



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	高校へのスプライトの親雷雲観測用教材の展開(fulltext)
Author(s)	鈴木,智幸; 鈴木,裕子; 鴨川,仁; 宮下,敦
Citation	東京学芸大学紀要. 自然科学系, 66: 33-38
Issue Date	2014-09-30
URL	http://hdl.handle.net/2309/136935
Publisher	東京学芸大学学術情報委員会
Rights	

高校へのスプライトの親雷雲観測用教材の展開

鈴木 智幸*・鈴木 裕子*・鴨川 仁*・宮下 敦**

物理科学分野

(2014年5月23日受理)

SUZUKI, T., SUZUKI, Y., KAMOGAWA, M. and MIYASHITA, A.: Deployment of a teaching material at high school for observing electric field by sprite parent storm. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **66**: 33-38. (2014) ISSN 1880-4330

Abstract

Sprites are observed by many high school students in Japan by means of high-sensitivity CCD cameras. They have revealed the optical characteristics of sprites (e.g. morphology and 3-dimensional location). However, they did not have materials to observe electrical phenomena in the storms causative of sprites. So, we developed a low cost field mill data acquisition system observing surface electric field change produced by sprite parent storms. Then, we have deployed the low cost field mill at high school in Tokyo. We will present some sample of the observational results and problems on the observations.

Keywords: Teaching materials, Sprite, Lightning flash, Charge amount, Charge location, Field mill

Department of physics, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 雷雲起源の現象のうち成層圏から電離圏下部で発生する放電現象は、高高度放電発光現象と呼ばれており、その成因や形状、発生高度等の特徴の違いにより、分類されている。その中でも特に観測事例が多いのは、スプライトと呼ばれる現象であり、雷雲内から大きな正電荷の中和を伴う正極性落雷の発生に伴って雷雲上空で起こるといわれている。日本周辺で起こるスプライトは、アマチュア天文家や多数の高校生達が高感度CCDカメラを用いて観測を実施しており、その光学特性（形状や空間的な位置など）を明らかにしている。しかし、スプライトを発生させる雷雲内の電荷の中和に着目して観測を行っている例はほとんどない。これは、スプライトの原因となる電気的な現象を観測する手法についてよく知られていないためであると考えられる。そこで、スプライトの原因となる雷雲とその電気的な特性を観測するための教材を開発した。この教材は、地上電界を観測し、データを自動収集するための教材である。ここでは、2013年からこの教材を都内の高校に展開し、連続観測を行った結果と検討が必要な事項について報告する。

* 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)
** 成蹊中学・高等学校 (182-8585 東京都武蔵野市吉祥寺北町 3-10-13)

1. はじめに

雷雲の放電活動と関連する上空での放電現象は、高高度（瞬間）放電発光現象とよばれ、光学観測による形状、発生高度などの特性に違いにより、分類されており、成層圏から電離圏下部（高度約10数kmから100km）で発生する。高高度放電発光現象の中で最も観測事例が多いスプライトは、1989年にアメリカで発見された。これまでの多くの研究から、スプライトは、活発な雷放電を伴う雷雲上空の中間圏で観測され、特に多量の正電荷の中和と関連する、中和電荷モーメントの非常に大きな正極性落雷が原因となって発生すると考えられている。日本においても1990年代後半に冬季雷に伴って¹⁾、2000年代初めには夏季雷に伴って²⁾ スプライトが観測されている。この観測を契機に、その後、校外活動で天体観測を行っている高校生が連携して、スプライトの同時観測を試みている³⁾。2006年からは、スーパーサイエンスハイスクール（SSH）採択高校と高知工科大学が共同し「SSH コンソーシアム」を結成、世界最大規模のスプライト同時観測が開始され、現在に至っている。これにより、数多くのスプライトの画像が取得され、お互いがデータを持ち寄った協同の解析により、高精度な3次元でのスプライト発生位置の同定や3D画像の作成を行うなど、優れた成果を出している。しかし、スプライトが大きな電荷の中和をとともなう雷放電（主に落雷）が原因であると言われているにもかかわらず、原因である雷放電に目を向けている高校生は非常に少ない。これは、観測機材が高価なことや雷放電を観測可能な高校生向けの機材が整っていないこと、解析手法に関する提案がなされていないことなどが原因と考えられる。しかし、これが克服されれば、高校物理で学習する電磁気学により、スプライトと雷放電とを関連付けることが可能となり、スプライトとその原因となる落雷の観測をとおして、現象を多面的にとらえる思考を実体験として醸成できるのではないかと考えた。

そこで、高校生によるスプライト観測をより発展させるきっかけとして、スプライトを発生させる「電気」と高校生の授業で行われる電磁気学とを結びつけるために、スプライトを発生させる原因である落雷の中和電荷位置・量が推定するのに必要な教材を開発した。

本研究では、スプライト観測及び雷放電活動に興味を持っている高校生向けに開発した、落雷に伴って生じる静電界変化の観測に必要な教材を高校に展開し、試験観測を試みた結果を報告する。

2. 親雷雲観測教材の展開

2. 1 親雷雲観測教材

高校生向けの親雷雲内の「電気」を観測することを目的としてすでに開発している教材⁴⁾は、高校生、または指導する先生が作成しやすいように、できるだけ安価かつ入手がしやすい市販の半完成品を組み合わせ、難易度を抑えることを考慮した。さらに、解析の際に、他の観測装置との時刻同期を考え、可能な限り高サンプリングレートでデータを取得するとともに、正確な時間も同時に取得できるように考慮して構成されている。この教材は、帯電させたポリエチレンをセンサーにかざし、移動させることで、電界変化の計測ができることを確認している。

教材の作成には、工業用途の静電界計であるコガネイ社製のEPセンサー⁵⁾、GERMIN社製GPSレシーバーであるGPS18xLVC⁶⁾及びLab-Jack社製の汎用AD変換器であるU3HV-LJ⁷⁾、⁸⁾を組み合わせ構成した。EPセンサーの信号はAD変換器のチャンネル1に、GPSレシーバーから出力される正確な1s信号はチャンネル2に入力され、デジタル化されたのち、USBケーブル経由でデータ保存用のPCに入力される。入力された信号はAD変換器付属のソフトウェアを用いて時刻情報とともに保存されるようになっている。

EPセンサーは、 $\pm 20\text{kV}$ のレンジを持ち、分解能は40V、最大サンプリング周期は10ms、データ出力周期0.1s、アナログ及びデジタルでの出力設定が可能である。これらの設定は、専用RS232Cケーブルを用いてPCに接続し、ハイパーターミナルソフトウェアで行うことができる。アナログ出力時の電圧出力範囲は1.0～5.0Vで、電圧値0レベルは、3.0Vである。なお、電界値への換算式は、 $\text{電界値} = (\text{出力電圧値} - 3.0) \times 10\text{kV}$ により行う。

GPS18xLVCはアンテナ及び受信機が一体となったGPS受信機で、12チャンネル並列GPS受信機が搭載されている。測位データはRS-232/TTLレベルで、NMEA0183フォーマット（テキスト）で出力される。また、パルス幅可変の1 μs 精度の1pps（GPS衛星からの正確な1秒パルス信号）パルスを別に出力する仕様となっており、このパルス信号をAD変換器に入力している。

U3HV-LJは12bit・4チャンネル搭載のAD変換器で、High電圧モードで-10～+10V、分解能約0.005V、またはLow電圧モード0.004～+2.44V分解能、約0.0006Vの直流電圧を、モードを切り替えて入力することが可能である。また、サンプリングレートは、毎

秒0.001～1000回程度まで可変となっている。

EPセンサーの作動モードは、実測データ出力、データ出力周期を0.1sに設定した。また、AD変換ボードのサンプリングレートは毎秒100回、GPSが出力する1ppsのパルス幅を100msと設定した。EPセンサー及びGPS受信機は0から5Vの範囲のアナログデータを出力するようにしているため、AD変換器の設定はHigh電圧モードで毎秒100回サンプリングし、テキストでデータを保存するようにしている。

2. 2 観測構想

図1は、開発した教材を用いた都内での親雷雲下での静電界変化の測定と関東上空のスプライト観測のための観測構想図を示す。今回は、作成した教材を東京都内にある、学芸大（小金井市）と成蹊中学・高等学校（吉祥寺）に展開し、電界計ネットワークを構築するための初期観測を試みた。両校は、中央線に沿ってほぼ東西に、直線距離で約7km離れた場所に位置している。将来的には、学芸大から10km圏内の大学または高校に5点以上教材を展開し、電界計観測のネットワークを構成する計画である。ここでは、静電界観測結果からスプライトを発生させる雷放電電荷中心位置の標定や中和電荷量の推定を行うことを想定している。中和電荷量の推定には、この教材を5～10kmという短い間隔で多数（最低4箇所以上）の配置し、各観測点で得られた計測データを、鏡像点電荷モデルが作る地上電界分布と比較し、評価関数（ χ^2 分布）が最小となるように、点電荷の空間位置と中和電荷量を決定する方法を用いることとしている。この方法の優れている点は、静電界を観測しているため、多地点で取られたデータの比較がしやすいこと、放電による地上電界の変化に加えて、雷雲とともに移動する電荷がつくる、地上電界変化の観測も可能な点である。特に中和電荷量と電荷位置が同時に求まる点も大きな利点である。一方で、感度を上げると、ノイズが大きくなり、観測値が飽和し、観測ができなくなるという欠点もある。また、センサ自体が防水仕様ではないため、降水の影響によるセンサーの故障を防止するために、センサーを下向きにし、開口部を下向きにした金属製円筒ケースに格納するようにして、克服した。（図2）なお、2013年夏季の観測開始から、複数の高校への展開を試みる計画であったが、最初に教材設置を行った高校において、様々な検討を行い克服すべき点が判明したため、2013年については、1校のみとし、運用上の課題・検討事項を洗い出すこととした。なお、この観測と連動して、関東地方を含む広範囲でのスプライト

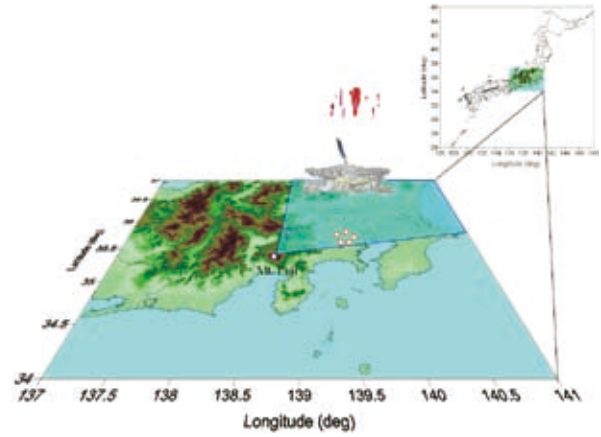


図1 観測構想図

イト観測を目的として、学芸大では2013/7/20から富士山山頂にある富士山測候所に高感度カメラを設置しスプライトの光学観測を行った。その結果、2013/7/22には、富士山からの初スプライトの観測に成功している。次に教材の展開と観測状況について述べる。

3. 教材の展開と観測

3. 1 教材の設置

図2は、開発教材のセンサーの設置状況（上）と観測ソフトウェア（下）、図3はBOLTEK社製のフィールドミル型電界計の設置状況（上）及び観測ソフトウェアを示す。

今回開発した教材は、成蹊高校の屋上に設置（図2）し、2013年夏季から観測を継続している（2013/8/10から2014/5/20現在）。観測場所は、3階建ての建物の屋上である。教材の電界値を校正及びバックアップの

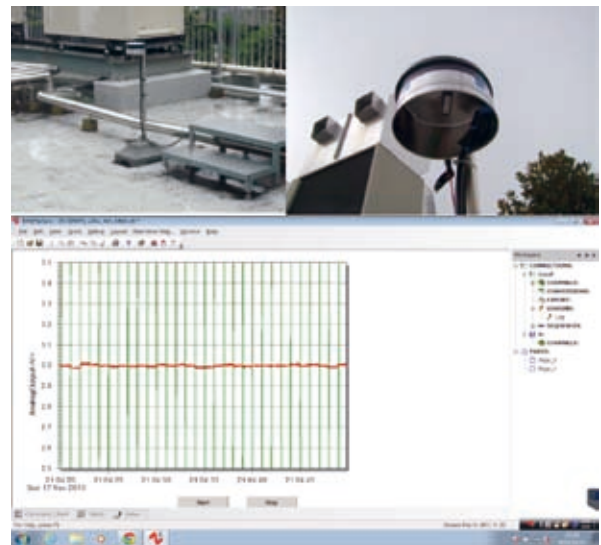


図2 開発した地上電界センサーと設置状況（上）と観測ソフトウェア画面（下）

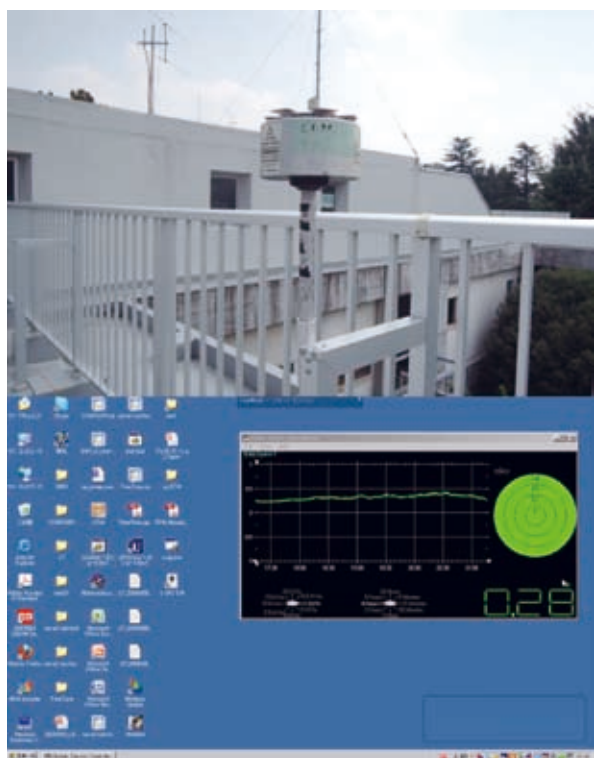


図3 校正用フィールドミル型電界計の設置状況(上)と観測ソフトウェア画面(下)

ため、BOLTE社製のフィールドミル型の電界計(図3)を同じ屋上に設置し、同時に観測を行った。データ保存用のPCは、WIFIモバイルルーター経由でインターネットに接続されており、リモートコントロールソフトウェア(Team Viewer)で、PCの管理を遠隔実施できるようにした。また、パソコンの時刻同期のため、インターネット経由でNTPサーバーにアクセスし自動的に時刻校正が可能なソフトウェア(Time tune)を導入した。また、1時間ごとにPCの状態をウィンドウズの内部コマンドで確認し、ステータスメールを送信するように設定した。

3. 2 運用上の問題点と対策

設置上及び長期運用の間に、発生した問題点は次のとおりである。

- (1) ウィンドウズアップデートを含む、バックグラウンドでのソフトウェアのアップデートが原因と思われるパソコンのフリーズが多発した。
- (2) モバイルルーターのオフラインが原因と思われるリモートコントロールが不能となる事象が発生した。
- (3) センサーに入力されるの信号が予想よりも弱かった。
- (4) 長期観測時のAD変換データ取得ソフトウェアが出力する時刻に遅延がみられた。

- (5) 屋上等の設置場所は、電源や屋内への配線引き込みが難しい場合がある。
 - (6) 近隣への落雷によるパソコンの破損が発生した。各問題点に対して考える対策は、次のとおりである。
- (1) PCのフリーズ防止のため、アップデートプログラムの無効化を行った。また、フリーズを極力避けるため、遠隔操作により定期的な、再起動を行った。遠隔操作不能の対策として、自動再起動が有効であると考えられる。
 - (2) モバイルルーターのオフライン化は、強い雨や大雪の時に頻発した。天候が回復するとネットワークに接続されるようであったが、PCとの通信の回復ができない事象がみられた。再起動するとオンラインになることから、自動再起動を考慮する必要がある。
 - (3) センサーを風雨対策及びアースを取るために下面の空いた金属ケースに格納したが、金属ケースの影響で、電界変化が極めて小さくなることが判明した。センサー面を可能な限り開口面に近づけるとともに、風雨の影響を避けるため半密封型にする等の対策が必要であることが分かった。
 - (4) AD変換器付属のデータ取得ソフトウェアが、内部タイマーを使って時刻を計測している可能性があることが判明した。NTP同期された、PCの時刻と比較して、1秒に100回程度のサンプリングであっても、24時間で最大5分程度遅れる場合があることが分かった。定期的にシステム時刻をデータ出力し、ソフトウェア起源の時刻遅延を校正するようにプログラムを書き換える必要がある。
 - (5) 機材は、屋上に設置することが管理上最適であるが、電源や配線の引き込みが困難なことがあるため、太陽電池パネル等を用いた電源レスの観測システムの構築を考慮する必要がある。
 - (6) 電源からプラグを抜くのが対策としては最適だが、観測対象が雷のため、観測を継続するために、UPS、雷対策用コンセント、アレスタの使用など可能な限りの対策を考慮する必要がある。

3. 3 観測結果(期待される観測データ)

図4は、2013/8/11に観測地点である成蹊高校を通過した雷雲と雷雲通過時の静電界波形を示す。教材と校正用のフィールドミルは、2013/8/10に設置したが、直後に発生した雷放電によると思われる影響で、教材に接続して観測していたPCが破損した。代替PCは2013/9/11からの稼動となったが、雷雲の上空通過時

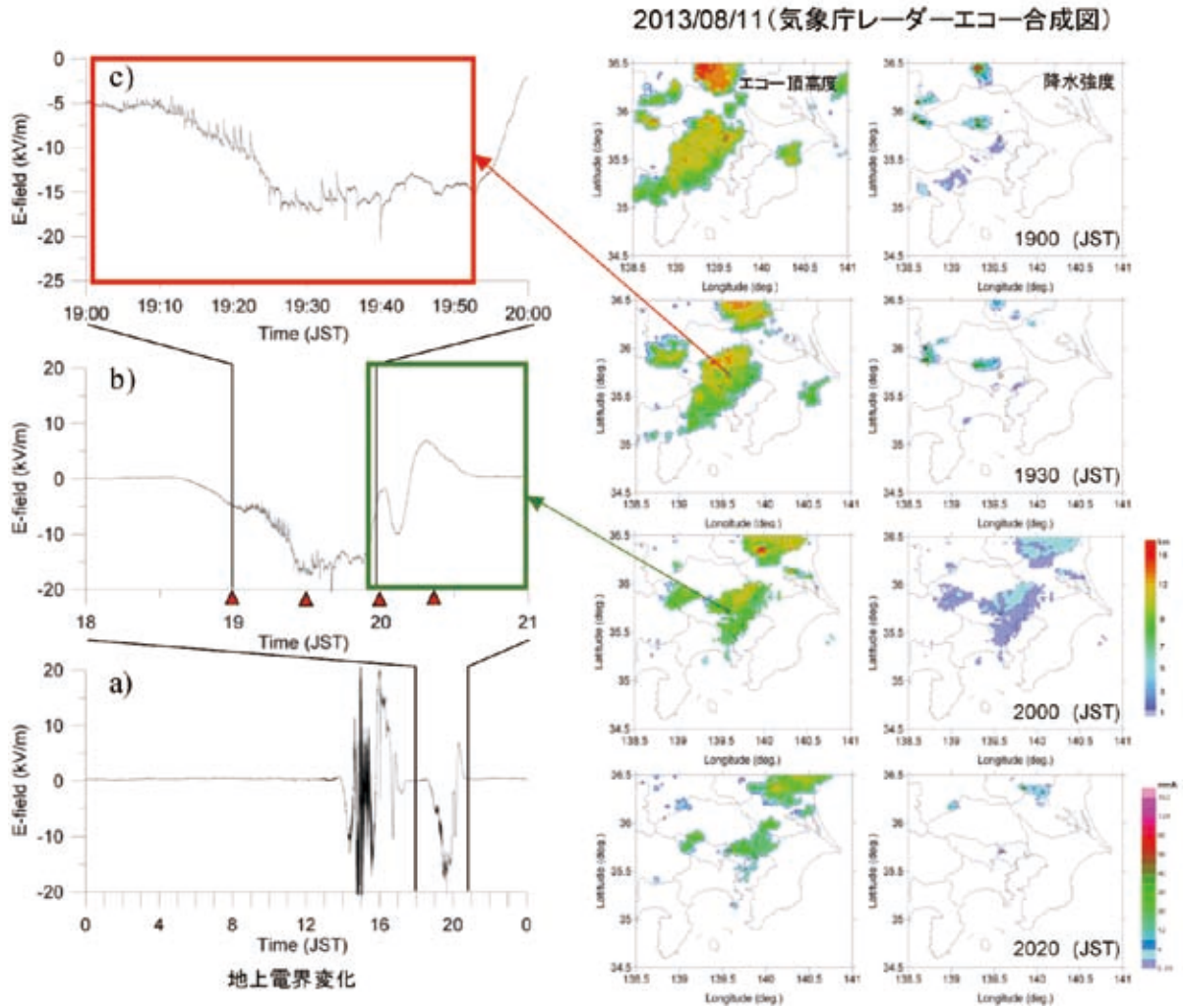


図 4 2013/08/11 に地上電界計上空を通過した雷雲の降水強度 (右) とエコー頂高度 (中) の時系列変化及び地上電界変化 (左)
 降水強度及びエコー頂図内の黒のひし形は、教材及び地上電界計の設置場所を示す。地上電界変化は a) 0 ~ 24 時, b) 18 時 ~ 21 時 (赤い三角形は、対応する気象庁レーダーエコー合成図の時刻を示す。緑の枠は対応する雷雲通過時の地上電界変化を示す。), c) 19 時 ~ 20 時 (赤枠は対応する時刻の雷雲及び雷放電に伴う地上電界変化を示す。) を示す。

のデータが取れていないため、今回使用したデータは、校正用のフィールドミルによるものである。今回は、このデータを用いて、2013/8/11 の雷雲下での地上電界について検討を行った。

地上電界変化を見ると、この日は、昼頃から雲放電または遠方の雷放電に伴うと思われる小刻みな電界変化の後、14 時頃からはゆっくりとした変化の中に急峻な変化が入り混じった波形となり、ダイナミックレンジを越える非常に複雑な電界変化がとらえられている。一方、17 時過ぎには一旦地上電界変化は 0 付近に戻り、その後 19 時少し前頃から、ゆっくりとした変化の中に、小刻みなスパイク状の変動を含む電界波形が見られる。20 時頃には、小刻みな電界変化は減り、ゆっくりとした変化が卓越したのち、20 時半頃には、0 付近に戻っている。ゆっくりとした変化は、

雷雲の移動に伴う雷雲内の電荷の移動を反映しているものと考えられる。20 時以降のゆっくりとした波形の変化を見ると、この時間帯にスパイク状の変化は、ほとんど見られない。ゆっくりとした変化は、はじめ正に振れた後、負に振れ、その後正に振れた後、0 に戻っている。このことは、上部が正、下部が負の典型的な 3 極構造を持つ雷雲下での電界変化を示していたものと考えられる。

一方、スパイク状の電界変化は、雷放電に伴う雷雲内の電荷中和に伴う変化であることが推測された。この変化が上空の電荷が消えたことによる変化と仮定すると、上に瞬間的に大きく振れたときにはトータルとして負電荷が、下に大きく振れたときには正電荷が雷雲内から中和されたことを示唆していたと考えられる。

このような特性を踏まえて、多地点に地上電界計を

設置し、ゆっくりとした変化を同時に観測することにより、地上電界の等値線を時系列で描くと雷雲下での地上電界マップとその時間変化を見ることができる。また、スパイク状の変化量を、点電荷が雷雲内から中和されたことによる波形の変化と仮定し、中和された点電荷が各観測点に作る電界変化と最もフィットするときの中和電荷位置と電荷量を数値解析的に解くことで、落雷により中和された電荷量の推定が可能となることが期待できる。

4. まとめ

今回の長期観測により、通年観測していく上での課題が明らかとなり、今後多地点に展開していく上で非常に有意義な観測結果が得られた。また、雷雲通過時の地上電界データの取得にも成功し、3極構造を持つと思われる雷雲通過時の地上電界変化波形及び雷放電に伴うと思われる急峻な電界変化波形が得られた。今後は、問題点への対策を検討し、ひとつずつ問題点を解決しつつ、複数観測点の展開に向け対策を採っていく予定である。

5. 謝辞

本研究での平成25年度文部科学省/独立行政法人日

本学術振興会の科学研究費補助金(奨励研究)JSPS科研費25909061の助成を受けて実施した。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) H. Fukunishi, Y. Takahashi, A. Uchida, M. Sera, K. Adachi, and R. Miyasato: "Occurrence of sprites and elves above the sea of Japan near Hokuriku in winter", EOS Trans. AGU, 80(46), Fall Meet. Suppl., F217, 1999.
- 2) <http://sonotaco.jp/forum/>, (最終アクセス日: 2014/5/21) .
- 3) 山本真行: "高大連携最先端理科教育「高校生スプライト同時観測」の6年間", 高知工科大学紀要, 7(1), pp.167-175, URL <http://hdl.handle.net/10173/542>, 2010.
- 4) SUZUKI, T., KAMOGAWA, M. and HAYAKAWA, M.: An attempt to develop a new instrument for the sprite observation in high school. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 65: 9-15. (2013) (in Japanese)
- 5) <http://ww1.koganei.co.jp/jp/shop/goods/series.aspx?category=J030010000>, (最終アクセス日: 2014/5/21).
- 6) I.D.E, "GPS18x series GPS sensor 技術仕様書", www.rakuten.ne.jp/gold/ida-online/GPS/GPS18x.pdf, (最終アクセス日: 2014/5/21).
- 7) <http://www.xbow.jp/u3hv.html>, (最終アクセス日: 2014/5/21).
- 8) <http://labjack.com/u3>, (最終アクセス日: 2013/4/29).