

2021年8月30日首都圏で発生したブルースターターと富士山からの観測

鈴木智幸¹, 鴨川仁¹, 櫻井南海子², 伊東耕二³
1.静岡県立大学, 2.防災科学研究所, 3.所属無

1. はじめに

雷雲上空で発生する放電現象は高高度放電発光現象と呼ばれ, その発生高度, 形状, 成因等の違いにより, エルプス, スプライト, 巨大ジェット, ブルージェット, ブルースターター等がこれまでに発見されている. 我々のグループでは, 富士山山頂からこれらの現象を撮影するため, 2012年から3号庁舎外に高感度モノクロ CCD カメラを複数台設置し, エルプス, スプライト, 巨大ジェットの観測に成功してきた. 2019年からは, 高感度カラーFHD(ハイビジョン)カメラも導入して観測を実施し, 非常に高画質な雷雲と雷放電画像が取得できることを確認している.

2021年の観測では, 初めて2事例のブルースターターのカラー画像が取得された. ブルースターターやブルージェットは, 発達した雷雲のオーバーシュートしたもともと発達した雲頂から直接放出される逆円錐状の細長い青色の放電発光現象である.

今回は, 昨夏の観測と富士山山頂から初めてカラー動画とえられた, 2021年8月30日に埼玉県と群馬県県境付近で発生したブルースターターと関連する雷放電, その親雷雲についての解析結果を報告する.

2. 2021年の観測結果

2020年夏に引き続き, 新型コロナ流行に伴い, 山頂での観測に様々な制約が付くことが予想され, 山頂に行くことができないことも想定されたことから, これまで, 使用していた固定型のカメラシステムの設置を断念し, 山頂班に撮影を依頼することを前提として, 小型の4Kカメラと小型三脚及び小型三脚にソーラーパネル付バッテリーを複数搭載し, 半日以上(地上で12時間までの連続撮影試験を実施済)の連続動画が撮影可能な簡易光学観測システムを構築した(図1). 時刻の特定のため, GPSで時刻同期が可能な時計の時刻表示を定期的に撮影することで, 可能な限り正確な時刻が分かるようにした. このカメラによる観測は, 8/24, 8/27, 8/28に各日約9時間程度実施した. 8/30に機材を撤収したところ, 当日に非常に激しい雷雨が首都圏で起こったことから, 急遽, 富士山山頂からこの原因となった雷雲と雷放電の撮影を山頂班に依頼し, 携帯電話のカメラ(23フレーム/秒)で撮影してもらった. その結果, 多くの雷放電と親雲の観測に加えて, 富士山山頂からは初めてとなる2事例のブルースターターのカラー撮影に成功した(図2).

3. ブルースターターの親雷雲と放電分布



図1 長時間観測が可能な小型4Kカメラシステム

2021/8/30に富士山山頂から撮影されたブルースターターは携帯電話のカメラで撮影され, 正確な発生時刻は, 不明であるものの19:40~1950JSTの間に撮影されたことが分かっている. また, 19:30~1940JSTの間, 東京都内からも多数のブルースターターが観測されており, 富士山山頂で観測されたブルースターターの親雷雲は都内で観測されたブルースターターと同じ親雷雲が発生させたものと考えられることから, この情報を参考に親雷雲と放電分布について, 気象庁レーダー及びLiDEN, 防災科研LMA(Lightning Mapping Array), Blitzortung.orgの落雷位置データを使い, 親雷雲と雷放電の関係を求めた. なお, 我々のグループもBlitzortung.orgに参加しており, 捕捉率を上げるために今期は御殿場, 太郎坊, 旧富士山測候所に雷放電センサを増設している.

4. 解析結果

(1)ブルースターター

富士山から撮影されたブルースターターは2事例であったが, 都内からは10:30~10:40UTCの間に15事例のブルースターターが観測された. ブルースターターの正確な発生時刻と発生方位角はこの情報を使用した. 都内で撮影された動画データは, NTPで5分毎に規正され, 少なくとも1s



図2 2021/8/30 19時台に富士山から観測された雷放電（上）とブルースターターの拡大図（下）。白矢印はブルースターターを示す。

程度の時刻精度を有している。ここでは、10:37:54 (641ms) UTC に発生した、この日最も明るかったブルースターターの事例解析を行った。

(2) ブルースターターを発生させた親雷雲

図3にブルースターターを発生させた時刻の高度2kmのレーダーエコーとその期間のBlitzortung.org落雷分布(左図)及びLiDENの落雷分布(右図)を示す。富士山山頂及び都内から撮影した動画から、ブルースターターは、南側の雷雲エコーによって発生しており、ブルースターターが出現していた期間では、ほとんどの落雷がこのエコー域に集中していた。ここでは、雷雲エコーの発達を図は示さないが、ブルースターターの親雷雲は、発生当初1つのエコーであったものが、その後分裂したスプリッティングストームで、南側のエコーが東進しながらより発達し、ブルースターターを発生させていたことが分かった。なお、北側のエコーについては、東北東進した。落雷極性の解析から、落雷の大部分が負極性落雷であった。両雷位置標定システムを比較すると、エコー域内に落雷が集中している点は同じであるが、LiDENの方が、エコー周辺の落雷をより多く標定していた。次に、この雷雲の落雷の時系列に注目した。

(3) Blitzortung.orgとLiDENによる落雷時系列

図4にブルースターターを発生させた親雷雲のBlitzortung.orgとLiDENによる落雷時系列について示す。この図は、親雷雲がブルースターターを発生させた時刻の前後1時間、かつ親雷雲を含む移動経路内(36.1-36.4N, 138-140.2E)の総数を示している。棒グラフ内の数字は、落雷数を示し、数字の色は棒グラフの色と対応している。なお、LiDENは、総数落雷に加えて、落雷のうち推定電流値の絶対値が大きい(ここでは絶対値10kA以上と設定)事例のみの落雷時系列も示した。

ブルースターターが発生した時間帯に、Blitzortung.orgの落雷数(灰色)はピークを迎えていた(落雷極性及び電流値の推定はされていない)。LiDENの落雷数(赤色)では、ブルースターターの発生に少し遅れてピークを迎える一方で、1120UTC頃にそれよりも大きなピークを持っていた。絶対値10kA以上の落雷数(薄紫色)は、ブルースターターの発生した時間帯にピークを迎えたものの、11:20UTC頃のピークは緩やかであった。両者の比較から、LiDENでは、推定電流値の小さな落雷まで標定しているのに対して、Blitzortung.orgは比較的大きな雷放電を標定していることが示唆された。なお、ブルースターターを発生させたBlitzortung.orgの標定した親雷雲の落雷の捕捉率は、

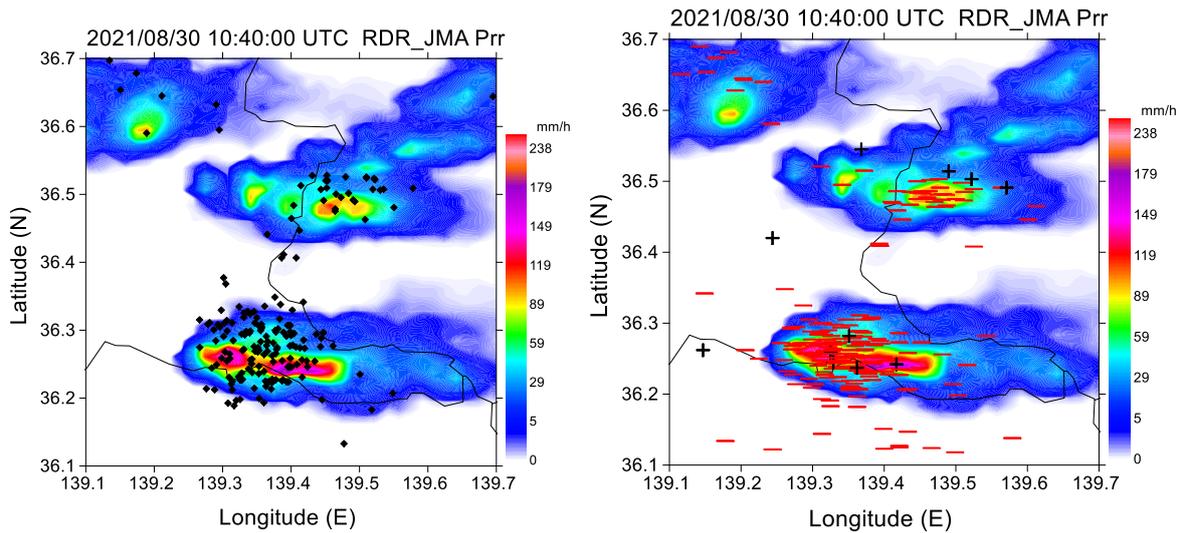


図3 ブルースターターを発生させた親雷雲と落雷分布

Blitzortung.org の落雷分布 (左) と LiDEN の落雷分布 (右). LiDEN の落雷分布のうち赤の「-」は負極性、黒の「+」は正極性落雷を示す.

LiDEN に対して、最大約 8 割, 最小約 1 割程度であった.

(4) ブルースターター, LMA 及びレーダーエコーの対応

図 5 に 10:37:54UTC のブルージェットが発生した時間帯の LMA の放電位置, レーダーエコー, 都内から撮影された画像から求めたブルースターターの位置を重ねたものである. 上図は親雷雲の中心線の北緯 37.245 度に沿ったレーダーエコーの RHI 断面に, 都内で撮影された光学観測から求めた方位角仰角から求めた位置と高度 (鉛直の黒線) を, また, 防災科研の LMA の雷放電位置を緯度・高度断面に投影した図である. LMA 凡例の放電時刻は 10:30UTC からの経過秒で示している. ブルースターター発生時刻と近い放電点は, 時系列順に緑, 赤, 黄丸にしている. 放電路の鉛直分布から, ブルースターターの原因となった電荷は, 高度 10km 以上に位置していた. また, 高度 17km 付近に放電位置が標定されており, ブルースターターの発生位置・時刻と非常に近いことからブルースターターと関連する放電であることが示唆された. エコーの鉛直構造を見ると, 非常にエコー強度の強い領域が高度 10km 以上まで達しており, その下方ではエコー強度の弱い vault 構造が見られた.

下図は, 親雷雲の高度 2km のエコー強度に, ブルースターターの位置を RHI 断面に投影した時の位置と LMA で標定された雷放電位置の水平分布を示している. ブルースターターの水平位置を, 光学観測から求めたブルースターターの方位角 (実線) と RHI 断面 (破線) の緯度との交点に×印で示している. また, 最も高度の高い LMA の放電点標定位置を赤色のひし形で示している. ブルースターターと関連する放電は, エコー強度の非常に強い領域に集中していた. また, 水平構造を見ると西端付近には不明瞭ながらフック状

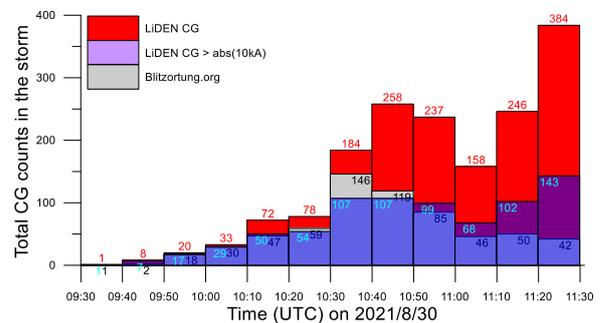


図4 親雷雲が発生させた落雷数の時系列

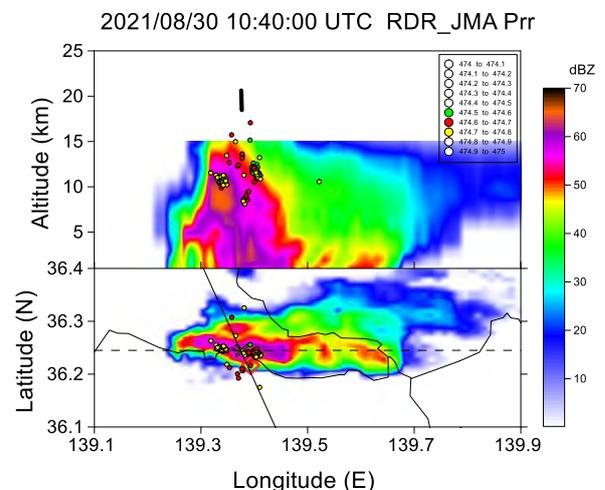


図5 10:30:54UTC に発生したブルースターター, LMA, 親雷雲の鉛直エコー断面 (上図) 及び高度 2km の水平エコー分布 (下図)

の構造が見られた. エコーの水平及び鉛直構造から, この雷雲エコーはスーパーセルに見られる構造を持っていた.

なお、ブルースターター的位置を RHI の投影位置と対応するように表示したが、LMA で最も高い高度に標定された放電点の位置にブルースターターが発生したとすると、ブルースターターの水平位置は、エコーの南端の赤色のひし形付近に移動することになる。

5. まとめ

2021 年の富士山からの高高度放電発光現象の観測及び解析結果から下記のことが明らかとなった。

- (1) 富士山からの光学観測
 - 2 事例のブルースターターのカラー動画観測に成功した。
- (2) ブルースターターの親雷雲
 - ・ スプリッティングストーム(分裂する雷雲)であった。
 - ・ ブルースターターの親雷雲は、分裂後、より発達した南側の雷雲であった。
 - ・ Vault やフックエコーの存在から、親雷雲エコーはスーパーセルに見られる特徴を有していた。
- (3) ブルースターターと関連する放電
 - ・ LMA により、ブルースターターと関連する放電と示唆される放電がブルースターターの発生方位角の雲頂付近に標定された。
- (4) Blitzortung.org と LiDEN の比較
 - ・ Blitzortung.org の捕捉率は、特定の雷雲に関して、LiDEN の標定した全落雷との比較で、最大 8 割、最小 1 割程度であった。
 - ・ LiDEN の $\pm 10\text{kA}$ 以上もしくは以下の推定電流値を持つ事例に限って言えば、Blitzortung.org と LiDEN は、ほぼ同程度の捕捉率であった。
 - ・ 両落雷位置標定システムの比較(4)(5)から、両システムの相対的な標定特性の一端が明らかとなった。

謝辞

ブルースターターの動画は、NPO 法人「富士山測候所を活用する会」山頂班 岩崎洋班長から提供を受けました。落雷位置データは Blitzortung.org から提供を受けました。レーダーエコー等のデータは、気象研究コンソーシアムより提供を受けました。本研究は JSPS 科研費 20H02419「富士山頂高度を活用した落雷減災のための多角的雷研究」の助成を受けました。また、NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれました。ここに、関係者の皆様に深謝いたします。