

スプライト観測を行っている高校生のための新しい教材開発の試み

鈴木 智幸*・鴨川 仁*・早川 正士**

物理科学分野

(2013年5月28日受理)

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) ISSN 1880-4330

Abstract

Sprites are one of the transient luminous events (TLEs) and are excited above a thunderstorm with strong positive flashes. The phenomena have been observed all over the world and are produced by the removal of large amount of positive charge from the thunderstorm (cloud-to-ground discharge). In Japan, sprites have been observed by many high school students by means of high sensitivity CCD cameras. They have revealed some of characteristics of sprites such as morphology through the optical measurements. Although sprites are produced by the removal of charges from the thunderstorm, they do not have instruments to observe electrical phenomena associated with sprites. So, we developed an instrument in order to provide an observation methodology of the electrical properties of sprite-producing thunderstorms. The instrument is a low-cost data acquisition system of field-mill which measures a surface electric field. If they can deploy more than four field-mills with at 5-10 km interval of each station, they can estimate an amount of positive charge removed associated with sprite-producing discharge under a simple assumption. Since the experiment and calculation is simple, this system may strengthen their understanding of electromagnetism.

Key words: Physics education, 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: スプライトは、高高度放電発光現象の一つで、活発な落雷を伴う雷雲上空で発生する。この現象は、世界中で観測されており、雷雲から大きな正電荷が中和されることにより発生すると考えられている。日本において、スプライトは、多くの高校生によって、高感度CCDカメラを用いて観測され、スプライトの光学特性（形状や空間的な位置など）などが明らかにされてきている。しかしながら、スプライトが雷雲からの電荷の中和が原因で発生するにもかかわらず、彼らはスプライトの原因となる電氣的な現象を観測するツールをほとんど持ち合わせていない。そこで、スプライトの原因となる雷雲とその電氣的な特性を観測するための手法を提供するための教材を開発した。その教材は、低価格で地上電界を観測するためのフィールドミルデータ収集装置である。もし、彼らが4つ以上のフィールドミルを5～10km程度の間隔で展開できれば、単純な仮定の下で、スプライトを発生させる雷放電に伴い中和された正電荷の総量を見積もることが可能となる。ここでは、中和電荷位置・量を推定するための教材の開発について報告する。

* 東京学芸大学環境科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

** 電気通信大学先端ワイヤレスコミュニケーションセンター (182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

1. はじめに

スプライトは、成層圏から電離圏下部（高度数10kmから約100km）で発生する高高度放電発光現象の一種である。この現象は、活発な雷放電を伴う雷雲上空で観測され、多量の正電荷を中和する、中和電荷モーメントの非常に大きな正極性落雷によって発生すると考えられている。特に、冬季雷は、夏季雷と比較して正極性落雷の比率が高く、落雷により雷雲内から中和される電荷量も大きいことがよく知られている。このことから、冬季雷が好発する日本海上でのスプライト発生が以前から予想されており、実際に1998年に冬季スプライトが日本海上空で観測されている¹⁾。その後ほどなくして、アマチュア天文家が2003年12月スプライトを高感度カメラで観測したのを契機に、山本ら²⁾が中心となって、高校生天体観測ネットワーク参加の高校生によるスプライト観測を働きかけ、同時観測を試みた。その結果、2004年冬には、早くも高校生による初のスプライトの観測に成功している。さらに、2005年には、山本らが中心となって執筆した「高校生天体観測ネットワーク版スプライト観測ハンドブック2005」が発行され、高校生向けに提供されている³⁾。2006年12月には全国14の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ている。そして、コンソーシアムに参加している多くの高校が、夏季・冬季を問わずスプライトの光学観測を行い、参加した多くの高校で、その観測に成功し、2010年2月までに1600余りのスプライト観測に成功している²⁾。これとは別に、多数のアマチュア天文家及びスプライトに興味を持ちスプライト観測を行っている個人が、情報を持ち寄るサイトでの情報交換も行われており、このサイトへコンソーシアム参加の高校生が撮影した画像を定期的にアップロードするなど、一般のスプライト観測者との交流も盛んである⁴⁾。このように、日本のスプライト観測ネットワークは、ここ10年程度で大きく進歩し、アマチュア天文家や高校生がネットワークを組むことにより、数多くのスプライトの画像が取得されるのみならず、お互いの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を行うなど、研究者顔負けの成果を得ている。これら、アマチュア及び高校生によるスプライト観測網は、世界最大規模となっている。

このように、スプライトそれ自身に関する観測は大

きな広がりを見せている一方で、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、高速な現象である雷放電を観測するためには、非常に高い時間精度で雷放電が発する信号を観測するため、機材が高価となること、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一因と考えられる。しかし、仮にスプライトと雷放電を高校物理で学習する電磁気学との関連付けをすることができれば、スプライト観測を行っている高校生が、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。そして、スプライトと雷放電という関連する物理現象を多面的にとらえ、その関連性に目を向けさせることができれば、高校生によるスプライト観測網をより発展させることが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・量が推定できる観測測器を開発した。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、落雷に伴って生じる静電界変化の観測に必要な教材のプロトタイプを開発し、試験観測を試みた結果を報告する。

2. 高校生向けの雷放電観測教材

2. 1 教材の機能検討

雷雲の発生や雷放電に伴い地上で観測される電磁界変化の観測は、大きく分けて、(1) 雷放電路（リーダー）の先端で発生する高周波帯、(2) 落雷・雲放電に伴い発生する中・低周波、(3) 雷雲が持つ電荷や落雷・雲放電に伴う直流付近の変化を観測する手法が用いられてきた。これらの観測結果は、(1) 落雷や雲放電に伴うリーダーが放射するVHFからUHF帯の放射電界変化をとらえて、その放射位置を数10kmの範囲で3次元標定する方法、(2) VLFからMF帯を使い、落雷や雲放電に伴い発生する放射電磁界変化を観測し、到来時間作法や交合法で数100kmの広範囲でその放射位置を2次元推定する機器や、大きな電界変化を伴う落雷が発生させるELF帯からULF帯の放射電磁界を観測し、理論値と比較することで、少ない観測点にもかかわらず、地球規模での落雷位置標定及

び中和電荷モーメントの推定を可能とする方法, (3) フィールドミル型の電界計⁵⁾を用いて雷放電に伴う地上電界変化から, 点電荷を仮定して中和電荷量とその位置を推定する方法などにより, 雷雲の電気的な活動に関する解析が行われている。(1)(2)の方法は, リーダーや落雷・雲放電など, 雷放電について詳細に観測できる半面, その同定のために極めて高い時刻精度で観測する必要があり, 機材作成のための資金的及び技術的な敷居が高い。一方, (3)の方法は, 細かい放電の様相の観測は難しい反面, 雷雲内から放電によって消滅した電荷に伴い生じるトータルとしての電界変化や, 雷雲の電荷分布に対応した地上電界が観測できること, 時刻精度は電磁界観測を行う方法と比較すると低くてもよく, かなり歴史のある方法でもある。しかし, この方法は, 標定のためには点電荷を仮定することが必要であることから, その位置標定精度は, (1)(2)の方法と比較すると低いと考えられるが, 雷放電前の雷雲の電荷分布推定ができること, 雷放電に伴う中和電荷量の算出が可能であること等, (1)(2)の方法にはない大きなメリットがある。近年は, 少ない観測点で広い領域を観測可能な(1)(2)の方法で雷放電を観測するのが一般的となっている。(3)の方法で位置標定や中和電荷量の推定を行うためには, 静電界計を5~10kmという短い間隔で多数(4箇所以上)の配置する必要があり, その管理の煩雑さから, 同手法に取り組んでいる研究者はほとんどいない。しかし, 観測点を多数設けることができれば, (1)(2)の方法では得られないデータが取得できることから, サイエンスを行う上での有用性は高い。一方, 電荷位置・量の推定のために多数の測器からなるネットワークを組む必要がある点がこの手法を困難なものにしている。しかし, 高校生には, すでにSSHでスプライト観測ネットワークを組んだ実績があるため, 機材さえ提供できれば, 本ネットワークの構築も可能なのではないかと推察される。また, 中和電荷位置・量推定に用いる手法は高校電磁気で学ぶ内容が応用できることから, 電磁気学の理解を深めることも期待でき, SSHをはじめとした課外活動が物理の実験授業に貢献しうる点でも意義は大きいと考える。さらに, 中和電荷位置・量推定に成功した暁には, 研究者が行う研究に劣らない結果を得ることができる可能性を秘めている。

2.2 教材開発

今回作成する雷放電の観測機材は, 高校生が使用する教材であるという位置づけから, 次の点を考慮して

教材開発の検討を行った。

a) 比較的安価であること, b) データの扱いが比較的容易であること, c) 市販品の組み合わせで作成できること, d) 作成が比較的容易であること。

以上を考慮した結果, 今回は, 近年の技術の発展から比較的安価に購入できるようになった工業用途の静電界計を用いて, スプライトを発生させる雷雲の電気活動を観測する教材を開発することとした。また, 今回は, 興味を持ってくれた高校生, または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で作成することに気を配った。さらに, 解析がしやすいように, 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た。

使用した市販品は, 工業用途の静電界計であるコガネイ製のEPセンサー⁶⁾, GERMIN社製GPSレシーバーであるGPS18xLVC⁷⁾及びLab-Jack社製の汎用AD変換器であるU3HV-LJ^{8), 9)}を組み合わせで作成した。開発する教材の部品として, これらの市販品を選択したのは, ソフトウェアが準備されており, 簡単な工作は必要となるが, AD変換器に部品を接続しただけで, 機能させることができるためである。各製品ともに国内でインターネット販売されており, 手軽に購入が可能である。なお, データ保存のためのパソコンを除いた, 教材の総額は10万円を切っており, GPS時刻まで取得可能な点を考慮すると, 市販の静電界計の1/20~1/4の予算で作成可能である。次に各部品の特徴を示す。

2.2.1 EPセンサー

この静電界センサーは, $\pm 20 \text{ kV/m}$ のレンジを持ち, 分解能は 40 V/m である。サンプリング周期は 10 ms で, データ出力周期(1s, 0.5s, 0.2s, 0.1s)及び作動モード(平均化データ出力, 実測データ出力, イオンバランスモニタ)が変更可能な仕様となっている。データは, 設定したデータ出力周期でRS232Cおよびアナログでの出力が可能な設定である。各種設定は専用ケーブルを用いたRS232C経由で, ハイパーターミナルソフトウェアで設定が可能である。アナログ出力時の電圧出力範囲は $1.0 \sim 5.0 \text{ V}$ で, 電圧値0レベルは, 3.0 V である。なお, 電界値への換算式は, 電界値 = (出力電圧値 - 3.0) $\times 10 \text{ kV/m}$ である。

2.2.2 GPS18 x LVC

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

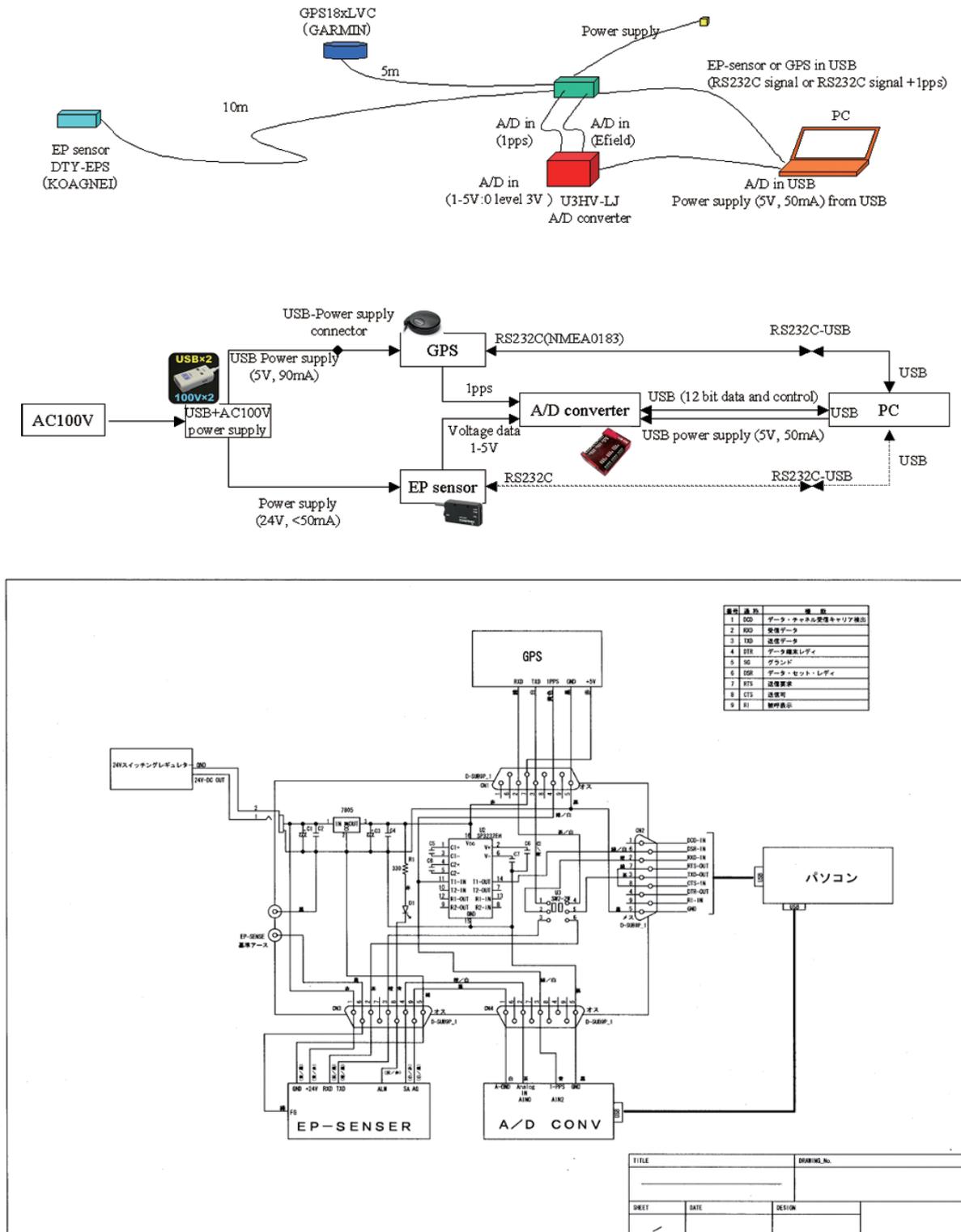


図1 開発した教材の接続ブロック図 (上) 及びコントローラーの回路図 (下)

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 μ s精度の1pps(GPS衛星からの1秒パルス信号)を別に出力する。

2. 2. 3 U3HV-LJ

U3HV-LJは、12bitのAD変換器を搭載した4ch入力可能な機器で、入力は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な仕様となっ



図2 開発した教材



図3 EPセンサー及び開発した機器の動作試験

ている。サンプリングレートは、毎秒0.001～1000回程度となっており、計測データ保存用PCのハードディスクの空き領域がなくなるまで、テキスト形式で連続書き込み可能な仕様となっている。今回使用する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ため、AD変換器はHigh電圧モード（レンジ-10～+10V）の2ch入力で使用する。

なお、教材の最小構成は、先に示した3つの部品と電源のみ（多少の工作は必要）だが、今回は、これら機材の設定を統合的に扱うための、設定用コントローラを別に開発している。

図1に、開発した教材の接続ブロック図（上）及びコントローラの回路図（下）を示す。図2に開発した教材一式を示す。コントローラは、EPセンサーの観測電界に対応した電圧値及びGPSの1ppsレベルの電圧をAD変換器に出力し、AD変換器はPCへUSBでデータを出力する。観測データは付属のソフトウェアで、テキスト変換される。なお、テスト用にGPSとEPセンサーが出力するTTLレベルの信号をRS232CでPCに出力することも可能な設計としている。

3. 試験方法

3.1 動作試験

今回行った動作試験は、雷放電に伴う急峻な変化も扱うため、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1000回、GPSが出力する1ppsのパルス幅を100msと設定した。図3は、動作試験の様子を示す。試験は、ポリエチレンと人毛を擦り合わせて帯電させ、センサー付近で帯電させたポリエチレンを移動させることで行った。図4は、試験結果の一例を示す。サンプリングの開始及

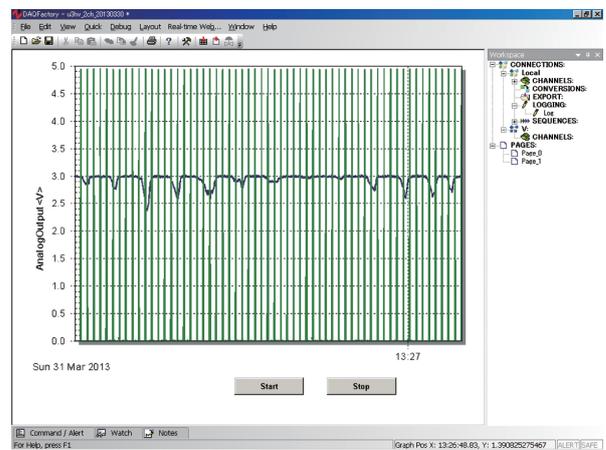


図4 動作試験結果の一例 青線がEPセンサーからの入力信号波形を、緑線がGPSからの1ppsの入力信号波形を示す。

びデータの書き出し、サンプリング終了などの各種操作は、AD変換器に付属のソフトウェアプログラムを用いている。また、グラフは、レンジ5V（10bit）2chのみ表示するように変更している。ポリエチレンと人毛は、それぞれ負及び正に帯電する性質があるため、図4に示すとおり、電界値の変化から負に帯電したポリエチレンの移動に伴う変化を正しく観測していることが分かった。また、1ppsも設定したパルス幅で出力されAD変換されていることが確認できた。

3.2 試験観測

図5は、試験観測用に作成した静電界計ケースの設置状況を示す。三脚の上部に金属製の銀色のケースを設置し、その内部に静電界計を設置している。この静電界計は防水仕様ではないため、このケースは風雨の進入を防ぐ目的に加え、接地することで0レベルを地上と同じに保つアースとしても機能している。図6は、試験観測の一例を示している。この日は、約5時

連続観測を行い、5時間で取得されたデータ量は約450MBであった。曇り模様ではあったが、近くでの雷放電活動はなかったため、地上電界値はほぼフラットとなっていることが分かる。なお、例として示した以外にも観測を行っていたが、この教材が、GPSの時刻精度を高めるために毎秒1000回のAD変換を行い、落雷による停電でPCに電源が供給されなくなっても観測が継続できるようにデータをほぼリアルタイムで書き込む仕様となっていることから、内蔵ハードディスクが連続のデータ書き込みに伴う熱により破損し、初期観測期間に取得したデータを全て失うというアクシデントに遭遇した。このため、長期間の観測では、内蔵ハードディスクへの書き込みを行わず、データの書き込み先をSDメモリ等の外部メモリに書き込み、定期的な書き込まれたデータを外部の大容量ハードディスクにコピーまたは移動することなどの考慮が必要であることが明らかとなった。



図5 試験観測時の静電界アンテナの設置状況 EPセンサは銀色のケースの内部に格納している。

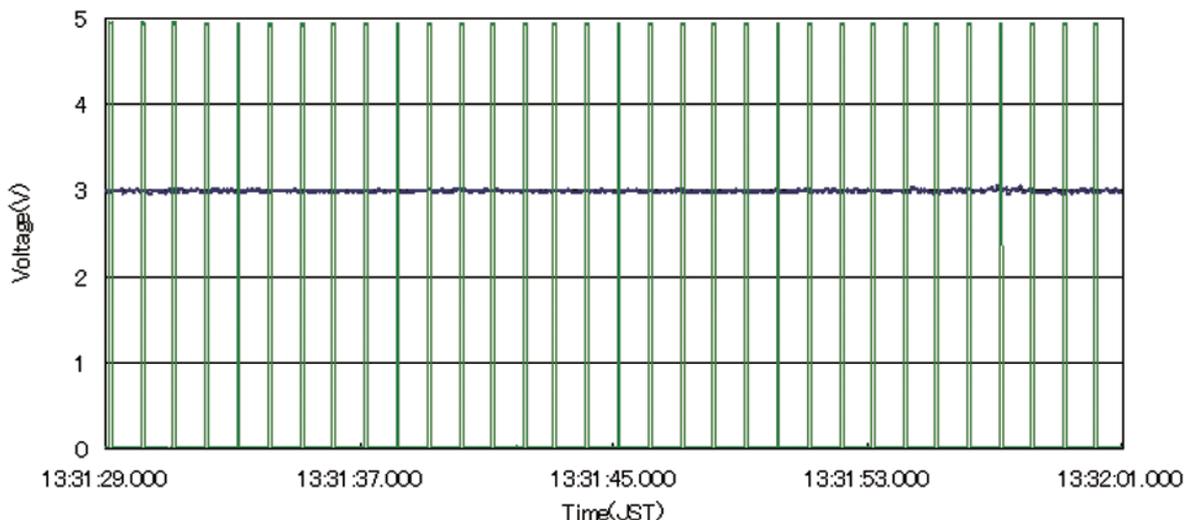


図6 試験観測で観測された電界波形の一例 見方は図4と同じ

4. まとめ

スプライト観測を行っている高校生向けに、その原因となる雷放電の電氣的な活動を観測するための教材を開発し、動作試験及び試験観測を行った。その結果、開発した教材が正しく動作することを確認した。一方で、連続で観測した場合の問題点も明らかとなった。今後は、NMEA0183フォーマットで出力される正確なGPS時刻を用いてPCの時計を自動補正する機能、ファイルを分割して保存するように観測プログラムの変更を行う他、データを定期的に、保存用のハードディスクに移動する機能を付加するなど、試験観測上問題となった点についての改善を行うことを予定している。さらに、初期観測を実施し、引き続き問題点の洗い出しを行う予定である。また、高校生にこれら機材を使って観測してもらうために、高校生が発表した実績がある学会等での発表、関東のSSH校への紹介等の機会を通じて、この教材の普及を図っていきたい。

5. 謝辞

教材開発を行うにあたり、松永秀人氏より多くの助言及び作成時に多大なサポートを受けた。また、本研究は平成24年度および平成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, 研究課題番号: 24909060および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) 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.
- 3) 山本真行, 鈴木文二 編著: "スプライト観測ハンドブック", 高校生天体観測ネットワーク, 2004.
- 4) <http://sonotaco.jp/forum/>, (最終アクセス日: 2013/4/29).
- 5) 日本大気電気学会編, "大気電気学概論", コロナ社, pp. 5, 2003.
- 6) <http://ww1.koganei.co.jp/jp/shop/goods/series.aspx?category=J030010000>, (最終アクセス日: 2013/4/29).
- 7) 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: 2013/4/29).
- 8) <http://www.xbow.jp/u3hv.html>, (最終アクセス日: 2013/4/29).
- 9) <http://labjack.com/u3>, (最終アクセス日: 2013/4/29).