日本海側冬季雷雲下における地上電界極性の地域分布の推定

正員 櫻 野 仁 志 (石川高専)
 准員 松 原 亮 滋 (名古屋大)
 准員 村 下 直 久 (名古屋大)
 正員 鬼 頭 幸 生 (名古屋大)

1. ま え が き

電力供給に支障をきたす原因のうちでは、電力施設への雷害が大きな比率を占めるに至っている⁽¹⁾。雷雲の襲来時にどのような条件で対地雷放電が発生するかを予知できれば、この雷害を防止するという見地から極めて有効である。著者らによるロケット誘雷実験で経験されたことであるが、誘雷地点の地上電界が高くても必ずしも誘雷に成功するとは限らない。すなわち、雷雲の広がりおよびロケット発射地点と雷雲との相対位置などに依存して、誘雷の成否が左右されることが指摘されている⁽²⁾。このような結果から、自然に発生する雷放電についても、その周辺環境までを明らかにすることは重要と考えられる。

雷雲下の電界は、雷雲電荷の移動やそれに伴う空間電荷の発生状況により徐々に変化していく準静電界である。雷放電の開始については、雲側か地表側かにおいて電界の局部的ひずみが徐々に高まり、あるレベルを超えたときにリーダが誘発され、場合によっては大地への放電路が形成されると考えられる。衝撃性の電界が印加されて、大気の絶縁破壊が生じるのではない⁽³⁾。自然の雷放電の発生環境についての示唆を得る

一つの手段として、雷雲下における地上電界の地域分布を把握する必要があると考えた。本論分では、その第一段階として、我が国の日本海側沿岸に冬季に襲来する雷雲によってもたらされる地上電界の極性分布を対象として、その推定方法を取上げている。

多地点での電界観測の代表例としては、北陸地方日本海側に多数の回転セクタ形電界計を配置した航空関係の観測システムがあり、航空機の安全運航に指針を与えている。このほかにも、地上電界の多地点観測の有効性は多く指摘されている⁽⁴⁾。

著者らは、実際に針端コロナ電流測定装置⁽⁵⁾を使用して地上電界の多地点観測を行い、その結果から冬季雷雲下の地上電界極性の地域分布を推定できる方法を新たに考案した。更に、この方法によって得られた地上電界極性の地域分布とロケット誘雷の放電路とを関連づけて考察することによって、人為的な対地雷放電についてはあるが、雷放電の進展方向と発生環境との関連性を初めて指摘した。本推定法は、冬季に発生する自然の雷放電の発生環境に適用して特に有効であり、電力施設の雷害防止対策などを検討するうえで有用であると思われる。ただし、ここで述べようとしている方法は、雷雲内の電荷の状況が著しくは変化せず、ほぼ直進すると予想される範囲内で、適用が可能なものである。このような条件は冬季雷はほぼ満足しているが、激しい熱雷を主体とする夏季雷では吟味を要する。

著者らが使用した針端コロナ電流測定装置は極めて簡易で可動部分がなく、従って大きな電源を必要としないなどの特色をもつ反面、定量的な精度の点では若干劣る。ここでは、多地点観測の有効性を指摘することに主眼があり、回転セクタ形電界計のような高級な器具を多数そろえれば、更に定量的に良好な成果を得

Presumption of Regional Distribution of the Electric Field Polarity on the Ground Induced by Winter Thundercloud in Hokuriku District. By Hitoshi Sakurano, Member (Ishikawa College of Technology), Ryoji Matsubara, Associate, Naohisa Murashita, Associate & Yukio Kito, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).

櫻野仁志：正員，石川工業高等専門学校電気工学科

松原亮滋：准員，名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程
 (現在，日立電線(株))

村下直久：准員，名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程
 (現在，(株)高岳製作所)

鬼頭幸生：正員，名古屋大学工学部電気学科

るものと思われる。

以下、第2章では針端コロナ電流多地点観測の結果から雷雲の移動方向と移動速度を算出する方法について、第3章では地上電界極性の地域分布の推定結果について、第4章ではその地域分布とロケット誘雷放電路の関係について述べる。

2. 雷雲の移動方向と移動速度の算出

〈2・1〉 針端コロナ電流多地点観測 著者らは、昭和52年から石川県河北潟干拓地において、冬季雷を対象としたロケット誘雷実験に参加し⁽⁶⁾、そのなかで針端コロナ電流の多地点観測を分担してきた。観測期間は表1に示されるように毎年度11月下旬から約1箇月間である。観測方法および観測地点の配置については文献(2)に記述するところであるが、概要は次

表1 針端コロナ電流の多地点観測期間
Table 1. Period of the observation of the point discharge current at multi sites.

年 度	観 測 期 間
61	11/30~12/26
60	11/30~12/16
59	11/20~12/20
58	11/22~12/18
57	11/25~12/18

のとおりである。電極は直径0.3mmのニッケル電極で先端を半球状に研磨してある。これを地上5mに支持し下端を10kΩで接地して、この電圧降下でコロナ電流を検出する。記録には自動平衡方式のペンレコードを用いており、針端コロナ電流の平均値が記録されるが、ここでは「針端コロナ電流波形」と記述することにする。河北潟干拓地付近の概略の地図と、そこにおける観測地点の位置を図1に示す。

各地点における針端コロナ電流波形の測定結果の一例を図2に示す。波形は測定地点K, L, M, N, P, Q

図1 針端コロナ電流の観測位置
(昭和59年)

Fig. 1. Observation sites of the point discharge current.

ロケット誘雷、実験番号84-8、昭和59年12月19日の例

図2 各観測地点での針端コロナ電流波形

Fig. 2. Waveforms of the point discharge current at each observation site before and after the triggered lightning.

の各位置にだいたい対応させて示した。各地点の針端コロナ電流波形には時間的な遅れをもって類似した波形が明らかに読取れ、河北潟干拓地程度の範囲ならば雷雲の状況があまり激しく変化することなく移動していることに対応する。この特徴は、日本海側冬季雷では非常に顕著に見られる。日本海側冬季雷の場合、雷雲は海上で発達し陸へと移動する⁽⁷⁾。従って、河北潟干拓地程度の移動距離（約5 km）では雷雲内の電荷配置はさほど変化しないと考えられる。このような波形上の特徴から後述のようなデータ処理を行うことにより、雷雲の移動方向、移動速度を算出することができる。各年度の誘雷地点は多少の移動があっても、だいたいこの地区の中心付近で図1のP点の近傍である。コロナ電流の大きさは応答周波数の上限1 Hz程度のペンレコードで記録しているにもかかわらず、誘雷時点あるいは自然雷の発生時点には、いずれの測定地点でもパルス状の変化が認められ、時刻合せに役立つ。そのような現象に基づいて、後に示す図5の電界分布の地理的、時間的対応を確定している。

〈2・2〉 雷雲の移動方向と移動速度の算出方法

測定地点のうちで任意の三地点での針端コロナ電流観測結果より、雷雲の移動方向と移動速度を以下に示す方法で算出した。

図3において、O, A, Bを針端コロナ電流観測地点とする。OA, OBの距離をa, bとし、両者の成す角をθとする。雷雲Mが矢印のように、移動方向α(OAを基準に左回りを正とする)、速度vで移動すると仮定する。この雷雲電荷は必ずしも単一極性とは限らないが、電荷群の総合された結果として、地点O, A, Bの電界が正または負の値となっている。最も高くなるのは、図3を参照すればそれぞれ時刻t=0, t=t_A, t=t_Bにおいて各観測点に最も近い距離に雷雲

図3 雷雲の移動方向と移動速度の算出

Fig.3. Calculation of a moving course and a moving speed of the thundercloud.

が来たときとなる。移動速度vを一定とすると次式が成り立つ。

$$vt_A = a \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$vt_B = b \cos(\theta - \alpha) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式より、

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{t_B a - t_A b \cos \theta}{t_A b \sin \theta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$v = \frac{a \cos \alpha}{t_A} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、t_A, t_B: O点とA点およびO点とB点の針端コロナ電流波形の対応する極大値の時間差

〈2・3〉 算出結果と吟味 (3), (4)式から算出した移動方向と移動速度の結果を、ロケット誘雷に成功した4回の時刻について図4に示す。六地点のうち

(a) 実験番号 84-3
(昭59.12.1, 19:28)

(b) 実験番号 84-7
(昭59.12.17, 0:22)

(c) 実験番号 84-8
(昭59.12.19, 0:33)

(d) 実験番号 84-12
(昭59.12.19, 6:24)

(注) 図中、たとえば(31)とそのかたわらの矢印とはそれを含む三角形の頂点の観測結果から推定された雷雲の移動速度(km/h)と移動方向を示す。

図4 雷雲の移動方向と移動速度の算出結果
Fig.4. Calculated results of a moving course and a moving speed of the thundercloud.

から三地点を複数個〔例えば、(a)図では $\triangle NLP$ 、 $\triangle LMP$ 、 $\triangle PMQ$ の3個〕を選んで、それぞれの雷雲の移動方向(矢印で示す)と移動速度(円内の数値、km/hで示す)を算定し、図中に示してある。複数の三角領域からの結果がある程度一致しているので、個々に得られた値の算術平均をもって雷雲の移動方向と移動速度の推定値とした。

一般に、雲の動きは気象レーダのエコーを連続観測することによっても広い範囲で知ることができる。冬季ロケット誘雷実験においては、金沢地方の気象レーダの観測から求められた雷雲の移動状況を問い合わせ、そのつど実験日誌に記録している。この移動状況は、主として日本海上から本土沿岸までについてのものであるが、冬季の雷雲は季節風の方に移動し続けるのが通常であるので、河北潟干拓地についてもほぼ同様とみなされ、針端コロナ電流から求めた値を吟味するために用いた。

レーダ観測による結果と針端コロナ電流の多地点観測による算出結果との比較を昭和60年度について表2に示す。移動方向は気象レーダに合せて両者とも北を0度として右回りを正としている。レーダ観測の欄の時刻は電話による問い合わせの時刻である。針端コロナ電流観測による雷雲の移動方向および速度は記載時刻の前後30分から1時間の波形から算出した。

これによると、両者の推定結果はほぼ一致してお

表2 雷雲の移動方向と移動速度について針端コロナ電流多地点観測による推定とレーダ観測による推定の比較(昭和60年)

Table 2. Moving courses and speeds of the winter thundercloud estimated by the proposed method and by rader observation.

月 日	針端コロナ電流観測による			レーダ観測による		
	時刻	移動方向(DEG)	移動速度(km/h)	時刻	移動方向(DEG)	移動速度(km/h)
12/9	2:00	100	55			
	4:30	80	60	3:25	90	60
	5:00	90	40			
12/10	24:00	130	45	22:00	不明	45
12/11	21:00	65	35	20:40	110	40
				22:38	110	40
12/13	21:30	70	65	21:28	80	50
12/14	20:00	90	55	21:50	90	60
12/18	2:00	130	50	2:13	130	50

注1) 移動方向は、北を0度として右回りを正としている。

注2) 針端コロナ電流欄では記載時刻の前後30分から1時間の波形から方向と速度を推定した。

注3) レーダ観測欄の時刻は電話で問い合わせた時刻であり、誘雷実験日誌に記入してあるものをすべて記載してある。

り、針端コロナ電流の多地点観測から求めた雷雲の移動方向と移動速度の算出結果は妥当なものといえる。

3. 地上電界極性の地域分布の推定

前章の方法で移動方向、移動速度が求まると、本章に述べる作図法により地上電界極性の地域分布が推定できる。一例として、昭和59年12月19日0時33分に誘雷成功した実験No.84-8のロケット打上げ直前の地上電界極性の分布を図5に示す。このとき雷雲は北から右回りに測って150度の方向へ40 km/hで移動していた。

作図方法をN点について具体的に説明すれば、次のとおりである。N点を通り雷雲の移動方向に直線ABを描く。これに平行に時間軸OTを描いて、ここにN点における針端コロナ電流波形(図2のN点参照)を描く。このとき、時間の流れはOからTへ向かうことに留意する。また、この波形上に時刻 T_0 にパルスが認められる。これはP点でロケット誘雷に成功した0時33分に発生したものである。この種のパルスは干拓地内の六地点すべてに発生するもので、時刻合せに利用できる。さて、コロナ電流が正で持続した期間($T_2 - T_1$)に移動速度を掛け合せて求めた距離BCを直線AB上にとる。それに次ぐ負の期

実験番号 84-8, 昭和59年12月19日, 0:33

図5 地上電界の地域分布の推定例

Fig. 5. An estimated example of regional distributions of the electric field on the ground.

間($T_3 - T_2$)に対して同様に距離 CD をとる。この CD は線を太くして示してある。このように直線 AB を区切っていく。このような操作を他の観測点 K, L, M, P, Q について行い、最終的に図5を得る。ただし、針端コロナ電流が0のとき(電界強度で約 1 kV/m 以下に相当)は線を引かない。

個々の点について作図したにもかかわらず、図5には地上の電界の極性分布が地図上に浮かび上がってくる。この例では、ロケットを打上げた0時33分には、河北潟干拓地程度の大きさの地域が負極性の地上電界となっており、しばらくはこの分布状態のままで北西から南東の方向へ推移していくのがよくわかる。

ここでは単に極性だけを表示したが、移動方向上の電界強度が針端コロナ電流の大きさから概算できればそれを付加することによって、更に有用な地域分布が得られることとなる。

4. 対地雷放電路と地上電界極性の地域分布との関連性

雷放電路の進展の立体的な解析を行うためには、二方向からのスチール写真が必要となる。自然雷でこの条件を満たす写真を得るのはなかなか難しいが、落雷位置と時刻をあらかじめ設定できるロケット誘雷では容易である。これまでのロケット誘雷放電において、その立体解析結果によって放電路の水平面上の進展状況と垂直面上の進展状況がそれぞれ明らかにされたものは7例であった⁽⁶⁾。ここでは、その7例の進展状況と、さきに求めたような地上電界極性の地域分布との関連性について述べる。

図6は雷放電路の水平面への投影図と地上電界の分布を重ねて描いたものである。ただし、第3章と同様な地域分布の表示方法をとると見にくくなるので、ここでは分布領域の概略を太い実線で、その極性を○印の中にそれぞれ示した。放電路のうち破線で囲んだ部分は片方のスチール写真のみから推定した形状である。

同図から、冬季ロケット誘雷における放電路は誘雷点を含む極性領域の中央部に向かう傾向があると結論される。例えば、帯状の地上電界の分布をもつ(a), (b), (e)図においては、放電路は帯の中央部に向かう。そのほかの(c), (d), (f), (g)図ではそれぞれの極性領域における中央部に向かう傾向が認められる。すなわち、雷雲の中に電荷密度の高い部分が中央部に存在し、それに向かって誘雷された放電路が進展していると推定される。

また、(a), (g)図については雷放電路が垂直方向

に延びるのではなく、誘雷点から水平距離で 1 km 以上にわたって横に進展している。これは、ロケットを打上げた位置が電荷密度の高い雲の中央部ではなく、端のほうに偏っていたからであると思われる。特に、(a)図においてはそれが顕著である。逆に、誘雷点がその極性領域の中央部にある場合、例えば(b), (d), (e), (f)図などでは放電路が枝分れしているものもあるが、真上に向かうものが多い。

これらの例には、地上電界の極性の異なった領域にまたがって放電路が進展したものはなかった。

ロケット誘雷では打上げ点の地上電界がある程度高い値に達したときにロケットを発射している。ここで述べたように、その周辺の地上電界分布と照合すると、それと放電路の進展との相関性が認められる。

図6 地上電界の地域分布とロケット誘雷放電路の投影図

Fig.6. Regional distributions of the electric field on the ground and horizontal projection of lightning paths triggered by a rocket-wire method.

5. 結 論

針端コロナ電流の多地点観測から地上電界極性の地域分布を推定する方法を示した。各地点の観測では針端コロナ電流の時間的变化が得られるにすぎない。しかし、日本海側冬季雷のように、雷雲内の電荷配置がある程度保たれながら移動してくることを前提とすれば、3点の観測データから雷雲の移動方向と移動速度とを推定できる。これを異なった3点ごとのデータから算定したところ、いずれもかなり類似した結果を得ることができ、この方法が妥当なことが裏づけられた。このようにして決定した雷雲の移動速度と移動方向から、作図により電界極性の地上分布が求まる。これにより地上電界の状況がよくわかるようになり、雷雲の大きさもおおよそ推定できる。この方法では、わずかな地点の観測によりかなり広範囲な地域の電界が推定できる。

この応用例として、得られた地上電界極性の地域分布とロケット誘雷の放電路の立体解析との関連性を検討した。その結果、ロケット誘雷による放電路は地上電界の誘雷点を含む同一極性領域の中央部に向かう傾向が認められた。自然の落雷の場合にも、放電路が横に長く延び出す例が幾つか観測されており、本推定法をより広域での多地点観測に適用すればその原因にせ

まることができ、また有効な落雷警報を提供できるものと推察される。

終りに、本研究の一部は科学研究費補助金一般研究(C)「課題番号 62550200」を受けたことを付記する。また、名古屋大学工学部 堀井憲爾教授を代表とするロケット誘雷実験グループ各位の有益なご討論に深謝いたします。卒業研究として実験に参加された名古屋大学工学部学生 五十住晋一君の御協力に謝意を表します。

(昭和63年7月25日受付, 平成元年1月17日再受付)

文 献

- (1) 例えば、大和、他：「雷害事故実態」，電学誌，**98**，1151 (昭53-12)
配電線雷害対策専門委員会：「配電線雷害対策」，電気協同研究，**40**，No.6 (昭60-2)
- (2) 櫻野、他：「冬季雷雲の規模からみたロケット誘雷の特徴」，電学論 B，**106**，685 (昭61-8)
- (3) 鬼頭：「雷電界，空間電荷の観測」，昭60電気学会全大，S.13-4
- (4) R. H. Golde: Lightning I. p. 440 (1977) Academic Press
- (5) 東山、他：「雷雲下の針端コロナ電流特性とそれによる雷雲接近の検知」，電学論 A，**99**，441 (昭54-9)
- (6) 堀井・宮地：「ロケットによる雷放電トリガの実験」，電学誌，**98**，1160 (昭53-12)
- (7) 池田：「夏季雷と冬季雷」，電気評論，**66**，650 (昭56-7)
- (8) 松原、他：「冬季ロケット誘雷放電形状の分類」，電気学会放電・高電圧合同研究，ED-85-71；HV-85-22 (昭60)