

架空送電線の雷事故と Blitzortung の比較による標定率評価

成田 知巳* (湘南工科大学)

Evaluation of coverage rate by comparing lightning faults on overhead transmission lines and Blitzortung
Tomomi Narita*, (Shonan Institute of Technology)

We evaluated the location rate and location accuracy of Blitzortung, a lightning location device introduced in Japan. We compared data from 91 transmission line lightning accidents in 2019 that matched LLS with Blitzortung data. As a result, the location rate was 88% and the median position accuracy was 1.7 km. Moreover, the orientation rate improved to 92% by reorientation.

キーワード: ブリッツ, 架空送電線, 落雷位置, LLS
(Keywords, Blitzortung, overhead transmission lines, lightning position, LLS)

1. はじめに

雷放電による災害によって生じる経済損失は膨大である。積乱雲に伴う突発的な降雨や雷放電によって生じる水害や停電などによる公共災害防止のために雷放電位置標定装置が必要となる。これまでの商用の雷放電位置標定システムは、気象会社⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ や電力会社⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ のものがあるが、無料で公開されているのは粗い地図上に表示された視覚的な情報のみで、詳細なデータは非公開または有料である。表1に各種雷放電標定装置の概要を示す。周波数帯はLF帯およびVLF帯があるが、雷放電標定方式は、いずれも到来時間差方式を用いている。一方、IT技術の向上により、ネットワークを介して、装置やセンサをコントロールすることが容易になるとともに装置が安価に入手可能となった。そこで、IT技術を活用した安価な装置を用いて、世界規模で高精度の雷放電標定ネットワークの実現を目指した「Blitzortung」プロジェクトに参加した。このプロジェクトは、ドイツ・ハインリッヒハイネ大学のEgon Wanke教授らが2012年に開始したもので、受信局を自らがはんだ付けすることで雷観測装置を製作・設置するボランティアで運用されている。雷放電標定の座標などの雷に関するデータは、リアルタイムでインターネット上に無料で公開されている。なお、2012年にGreen-system, 2013年にRed-system, 2016年にBlue-systemにバージョンが変更されている。

Blitzortungの受信局は、これまでに主に米国、欧州、オセアニア地域に展開され、2023年12月現在、約2,300台の受信局が登録され、そのうち約半数の1100台が稼働状態にある。日本国内では2016年2月に湘南工科大学が初めて設置し⁽⁹⁾、2023年12月までに国内は北海道から沖縄および小笠原まで全国60局、海外はモンゴル、インド、バングラデシュ、ネパール、ミャンマー、タイ、カンボジア、ベトナム、フィリピン、インドネシア、グアム、ハワイ、サモアに20局を設置した。雷放電から発生する電磁波のうち、VLF帯の電磁波は電離層を反射し、遠方まで届く場合もあることから、広範囲の雷放電を標定することが可能である。

本報告では、2019年時点でのBlitzortungの捕捉率を送電線の雷事故と比較し評価した。なお、2019年時点での日本国内の受信局数は50局であった。

表1. 日本の雷放電位置標定システム(LLS)の比較
Table 1. Overview of lightning position system in JAPAN

System	Frequency	Method	Operator	Free/ Fee	Area
JLDN ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	LF	TOA	Company	Fee	Japan
Electric Power Company ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾	LF	TOA	Company	-----	Japan
Meteorological Agency(LIDEN) ⁽⁷⁾	LF	TOA	Government	Fee	Japan
WWLLN ⁽⁸⁾	VLF	GTOA	University	-----	World
Blitzortung	VLF	TOA	Volunteer	Free	World

2. 受信局の概要

〈2・1〉 雷放電位置標定原理 Blitzortung の雷放電位置標定システム (LLS: Lightning Location System) は、雷放電標定に到来時間差方式(TOA)^{(10) (11) (12)}を用いており、雷放電時に発生する電磁波が各受信局に到来する時間差を用いて、雷放電位置の標定している。2局間の到来時間差が分かると、電磁波放射点の解の軌跡は1つの双曲線となる。したがって3つの受信局があれば双曲線の交点として、雷放電位置が標定できる。なお、Blitzortung では、最低受信局数として6局を設定しており、6局が受信していない場合には、ノイズとして処理される。また、時刻精度を1 μ sと仮定したときに算出される位置決定誤差が15kmを越えるデータは除外した。この説明を図1に示す。2つの受信局をsite_1およびsite_2とし、その距離を100kmとし、その両方で1 μ sつまり300m過小評価していたと仮定する。site_1とsite_2を結ぶ線分の中線から落雷位置を仮定した黒丸までの距離を計算すると、 $\sqrt{111503^2 - 50000^2} = 99664.0$ であり、同様に両方で1 μ s過大評価していたとすると、 $\sqrt{112103^2 - 50000^2} = 100334.9$ となる。この両方の差は、671mであり、これをDeviation(偏差)と定義する。図の右側にある黒丸の2例は、Site_2から45度および60度の方向の場合に計算した結果であり、Deviationはそれぞれ1878m, 4318mである。黒丸の位置が右に行くほど、Deviationは大きくなる。つまり、到達時間差による標定計算の誤差が大きくなる。また、この見積もりでは、site_1とsite_2間の基線長が100kmであるが、基線長が変われば結果も変化し、短い基線で遠方や基線方向に近い地点を標定する場合、Deviationは大きくなる。このことから、Deviationが大きいと落雷位置計算しても誤差が大きいことから出力しない設定としている。その基準をMaximum Deviation Span (MDS)と定義し、Blitzortungでは15kmとしている。さらに、標定に用いる受信局のすべてが、標定点から見た方位角の範囲が90度以内に偏っている場合は、誤差が大きくなるため除外した。これをMaximum Cycle Gap (MCG)と定義し、360度-90度=270度を上限とし、それ以上の場合には標定計算を出力しない。

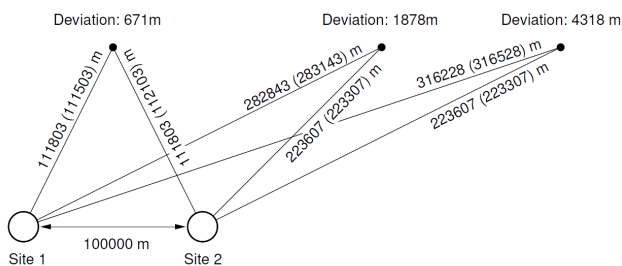


図1. 受信局位置と落雷点の位置関係による偏差

Fig.1. The deviations for an accuracy of $\pm 1\mu$ s for different cut angles

〈2・2〉 システムの構成 装置は磁界アンテナ・アンプ、電界アンテナ・アンプ、GPS, GLONASS⁽¹³⁾およびコントローラで構成される。磁界アンテナと電界アンテナを用いて、雷放電により発生したVLF帯の電磁波の磁界成分と電界成分を受信する。その大きさがしきい値を超えるとトリガがかかり、時刻と受信局の座標、波形が記録される。なお、受信局の周囲環境により、バックグラウンドノイズが異なるため、そのレベルに応じてトリガーレベルを自動的に変更している。それらのデータがUDP方式でサーバに送信され、6局以上で雷放電波形が観測されると、誤差が最小になるように統計的に処理され、雷放電の位置が計算される。その雷放電位置は、ほぼリアルタイムで表示される。なお、距離の計算は球面座標を使用する。また、受信局の時刻の同期はGPS, GLONASSを用いている。

表2にシステムのスペックを示す。標定方式は、到来時間差方式である。GPS, GLONASSについては、Global Top PA6H GPSモジュールを用いて、1PPSの信号を出力する。同期精度は、平均10nsが得られる。磁界アンテナは、全方向からの雷放電電波を受信出来るように東西方位および南北方向に約20cmの長さのフェライトアンテナを2本、大地に対して平行に設置している。電界アンテナは大地に対して垂直方向に設置し、電界の垂直成分を検出する。

また、アナログデジタル変換のサンプリング周波数は525kHzである。なお、Blitzortungのシステムは、旧バージョンであるRed-Systemと現行バージョンであるBlue-Systemが混在している。Blitzortungからプリント基板や基本となる電子部品を購入し、GPSアンテナその他のパーツは、ユーザーが別途購入し、自ら組み立てる仕組みである。心臓部であるCPUおよびA/D変換は汎用品であるARMチップを用いている。このチップは、168MHzのクロック周波数で動作し、12bitのA/D変換器を持ち、最大1000ksps(1 μ sのサンプリングが可能)の性能がある。

表2. システムのスペック

Table 2. System specifications

Calculation method	Time of arrival
GPS&GLONASS (Time)	10ns
Antenna	Magnetic Field Antenna (East-West) Magnetic Field Antenna (South-North) Electric Field Antenna (Vertical antenna)
Sampling rate	525kHz
Observation frequency	1-50kHz (Magnetic Field) 5-50kHz (Electric Field)

現行バージョンである Blue-System は, Red-System と比較して, 表面実装部品 SMD (Surface Mount Device) の小型化が図られており, 組み立て易く設置しやすい特徴がある. なお, 大きさは, 13cm×14cm であり小型・軽量である. また, 消費電力は 5W 程度である.

〈2・3〉 アンプの周波数特性 図 2 に磁界アンプの周波数特性を示す. 磁界アンプには 1kHz のハイパスフィルタと 50kHz のローパスフィルタがあり, 1kHz~50kHz まで-3dB を下回ることなく, ほぼフラットな周波数特性を示している. 電界アンプには 5kHz のハイパスフィルタと 18kHz, 44kHz および 50kHz のローパスフィルタがあり, 5kHz~50kHz の帯域の受信が可能である.

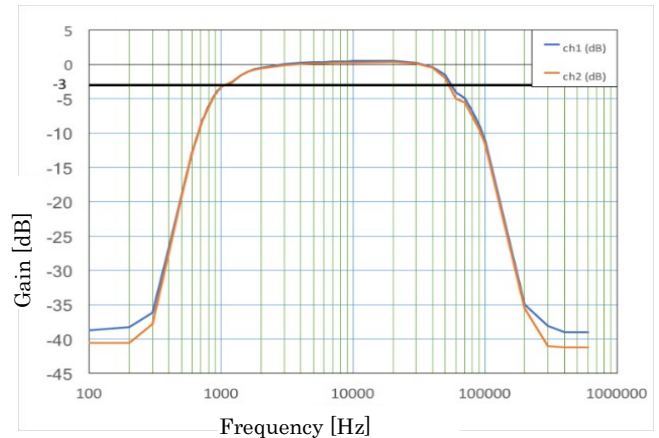


図 2. 磁界アンプの周波数特性

〈2・4〉 アンプの入出力特性 図 3 に磁界アンプの入出力特性を示す. 入力波形の波頭長と出力波形の波頭長は直線性の関係があり, 入力波形の波頭長が 9μs 以上となると, 入力波頭長と出力波頭長が等しくなるため, 9μs 以上であれば正しい雷放電到来時間が記録できる. 一般に帰還雷撃に伴う電磁波パルスの波頭長は概ね 1μs から 4μs であることから, このアンプを適用すると, 2μs から 1.5μs 程度遅れることが推定される. ただし, 到来時間差方式では, 各受信局の受信時間の差から双曲線を描き交点を標定点としているため, 9μs 以下であっても全ての受信局が同様に遅れた時間を記録するため, 到来時間差方式を用いた位置標定計算には, 影響が少ないと推定される.

Fig.2. Frequency characteristics of magnetic field amplifier

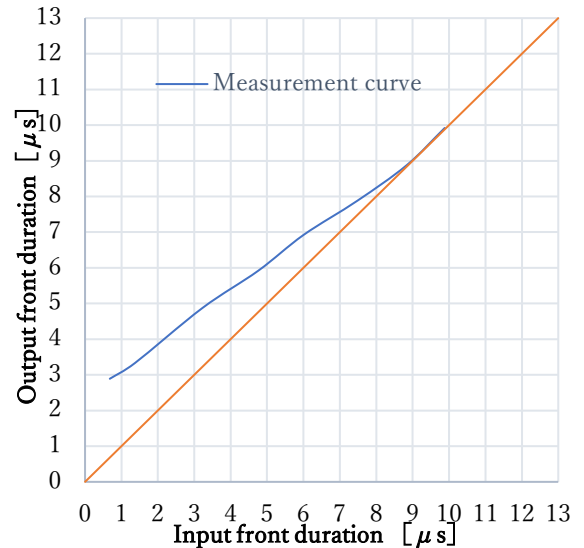


図 3. 磁界アンプの入出力特性

Fig.3. I/O-characteristics of magnetic field amplifier

〈2・5〉 受信局のデッドタイム 雷放電位置標定システムでは多重雷を Flash として捉えるか Stroke として捉えるかによって標定数が変化する. なお, Flash は多重雷全体を一つの落雷として数え, Stroke は多重雷を一つ一つの落雷として数えることである. Blitzortung がどの程度 Stroke を標定することが出来るのかを評価するため, パルス間隔をパラメータとして, 磁界アンプへの入力数とサーバへの出力数の比率を求め, データの取り逃しが発生する時間, つまりデッドタイムを求めた. 具体的には, 100mV のパルス波を磁界アンプに入力し, 入力数を 10 回として, パルス間隔時間を 1ms から 20ms まで 1ms 毎に変化させて, サーバへの送信数をカウントした. 検証結果を図 4 に示す. 横軸をパルス間隔時間とし, 縦軸を出力数と入力数の比とした. 入力と出力の比が 1 になる場合が Dead Time の閾値であり, Blue-System は 8ms, Red System は 14ms であった. 文献(14)(15)によると, 多重雷は主に 30~80ms 間隔で発生する. また, その中央値は, 51ms~90ms であり, 14ms のデッドタイムは 90%以上捕捉することが可能である. 従って, Blitzortung は多重雷を概ね捉え, Stroke 単位での標定が可能であると判断できる.

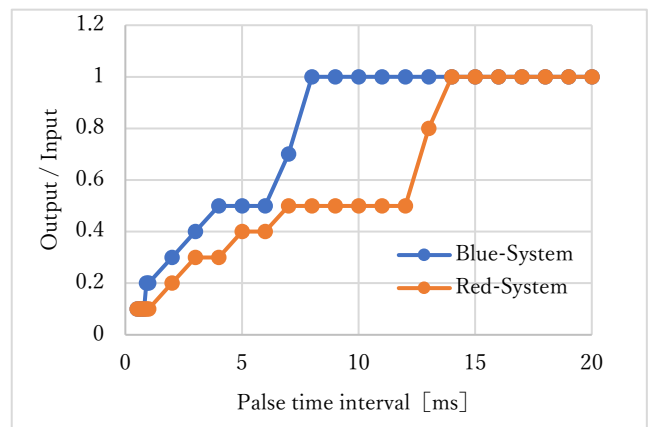


図 4 Blitzortung のデッドタイム

Fig.4 Blitzortung Dead Time

以上のアンプ、アンテナ、コントローラなどを組み合わせ、全体を防水ボックスに入れ、大学の屋上などに設置した。なお、電源は、5V、1A程度のUSB電源を用い、装置をインターネットに接続した。図5に2019年時点での日本国内のBlitzortung受信局の配置図を示す。赤丸が受信局であり、北は北海道、南は沖縄まで、また小笠原の父島にも受信局を配置して、合計50局を用いて日本各地で発生する落雷に伴う電波を捉える。

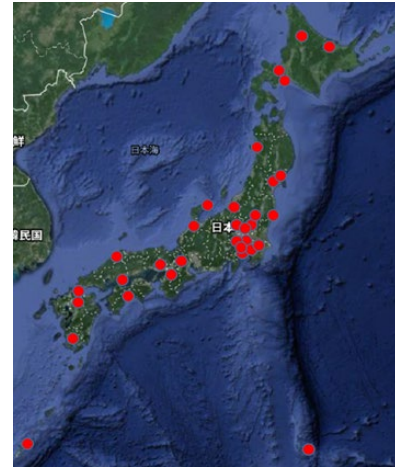


図5. 日本のBlitzortung受信局位置(2019年)

Fig.5. Distribution map of receiving stations in Japan (2019)

3. 標定率の検証

Blitzortungの位置標定精度を評価するためには、落雷の時間と場所を正確に把握する必要がある。しかし、現実的には困難であることから、電力会社の送電線の雷事故データを用いて評価した。送電線の雷事故点を落雷時間と落雷位置としてBlitzortungの雷放電時間・位置と比較検討した。

〈3・1〉 比較データ 2019年に発生した関東地方の66kV～500kV送電線の雷事故のうち、LF帯を用いた雷放電位置標定システムLLSと一致した91事例のデータを比較対象とした。対象エリアは、緯度:34.68°～37.15°、経度:138.3°～141.0°の四角の内側のエリアを対象とした。この範囲を図6に示す。また、照合する際の一致の条件は、LLSとBlitzortungの時間差が100μs以内、なおかつLLSとBlitzortungの距離差が20km以内とした。

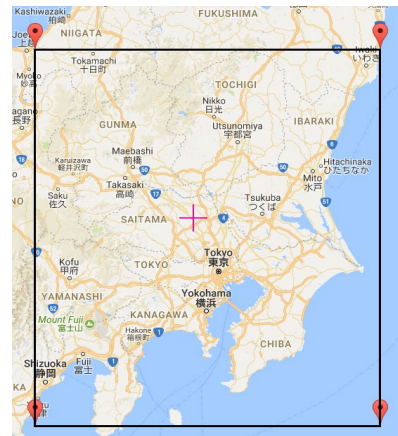


図6 精度検証に使用したエリア

Fig. 6. Area used for accuracy verification

〈3・2〉 位置精度評価 91事例に対して、Blitzortungが標定したのは、80事例(約88%)であった。標定出来なかった11事例については、6局同時の条件を4局同時に変更して再計算した結果、さらに4事例の標定が出来た。従って、91事例に対して84事例(92%)が標定出来た。

図7にLLSを中心(基準)としてBlitzortungの標定位置をプロットしたものを示す。80データの中央値は1.7kmであった。また、プロットは東側に偏っている傾向があった。この主な要因は、関東平野への落雷に伴う電磁波が脊梁山脈を越える際に地表波が山脈に沿って伝搬することから時間遅れが発生することによるものと推定される。さらに、図8に距離を横軸にした距離分布を示す。概ね1kmから3kmに分布している。

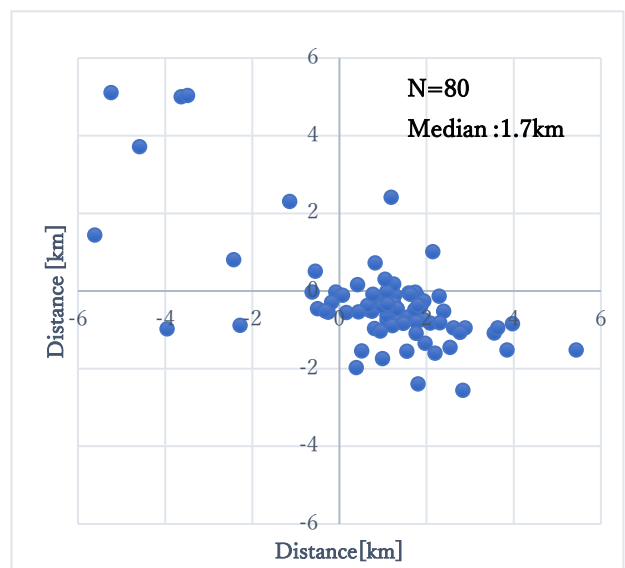


図7 LLSを基準としたBlitzortungの分布(N=80)

Fig. 7. Distribution of Blitzortung based on LLS (N=80)

表3に送電線の雷事故データとBlitzortungを比較した結果を示す。91件の雷事故に対して、Blitzortungで標定したデータは80件つまり88%標定可能であった。その際の位置標定の中央値は1.7kmであった。

〈3.3〉 電流値評価 LLS で標定した 91 件についてその推定電流値の分布を図 9 に示す。電流値が 50kA 以上では Blitzortung で全て標定している。

Blitzortung で標定できた場合の平均電流値は 37kA であった。一方で標定できなかった場合の平均電流値は 23kA であった。従って、Blitzortung 標定は電流値が小さいと標定できないケースもあると考えられるものの、ほぼ LLS と同様に標定が可能である。

なお、送電線は、落雷の電流値が概ね 30kA 以上で雷事故が発生することから、LLS の推定した電流値に課題があると推定される。

表 3 送電事故データに対する Blitzortung の標定率

Table 3. Blitzortung's standardization rate for transmission fault data

Number of Faults	91
Blitzortung	80
Coverage Rate	88[%]
Median distance	1.7[km]

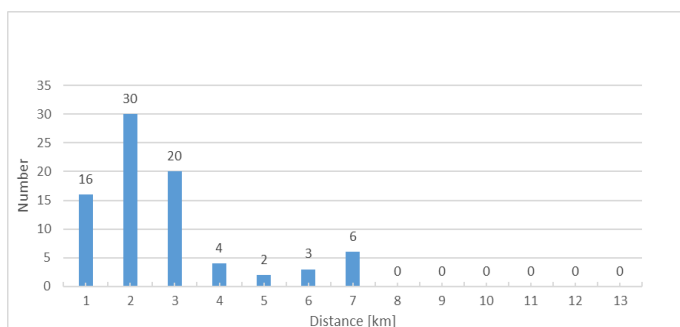


図 8 LLS の落雷位置を基準とした Blitzortung の距離分布

Fig. 8. Blitzortung distance distribution based on LLS lightning strike location

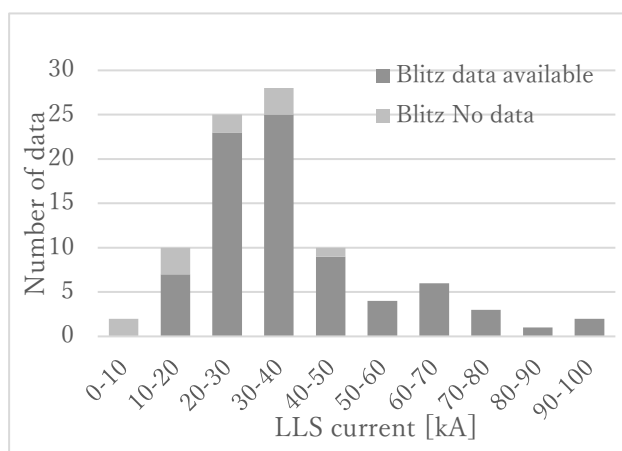


図 9 LLS の推定電流値分布

Fig. 9. Estimated current value distribution of LLS

4. まとめ

高度情報化社会は雷に対して脆弱である。そのため、落雷による停電や機器の破損を防ぎ、社会インフラのネットワークを支えている電子機器の安定運用および落雷からの人命保護のため、落雷に関する情報が必要となる。しかし、落雷に関するデータは入手することは困難である。これらを解決するために Blitzortung システムを日本に導入した。

Blitzortung システムは小型で安易なセンサを用いて高精度の雷放電位置標定を行う装置であり、湘南工科大学ではこのシステムを日本で初めて導入し、2023 年 12 月現在で全国、アジアに受信局を計 80 局設置することで全国展開を実施した。これにより、落雷に関する様々なデータを無料で取得することが可能となった。また、VLF 帯の電磁波は日本、東南アジア、オーストラリアなど遠方まで電磁波が伝搬するという特徴があるため、広範囲にわたっての位置標定が可能となった。

本研究では、Blitzortung で標定された落雷データを評価するため、2019 年の送電線雷事故のうち LLS と一致した 91 件データと Blitzortung のデータを比較した。その結果、標定率は 88%、位置精度の中央値は 1.7km であった。また、再標定により標定率は 92%まで向上することが分かった。

商用システムで一般に無料で公開されている情報は、10～20 分間隔で落雷状況を画像で表示するが、Blitzortung は無料かつリアルタイムで落雷分布図の拡大縮小ができるため、送電線の雷事故巡視の参考情報になると思われる。

今後は、落雷標定精度向上や電流値を推定するなどを検討する。

文 献

- (1) <https://www.franklinjapan.jp/> Accessed Dec. 24, (2023)
- (2) M.Ishii, M.Saito, M. Fujii, J.Hojo, M.Matsui, N.Itamoto, K.Shinjo, "LEMP from lightning discharges observed by JLDN. *IEEJ Transaction on PE* No.125(8), pp.765-770, (2005)
- (3) K.L.Cummins, M.J.Murphy, E.A.Bardo, W.L.Hiscox, R.B.Pyle, and A.E.anpifer: "A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S.National Lightning Detection Network", *J.Geophys. Res.*,103(D8), pp.9035-9044, (1998)
- (4) E. Zaima, A. Mochizuki, N. Fukiyama, H. Hojo and M. Ishii: "Observation of Lightning by Time-of-arrival type Lightning Location System (LPATS)", *IEE of Japan Trans. Power & Energy*, Vol.116, No.9, pp.1033-1038, (1996) (in Japanese)
財満英一, 望月東, 吹山直樹, 北条準一, 石井勝:「到来時間差方式の雷放電位置標定システム (LPATS) による雷放電の観測」, 電気学会論文誌 B, 116 巻 9 号, (1996)
- (5) T.Shindo, S.Yokoyama, "Lightning occurrence data observed with lighting location systems in Japan:1992-1995", *IEEE transactions on Power Delivery* No.13(4), pp.1468-1474, (1998)
- (6) T. Narita, T. Shioda, E. Zaima, and M. Ishii: "Performance Evaluation of LPATS-T at TEPCO", *IEE of Japan Trans. Power & Energy*, Vol.134, No.5, pp.450-455, (2014) (in Japanese)
成田知巳, 塩田徹, 財満英一, 石井勝, 「雷放電位置標定装置(LPATS-T)のパフォーマンス評価」, 電気学会論文誌 B, Vol.134, No.5,

- pp.450-455, (2014)
- (7) 笠原真吾, 「雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法」, 測候時報, 78 巻, pp.95-140,(2011). (in Japanese)
 - (8) C. J. Rodger, S. Werner, J. B. Brundell, E. H. Lay, N. R. Thomson, R. H. Holzworth, and R. L. Dowden: "Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN) : initial case study", *Ann. Geophys.*, 24, pp.3197-3214, (2006)
 - (9) Narita, T.; Wanke, E.; Sato, M.; Sakanoi, T.; Kumada, A.; Kamogawa, M.; Ishikawa, H.; Harada, S.; Kameda, T.; Tsuchiya, F.; et al. A Study of Lightning Location System (Blitz) Based on VLF Sferics. *In Proceedings of the 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Rzeszow, Poland, 2-7 September (2018)
 - (10) R.L. Dowden and J.B. Brundell and C.J. Rodger. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*,64(7):817-830, (2002)
 - (11) W.J. Koshak and R.J. Solakiewicz. TOA Lightning Location Retrieval on Spherical and Oblate Spheroidal Earth Geometries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(2):187-199, (2001)
 - (12) H.D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche (Eds.) *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. Springer Verlag, 2009.
 - (13) <https://www.glonass-iac.ru/en/> Accessed Dec.24, (2023)
 - (14) Thomson, E.M, The Dependence of Lightning Return Stroke Characteristics on Latitude. *J. Geophys. Res.*, 85 pp.1050-1056, (1980).
 - (15) Thomson, E.M., M.A.Galib, M.A.Uman, W.H.Beasley, and M.J.Master, Some Features of Stroke Occurrence in Florida Lightning Flashes, *J.Geophys. Res.*,89, pp.4910-4916, (1984)