

論文の内容の要旨

Observational study of thundercloud radiation
bursts using a segmented organic scintillator
installed at a mountaintop

(セグメント化有機シンチレータを用いた山頂
における雷雲放射線バーストの観測研究)

加藤 陽

雷雲内部には 100 kV/m 以上にもなる強い電場が存在することが知られており、宇宙線 2 次粒子や大気由来の電子はこの雷雲内電場を通過する際に加速される。電子が空気分子との衝突によるイオン化で失う単位長さあたりのエネルギー損失は、 $O(10^0)$ MeV 以下の非相対論的領域においては電子のエネルギーの増加とともに減少し、その後緩やかな増加に転じる。一方、電子が $O(10^2)$ MeV に近い相対論的エネルギーに達する場合には、制動放射によるエネルギー損失がイオン化によるエネルギー損失に対して顕著に優勢となり、電子は制動放射によって X 線/ γ 線を生成しながら急激にエネルギーを失う。

雷雲内電場に入射した電子のうち一部は、電場による加速がイオン化によるエネルギー損失を上回って相対論的エネルギーまで加速される。この過程で大気分子との衝突により多数の knock-on 電子が生成するが、その中で一定以上のエネルギーを持つものは雷雲内電場によって加速され再び多数の knock-on 電子を生み出す。このプロセスが繰り返される結果、1 個のシード電子から複数個の電子が生成する増倍現象が起こることになる。これは相対論的逃走電子雪崩 (Relativistic Runaway Electron Avalanche: RREA) モデルと呼ばれ、この雪崩現象が発生する電場は地上付近で 280 kV/m ほどであるとされる。これは大気の絶縁破壊強度 2 MV/m よりずっと小さいため、現実的な雷発生モデルとして注目されている。実際に、RREA モデルによるとみられる増倍した電子や、それに伴う制動放射光子による大きな放射線信号が、雷活動と同期して地上や宇宙空間から観測されることがある。

これまでに観測された雷活動に関連するとみられる放射線バーストは大きく分けて 2 種類あり、一方は数ミリ秒程度の持続時間しか持たない短持続性バースト、もう一方は数秒から数十分程度の持続時間を持つ長持続性バーストと呼ばれる。衛星や一部の地上実験で観測される短持続性バーストは、雷放電現象と同期して観測されており、RREA モデルで比較的良好に説明されることが知られている。一方で長持続性バーストは、多くの場合山岳地帯で観測されているが、例外的に日

本海沿岸地域で冬季に発生する雷雲において似た性質を持つバーストが地上から観測されている。これらの長持続性バーストは、短持続性バーストとは対照的に雷放電とは関連がなく、雷雲の存在とだけ関連して観測される現象と認識されてきた。しかし長持続性バーストは観測例自体があまり多くないこともあり、その性質や RREA モデルとの関連性についての検証は発展途上である。

今回の観測で使用した検出器は、もともと原子炉モニタリングのための反電子ニュートリノ検出器として開発されたもので、Plastic Anti-Neutrino Detector Array の頭文字をとって PANDA と呼ばれている。PANDA のターゲット部分は、 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 100\text{cm}$ のプラスチックシンチレータを 10×10 本積み重ねた構造をしており、それぞれのシンチレータで発生した信号を両端に取り付けた光電子増倍管で検出する。PANDA の開発は 4×4 本のシンチレータを使用した最初のプロトタイプから始まり、その後 6×6 本使用した第 2 次プロトタイプ PANDA36、 8×8 本使用した第 3 次プロトタイプ PANDA64 と 3 世代のプロトタイプが開発されてきた。2011 年に関西電力大飯発電所でおこなった PANDA36 によるニュートリノ測定実験の際に、雷雲に由来するとみられる長持続性バーストが観測されたことから、2014 年には雷雲バーストの測定を目的として PANDA64 を用いて乗鞍観測所での測定をおこなった (Figure 1)。

乗鞍観測所は岐阜県にある東京大学宇宙線研究所の実験施設であり、標高 2,770 m (大気圧 0.72 hPa) に位置している。一般的に標高が高いほど雷雲との距離が近くなり放射線バーストが観測しやすいことから、多くの先行研究では山岳地帯で観測がおこなわれており、乗鞍観測所でも過去に長持続性バーストの観測例が報告されている。2014 年 7 月に PANDA64 を乗鞍観測所に輸送して測定を開始し、9 月末まで合計 54 日間の観測をおこなった。PANDA は原子炉モニタリング用に開発されているため、トラックに積み込んだまま測定できるという利点がある。そのため屋内での測定と比べて少ない遮蔽のもとで放射線観測をおこなうことができる。PANDA64 はそのままの構成では放射線バーストの観測には向かないため、シールドの撤去やトリガーレートを抑えるためのデータ取得回路の調節をおこなうなどして測定を実施した。



Figure 1: 乗鞍観測所に設置した PANDA64

全測定期間のデータを 30 秒ごとの区間に切り分けて、ある 30 秒区間の 3 MeV 以上のカウントレートが前後 2 時間の参照区間の平均カウントレートと比べて 5σ 以上の信号増大を連続して持つ区間をバースト候補として探したところ、54 日間で 12 回のバースト候補が見つかった (Figure 2)。

3 MeV 以上と設定したのは降雨による放射性降下物の影響を避けるためであり、実際に 12 回のバースト候補区間では降雨によるとみられる 3 MeV 以下の緩やかなベースライン変動が見られた。一方、3 MeV 以上でみられる信号増大は放射性降下物による低エネルギーでの変動とははっきりと区別することが可能で、12 回のバースト候補のすべてで 5 - 20 MeV 以上の範囲までカウントレート上昇が観測された。信号増大の持続時間は、1 個のピークにつき数分から 10 分程度であった。これは雷雲由来の長持続性バーストとしては典型的な持続時間である。

観測されたバースト候補が雷雲に関連したものであるか調べるため、気象庁の提供する雷情報を利用した。その結果 12 回のバースト候補すべてが、雷雲による雷放電が実際に発生または発生する可能性がある状況で観測されたことが確認された。信号増大の持続時間とエネルギー、そして雷情報との相関から、これらのバースト候補はすべて雷雲由来の長持続性バーストであると結論付けた。

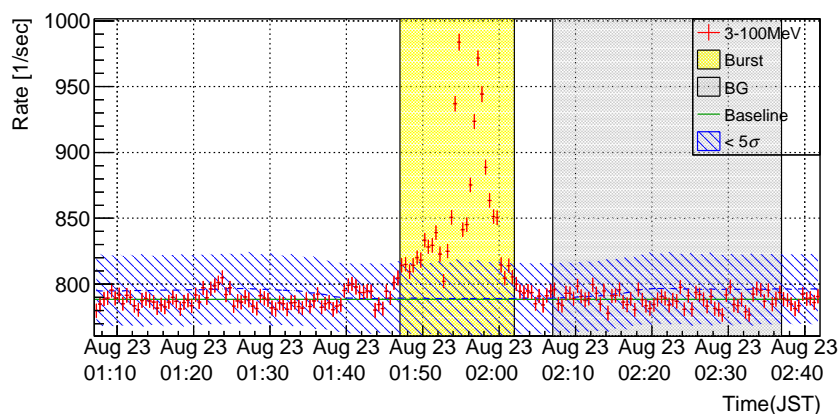


Figure 2: 観測されたバーストの例 : burst20140823-1 における 30 秒カウントレート (3 - 100 MeV) の時間変化、バースト区間と BG 区間、参照区間に対する 5σ 領域、BG 区間の平均カウントレート

乗鞍観測所での測定時、検出器の周囲に大気中の電場の強さを測定するための電場計と雷光を検出するための光検出器を設置した。過去の観測例から、長持続性バーストの終結には緩やかなものと急激なものの 2 種類あると考えられるが、今回の測定ではそれらが連続してとらえられた (Figure 3)。

緩やかなバーストの終結は、電場の値が正の方向に最大で数分かけて上昇するのにあわせてバーストが終結する現象であり、過去の観測例のほとんどはこのケースである。これはバーストを引き起こしている雷雲が検出器上空を通過したことに対応していると考えられる。一方で急激なバーストの終結は、電場が正の方向に 1 秒以内に大きく振れると同時にバーストが終結する現象であり、これまであまり観測されていない珍しいケースである。この終結は放電と関連している可能性が高いと考えられ、実際に光センサーによる雷光の観測と同時に電場の急上昇が観測されていることから、放電によるバースト終結を強く示唆している。

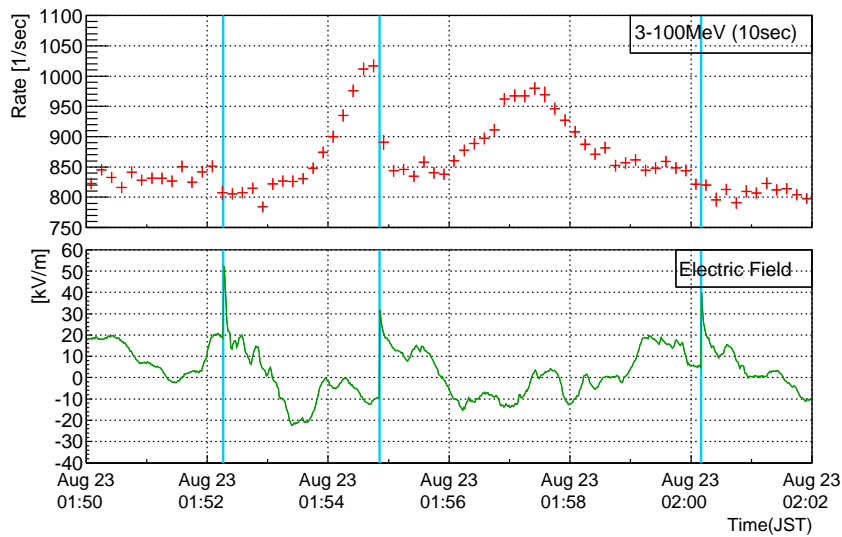


Figure 3: 10 秒ごとのカウントレート (3 - 100 MeV) の時間変化と電場の変化 (burst20140823-1)

検出器で観測されたスペクトルを最もよく再現するような上空の逃走電子ソースのエネルギーと高さを見積もるため、モンテカルロシミュレーションをおこなった。シミュレーションは2段階に分けて行い、まず上空の一定の高さから単色電子を地面に向けて発射した場合の地上到達時における γ 線と電子のエネルギースペクトルを求め、さらにそのスペクトルに基づく γ 線と電子を検出器の上方から発射して検出器の応答を調べた。

乗鞍で観測した12回のバーストの場合、最も可能性の高い逃走電子ソースの高さとエネルギーは、高さ300 - 1700 m、エネルギー35 - 95 MeVとなった。大飯で観測した3回のバーストについておこなった同様のシミュレーション結果と比べると、高さには明らかな違いは見られないものの、逃走電子のエネルギーについては3回のバーストとも16 MeVだった大飯と比べて乗鞍のほうが高いという結果が得られた。一方、得られたシミュレーション結果から上空における逃走電子のフラックスを計算すると、その値は逆に乗鞍のほうが大飯より100倍以上小さくなるのがわかった。

さらに、バーストに含まれる粒子成分についても解析をおこなった。乗鞍で観測された12回のバーストはすべて γ 線が優勢なバーストであり、バースト中に電子の占める割合は最大のもので3割程度だった。一方、大飯の一部のバーストで検出された中性子成分については、乗鞍の12回のバーストからは検出されなかった。