

スプライトストリーマと不均一ヘイローの関係

三宮 佑介^{1*}, 高橋 幸弘¹, 佐藤 光輝¹, 工藤 剛史¹, 小林 縫¹, 山田 大志¹,
島 侑奈¹, NHK 宇宙の渚², H. Stenbaek-Nielsen³, M. McHarg⁴, R. Haaland⁵,
T. Kanmmae³, S. Cummer⁶, Y. Yair⁷, W. Lyons⁸

1. 北海道大学, 2. NHK 宇宙の渚プロジェクト 3. *Geophysical Institute (GI),
Univ. of Alaska, Fairbanks*, 4. *US Air Force Academy*, 5. *Fort Lewis College*,
6. *Duke University*, 7. *Open University of Israel*, 8. *FMA Research*

1. はじめに

雷雲地上間放電に伴う高高度放電発光現象は成層圏, 中間圏, 熱圏下部で発生し, その中で最も主要な現象の一つに挙げられるのがスプライトである. スプライトは主に正極性の雷雲地上間放電(+CG)に伴い, +CG 開始後数 ms から 100 ms 後に発生し, その発光継続時間は 10 から 100 ms であることが明らかにされている. またスプライトは発光の際にストリーマ放電による微細構造を持つ事も明らかにされている. そのストリーマ放電に先行して, しばしばスプライトヘイローと呼ばれるぼんやりとした発光がある. スプライトヘイローの内部には不均一構造が確認されており, スプライトヘイローの下部から発生するスプライトストリーマとの関係が指摘されている. そこで本研究では, 先行するスプライトヘイローとそれに続くスプライトストリーマの関係を調べ, ストリーマの発生条件やメカニズム解明を明らかにする事を目的としている. 今回は, NHK「宇宙の渚」プロジェクトのために実施された観測キャンペーン中に航空機から観測されたハイスピードカメラによる観測画像を用いて, スプライトヘイローからスプライトストリーマへの進展速度を計算した.

2. 観測・解析概要

北海道大学のグループは NHK, アラスカ大学フェアバンクス校, デューク大学, アメリカ空軍アカデミーなどと協力し, 2011年6月26日から2011年7月11日までアメリカコロラド州においてスプライト航空機観測キャンペーンを実施した. このキャンペーンは, 世界で初めてスプライトを航空機 2 機からハイスピードカメラにより同時に観測する事に成功した. NHK チームが搭乗する航空機には, PhantomV710 ハイスピードカメラと EMCCD カメラを, アラスカ大チームが搭乗する航空機には, PhantomV7.1 ハイスピードカメラとビデオフレームレートのパンクロマチック CCD カメラ(Watec WAT-902 ULTIMATE)をそれぞれ搭乗した. ハイスピードカメラのフレームレートは共に 8,000 から 10,000 fps である. 本キャンペーンで航空機のハイスピードカメラによって同時観測されたスプライトは 28 イベントであり, どちらか一方のハイスピードカメラのみ観測されたイベントを合わせると 60 イベントを越えるスプライトを観測出来た. 観測されたイベントの内, PhantomV710 で

観測された 2011 年 7 月 5 日 08:50:50UT に観測されたイベントについて、スプライトヘイローとスプライトストリーマの進展速度を、1 フレーム毎に進展位置を記録し計算した。

3. 結果

2011 年 7 月 5 日 08:50:50UT に観測されたイベントの親雷放電の位置は北緯 44.8232 度、西経 96.4024 度、航空機の位置は北緯 46.7444 度、西経 96.5138 度、ピーク電流値は 102 kA、であった。このイベントについて、図 1 に発光開始から 4 ms を積分した画像を示す。図 1 の①と②はそれぞれ今回、進展速度を計算したスプライトヘイロー、スプライトストリーマに関するカラムを示している。図 1 中の黄破線はストリーマが進展した水平スケールを表している。図 2a はスプライトヘイローの不均一構造を、図 2b はそれに続くスプライトストリーマとカラムを示した。図 2a のスプライトヘイローの周囲より明るい部分の分布が図 2b のカラムの分布と一致しているように見える。

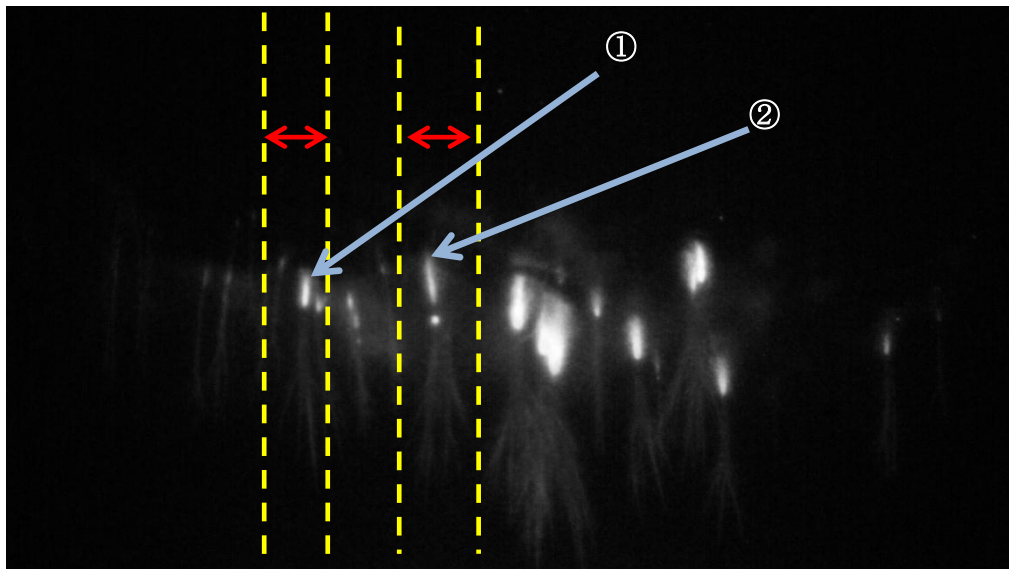


図 1. 発光開始から 4 ms を積分した画像

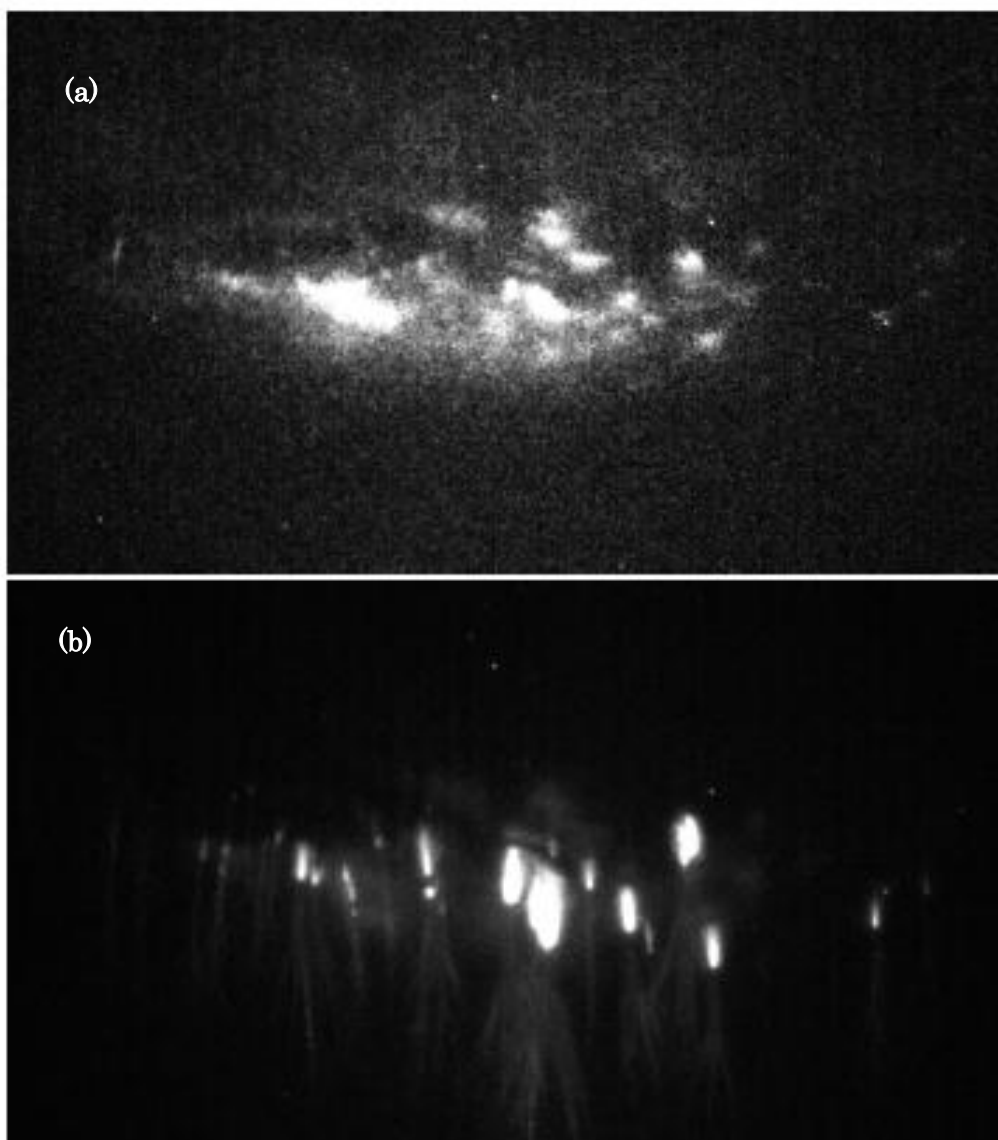


図 2. (a) スプライトヘイローの不均一構造, (b) スプライトストリーマとカラムの水平分布

3-1. 図 1 の①の部分について

続いて観測されたスプライトのハイスピード画像から進展位置を 1 フレーム毎に記録し, 求めた進展速度について示す. 図 3 は, 図 1 に示した①の部分について記録した進展の位置をプロットしたものである. スプライトストリーマが進展するにつれ 3 度分岐しており, その分岐点を分岐 a, 分岐 b, 分岐 c とした.

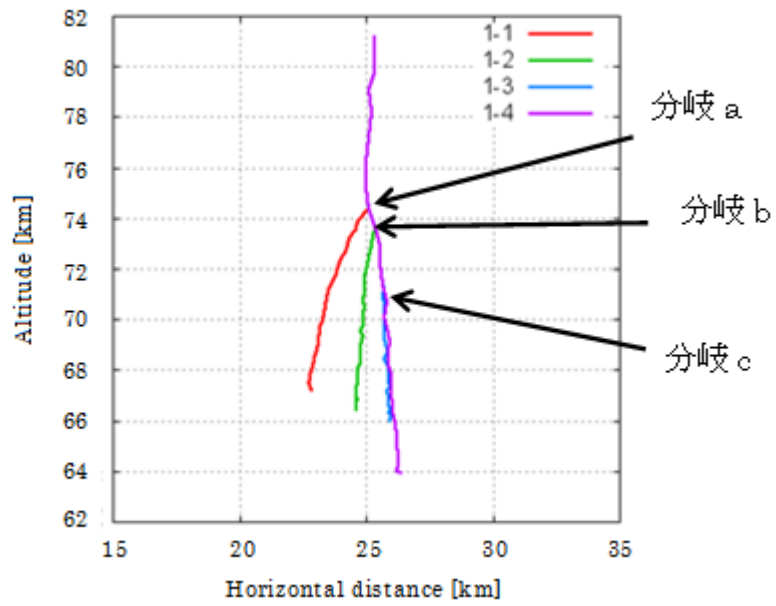
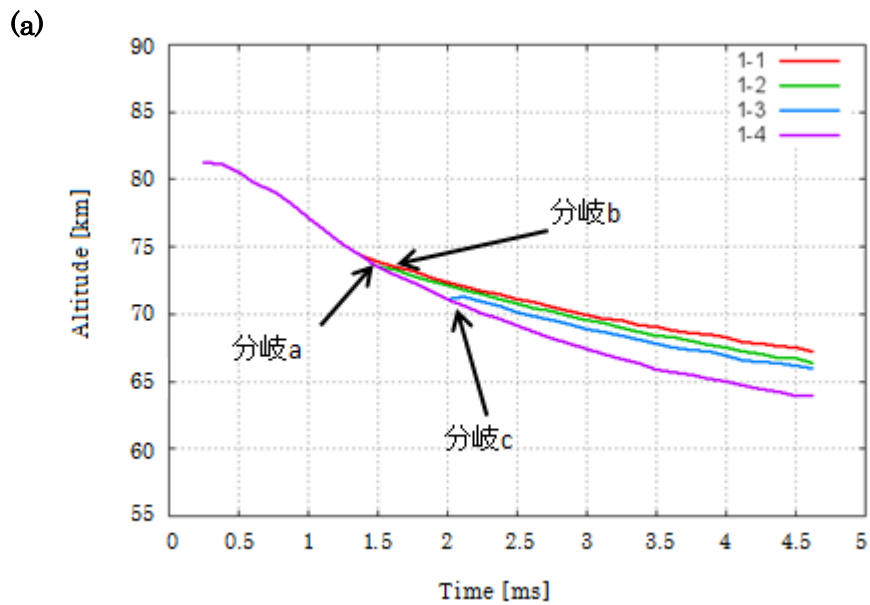


図 3. 図 1 の①の部分についてスプライトストリーマの進展位置のプロット

図 4(a)は進展位置の時間変化を示しており，横軸が時間，縦軸が高度である．また，図 4(b)は鉛直方向の進展速度を示しており，横軸が時間，縦軸が速度である．それぞれの線の色と分岐点は図 3 と対応している．(※時間は親雷放電発生時ではなく，任意)



(b)

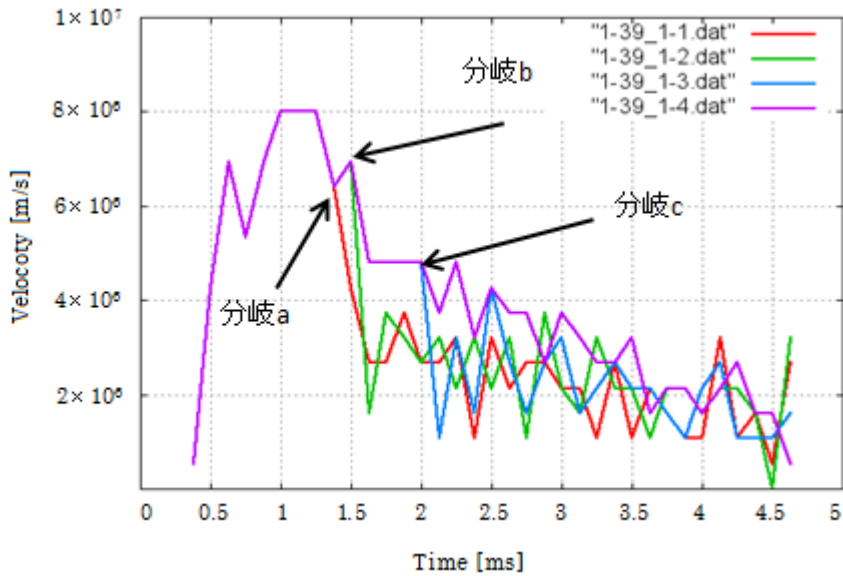


図 4. (a) 進展位置の時間変化, (b) 鉛直方向の速度

スプライトヘイローからスプライトストリーマまで継続して鉛直方向の速度を計算してみると、図 4(b)のような速度変化が見られた。スプライトヘイローの下部からスプライトストリーマが進展し始めたのは、およそ 0.8 ms 辺りであった。また、ピーク速度は 8.0×10^6 m/s であり、その後は指数関数的に速度が減少していくように見える。

3-2. 図 1 の②の部分について

図 5 は、図 1 に示した②の部分について記録した進展の位置をプロットしたものである。スプライトストリーマが進展するにつれ 5 度分岐しており、その分岐点を分岐 d、分岐 e、分岐 f、分岐 g、分岐 h とした。図 6(a) は進展位置の時間変化を示しており、横軸が時間、縦軸が高度である。また、図 6(b) は鉛直方向の進展速度を示しており、横軸が時間、縦軸が速度である。それぞれの線の色と分岐点は図 5 と対応している。(※時間は親雷放電発生時ではなく、任意)

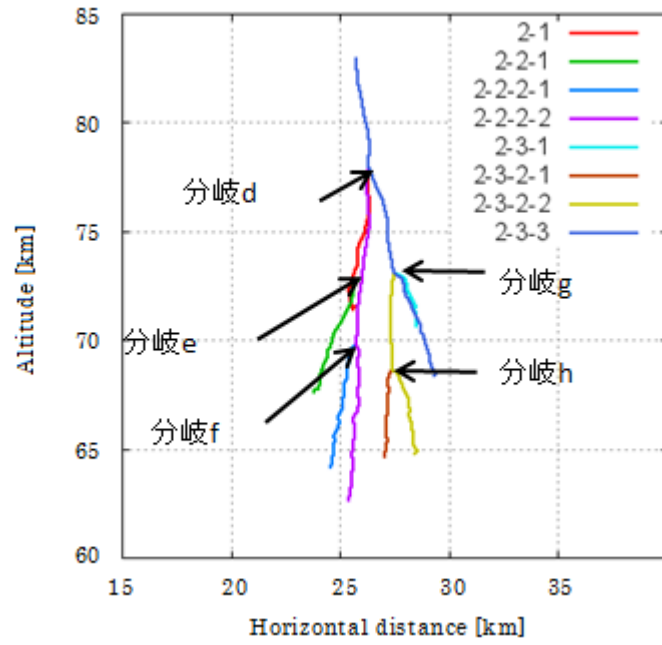
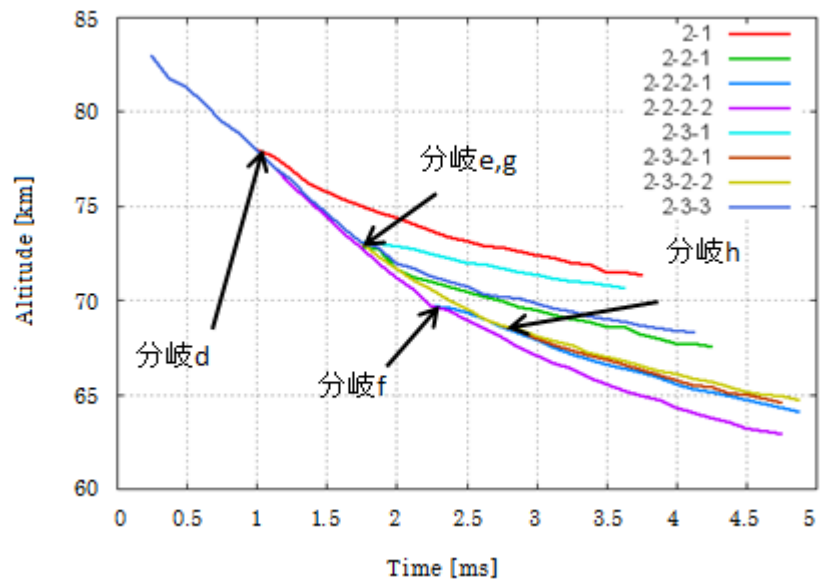


図 5. 図 1 の②の部分についてスプライトストリーマの進展位置のプロット

(a)



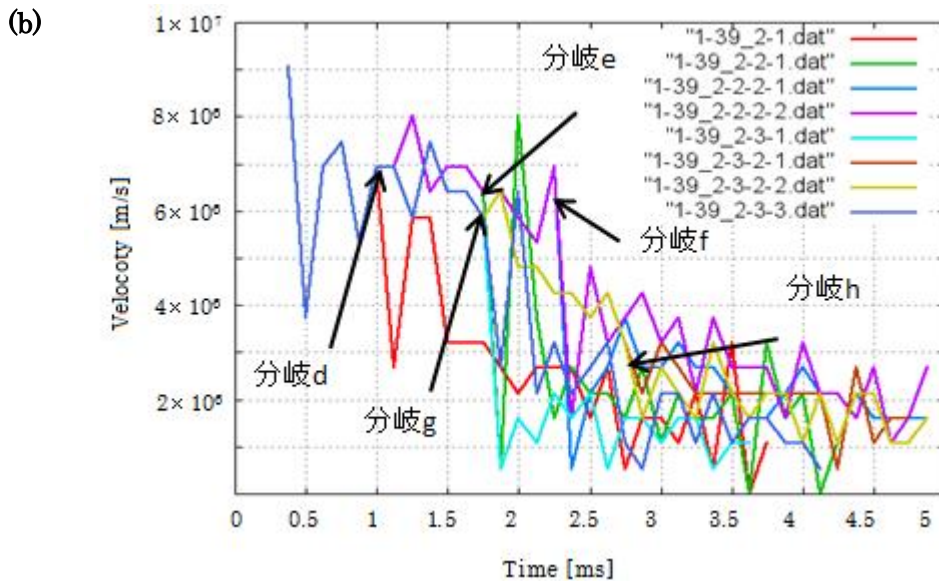


図 6. (a) 進展位置の時間変化, (b) 鉛直方向の速度

②についても①と同様にスプライトストリーマの鉛直進展速度を計算した。ストリーマが進展し始めたのは、およそ 0.6 ms 辺りであった。また①の速度ピークのタイミングとは違い、②の速度ピークは記録し始めの $9.1 \times 10^6 \text{ km}$ であった。速度の減少は①と同様に指数関数的である。

4. まとめ

本研究では、2011年6月26日から2011年7月11日までの間にNHK「宇宙の渚」プロジェクトの観測キャンペーンで、航空機により撮影された光学データをもとにスプライトヘイローとスプライトストリーマの進展速度を計算した。今回のスプライト観測キャンペーンでは28イベントのスプライトを2機の航空機から同時にハイスピードカメラで観測し、どちらか一方のハイスピードカメラで観測できたイベントを含めると、60イベントを越える。

今回は観測された2011年7月5日08:50:50UTのイベント中の2か所のスプライトヘイローの不均一部分に注目し、スプライトヘイローとスプライトストリーマの関係を調べるための初期解析として、進展速度を継続して求めた。同じイベント中で進展速度を比較した結果、ピーク速度は異なり、また速度が減少していく様子はどちらも指数関数的であることがわかった。

今後はさらにイベント数を増やし、イベント毎の速度変化の特徴を調べる必要がある。さらに光量の度数分布や、二次元FFT法を用いることによって、より詳細なスプライトヘイローの不均一構造を捉え、スプライトストリーマ発生との関係を明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] Luque, A and U. Ebert, Emergence of sprite streamers from screening-ionization waves in the lower ionosphere, *Nature Geoscience*, PP757-760, October 2009, DOI:10.1038/NGEO0662.
- [2] Stenbaek-Nielsen, H. C., M. G. McHarg, High time-resolution sprite imaging: Observations and implications, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 41, pp234009
- [3] Moudry, D., Stenbaek-Nielsen, H. C., Sentman, D., and Wescott, E., Imaging of elves, halos and sprite initiation at 1ms time resolution, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 65 (2003) 509-518, DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00323-1