 日 17:30 (LT)頃, 2016 年 8 月 23 日 16:00 (LT)頃に計 4 件のロングバーストが検知された. このうち X バンド MP レーダーデータが記録されていた 2013 年 7 月 26 日, 8 月 5 日, 2016 年 8 月 23 日の 3 事例の観測結果を図 2 に示す. なお, バースト継続時間はそれぞれ約 5 分, 約 5 分, 約 10 分であった.

連絡先：高橋周作（Shusaku TAKAHASHI） b122325w@st.u-gakugei.ac.jp

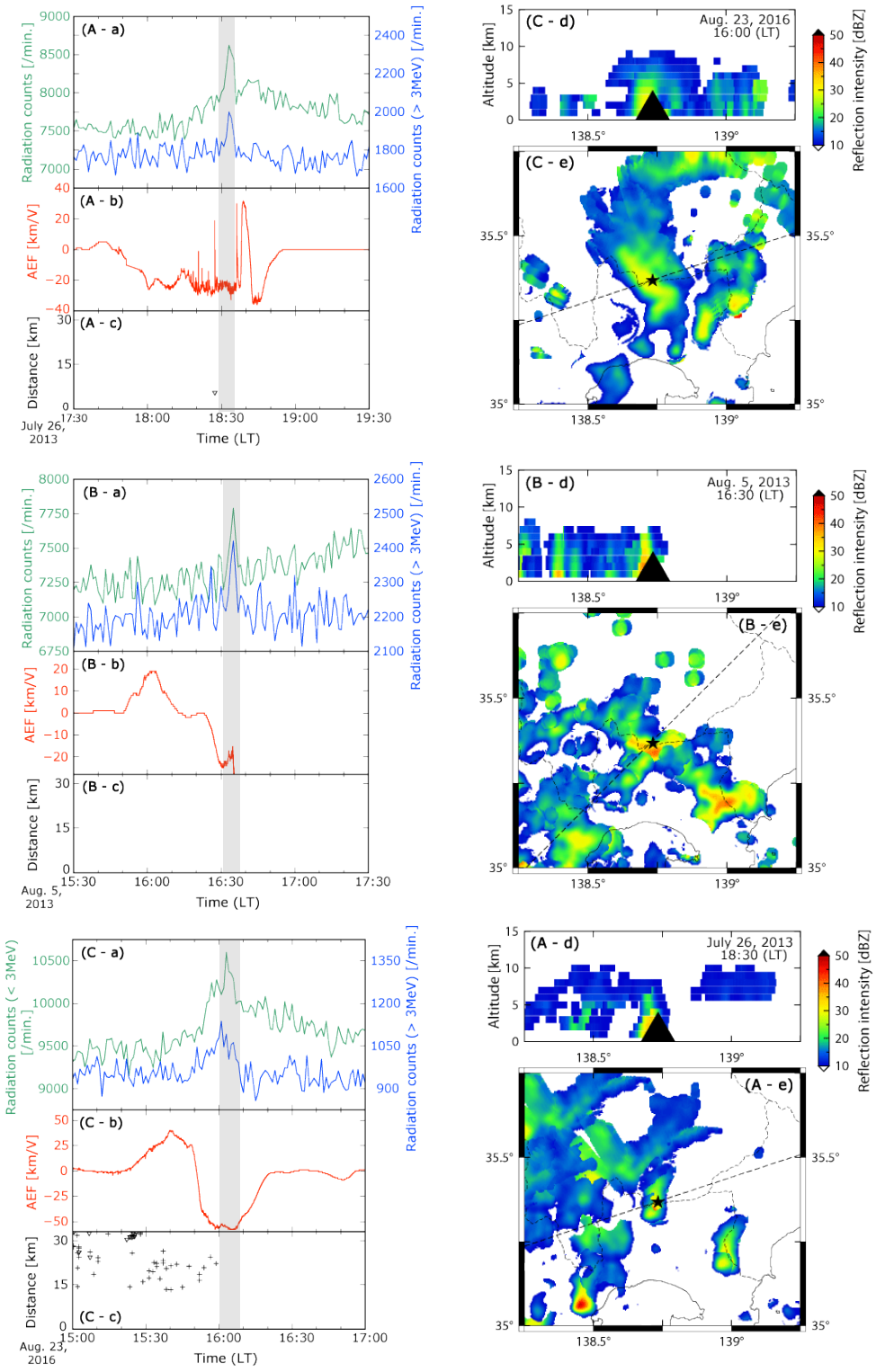


図 2　各ロングバースト時の時系列プロットと X バンド MP レーダー反射強度分布図. A は 2013 年 7 月 26 日の事例, B は 2013 年 8 月 5 日の事例, C は 2016 年 8 月 23 日の事例である. (a) 緑は 3 MeV より小さいエネルギーを持つ放射線の 1 分ごとのカウント数, 青は 3 MeV より大きいエネルギーを持つ放射線の 1 分ごとのカウント数. ロングバースト発生時刻帯に網掛けをした. (b) 大気電場の値. 大気電場は鉛直上向きを正に取っている. なお事例 B は 16:35 以降データが欠損している. (c) 富士山頂周辺で発生した雷の極性と富士山頂からの水平距離. 事例 A は WWLLN 雷データ, 事例 B は DOCOMO 雷データ, 事例 C は中部電力雷データを用いている. ＋は正極性落雷, ▽は負極性落雷を示す. (d) e 図の破線部における反射強度の鉛直断面図. (e) 高度 4km における反射強度の水平断面図. ★印は富士山頂, 破線は富士山頂を通過した雲の軌跡を示す.

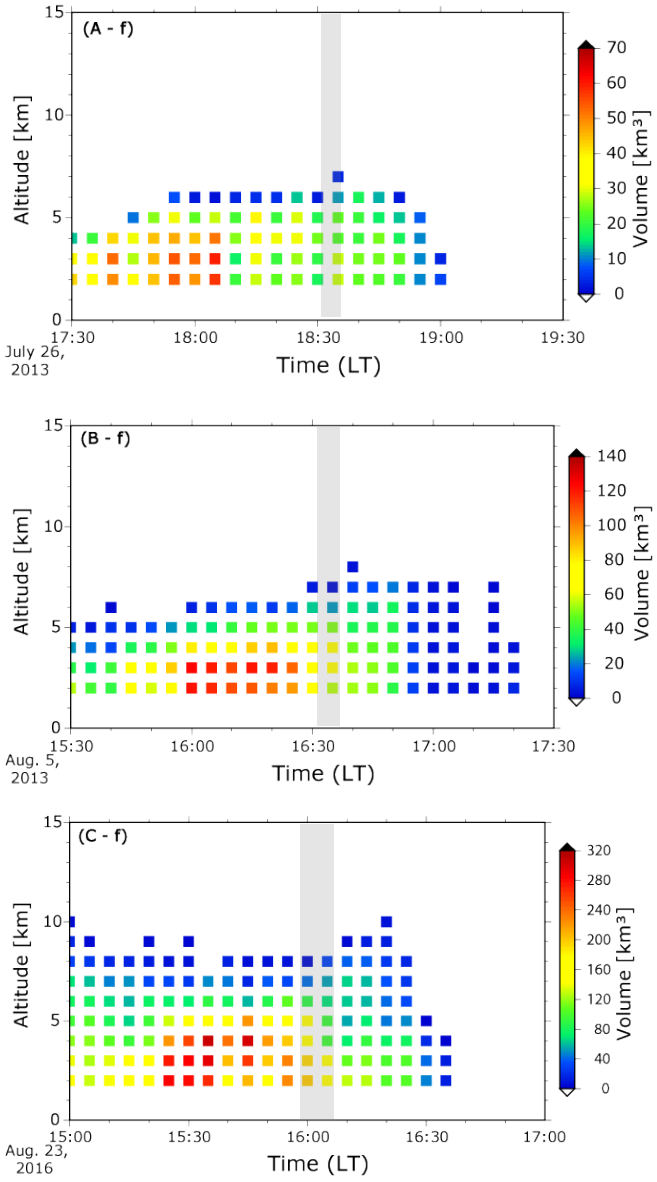


図 3　事例 A, B, C のロングバースト発生前後における，雷雲内の高度 1 km ごとの上昇流体積(移動する雷雲内において強い反射強度を示す部分を含むよう，事例毎にある一定の水平断面面積を保つよう解析領域を指定し，上昇流を一辺 1 km の単位格子ごとに求め，そのうち上昇流速度 0.1 m/s 以上を示す格子の数を積算)の時系列プロット．ロングバースト発生時刻帯に網掛けをした．

4. 考察

図 3 の上昇流体積プロットより，3 事例とも上昇流体積がピークになった後にロングバーストが発生していることがわかる．事例 A については図 2 (A - b) の大気電場変動より，事例 C については図 2 (C - c) の雷プロットより，雷の発生が収束した後にロングバーストが発生していることもわかる．雷雲は強い上昇流によって成長し最盛期を迎えると，雲内の降水粒子の落下に伴って下降流が形成され衰弱期に突入する [6]．また，落雷は雷雲内で粒子がこすれ合うことにより蓄積された電荷が一気に放出される現象であり，雷雲の最盛期に発生する．したがって，今回観測されたロングバーストは雷雲の衰弱期に発生したものであると考えられる．

また，一般的な夏季雷雲の雲内電荷分布については，電場のゾンデ観測や地上観測により，上層に正電荷，中層に負電荷，下層に局所的な正電荷が存在する三極構造を成すと言われており [7]，中層の負電荷は降雨や落雷によって地面に運ばれる [8]．したがって，ロングバーストが発生した雷雲衰弱期において，雷雲内上層の正電荷は中層の負電荷より比較的大きな電荷量を持っているため，雷雲上部の電場は下部の電場より大きいと考えられる．

ここで，ロングバーストの発生源について考える．雷雲下部を放射線発生源であると推論した過去の研究の冬季雷雲下部電場推定値(およそ-400 kV/m)と比較して，今回の観測事例 A, B, C はいずれも電場の値がそれほど大きくないため，雷雲下部が放射線の発生源であるという説は考えにくい．そこで本研究では，雷雲内上層の正電荷によって雷雲上部に作られる鉛直上向きの電場が雷雲衰弱期で強められており，且つ雷雲下部と雷雲上部の電場の方向は等しいという点に着目し，雷雲上部を放射線の発生源とする場合について考える．宇宙線などから生じた電子が雷雲上部の鉛直上向き電場によって加速され，制動放射を起こすことで，放射線バーストが発生したと仮定し，Torii らが開発したモンテカルロシミュレーション [4] を行った．X バンド MP レーダー解析より，雷雲の高度は最高でも高度 10 km ほどまでしか到達していなかったため，その上の 13.5 km に線源を設定し，0.28 気圧で一様な空気分子密度の空間において電場の大きさを変化させ，それぞれ線源を 100 万発打ち込んだ場合の放射線線量を高度 200 m 毎に計算した．

電場パラメータを変化させたときの計算結果を近似して高度プロファイルを求め，電場 0 kV/m のときの結果を 1 とした放射線線量比率を求めた．電場が 100 kV/m あれば富士山頂の高度 3,776 m における放射線流量比率が 1.1 を超え，放射線観測において有効な結果であると考えられる．この電場値は絶縁破壊閾値 [5] を超えないため，雷雲上部を放射線発生源とする本研究の説は支持される．

5. まとめ

2013 年と 2016 年富士山頂で検知された 4 件のロングバーストのうち，X バンド MP レーダーデータが記録されていた事例について解析したところ，放射線バーストは雷雲の衰弱期に発生していることが分かった．本研究では，雷雲衰弱期において，雷雲内の電荷の不安定さによって強められる雷雲上部の鉛直上向き電場における電子加速の制動放射を発生起源とした，放射線バースト発生機構の可能性を示唆した．

参考文献

1) J. R. Dwyer et al. (2012). High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, Space Sci. Rev., 173, 133-196.
2) A. V. Gurevich et al. (1992). Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm, Phys. Lett. A, 165, 463-468.
3) T. Torii et al. (2011). Migrating source of energetic radiation generated by thunderstorm activity, Geophys. Res. Lett., 38, L24801.
4) T. Torri et al. (2014). Monte Carlo Simulation for the Source of Transient Energetic Radiation Generated by Thunderstorm Activity, J. Atmos. Electricity, 34, 1-7.
5) T. C. Marshall et al. (1995). Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms. J. Geophys. Res., 100 (D3), 7079-7103.
6) 日本大気電気学会 (2003). 大気電気学概説, 15-17.
7) Kuettner, J. (1950). The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds, J. Meteorol., 7, 322-332.
8) R. P. Feinnman, R. B. Leighton, M. L. Sands (1963). Electricity in the Atmosphere, The Feynman Lectures on Physics, 2, 9-3.