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, 工藤剛史 1, 三宮佑介 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 100 ms 後に雷雲上空に発生し、その発光継続時間は 10-100 ms 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・空間的発展を明らかにすること、以上の 2 つである。

## 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 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、カラム型スプライト 8 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本1本のカラムについて、親雷放電からの距離と発生高度の関係を調 べた。

## 3. 結果と考察

観測されたカラム型スプライトには、①Diffuseな不均一ヘイローを伴うタイプ、ヘイローを伴わないタイプ と、②明瞭な不均一ヘイローを伴うタイプが存在する事が分かった。解析を行ったイベントの内 2イベント が前者、6イベントが後者に分類される。 i. Diffuseな不均一ヘイローを伴うタイプ、ヘイローを伴わないタイプ

2011年7月3日 5:20:49 UT と7月5日 8:54:13 UT に発生したイベント(Fig.1(a), Fig.2(a))について 解析を行った。前者のイベントについて、Fig.1(b)は(a)のカラム e についての時間発展を示している。こ こで、最初に下方伝搬している粒状の発光をストリーマヘッド、その後の棒状の発光の下端の高度をカラム の下端高度とする。Fig.1(c)は、スプライトカラムの水平分布を示している。また、Fig.1(d)は、それぞれの カラムについて、親雷放電からの距離と縦軸にカラムの下端高度の関係を示している。この図から、親雷放 電からの距離が大きくなるにつれて、カラムの下端高度が上がっていっていることがわかる。さらに、 Fig.1(e)は、親雷放電からの距離とストリーマヘッドの進展速度の関係を示したものである。この図から、 親雷放電からの距離が大きくなるにつれて、ストリーマヘッドの進展速度が小さくなっているのがわかる。 後者のイベントについても、Fig.2(b)-(d)から同様の傾向が見られる。これらの結果は、親雷放電が生起する 準静電場の水平方向の強度分布によって引き起こされたと考えられる。



Fig.1 (a) 2011年7月3日 5:20:49 UT に観測されたイベント。(b)カラム e についてFig.1(a)に示される短冊状ピ クセル空間を抜き出し、時系列順に並べた図。 (c) スプライトの水平空間分布。×がカラムの位置を示しており、 それぞれのアルファベットは(a)に対応している。★は親雷放電の位置を示している。(d) 親雷放電からの距離に対 するカラム下端高度。(e) 親雷放電からの距離に対するストリーマヘッドの進展速度。



Fig.2 (a) 2011年7月5日 8:54:13 UT に観測されたイベント (b) スプライトの水平空間分布。×がカラムの位置を 示しており、それぞれのアルファベットは(a)に対応している。このイベントでは、2つのCGが200 ms の間隔で 連続して発生しており、1回目のCGでカラム g, h, i が、2回目のCGでカラム a – f が発生した。★は親雷放電の 位置を示している。(c) 親雷放電からの距離に対するカラムの下端高度。(d) 親雷放電からの距離に対するストリ ーマヘッドの進展速度。

## ii. 明瞭な不均一ヘイローを伴うタイプ

2011年7月3日 3:58:02 UT,7月3日4:03:16 UT,7月5日 6:38:42 UT,7月5日 8:50:50 UT,7月11日 4:25:28 UT,7月11日 6:09:56 UT に発生したイベントについて解析を行った。このうち、2011年7月3日 3:58:02 UT のイベントについて示した図がFig.3 である。Fig.3の(b)はスプライトカラムの水平分布を、(c) は親雷放電からの距離と縦軸にカラムの下端高度の関係を、(d)は親雷放電からの距離とストリーマヘッド の進展速度の関係を示している。Fig.3 (c),(d)からは、i. Diffuseな不均一ヘイローを伴うタイプ、ヘイロー を伴わないタイプで見られたような親雷放電からの距離と下端高度、進展速度との関係性は見られなかった。 また、7月11日 4:25:28 UT のイベントについて示した図がFig.4 である。Fig.4についても、(b)はスプライ トカラムの水平分布を、(c)は親雷放電からの距離と縦軸にカラムの下端高度の関係を、(d)は親雷放電から の距離とストリーマヘッドの進展速度の関係を示している。Fig.4 (c)には、i. Diffuseな不均一ヘイローを伴 うタイプ、ヘイローを伴わないタイプで見られたような親雷放電からの距離と下端高度の関係が見られた。 一方で、親雷放電からの距離と進展速度との関係性は見られなかった。全体として、親雷放電からの距離と 下端高度の関係は、6イベント中3イベントで見られたが、親雷放電からの距離と進展速度との関係性は見ら れなかった。



Fig.3 (a) 2011年7月3日 3:58:02 UT に観測されたイベント (b) スプライトの水平分布。×がカラムの位置を示し ており、それぞれのアルファベットは(a)に対応している。 (c) 親雷放電からの距離 vs カラムの下端高度。(d) 親 雷放電からの距離 vs ストリーマヘッドの進展速度。



Fig.4 (a) 7月11日 4:25:28 UT に観測されたイベント (b) スプライトの水平分布。×がカラムの位置を示しており、それぞれのアルファベットは(a)に対応している。(c) 親雷放電からの距離 vs カラムの下端高度。(d) 親雷放電からの距離 vs ストリーマヘッドの進展速度。



Fig.4 500 C・km の CG によって引き起こされる電場の時間変化をシミュレーションによって示した図。 [*Qin et al.*, 2011]



Fig.5 落雷が発生したポイントと電荷が解消された位置にズレが生じている場合のイメージ図

明瞭な不均一ヘイローを伴うイベントで、雷放電からの距離と下端高度、進展速度の間に関係性が見られな い要因のひとつとして、ヘイロー発生に関係する電子密度の急激な増加による準静電場の緩和が考えられる。 Fig. 4は、CGによって引き起こされる電場の時間変化をシミュレーションによって示した図である。この図 より、高度82-86 kmのヘイロー領域では、他の高度に比べて電場の緩和が急激に進むことがわかる。つま り、不均一ヘイロー内の濃い部分と薄い部分では電場の緩和され方が異なり、ローカルな電場に揺らぎが生 じている可能性がある。また、電荷は雷雲内に広がって分布しているため、実際に落雷が発生したポイント と電荷が解消された位置にズレが生じているという可能性も考えられる(Fig.5)。その場合、それぞれのカラ ムについて落雷位置からの距離ではなく、電荷が解消された位置からの距離と下端高度、進展速度の間に関 係性が見られるかもしれない。

5. 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、スプリイトストリーマの空間分布を求めた。

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 機の航空機のハイスピードカメラによって同時観測された。その内、カラム型スプライトが発生した8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。観測されたカラム型スプライトには、①Diffuseな不均一へイローを伴うタイプ、ヘイローを伴わないタイプと、②明瞭な不均一へイローを伴うタイプが存在する事が分かった。解析を行ったイベントの内 2イベントが前者、6イベントが後者に分類される。

①diffuseな不均一ヘイローを伴うタイプ、ヘイローを伴わないイベントでは、親雷放電からの距離が大きくなるにつれて、カラムの下端高度が上がっていくという関係が見られた。また、親雷放電からの距離が大きくなるにつれて、ストリーマヘッドの進展速度が小さくなるという関係も見られた。一方、②明瞭な不均一ヘイローを伴うイベントでは、6イベント中3イベントで③と同様の親雷放電からの距離とカラムの下端高度の関係が見られた。しかし、親雷放電からの距離とストリーマヘッドの進展速度の関係は見られなかった。