

富士山山頂における高エネルギー放射線および大気電場の観測

田中章裕¹, 鳥居建男^{2*}, 杉田武志³, 保田浩志⁴, 鴨川仁¹

1. 東京学芸大学, 2. 日本原子力研究開発機構, 3. 科学システム研究所,
4. 独立行政法人放射線医学総合研究所

1. はじめに

雷活動に起因すると考えられる放射線が、冬季雷をはじめ[1, 2]、さらには Terrestrial gamma-ray flash (TGF) [3,4]と呼ばれる雷雲上空で観測される変動まで様々な時と場所で観測されている。これらの放射線には、雷雲中の高電場に起因すると考えられる 10 秒以上持続する長時間の放射線変動と、雷放電に起因すると考えられる 1 ミリ秒程度の短時間の放射線バーストの 2 つのタイプが観測されている。特に、前者は冬季雷を代表として、放射線発生源と考えられる雷雲と観測地点の距離が短い場所で頻繁に観測されている。

冬季雷活動時に地上で観測される事象は、落雷とほぼ同時に観測される短時間バーストの他に、落雷の数 10 秒程度前から上昇し、落雷発生とともに再び元の値に戻るような、放射線計数率の緩やかな変動が観測されている[5]。しかも、そのエネルギーは数 MeV[1]から 10 MeV 超[2]と高エネルギーである。このような事象は、雷雲の高度が高い夏季雷時では地上で観測された報告がない。そのため、雷雲高度の低い冬季雷の場合、放射線の発生源と考えられる雷雲の高電場領域も低い高度で形成され、この領域で加速された高エネルギー電子は空気分子との雪崩的な衝突によって制動放射線(光子)を生成し、その一部が地上まで達したものと考えられる。

そこで、雷雲中では夏季雷でも冬季雷と同様の事象が発生しているかどうかを調べるために、日本で最も高く、また雷活動が盛んな独立峰である富士山の山頂において雷活動時の放射線変動を観測した。

2. 測定

測定は、富士山頂にある富士山測候所内で行った。測候所は標高 3,776m の最高地点、剣が峰に設置されている。2008 年から2010年の7月下旬ないしは8月上旬から8月下旬までの間、測候所の最上階に放射線検出器を設置して放射線変動の連続観測を実施した。放射線検出器は、厚さ 2mm のアルミ製のカバーで覆われた5インチの円筒型 NaI(Tl)シンチレーション検出器を用い、この検出器に5インチ光電子増倍管を接続した。この検出器の測定エネルギー範囲は、150keVから23MeVとし、この範囲の波高分布の変動を計数した。2009年から2010年ではBoltek社製のフィールドミルを用いて大気電場も同時測定および、プラスチックシンチレーター検出器を用いて高エネルギーの電子についても観測を行った。また、雷活動は、フランクリン・ジャパン(株)が運営するJLDN (Japan Lightning Detection Network)の落雷データを用いた。

3. 2008 年の測定結果

2008 年 8 月 9 日に富士山頂付近は雷活動が盛んであった。11 時頃より雷放電が頻発し 16 時頃まで続いた。NaI 検出器で観測された全計数、及び各エネルギー領域での放射線計数の時間変動、また JLDN で測候所を中心に 10km 四方での雷活動の記録を Fig.1 に示す。

Fig.1 では 1 秒毎の放射線計数の変動を平滑化するために、21 秒間の移動中央値を示した。Fig.1 に示すように、11:35 から 11:55 までの 20 分間に顕著な放射線計数率の上昇が観測された。天然放射性核種に起因するとは考えられない 3MeV 以上のエネルギー領域についても有意な上昇が見られ、10MeV 以上の領域についてもわずかであるが 10 秒以上継続して上昇した。しかも、この間に JLDN では落雷は観測されなかった。

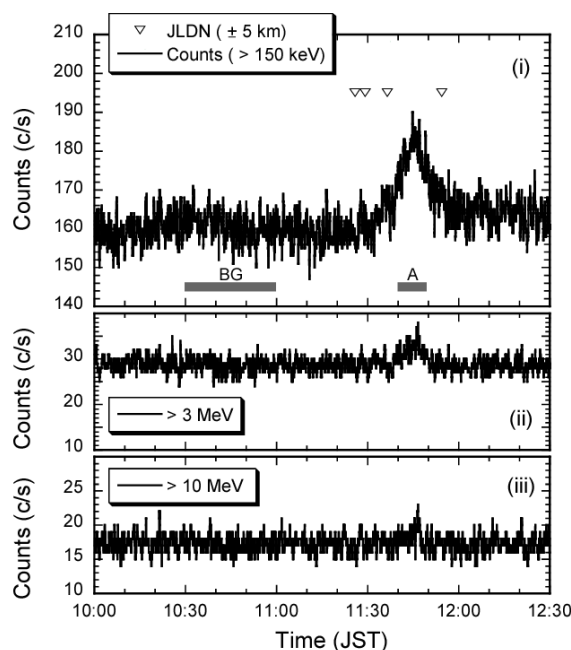


Fig.1 2008 年 8 月 9 日に観測された放射線計数率の変動の一例と JLDN の落雷記録。(i) は 150keV 以上の全計数率、(ii) は 3MeV 以上、(iii) は 10MeV 以上の計数率

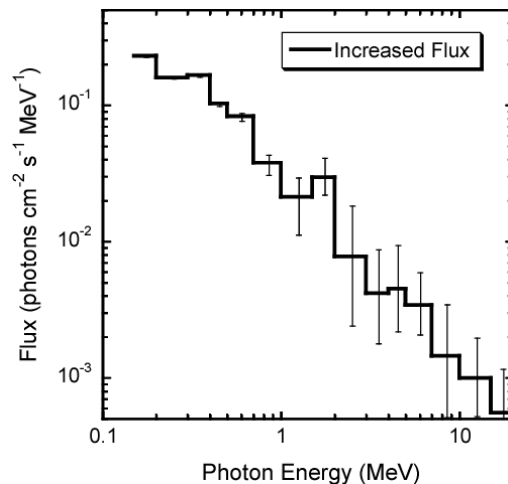


Fig.2 アンフォールディング計算により求めた計数率上昇時の入射放射線のエネルギースペクトルの増加分

さらに、NaI 検出器で得られた放射線計数の波高分布をアンフォールディング計算することにより、入射放射線のエネルギースペクトルを求めた。予め放射線計数が上昇する前の 10:30 から 11:00 までの 30 分間 (Fig.1 の”BG”) の計数をバックグラウンド (BG) 値として、アンフォールディング計算コード SAND-II を用いてエネルギースペクトルを求め、さらに放射線計数率が最も顕著に上昇した 10 分間 (11:40～11:50、Fig.1 の”A”) について同様にスペクトル解析を行った。Fig.2 に、放射線の計数が上昇した時 (A) のスペクトルから BG のスペクトルを差し引いた雷活動に起因すると考えられる放射線のエネルギースペクトルを示す。ここで、エネルギー群毎の計数の時間変動がポアソン分布していることから、各エネルギー群の計数の偏差からスペクトルの誤差を求め、エラーバーを Fig.2 に図示した。

図から明らかなように、雷活動に起因すると考えられる放射線は 10MeV 超までの連続スペクトルを示した。特に、3～7MeV までの高エネルギー領域で高い光子束を示し、BG 値に比べて約 25% の増加が見られた。

4. 2009 年および 2010 年の測定結果

2009 年の観測においても 2008 年と同様な高エネルギーの放射線の変動が 8 月 9 日未明に観測された (Fig.3)。2009 年より大気電場の計測およびプラスチックシンチレーター検出器による高エネルギー電子の観測も行われており、放射線変動が見られたとき、観測値が飽和してしまうほどの強い強度の負の電場が存在したことが分った。次に Fig.4 では NaI 検出器の指示値上昇時 (上昇を含む 10 分間) のパルス波高分布とその前の 10 分間の波高分布について Unfolding 計算して、入射光子のエネルギースペクトルを求めた。2008 年の結果と比較すると 2009 年の結果の方が、高エネルギー成分が大きくなっていることが分る。この間に JLDN では落雷は周辺に全く観測されなかった。気象庁によって取得されているレーダーエコーデータによればこの間強い強度のエコーが観測されていることから少なくとも落雷を伴わない雷雲が存在したことが分る。

2010 年の観測では、雷雲は山頂付近で観測されたものの 2008 年および 2009 年のような結果は得られなかった。

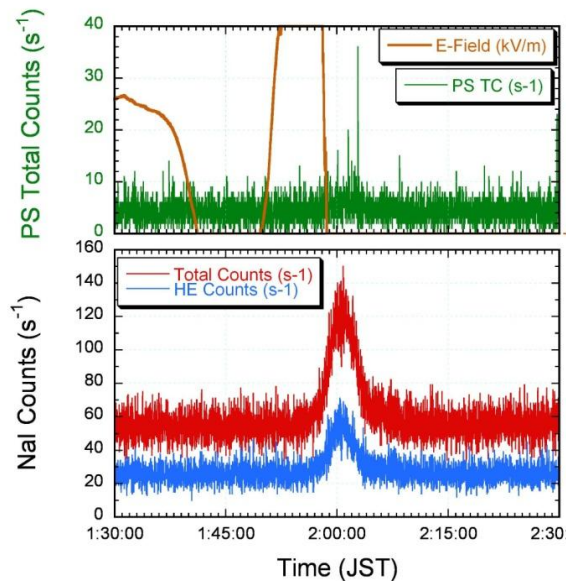


Fig.3 2009 年 8 月 8 日に観測された大気電場変動 (E-Field)およびプラスチックプラスチックシンチレーター検出器(PS)の記録(上段)、NaI 検出器の全計数(約1MeV 以上)、4MeV 以上の HE 計数の記録(下段)

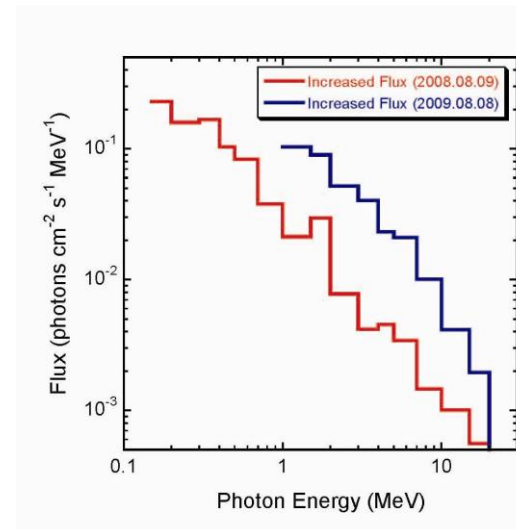


Fig.4 アンフォールディング計算により求めた計数率上昇時の入射放射線のエネルギースペクトルの増加分。比較のために2008年8月8日のデータを記載。

5. まとめ

富士山頂での放射線観測の結果から、雷活動に起因すると考えられる 20 分程度持続する緩やかな放射線計数率の変動が観測された。エネルギーは冬季雷の場合とほぼ同じであるが、冬季雷では、持続時間は数 10 秒程度までしか観測されていない[1,2,5]。これは、冬季雷において低高度で高い電界強度を持つ要因となるポケット正電荷の滞空時間が数分程度と夏季雷に比べて短いためと考えられ、高電界領域が長時間存在する夏季雷では、しかも高度 4,000m 近い高山では、近傍に高電界領域が長時間存在し、高エネルギー放射線を生成し続けたためと考えられる。

本観測結果や冬季雷での観測結果から得られた緩やかな放射線計数率の変動は、逃走絶縁破壊 (RB) [6]の前の段階から、雷雲中の高電界領域で”Pre-RB”とも呼べる状態が続くことにより、高エネルギー放射線が連続的に放出されたためと考えられる。これは、雷雲電界を模擬した場での高エネルギー電子・光子の挙動計算[7]からも、RB のしきい値電界(～280kV/m-atm)より前段階から、高エネルギー電子・光子束が増加し始めることにより示唆されるものである。

参考文献

- [1] T. Torii, et al. (2002), *J. Geophys. Res.*, **107**, 4324.
- [2] H. Tsuchiya, et al. (2007), *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 165002.
- [3] G. J. Fishman, et al., (1994), *Science*, **264**, 1313.
- [4] D. M. Smith, et al., (2005), *Science*, **307**, 1085.
- [5] T. Torii, et al., (2008), *Proc. 30th ICRC*, Vol.1, pp.677-680, UNAM, Mexico.
- [6] A. V. Gurevich, et al. (1999), *Phys. Lett., A* **254**, 79.
- [7] T. Torii, et al., *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05113, doi:10.1029/2003GL019067.

*連絡先: 鳥井建男 (Tatsuo TORII)、torii.tatsuo@jaea.go.jp