

航空機観測によるスプライトストリーマの立体構造の解明

小林縫¹, 佐藤光輝¹, 高橋幸弘¹, 山田大志¹, 工藤剛史¹, 三宮佑介¹, 柳芳紀¹, 井上智広²,

NHK 宇宙の渚プロジェクト², H. Stenbaek-Nielsen³, M. McHarg⁴, R. Haaland⁵,

T. Kammae³, S. Cummer⁶, Y. Yair⁷, W. Lyons⁸, J. Ahrns³

1; 北海道大学, 2; NHK, 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

スプライトと呼ばれる成層圏、中間圏、熱圏下部(40-90 km)で発生する高高度放電発光現象は、1989年の発見以来世界中で観測が行われてきた。この現象は、主に正極性の雷雲地上間放電(+CG)によって、+CG開始後数msから100ms後に雷雲上空に発生し、その発光継続時間は10-100msであることが明らかになっている。また、これまでに行われた地上光学観測により、スプライトは発光の際にストリーマ放電による微細な構造をもつことも明らかにされている。しかし、その時間的・空間的発展や発生条件については未解明な部分が多く、それらに深く関わるスプライトの水平空間分布や、スプライトストリーマの立体構造も未だに明らかになっていない。特に、スプライトストリーマの立体構造が明らかになっていない理由として、地上からの多地点同時光学観測の実施が困難であること、地上光学観測では大気の大気散乱・吸収の効果でスプライトの微細構造が明瞭でないこと、さらにスプライトストリーマの立体的な時間・空間発展を明らかにするにはハイスピードカメラによる同時観測が必要となることが挙げられる。そこで本研究の目的は、スプライトの発生条件がどのように決まっているかを最終的に明らかにするため、航空機からのハイスピードカメラ観測データを用いて、スプライトの水平空間分布を特定することと、スプライトストリーマの時間的・空間的発展の物理機構を明らかにするためにストリーマの立体構造を特定すること、以上の2つである。

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年夏季に北米コロラド州にてスプライト航空機観測キャンペーンを実施した。観測にはハイスピードカメラを用い、世界で初めて航空機2機からの同時観測を行った。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

それぞれ搭載した。ハイスピードカメラのフレームレートは共に 8000-10000 fps である。本キャンペーンでは、合計 28 イベントのスプライトが 2 機の航空機のハイスピードカメラによって同時観測された。その内、2 イベントについて三角測量を行い、水平空間分布を特定した。さらに、1 イベントについて複数の上向きストリーマをもつスプライトストリーマについて三角測量を行い、立体構造を特定した。

3. 結果と考察

水平空間分布

2011 年 7 月 3 日 05:20:49UT に観測されたイベントについての水平空間分布を図 1 に示す。図 1(a)は NHK のハイスピードカメラ画像のうち、スプライト開始から終了までの全フレームを足し合わせた積分画像である。このイベントではカラム型およびキャロット型スプライトがハイスピードカメラ画像の中央に映っており、広角の EMCCD カメラ画像データからもスプライト全体像がとらえられていると確認された。この図中の、a-f のカラム型およびキャロット型スプライトの位置を求めた。a, b, d についてはカラムの下端の、c, e, f については赤点部分の緯度・経度を求めプロットしたものが図 1(b)である。図 1(b)は縦軸に緯度、横軸に経度をとっており、“+”はカラムとキャロットの位置を示している。“+”に記されたアルファベットは左図と対応している。“★”は親雷放電の位置を、矢印はカメラの視野方向を示す。このうち e のみキャロット型のスプライトである。図 1(b)より、計 6 つのカラムとキャロットが水平方向に約 60 km の広がりを持ち、親雷放電の落雷位置に対し北西側半分に偏って分布していることがわかる。また、e のキャロットはその他のカラムより落雷位置から離れたところに分布している。一方、カラム a,b,c とカラム d,f はそれぞれ親雷放電からほぼ等距離に分布していることが判明した。

一方、2011 年 7 月 5 日 08:54:13UT に観測されたスプライトに対し、水平空間分布を推定した結果を図 2 に示す。図 2(a)は NHK の EMCCD カメラにより取得された画像のスプライトが映っている部分を切り出した図である。このイベントでは複数のカラム型スプライトが EMCCD 画像の中央に映っており、EMCCD カメラの視野角は十分に広いため、図 2(a)にはこのとき発生したスプライトの全体像がとらえられていることが確認できる。この図中の、a-h のカラム・キャロットの下端の緯度・経度を求めプロットしたものが図 2(b)である。図 1 と同様、縦軸に緯度、横軸に経度をとっており、“+”はカラムの位置を示している。“+”に記されたアルファベットは左図と対応している。“★”は親雷放電の位置を、矢印はカメラの視野方向を示す。図 2(b)より、8 本のカラムが水平方向に約 80 km の広がりを持ち、親雷放電の落雷位置に対し南西半分に偏って分布していることがわかる。また、図 2(a)には映っているがもう一方の航空機に搭載されたカメラによって取得された画像に映っていなかったために今回解析を行えなかったカラムが存在するが、解析を行ったカラムとの位置関係からすべて親雷放電の落雷位置に対し

南西方向に分布していることがわかる。以上より、両イベントでカラム・キャロットが親雷放電の落雷位置に対し偏って分布していることがわかった。このことから、スプライトの発生には親雷放電に対して対称に生じる準静電場の他に、非対称性を生じさせる条件が効いていることが示唆される。

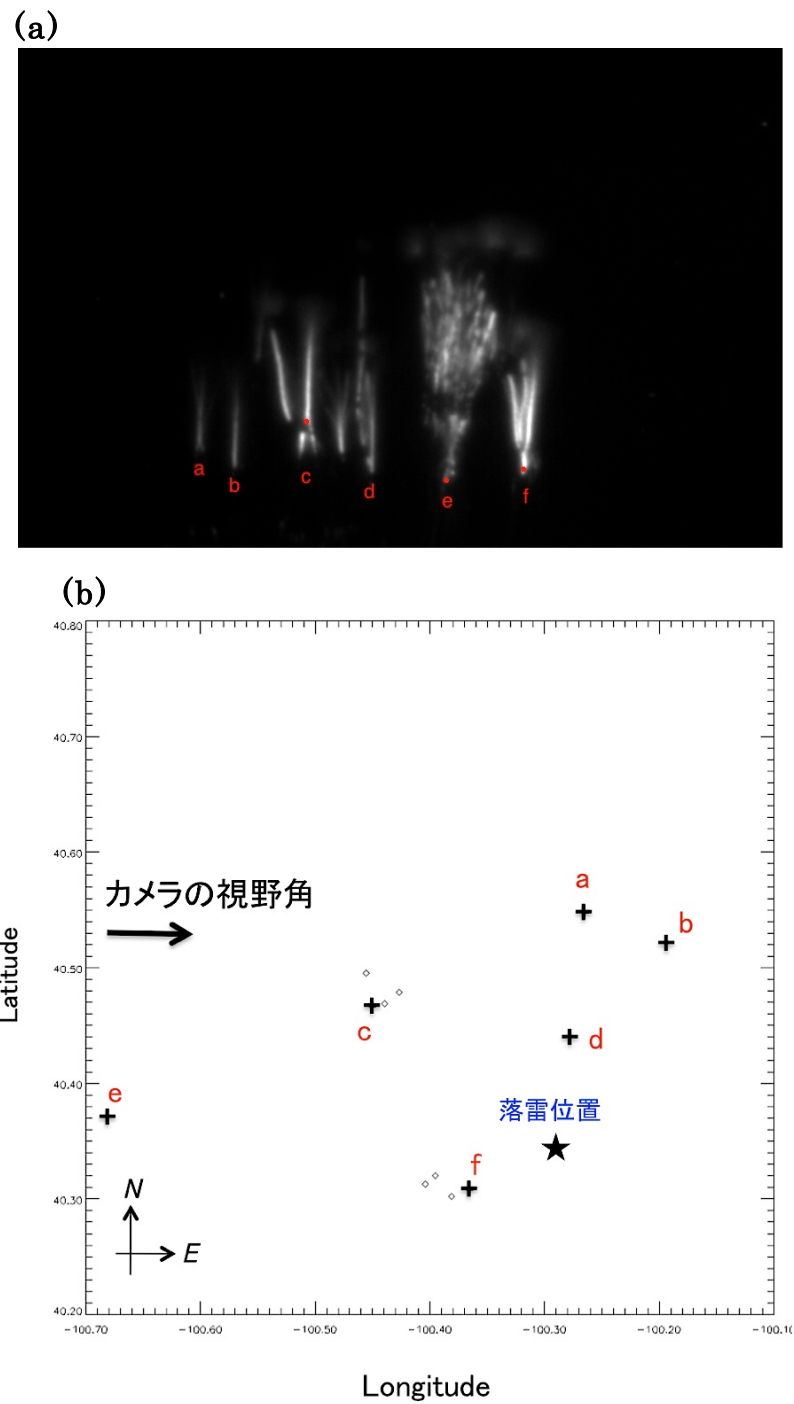
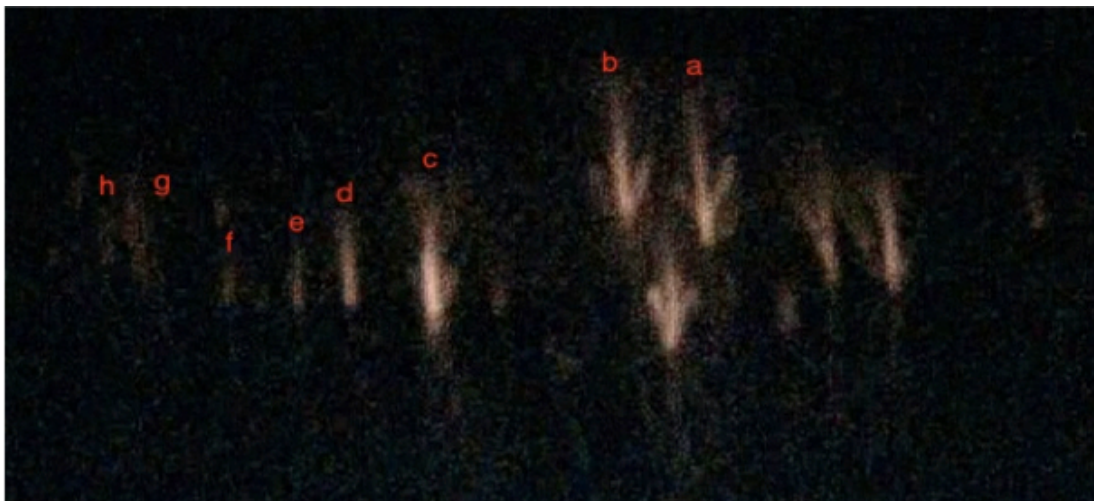


図1 2011年7月3日 05:20:49UTに観測されたスプライトの水平空間分布。(a)ハイスピード積分画像。(b)スプライトの水平空間分布。

(a)



(b)

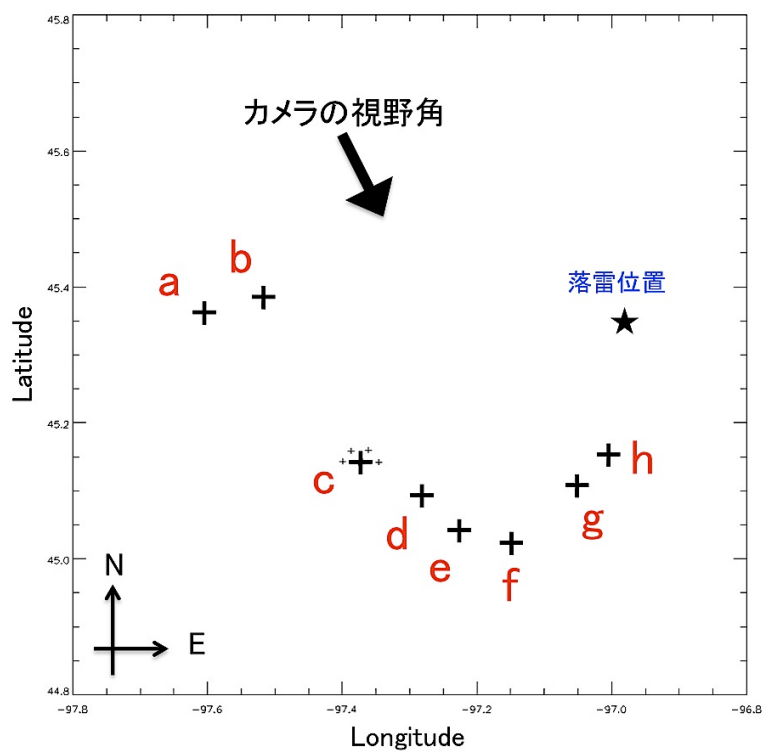


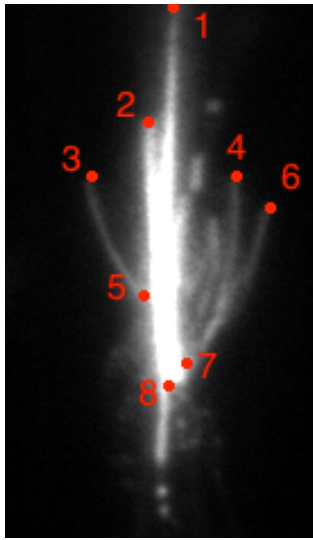
図2 2011年7月5日 08:54:13UTに観測されたスプライトの水平空間分布。(a)は、EMCCD画像で、(b)はスプライトの水平空間分布を示す。

スプライトストリーマの立体構造

図 2 のカラム c について、立体構造を求めた。図 3(a)は、NHK のハイスピードカメラによって取得されたカラム c の画像を、発光開始から終了まで全フレームを積分した画像である。図 3(a)に赤点で示したカラムの各部分の緯度・経度・高度をそれぞれ求め、それを元にカラムの立体構造、ストリーマの進展速度と太さなどを求めた。カラム c は次のような時間空間発展をする。まず点 1 で発光し、その発光が点 8 に向かって下向きに進展する。これを下向きストリーマと呼ぶ。点 1 から点 8 へ数 ms の間棒状に発光が進展した後、下向きストリーマの下部から数本のストリーマが上向きに進展する。これを上向きストリーマと呼ぶ。今回は、上向きストリーマの上端として点 2,3,4,6 の位置を求めた。また点 3 の上向きストリーマの起点として点 5、点 6 の起点として点 7 の位置を求めた。この結果、下向きストリーマの上端高度は 81 km、下端の高度は 71 km、太さは 0.7 km、進展速度は 4.7×10^6 m/s となった。また、上向きストリーマの下端の高度は 72-73 km、上端の高度は 76-78 km、太さは 0.3 km、進展速度は 5.5×10^6 - 5.6×10^6 m/s となった。ストリーマの進展速度は上下ともにこれまでの観測やモデルと一致する [Cummer et al., 2006; Ute and Luque., 2009]。

さらに、カラムの各部分の緯度・経度・高度をプロットし、スプライトストリーマの立体構造を再現したのが図 3(b)である。(b)の番号は(a)と対応している。図 3(b)は縦軸に高度、水平面に緯度・経度をとっている。また、図 3(b)を緯度・経度の平面にプロットしたものを図 4 に示す。図 4 は縦軸に緯度、横軸に経度をとっている。図 4 から、上向きストリーマは下向きストリーマを中心に放射状に進展していることがわかる。進展方向の水平距離は 4 本ともほぼ等しく約 2.5 km である。また、今回解析を行った上向きストリーマはすべて北半分に進展している。この方向はカラムに対する親雷放電の位置と一致している。このことから、落雷位置に近い程親雷放電による準静電場が強いために上向きストリーマが発生しているのではないかということが推測される。しかし、上向きストリーマの進展している方向はカメラの視線方向とも一致していることから、カメラに対して奥側に位置するストリーマは手前側に位置するストリーマと重複して観測された可能性もあり、より詳細な立体構造解析を今後進める方針である。

(a)



(b)

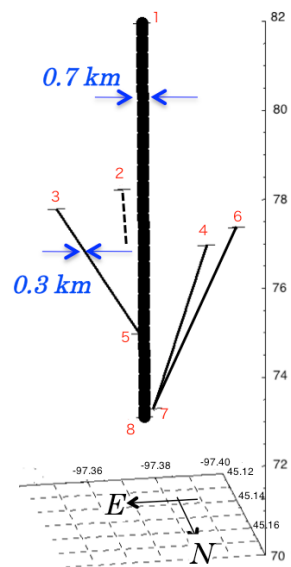


図 3 スプライトストリーマの立体構造。(a)はハイスピード積分画像(b)三角測量によって求めたストリーマの各部位の緯度経度高度をプロットした図。(a)と(b)に振られた番号は各部位の対応を示している。

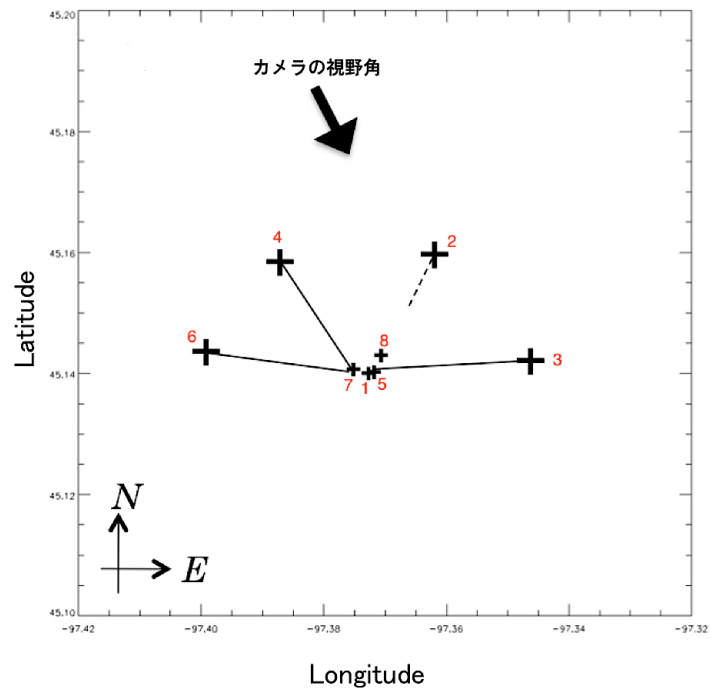


図 4 スプライトストリーマの平面図。図 3 を上から見た図でスプライトストリーマの水平構造を示している。各番号は図 3(a)(b)と対応している。

4. まとめ

本研究では、夏季北米でのスプライト航空機観測で撮影された光学データをもとに、スプライトストリーマの微細構造と水平空間分布について解析を行った。

2011 年の夏季米国のコロラド州で実施したキャンペーンでは、合計 28 イベントのスプライトが 2 機の航空機の高スピードカメラによって同時観測された。その内、2 イベントについて三角測量を行い、水平空間分布を特定した。その結果、スプライトは、水平方向に 60-80 km の広がりをもって分布し、親雷放電からの距離は最高で 40 km 以上になる事が分かった。また、分布は親雷の落雷位置に対して対称にはならず、ある方向に偏在している事が明らかになった。この結果から、スプライトの発生には、親雷放電に対して対称に生じる準静電場の他に、非対称性を生じさせる条件が効いていることが示唆される。

さらに、1 イベントについて複数の上向きストリーマをもつスプライトストリーマについて三角測量を行い、立体構造を特定した。上向きストリーマは下向きストリーマを中心に放射状に進展しており、それらの下端の高度は 72-73 km、上端の高度は 76-78 km、太さは 0.3 km、進展速度は 5.5×10^6 - 5.6×10^6 m/s であった。また、下向きストリーマの上端高度は 81 km、下端の高度は 71 km、太さは 0.7 km、進展速度は 4.7×10^6 m/s であった。ストリーマの進展速度は上向き・下向きともにこれまでの観測やモデルと一致する。スプライトストリーマの物理機構を解明するためには、今回得られたストリーマ構造の各高度と、イベントを発生させた親雷放電によって生じる準静電場、放射電磁界電場の時間変化を高度ごとに比較してみる必要があると考えられる。

参考文献

- Cummer, S. A., N. Jaugey, J. Li, W. A. Lyons, T. E. Nelson, and E. A. Gerken (2006), Submillisecond imaging of sprite development and structure, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04104, doi:10.1029/2005GL024969.
- McHarg, M. G., H. C. Stenbaek-Nielsen, and T. Kammae (2007), Observations of streamer formation in sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06804, doi:10.1029/2006GL027854.
- Moudry, D. R., H. C. Stenbaek-Nielsen, D. D. Sentman, and E. M. Wescott (2003), Imaging of elves, halos and sprite initiation at 1 ms time resolution, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 509–518.
- Luque, A., and U. Ebert (2009), Emergence of sprite streamers from screening-ionization waves in the lower ionosphere, *Nat. Geosci.*, 2, 757–760, doi:10.1038/NGE0662.