

スプライト発生位置と落雷位置の関係

鈴木 裕子¹⁾, 鈴木 智幸¹⁾, 織原 義明^{1),2)}, 成嶋 友祐¹⁾, 鴨川 仁^{1)*}
Yuko Suzuki¹⁾, Tomoyuki Suzuki¹⁾, Yoshiaki Orihara^{1),2)},
Yusuke Narushima¹⁾ and Masashi Kamogawa¹⁾

Abstract

In 1990, sprites were newly discovered in the mesosphere between clouds and ionosphere. Therefore, various investigations of sprites have been reported since last two decades. Sprites are induced by a strong electric field attributed to the neutralization of a large amount of positive charges at the upper part of thunderstorm when cloud-to-ground (CG) lightning occurs. Many papers have implied that the complex physics of sprite-induced CG lightning, namely parent CG lightning, causes various morphologies and lifetime of sprites and the time delay of sprite occurrence, which have been some of unsolved issues in the transient luminous events studies. However, they have not been completely explained yet. Thus, we investigate the discrepancies among them through an optical measurement and the observed parent CG lightning.

緒 言

スプライトは高高度発光放電現象の一つであり、最も観測頻度が高く多数の報告がなされている(e.g., Börsinger *et al.*, 2012). スプライトは、雷雲上部の大きな正電荷が対地雷によって中和される際に付随的に生じる強い電界によって、雷雲上空の中間圏から電離圏下部が発光する現象である。スプライトの形状、持続時間、原因となる対地雷から発生ま

での時間遅延等は、雷放電の複雑さに起因する可能性が指摘されている(Pasko *et al.*, 2012). また、電磁波観測で標定された親雷放電(落雷)位置とスプライト発生中心位置にはしばしば水平方向に50 kmを超える差異があることが報告されている(e.g., Bell *et al.*, 1998). しかし、この差異が生じる原因についてはよくわかっていない。このことから、本研究では、光学観測によるスプライトと親雷放電の水平位置の差異の原因を解明することを目的とする。

1) 東京学芸大学物理学科 〒184-8501 東京都小金井市貫井北町 4-1-1

Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo 184-8501, Japan

2) 東海大学海洋研究所地震予知研究センター 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1

Earthquake Prediction Research Center, Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka, 424-8610 Japan

* Corresponding to Masashi Kamogawa (kamogawa@u-gakugei.ac.jp)

(2015年2月11日受付 / 2015年2月23日受理)

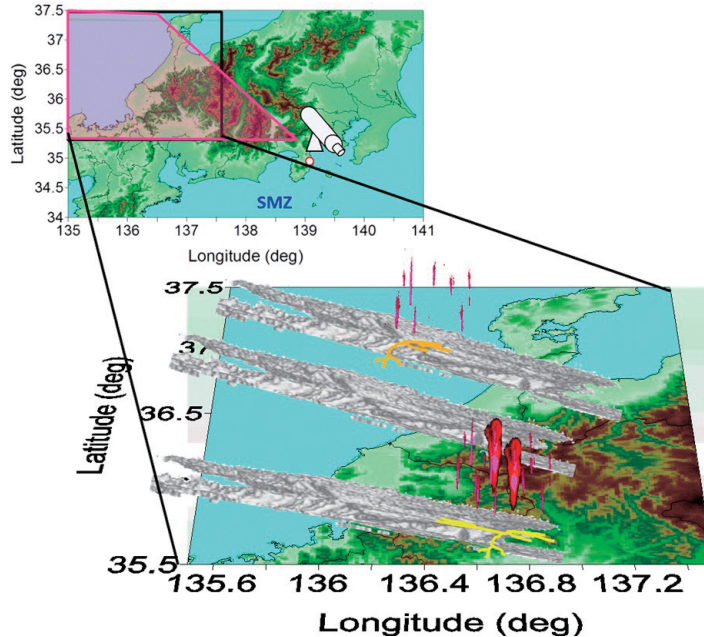


Fig. 1 Schematic configuration of sprites optical observation.

光学観測方法と雷データ

冬季に北陸地方の上空で発生するスプライトと対地雷に伴い生じる放電発光を観測するため、北陸地方から遠方の静岡県清水で高感度カメラによる夜間光学観測を行った。カメラは、北陸地方から200 km 以上離れた静岡県静岡市清水区の東海大学海洋学部1号館屋上 (SMZ: 138.5140 E, 34.9900 N) に設置した (Fig. 1)。観測可能なエリアは石川及び福井地域上空であり、これらの地域は冬季雷が頻繁に発生するのみならず、スプライトも発生することが分かっている (e.g., Suzuki, *et al.*, 2011)。今回光学観測を行った期間は2012年12月から2013年2月である。光学観測に使用したカメラはワテック社のモノクロ CCD カメラ (WAT-910HX) で、感度は 0.000005 lx であり、シャッタースピードを 10 ms

に設定して観測を行った。撮影された映像には、GPS 衛星から得られた正確な時刻のスーパーインポーズが可能となっている。GPS 時刻精度は $\pm 1 \mu\text{s}$ であり、スーパーインポージャーが与える時刻精度は、1 ms である。スーパーインポーズされた動画は分配器でハードウェアエンコードのパソコン用ビデオキャプチャおよび HDD 動画レコーダーに分配し、前者の動画は PC に取り込まれたのちイベントトリガー方式で記録される。動画サンプリングは 60 フィールド (1/60 秒 = 16.7 ms) である。後者は連続記録を行うためのものであり、動画サンプリングは 30 フィールドである。本研究の光学観測概略図は Fig. 2 に示す。また、設置したカメラと収録機器の様子を Fig. 3a と Fig. 3b にそれぞれ示す。なお、スプライト発生位置の方位角標定は、画像に撮り込んだスプライトと恒星との相対位置から行った。

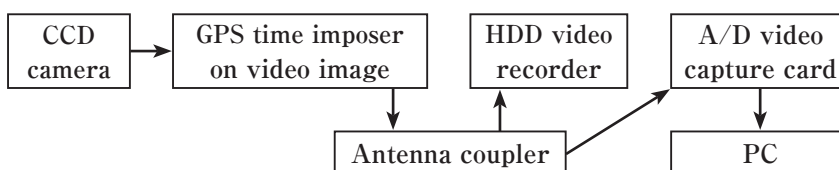


Fig. 2 Block diagram of the monochrome CCD camera system.

(a)



(b)



Fig. 3 (a) Photograph of the installed camera. (b) Photograph of the installed apparatus to collect data.

落雷位置を標定する方法には、落雷により発生する磁界変化を直交ループアンテナで計測し到来方位角を求める観測を2地点以上で同時に実施し、それらの交点から落雷位置を推定する方法 (MDF: magnetic direction finder) や、落雷に伴い発生する電界変化を十分に広い間隔をあけて設置された多数のアンテナで受信し、各アンテナで観測された、落雷に伴い生じた電界変化の受信時刻の時間差から、計算によって落雷位置と発生時刻を算出する方法 (TOA: time-of-arrival), さらに、1波長程度離れた複数のアンテナで観測された電磁波の位相差から到来方位を2点以上で同時観測し、放電波源を標定する干渉法のような技術がある。この他、落雷位置標定には、MDF と TOA の組み合わせにより標定精度を向上させたインパクトなどが存在する (IMPACT: improved accuracy using combined technology). (e.g., Krider *et al.*, 1976; Holle and Lopez, 1993; Cummins and Murphy, 2000; Rakov and Uman, 2003; Takayanagi *et al.*, 2011). MDF は対地雷 (リターンストローク) から発せられる電磁波の磁界を交差ループ・アンテナで受信し、対地雷の方位角や推定電流値はリターンストロークに関連する信号の最初のピーク値で決定される。このシステムは、三角測量方法を用いて対地雷の位置を特定するため、2点以上の MDF センサーを要する。また、TOA は2次元標定の場合3点以上の観察点で雷放電由来の電界変化をとらえ、到着時間の違いから対地雷の位置を特定する方法である。TOA は2

台のセンサー間の到来時間差から得られる位置双曲線を複数組み合わせその交点を求めることで対地雷の位置を決定する。TOA により正確な場所を標定するためには、正確な到来時間が必要なため、通常 GPS が提供する正確な時刻信号が使用される。干渉法は、雷放電から発せられる VHF 帯の電波も計測し、対地雷だけでなく雲放電位置も標定することができるようにしたシステムが開発されている。VHF 帯の干渉計は、3次元での放電源の推定が可能なものが多い。

本研究では、3つの雷位置標定システムのデータを使用した: Japan Lightning Detection Network (JLDN), Lightning Location Systems (LLS); www.rikuden.co.jp/hopes/llssen.html, World Wide Lightning Location Network (WWLLN). JLDN および LLS は、同じ IMPACT を使用したシステムで、それぞれ 21 および 8 局の観測サイトから構成された落雷位置標定システムであり、落雷位置、極性および推定電流値を推定可能である。JLDN と LLS の対地雷標定位置誤差は、それぞれ 500 m (平均値) と 640 m (中央値) 以内であり、対地雷検知率は、それぞれ 90 % 以上、88.7 % (冬季雷と夏季雷の平均) である (フランクリン日本ホームページ; <http://www.franklinjapan.jp/contents/observation/jldn/> および Shinjyo *et al.*, 2007). WWLLN は VLF 帯における球面波の到達時間を分析することによって対地雷位置を標定する (Rodger *et al.*, 2005), 70 以上の VLF レシーバーからなる世界的

なネットワークである (Hutchins *et al.*, 2013). 平均位置標定誤差は 10 km 以内であり, 検出率は 11% である (Rodger *et al.*, 2009). WWLLN の出力データは, 対地雷発生日, 時間, 場所, 落雷エネルギーとなっている.

なお, 対地雷標定位置データに加え, 気象庁 (JMA) により提供されている全国合成レーダーデータを使用した. このデータは日本における 2 km の高度での降水量 (mm/h) で, 1 × 1 km の空間分解能と 10 分の時間分解能を有している.

観測結果と解析方法

本冬季雷観測では, 合計 15 例のスプライト観測に成功した. スプライトの発生方向に関しては, 画像に映り込んだ恒星の位置を利用して算出した. また, 雷位置標定システムによる落雷分布を用いて, スプライトの出現方向と落雷の位置との関係について解析および考察を行った.

Fig. 4 に示されるスプライト画像から分かるようスプライトの本数や形状, それらの広がり様々である. また, 映り混んだ落雷に伴う最大発光位置は, ほぼスプライトの直下と判定できる. しかし, 各雷データの落雷標定位置はスプライト発生範囲から数十 km 程離れているものが多い (Fig. 5).

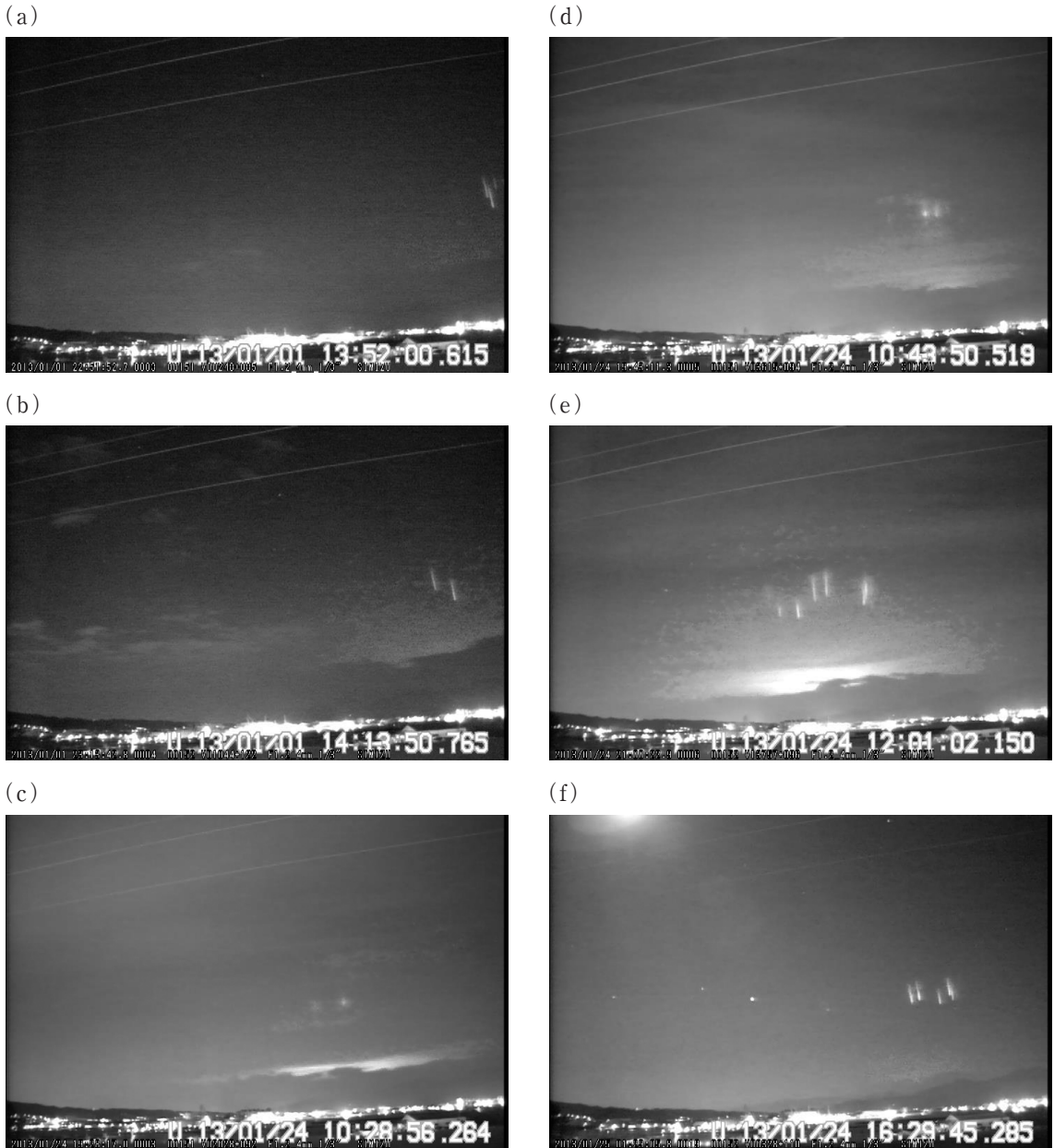


Fig. 4 Examples of sprites event. The (a) and (b) show the events captured in the same night at 13:51 (UT) and 14:13 (UT) on January 1, 2013, respectively. The (c), (d), (e) and (f) show the events captured in the same night at 10:28 (UT), 10:43 (UT), 12:01 (UT) and 16:29 (UT) on January 24, 2013, respectively.

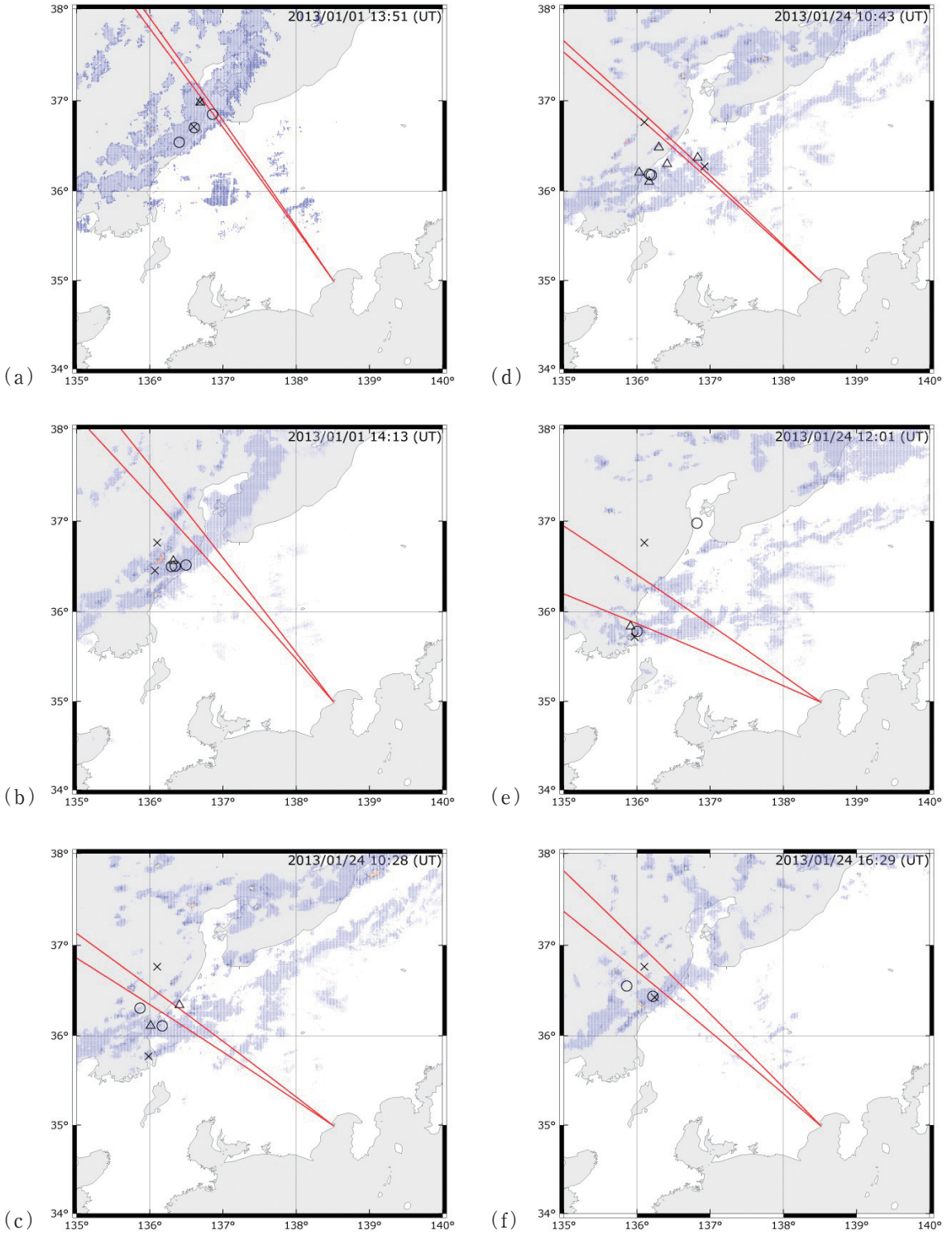


Fig. 5 The radar-echo maps and the cloud-to-ground lightning provided by JLDN (○), WWLLN (△) and LLS (×) associated with sprites as shown in Fig. 4. Red lines show the region sprites occurred.

考察とまとめ

Fig. 4c～eから分かるように画像には、スプライトのみならず雷発光も映り込んでいる。これは雷雲上部から漏れだした雷発光（散乱光）であり、最も発光が強い部分が雷雲内の電荷中和の中心位置であるものと推定される。この雷発光中心位置はスプライトとほぼ鉛直の関係あることがわかる。一方、Fig. 5に示されるように雷データが示す落雷位置はスプライト発生範囲から数十 km ずれているものが多い。これは、雷データが示す放電位置は地上の落雷位置を標定していることによると考えられる。このことから、画像内に映りこんだ雷発光は雷雲内で最も多量の電荷が中和された部分の中心位置をとらえているものと解釈することができる。日本における冬季雷では、落雷がほぼ直下で起こることが多い。夏季雷と異なり、水平に長距離放電したのち落雷へと至る事例があることが報告されている（Suzuki *et al.*, 2006）。そのため、Asano *et al.*, (2009) で指摘されているように、水平放電路により電磁波の伝搬方向が変わることなどが原因で、スプライトの形状に影響を与えるのではないかと推測することができる。このことから、今後は VHF 帯のような放電路（リーダー）を標定可能な装置を用いることにより明らかにすることが必要であり、これが今後の課題である。

謝 辞

本稿の執筆にあたっては、長尾年恭東海大学教授に貴重な助言を頂いた。静岡市清水区の設置・メンテナンスに関しては、東海大学海洋研究所地震予知研究センターの方々にご協力をいただいた。あらためて感謝申し上げます。また、Japan Lightning Detection Network（フランクリン・ジャパン）、Lightning Location System（北陸電力；ホームページより入手）、World Wide Lightning Location Networkにより提供された雷データを使用した。なお、本研究は科学研究費助成事業（課題番号：24360399, 2012-2014）を受けて実施された。厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- Asano T., Masashi, H., Mengu C. and Tomoyuki, S. (2008): Computer simulations on the initiation and morphological difference. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 113, A02308, doi: 10.1029/2007JA012528.
- Asano, T., T. Suzuki, M. Hayakawa, and M. G. Cho (2009), Three-dimensional EM computer simulation on sprite initiation above a horizontal lightning discharge, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 71 (8-9), 983-990, doi: 10.1016/j.jastp.2009.04.003.
- Bell, T. F., Reising, S. J. and Inan, U. S. (1998): Intense continuing currents following positive cloud-to-ground lightning associated with sprites. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1285-1288.
- Bösinger, T., LaBelle, J., Opgenoorth, H. J., Pommereau, J.-P., Shiokawa, K., Solomon, S. C. and Treumann, R. A. (2012): *Dynamic Coupling between Earth's Atmospheric and Plasma Environments*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, vol. SSSI 42, pp 609.
- Cummins, K. L. and Murphy, M. J. (2000): *Overview of Lightning Detection in the VLF, LF, and VHF Frequency Ranges*. 2000 ILDC, Tucson, Arizona.
- Franklin Japan home page, <http://www.franklinjapan.jp/contents/observation/jldn/>
- Holle, R. L. and Lopez, R. E. (1993): *Overview of real-time lightning detection system and their meteorological uses*. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-102, 68 pp.
- Hutchins, M. L., Jacobson, A. R., Holzworth, R. H. and Brundell, J. B. (2013): Azimuthal dependence of VLF propagation. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, doi: 10.1002/jgra.50533.
- JMA website, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/thunder1-2.html>
- Krider, E. P., Noggle, R. C. and Uman, M. A. (1976): A gated wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. *J. Appl. Meteor.*, 15, 301-306.
- Pasko, V., Yair, Y. and Kuo, C.-L. (2012): Lightning related transient luminous events at high altitude in the earth's atmosphere: phenomenology mechanisms and effects. *Space, Sci. Rev.* 168, 475-516 doi 10.1007/s11214-011-9813-9.
- Rakov, V. A. and Uman, M. A. (2003): *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press.
- Rodger, C. J., Brundell, J. B. and Dowden, R. L. (2005): Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network: Post-algorithm upgrade. *Ann. Geophys.*, 23, 277-290.
- Rodger, C. J., Brundell, J. B., Holzworth, R. H., Lay, E. H., Crosby, N. B. and Huang, T.-Y. Rycroft, M. J. (2009): Growing detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network. *AIP Conf. Proc.*, 1118, 15-20, doi: 10.1063/1.3137706.
- Suzuki, T., Matsudo, Y., Asano, T., Hayakawa, M., and Michimoto, K. (2011): Meteorological and electrical aspects of several winter thunderstorms with sprites in the Hokuriku area of Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, D06205, doi: 10.1029/2009JD013358.
- Shinjo, K., Kawamura, H. and Sakamoto, N. (2007): Difference for lightning characteristics detected by two different lightning location system. *Kenkyu kaihatsu nenpo*, 41, 1-5 (in

Japanese).

Suzuki, T., M. Hayakawa, Y. Matsudo, and K. Michimoto (2006),

How do winter thundercloud systems generate sprite-inducing lightning in the Hokuriku area of Japan? *Geophys. Res. Lett.*, 33, L10806, doi: 10.1029/2005GL025433.

Takayanagi, Y., Akita, M., Nakamura, Y., Yoshida, S., Morimoto,

T., Ushio, T., Kawasaki, Z.-I., Yamamoto, K. (2011): Development of VLF/LF bands interferometer and its initial observations (in Japanese). *IEEJ. Trans. FM.*, 131, 9, pp. 716-722.