

極超長波の空電観測による落雷の電荷量推定に関する研究

成田 知巳*

Estimation of lightning charges by ELF network observations

Tomomi NARITA

Abstract:

Cloud-to-ground strokes with a large charge transfer are known to damage the overhead ground wire in various locations in Japan. Despite requirement to identify promptly the possible damages after lightning strokes, the remote estimation of the charge amount lowers to the ground is technically difficult in general. Recently Extremely Low Frequency (ELF) radiations associated with intensive lightning strokes have been used as one of the effective tools to estimate lightning charge moment and transfer even 1000 km away from the lightning location. In this paper we focus on the two lightning strokes with damages in the overhead wire identified by Lightning Location System (LLS) operated by Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Amount of charge transfers for these two events were derived by the continuous ELF transient measurement in Moshiri Hokkaido operated by The University of Electro-Communications (UEC). The estimated charge transfer values were compared with those estimated from the condition of melting overhead wires. The amount of charge transfer from ELF measurement for the two lightning strokes were 350 C and 320 C, while relevant charge transfer values estimated from melting wires were 256 C and 162 C respectively. The ratio of lightning charge transfer values estimated from the melted condition of overhead wire to ELF transient was ranging from 0.5 to 0.7. Therefore we conclude that estimating the charge transfer value for intensive lightning by using ELF transient technique is an effective tool to identify and estimate the possible damages of overhead group wires remotely.

KEY WORDS : LLS, ELF, Charge Moment Change, Overhead Ground Wire, Lightning current

要旨:

大電荷量を伴う落雷によるものと推定される架空地線の溶損被害が発生している。耐雷性能を強化した架空地線に張替え中であるが、現状では従来型は数千kmも導入されているため設備の更新に長期間を要することから、被雷後の巡視点検と改修要否判断の効率化のために落雷の電荷量の推定手法が重要となる。落雷の電荷量を推定する手法には、静電界の変化による電荷量の推定手法があるが、数10 km程度までしかできないという欠点がある。一方、地球物理学の分野において注目されている電荷モーメントの手法は、長距離伝搬にて減衰の少ない極超長波(ELF)である3 Hz ~ 3 kHzの周波数帯の電磁放射波形を用いるため、一つの受信装置で送電線全体を把握できる可能性がある。論文では、本手法の電力分野への適用を検討した。具体的には66 kVや154 kV送電線に適用されている架空地線OPGW60 mm²が溶損した2事例について、溶損量から求めた電荷量と落雷点から約1000 km離れた北海道のELF受信装置で観測された対地雷に伴うELF帯電磁放射データから求めた電荷量を比較・検討した。

キーワード : LLS, ELF, 雷電荷量, 架空地線, 雷電流

1. はじめに

主に地方系送電線に使用されている架空地線には、AC70 mm²および中心に光ファイバを内蔵したOPGW60 mm²がある。OPGW60 mm²はAC 70 mm²よりも後発であることから、AC70 mm²で荷重設計

された鉄塔でも適用できるようにAC70 mm²と外径および重量がほぼ同一で設計されている。従って、中心部分に光ファイバ収納部があるため、より線1本1本の直径は、3.5mmから3.2mmと細くなっている。

近年、大電荷量を伴う落雷によるものと推定される架空地線の損傷が散見されている⁽¹⁾。このうち、素線の細い、OPGW60 mm²は、落雷によってまれに溶損などの被害が発生している。そこで、中心部分の

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 教授

光ファイバ収納部の断面積を小さくし、素線径を大きくすることにより耐雷性能を向上させた耐雷 OPGW 60 mm²を開発し、2014 年下期から現場適用を開始した⁽²⁾。しかし、現状では従来の OPGW60 mm²は数千 km も導入されているため設備の更新に長期間を要することから、被雷後の巡視点検と改修要否判断の効率化のために落雷の電荷量の推定手法が重要となる。

落雷の電荷量を推定する手法には、電流を時間積分して求めるのが基本であるが、現実的には困難であることから、電界から求める方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、数値電磁界解析から電荷量を求める手法⁽⁶⁾などが検討されている。しかし、落雷に伴う数百 kHz の電波を利用した電界観測では、遠方に伝搬するに従い、電界成分のうち誘導項が減衰し、2 回時間微分波形である放射項が卓越するため、時間変化が遅い波尾の長さの影響が大きい電荷量を推定出来るのは現実的には 20 km 程度までである。

一方、地球物理学の分野においては、近年落雷に伴う電荷モーメント（落雷電荷量と雷道の長さの積）が、大気中の大規模雷放電と、超高層、磁気圏への結合過程の観点から注目されている。特に、レッドスプライトと呼ばれる中間圏発光現象は、対流圏で発生する正極性の電荷モーメントの大きな落雷から多数発生する事が明らかとなっており、日本の北陸冬季雷においても多数観測されている⁽⁷⁾。電荷モーメントの導出方法として、対地放電に伴う空電のうち、長距離伝搬にて減衰の少ない極超長波（ELF）である 3 Hz ~ 3 kHz の周波数帯の電磁放射波形(ELF 帯トランジェント)を用いる手法が注目されている⁽⁸⁾。この手法の応用例として、全球の大規模落雷分布の導出が行われてきた^{(9)~(12)}。しかしながら、波動インピーダンスを用いたこの方法では、落雷位置標定精度が 500 km 程度である。そこで、より詳細な空間である大陸、国内規模（数千 km）の落雷および対応する電荷モーメントの時間空間分布の導出においては国内規模の ELF 帯の複数観測点（ネットワーク観測）から交会法を用いたり⁽⁸⁾、落雷位置情報を別の観測にて取得し ELF 観測と併用する事で落雷位置標定精度の向上を図った上で、電荷モーメントの導出が試みられている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。本論文では、上記手法の電力分野への適用を検討した。具体的には 66 kV や 154 kV 送電線に適用されている架空地線 OPGW60 mm² が溶損した 2 事例について、溶損量から求めた電荷量と落雷点から約 1000 km 離れた北海道の ELF 受信装置で観測された対地雷に伴う ELF 帯電磁放射データから求めた電荷量を比較・検討したので報告する。

2. 架空地線溶損事例

2006 年 12 月 27 日 1 時 52 分 59 秒に栃木県内にある 66kV の A 送電線において、落雷により 1 線地絡が発生した。巡視した結果、架空地線 OPGW60 mm²の素線が落雷により溶損した。Fig.1 に素線切れした架空地線を示す。これを事例 1 とする。

2007 年 7 月 30 日 9 時 49 分 18 秒に群馬県内にある 66kV の B 送電線において、送電線の電気事故は発生せず、架空地線の中心部にある光通信回線の障害が発生した。これは、落雷の電流波高値が小さく、継続時間が長く電荷量の大きい雷であったと推定される。巡視した結果、架空地線 OPGW60 mm²の素線が落雷により溶損した。これを事例 2 とする。

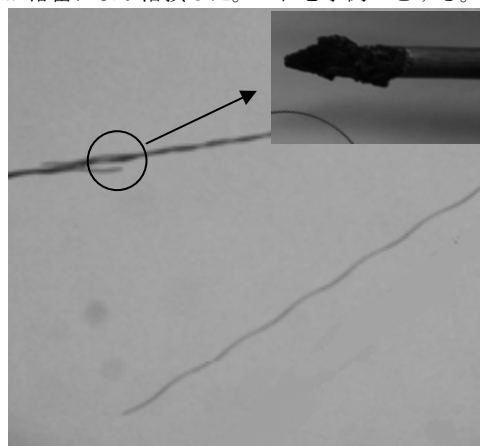
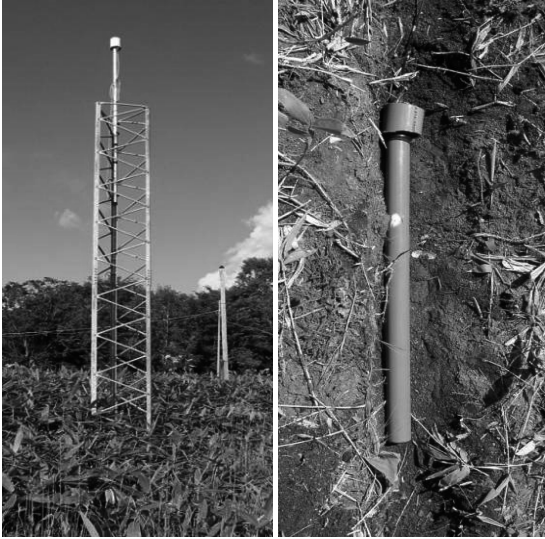


Fig.1. Sample of the melted OPGW60 mm²

Table.1. Overview of observation (at Moshiri Hokkaido)

Geographic coordinates	Latitude	44.29°
	Longitude	142.21°
Waveform observation	Vertical electric field component	
	Horizontally magnetic field component (West-East)	
	Horizontally magnetic field component (North-South)	
Sampling rate	4000 Hz	
Observation frequency	0.1 - 1000 Hz	



Electric field antenna Magnetic field antenna
Fig.2. Electric and magnetic antenna

3. ELFと溶損との比較

〈3・1〉ELF帯電磁波観測システムの概要 電気通信大学では、1996年から北海道雨竜郡母子里にある名古屋大学太陽地球環境研究所敷地内において、ELF帯の水平磁界および垂直電界の受信装置を設置している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。受信周波数は1kHz以下、サンプリング周波数4kHzにて連続波形観測を実施しており、アンテナはELF帯電磁波3成分(垂直電界1成分、水平磁界2成分)で構成されている。主な観測装置の諸元をTable.1に示す。なお、絶対時刻はGPS受信機を用いて記録している。また本研究で用いられている、電界および磁界アンテナの外観写真をFig.2に示す⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。周辺の電磁環境に大きく影響を受けるため、なるべくノイズの少ない環境を選んで設置している。また、磁界アンテナはノイズの影響を最小限にするため、地下約20cmに埋めてある。

〈3・2〉電荷モーメントによる電荷量の推定原理 ELF帯電磁放射データからの電荷モーメントの導出方法は、文献(12)の手法を用いた。まず、大地と電離層を球殻状の導波管と仮定し、その中を伝搬するELF帯電磁波は、モード理論により記述され、対地雷に伴うELF帯放射の周波数領域における電流モーメント $I(\theta)ds$ は、(1)式のように与えられる。

$$I(f)ds = -H_{\phi}(f) \frac{4ah \sin(\pi v)}{P^1_v (-\cos \theta)} \dots (1)$$

ここで、 $H_{\phi}(\theta)$: 観測される対地雷起源のELF帯電磁波の磁場(振幅スペクトル)、 a : 地球の半径(6.37×10^6 m)、 h : 電離層高度(80 km)、 v : 伝搬定数、 P : ルジャンドル陪関数、 θ : 受信点から空電源までの角距離である。

次に、電流モーメントから電荷モーメントを導出する。落雷の電流モーメントが時間領域において(2)式のように指数関数的なふるまいをすると仮定し複素フーリエ変換を行い、 $Iodts=A$ として変形すると以下の式が得られる。

$$I(t)ds = I_0 ds e^{-t/\tau} \dots (2)$$

$$|I(f)ds|^2 = \frac{A^2}{(2\pi f)^2 + \left(\frac{1}{\tau}\right)^2}$$

$$\frac{1}{|I(f)ds|^2} = \left(\frac{2\pi}{A}\right)^2 f^2 + \left(\frac{1}{A\tau}\right)^2 \dots (3)$$

(3)式を $y=mx+b$ の一次関数とみなすと、この直線の切片を求めることで時定数 τ を導出し、電荷モーメント Qds を導出することが可能となる。

$$Qds = A\tau = Iodst \tau \dots (4)$$

以上から磁界の測定により雷電荷モーメントが算出可能である。次にELF帯から推定されるのは雷電荷モーメントの値であるため、電荷量を求めるには雷道の長さが必要となる。なお、本論文では雷道の長さは推定が難しいため、電荷の中心位置とされる上空マイナス10℃の高度とし、夏季5km、冬季2kmと仮定した⁽¹⁷⁾。

〈3・3〉溶損量による電荷量の推定 落雷電流による電力線や架空地線の溶損については、電力中央研究所で落雷を模擬した直流アーク試験により、印加電荷量と電線の溶損量の関係式が実験的に求められている。直流アーク試験から求めた電荷量と溶損量の以下の関係式⁽¹⁵⁾から電荷量を推定した。なお、溶損量については、写真を用いて1mm単位で溶損の範囲を測定して算出した。

$$W=0.017Q-1.0 \dots (5)$$

ここで、 Q : 電荷量 [C]、 W : 溶損量 [g]

〈3・4〉電荷量の比較 架空地線が溶損した 2 事例について、溶損量から求めた電荷量と ELF 帯観測から求めた電荷量と比較した。解析手法は、まず、東京電力の落雷位置標定装置 LLS⁽¹⁶⁾による落雷時刻と ELF 帯トランジェントの時刻との差が 10 ms より小さいイベントを抽出し、さらに、LLS による落雷位置と ELF トランジェントのそれぞれから導出された二つの到来角の差が、10 度以内のイベントを同一の現象とした。次に、同定された落雷イベントについて〈3・2〉の手法により電荷モーメント Qds を算出し、雷道の長さ ds で除して電荷量 Q を求めた。

〈3・4・1〉照合事例 1

事例 1 については、東京電力の落雷位置標定装置 LLS では、日本時間 1 時 52 分 59.8556 秒に標定された。これに対して ELF では、1 時 52 分 59.8595 秒に受信している。この時間差は、+0.0039 秒であり、落雷点のあった栃木県と北海道受信局間の距離は約 870 km である。ここで、電磁波の伝搬速度を光速と仮定し、直線距離を光速で除すると伝搬時間は、+0.0029 秒であり、実際に観測された伝搬時間とほぼ一致している。

Fig.3 に ELF 帯トランジェントの一例の垂直電界波形を示す。また、Fig.4 と Fig.5 に、同イベントの磁界波形の南北方向及び東西方向成分を示す。横軸はいずれも 1 目盛り 0.040 秒であり、波形ピークの 0.0038 秒前に記入した縦線は LLS の標定時刻を示している。なお、Table.2 は日本時間、Fig.5,6,7 は世界標準時間で表示している。また、Fig.6 に受信局の東西及び南北の磁界強度成分から求めた電波の到来方向を矢印で示す。さらに、Fig.7 に落雷点と受信局の位置関係を示す。Fig.7 の矢印は、Fig.6 で求めた電波の到来方向である。LLS 落雷地点に近い位置関係にある。

溶損量から求めた電荷量 350 C に対して ELF トランジェントから求めた電荷量はその 7 割程度の 256 C となっている。

また、LLS では +50 kA の電流波高値を推定したことから、継続時間の長い放電による連続電流によって溶損したものと推定される。通常の夏季雷の電荷量は数 C であるが、今回、架空地線が溶損するような大きな電荷量を持つ落雷を推定できたことから ELF による電荷量の推定手法は、LLS との組み合わせにより架空地線の溶損推定に有効である可能性が確認された。

〈3・4・2〉照合事例 2

事例 2 については、落雷位置標定装置 LLS では、

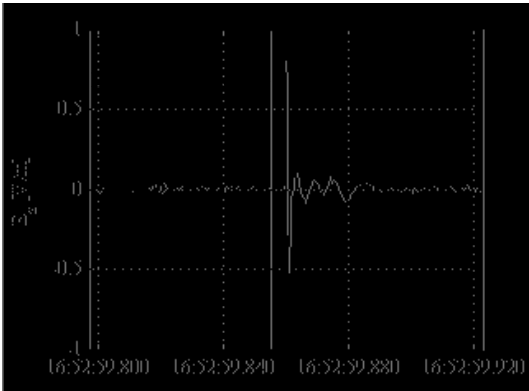
09 時 49 分 18.6220 秒に標定された。これに対して ELF では、09 時 49 分 18.6270 秒に受信している。この時間差は、+0.0050 秒であり、落雷点のあった群馬県と北海道受信局の距離は約 920 km であるので電波の伝搬時間とほぼ一致している。

Fig.8 に電界波形を、Fig.9 に磁界波形（南北方向）を、Fig.10 に磁界波形（東西方向）を示す。横軸はいずれも 1 目盛り 40 ms であり、波形ピークの 5.0 ms 前に記入した縦線は LLS の標定時刻を示している。なお、Table.2 は日本時間、Fig.8, 9, 10 は世界標準時間で表示している。また、Fig.11 に受信局の東西及び南北の磁界強度成分から求めた電波の到来方向を矢印で示す。さらに、Fig.12 に落雷点と受信局の位置関係を示す。Fig.12 の矢印は、Fig.11 で求めた電波の到来方向である。LLS 落雷地点に近い位置関係にある。

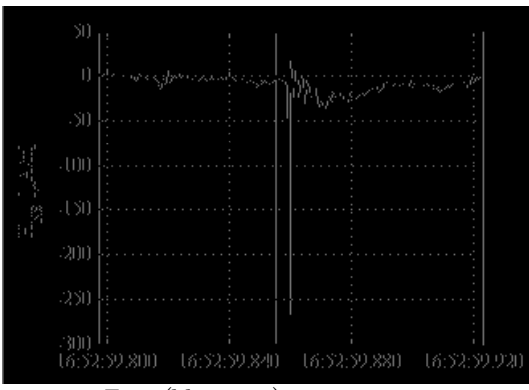
直流アーク試験から求めた、電荷量と溶損量の関係式(16)から電荷量を推定し、その値と ELF から電荷量を求めた結果、溶損量から求めた電荷量は 320 C、ELF から求めた電荷量は 162 C となった。主な誤差要因として雷道の長さが考えられるが、十分に実用に耐えうる。また、LLS では +20 kA と小さめの電流波高値を推定したことから、照合事例 1 と同様に、連続電流によって溶損したものと推定される。なお、本事例は、電流波高値が小さいため、送電線の電気事故は発生していない。この事例では雷による電気事故が発生しない場合においても設備損傷リスクのある落雷を判定できる可能性を示した。

〈3・5〉評価 電荷溶損量から推定した雷電荷量に対して、ELF 帯磁界から推定した電荷量は、0.5～0.7 倍であった。

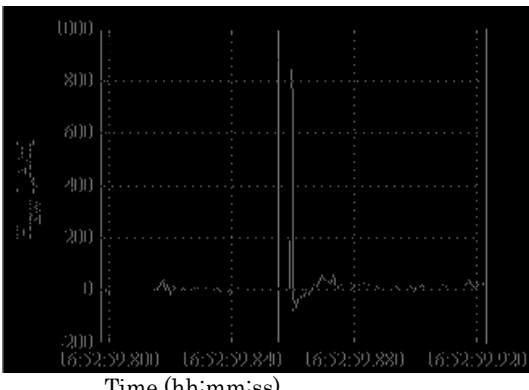
また、落雷位置標定装置 LLS と ELF の時間差は、0.0039 秒～0.0050 秒であった。落雷点と北海道受信局間の直線距離を光速で除すると伝搬時間は 0.0029～0.0031 秒であった。電荷量および時間差の誤差要因は、電離層の高さが季節や時間によって変化すること、実際の雷道は傾きがあること、大地の導電率、地形などの影響と推定される。



Time (hh:mm:ss)
Fig.3. Vertical electric field waveforms (UT)



Time (hh:mm:ss)
Fig.4. Horizontally magnetic field waveforms (North-South component) (UT)



Time (hh:mm:ss)
Fig.5. Horizontally magnetic field waveforms (East-West component)(UT)

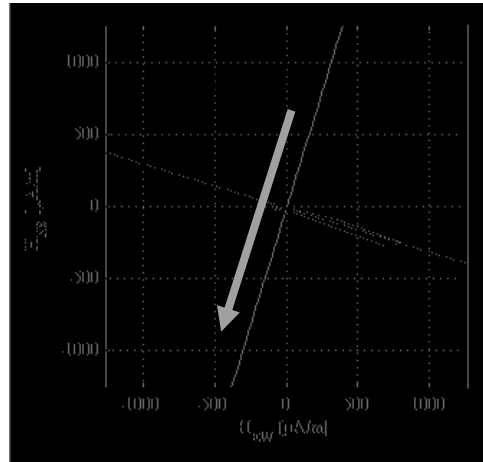


Fig.6. Magnetic hodogram of the ELF transient originated from the same lightning source

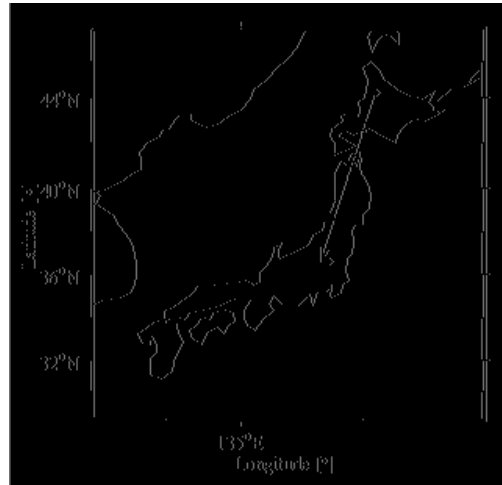


Fig.7. Lightning location of event No. 1 by LLS and arrival direction of ELF transient observed at Moshiri

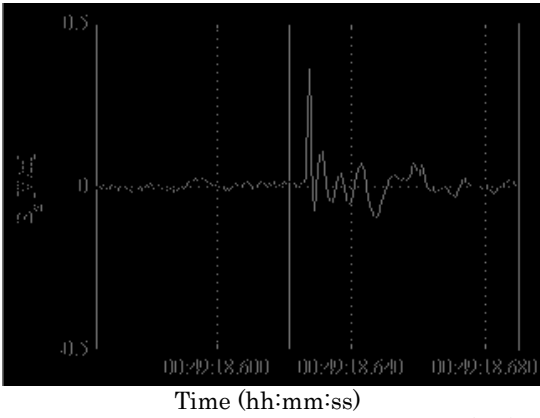


Fig.8. Vertical electric field waveforms (UT)

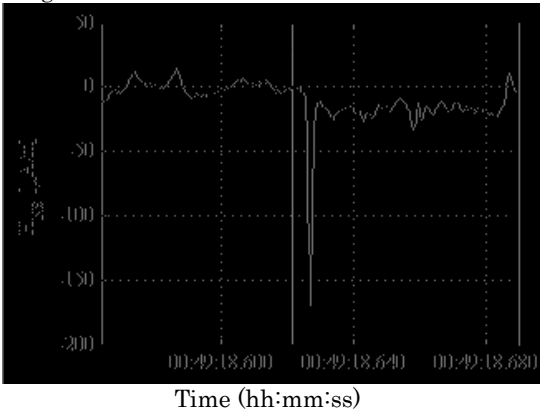


Fig.9 Horizontally magnetic field waveforms (North-South component) (UT)

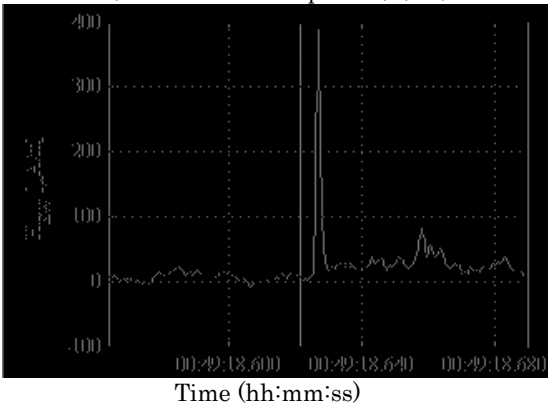


Fig.10. Horizontally magnetic field waveforms (East-West component)(UT)

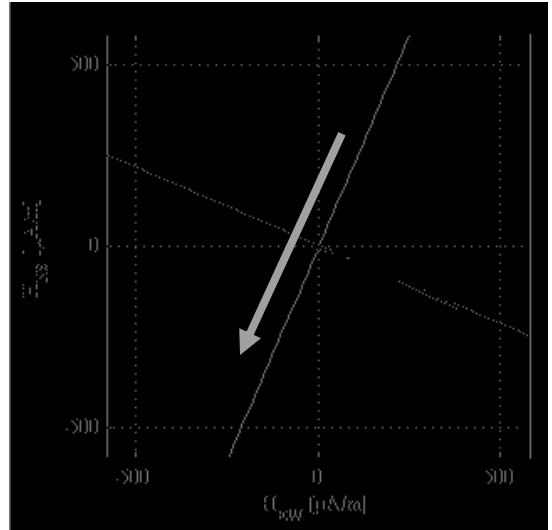


Fig.11. Magnetic hodogram of the ELF transient originated from the same lightning source

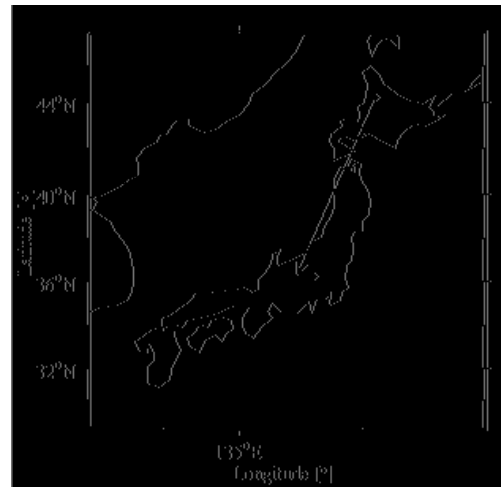


Fig.12. Lightning location of event No. 2 by LLS and arrival direction of ELF transient observed at Moshiri

Table.2. Relationship the charges melted wires and the charges by ELF

N o.	Transmission line	Charges from melted wire	LLS		ELF		Time-lag [s]	C(ELF) / C(melted wires)
			Time (JST) (hh:mm:ss)	Peak Current	Time (JST) (hh:mm:ss)	Charges		
1	66kV A-line	350 C	2006.12.27 01:52:59.85 56	+50kA	2006.12.27 01:52:59.859 5	511 Ckm /2 km= 256 C	+0.003 9	0.73
2	66kV B-line	320 C	2007.7.30 09:49:18.62 20	+20kA	2007.7.30 09:49:18.627 0	809 Ckm /5 km= 162 C	+0.005 0	0.51

文 献

4. まとめ

大電荷量を伴う落雷による架空地線の溶損事例について、ELF帯トランジェントの磁界観測から電荷量を推定した。その結果、Table.2に示すとおり、溶損量から推定した電荷量の0.5~0.7倍の精度で求められることを確認した。以上からELFによる電荷量の推定手法は、LLSとの組み合わせにより架空地線の溶損推定に有効である可能性が確認された。

主な結果を次に示す。

(1)実際の落雷によって溶損した2事例の架空地線とELFの観測結果を比較し雷電荷量の推定の可能性を示した。

(2)溶損量から推定した雷電荷量に対して、ELF帯磁界から推定した電荷量は、0.5~0.7倍であった。誤差の主原因としては溶損量から推定された電荷量のばらつき、電離層の高さが季節や時間によって変化すること、実際の雷道は傾きがあること、大地の導電率、地形などの影響などが考えられる。

今後は、更に事例を積み重ねて精度の検証及び向上、設備管理への活用方法について検討を進めていきたい。

(1)T. Narita, H. Ohta, E. Zaima, M. Ishii : " Case Study on Double - Circuit Lightning Faust of UHV Transmission Line", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.133, No.8, pp.685-689 (2013) (in Japanese)

(2)H. Yamaguchi, F. Minoura, A. Matsumoto, T. Narita, H. Ohta, T. Ohtaka, M. Iwata, Y. Goda, K. Nagano, T. Tsuji, T. Ogawa, M. Watabe, "Development of Lightning-resistant Composite Fiber Optic Overhead Ground Wire", 2015 National Convention Record, IEE Japan, No.7-084 (2015) (in Japanese)

(3)K. Michishita, S. Umehara, S. Kawamoto, K. Maeda : " Proposal of Simplified Method of Analysis of Charge Transfer Associated with Return Strokes", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.131, No.2, pp.238-239 (2011) (in Japanese)

(4)河本伸二, 「落雷の電荷量推定手法に関する研究」, エネルギー総研レビュー, No.21, pp.2-5(2010)

(5)R. Seki, K. Michishita, T. Nakamura, K. Makabe: "A Discussion of Estimation of Charge Transfer of Winter Lightning Stroke", 2015 National Convention Record, IEE Japan, No.7-097(2015) (in Japanese)

(6)M. Ishii, M. Saito, T.Miki, D.Tanaka, T. Shindo, A. Asakawa, H.Motoyama, Y. Suzuhigashi, H. Taguchi, "Observation of Lightning at Tokyo Skytree", 23rd International Lightning Detection Conference(ILDC)(2014)

(7)Y. Hobara, N. Iwasaki, T. Hayashida, M. Hayakawa, K. Ohta, and H. Fukunishi:"

- Interrelation between ELF Transients and Ionospheric Disturbances in Association with Sprites and Elves”, *Geophys. Res.Lett.*, Vol.28, pp.935-938(2001)
- (8)Y. Hobara, T. Inoue, M. Hayakawa, K. Shiokawa: “Deducing Locations and Charge Moment Changes of Lightning Discharges by ELF Network Observations in Japan”, *IEE Japan PE*, Vol.133, No.12, pp.994-1000(2013)
- (9)Y. Hobara, M. Hayakawa, E. Williams, R. Boldi and E. Downes, “Location and Electrical Properties of Sprite-producing Lightning from a Single ELF Site, in Sprites”, *Elves and Intense Lightning Discharges*. Ed. M. Fullekrug, E.A. Mareev and M.J. Rycroft, NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry 225, Springer, p.398, (2006).
- (10)Y. Hobara, N. Iwasaki, T. Hayashida, N. Tsuchiya, E. R. Williams, M. Sera, Y. Ikegami, and M. Hayakawa: “New ELF Observation Site in Moshiri, Hokkaido Japan, and the Results of Preliminary Data Analysis”, *J.Atmos. Electr.*, Vol.20, pp.99-109(2000)
- (11)Y. Ando, P. Maltsev, A. Sukhynyuk, T. Goto, T. Yamauchi, Y. Hobara, M. Sekiguchi, Y. Ikegami, M. Sera, V. Korepanov, and M. Hayakawa, “New ELF Observation System at Moshiri, Japan, and Assessments of Acquired Data,”*J. Atmos. Electr.*, 25, 29-39(2005)
- (12)E. Huang, E. Williams, R. Boldi, S. Heckman, W. Lyons, M. Taylor, T. Nelson, and C. Wong: “Criteria for Sprites and Elves Based on Schumann Resonance Observations”, *J.Geophys.Res.*, Vol.104(D14), pp.16,943-16,964, doi:10.1029/1999JD900139(1999)
- (13)S. A. Cummer, W. A. Lyons and M. A. Stenley, “Three Years of Lightning Impulse Charge Moment Change Measurements in the United States”, *J. Geophys. Res.*, Vol.118, pp.5176-5189, doi:10.1002/jgrd.50442(2013)
- (14)R. Nakamura, Y. Hobara, K. Shiokawa, and M.Hayakawa, “Deducing Locations and Charge Moment Changes of Lightning Discharges by ELF/LF”, *Japan Geoscience Union Meeting 2013, Makuhari, Japan(2013)*
- (15)K. Izumi, Y. Yamaguchi, Y. Kobarasawa, K. Kimura, “Performance for Short-Circuit Currents and D.C Arcs on Composite Fiber-Optic Overhead Ground Wires(OPGW)”, *CRIEPI Report*, 685514,(1986) (in Japanese)
- (16)K. Onozaki : “Lightning Observation System at TEPCO”, *Railway and Electrical Engineering*, Vol.14, No.8 , pp.9-13 (2003) (in Japanese)
- (17)N. Kitagawa, “Meteorological Aspects of Winter Thunderclouds Along the Japan Sea Coast”, *TENKI*, Vol.43, No.2, pp.7-17(1996) (in Japanese)