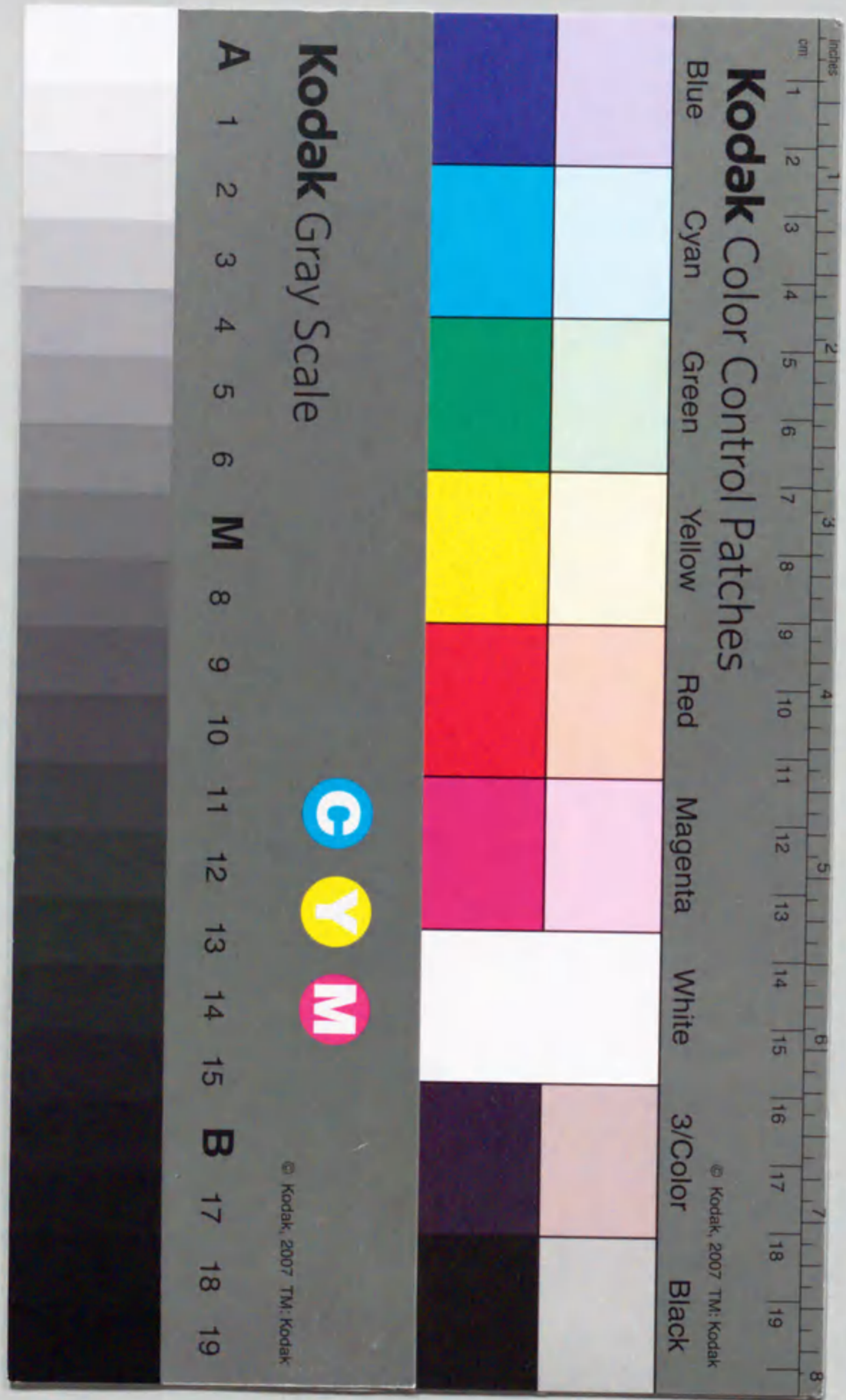


ロケット誘雷実験による  
冬季雷放電現象の研究

櫻野仁志



報告番号 乙 第 4334 号

①

ロケット誘雷実験による  
冬季雷放電現象の研究

櫻野仁志

# 目次

第1章 緒論	1
1.1 電力設備の雷害防止	1
1.2 冬季雷の研究	2
1.3 ロケット誘雷実験	6
1.3.1 ロケット誘雷実験の種類	6
1.3.2 外国のロケット誘雷実験	6
1.3.3 わが国のロケット誘雷実験	8
1.3.4 ロケット誘雷放電の利用技術	16
1.4 雷雲下における地上電界の計測	18
1.4.1 針端コロナ電流測定装置	18
1.4.2 針端コロナ電流と地上電界強度との関係	19
1.5 本研究の内容	20
参考文献	23
第2章 冬季雷雲の規模からみたロケット誘雷放電の特徴	26
2.1 緒言	26
2.2 ロケット誘雷の成否および発光時間の長い雷放電の発生	27
2.2.1 地上電界の強さとロケット誘雷の成否	27
2.2.2 雷放電の発光継続時間	27
2.3 針端コロナ電流からみた検討	30
2.3.1 冬季雷雲下の電界分布とロケット誘雷の成否	30
2.3.2 針端コロナ電流の6地点同時観測	32
2.3.3 針端コロナ電流の分布からみた冬季雷雲の水平方向分布	32
2.3.4 冬季雷雲の位置とロケット誘雷の成否	35
2.3.5 発光時間の長い雷放電の発生前後における 針端コロナ電流の変化	36
2.3.6 自然の状態での冬季雷雲の飛来様相	36
2.4 結言	40
参考文献	41
第3章 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	42
3.1 緒言	42
3.2 雷雲の移動方向と移動速度の算出	43

3. 2. 1 針端コロナ電流の多地点観測	4 3
3. 2. 2 雷雲の移動方向と移動速度の算出方法	4 4
3. 2. 3 算出結果と吟味	4 5
3. 3 地上電界極性の地域分布の推定	4 5
3. 4 対地雷放電路と地上電界極性の地域分布との関連性	5 0
3. 5 結言	5 0
参考文献	5 1
<b>第4章 冬季ロケット誘雷放電に伴う配電線誘導電圧</b>	<b>5 2</b>
4. 1 緒言	5 2
4. 2 試験用配電線と測定回路	5 3
4. 2. 1 試験用配電線の構成	5 3
4. 2. 2 誘導電圧の測定回路	5 4
4. 2. 3 誘導電圧抑制効果の測定方法	5 5
4. 3 雷放電と誘導電圧	5 5
4. 3. 1 誘導電圧の測定結果	5 5
4. 3. 2 リーダに伴う誘導電圧	5 7
4. 3. 3 主放電による誘導電圧	6 0
4. 3. 4 電圧極性によるパルス性誘導電圧波形の相違	6 3
4. 3. 5 誘導電圧最大値の検討	6 5
4. 4 架空地線の誘導電圧抑制効果	6 7
4. 4. 1 抑制効果の検証	6 7
4. 4. 2 上線地絡に伴う抑制現象	6 7
4. 4. 3 抑制効果の検討	6 8
4. 5 結言	6 9
参考文献	7 0
第4章の付録	7 2
<b>第5章 冬季雷対地雷撃時における配電線地絡保護継電器の表示動作</b>	<b>7 4</b>
5. 1 緒言	7 4
5. 2 ビデオカメラによる冬季雷放電の観測	7 5
5. 2. 1 観測の概要	7 5
5. 2. 2 ビデオ画像と針端コロナ電流の対応	7 6
5. 2. 3 異地点への多重雷	7 8
5. 3 地絡方向継電器(DGリレー)の表示動作	8 0
5. 3. 1 地絡方向継電器方式と対象配電線系統	8 0

5. 3. 2 DGリレーの表示動作	8 2
5. 4 雷放電様相とDGリレー表示動作	8 3
5. 4. 1 単一の配電線における表示動作	8 3
5. 4. 2 複数の配電線における表示動作	8 4
5. 4. 3 ロケット誘雷放電に伴う表示動作	8 8
5. 4. 4 雷放電とDGリレー表示動作との関連性	9 1
5. 5 結言	9 3
参考文献	9 4
<b>第6章 ロケット誘雷放電におけるファイナル・ジャンプ</b>	<b>9 5</b>
6. 1 緒言	9 5
6. 2 異常誘雷放電の発生と雷撃電流値の推定	9 6
6. 2. 1 異常誘雷放電の発生機構の推定	9 6
6. 2. 2 異常誘雷放電の電流値の推定	9 7
6. 3 異常誘雷の放電様相からみた最終雷撃距離	9 7
6. 3. 1 試験用配電線およびその近傍の大地への雷撃	9 8
6. 3. 2 制御所近傍の道路への雷撃	1 0 2
6. 3. 3 試験用配電線からかなり離れた大地への雷撃	1 0 4
6. 3. 4 発射台を直撃した雷撃	1 0 4
6. 3. 5 異常誘雷放電路から判定された最終雷撃距離	1 0 4
6. 4 最終雷撃距離と雷撃電流との関係	1 0 7
6. 4. 1 従来の実験式との比較	1 0 7
6. 4. 2 送電線耐雷設計への影響	1 0 9
6. 5 結言	1 0 9
参考文献	1 1 0
<b>第7章 結論</b>	<b>1 1 1</b>
7. 1 本研究で得られた知見	1 1 1
7. 2 今後の検討課題	1 1 3
参考文献	1 1 5
謝辞	1 1 6
本研究に関連して公表した論文	1 1 7

# 第1章 緒論

## 1.1 電力設備の雷害防止

高度に発達した情報化社会の基盤は安定な電気エネルギーの供給によって支えられる。その基盤を維持するためには、電力伝送網の供給信頼度の向上が将来にわたって必要不可欠であると考えられる。電力供給者側では、これまで種々の対策を実施することにより供給支障事故の減少に優れた成果をあげている。しかしながら、各種の故障が減少するに伴って、雷故障の割合が増加する傾向にある<sup>(1)</sup>。その理由の一つは、雷放電が今なお完全には解明されていない自然現象であり、故障防止対策が容易に実施できないことによる。それゆえ、確固たる雷故障防止技術の開発は、電力設備の信頼度向上にとって、残された重要課題と言っても過言でないと考えられる。

エネルギー需要の面からは、電気エネルギーの利便さにより、それが二次エネルギーに占める割合、すなわち電力シフトがますます増大しており、原子力発電などの大容量の電源開発が必要となってきた。そのような大規模な電源基地は、最近では日本海側地方に建設される傾向にあり、発生された電力は500kVないしは将来、1000kV級の超高圧送電線を用いて太平洋側の需要地へと長距離にわたって伝送されることとなる<sup>(2)</sup>。

日本海側地方では、夏季だけでなく冬季にも雷放電が多数発生し、年間を通して雷故障を引き起こしている。特に、冬季雷では2回線にわたる雷故障例が多いというように夏季雷にはみられない特徴が多く報告されている<sup>(3)</sup>。電力供給の信頼度向上には、冬季雷に対して確実な雷故障防止技術の開発が望まれている。そのために冬季雷の実態を明らかにし、夏季雷との相違点などを明解にする必要がある。

筆者は冬季ロケット誘雷実験に当初から参加し、そのなかで同実験による冬季雷放電に伴う諸特性の研究に従事してきた。ロケット誘雷の利点は対地雷放電の時刻と位置とをあらかじめ設定できることにあり、従来、気まぐれな自然現象ゆえに観測が困難であった至近距離からの測定をも可能にした。自然の雷撃を待つ研究と比較すれば、きわめて有効な研究手段であり、ロケット誘雷実験はこれまでの雷研究に新しい一分野を確立したといえる。

本論文は、電力系統の雷害防止技術を最終目標として、ロケット誘雷実験を通して明らかとなった冬季雷放電に伴う諸現象の解明を中心に構成されている。針端コロナ電流の多地点観測から雷雲規模ならびに地上電界の極性分布を考察することにより冬季ロケット誘雷の放電特性と雷雲との関係を明らかにし、これによって対地雷放電の発生予知に有用な知見を与えることができた。さらに、ロケット誘雷の特長を利用し

て、配電線誘導雷電圧と架空地線によるその抑制効果とを明らかにするとともに、配電線系統に設置された保護継電器が、襲雷時に地絡あるいは短絡故障が発生せず、遮断器も動作しないにもかかわらず、表示動作のみをすることと雷放電との相関性についても指摘した。また、ロケット誘雷の異常誘雷放電を利用して最終雷撃距離を実験的に検討し、冬季雷に対する雷遮蔽について一つの基礎的データを提示した。

## 1. 2 冬季雷の研究

従来までの雷研究が熱帯性の雷、日本では夏季雷を主な対象として実施されてきたのに対し、名古屋大学空電研究所グループは石川県金沢市郊外の河北潟干拓地近傍の宇の気町で冬季雷観測を行い、冬季雷の特異な特徴を初めて指摘した<sup>(4)(5)</sup>。この研究では、気象レーダ、多地点における地上電界変化の測定ならびにVTRによる雷放電路の観測から、冬季雷は夏季雷に比べて次のような特徴があると報告している。

- (1) 雲底が300m~700mという低さであり、地上電界が高い。
- (2) 放電がおよそ1秒程度の長時間にわたり継続することが多い。
- (3) 正極性の雷雲からの雷撃の割合が大きい。

一方、電力技術の分野からは、日本海側の山岳地を通過する275kV送電線の加賀嶺南線(500kV設計であるが、昭和49年(1974)に275kVで運用開始)において、2回線にわたる事故や架空地線の素線溶断事例が報告され<sup>(6)(7)</sup>、超高压送電線の耐雷設計を見直すために冬季雷の研究が要望された。

これらを契機として、多方面で冬季雷の研究が開始されている。すなわち、筆者らの参加する冬季ロケット誘雷実験、気象分野の研究機関、電力会社の研究機関などによる精力的な研究が現在まで継続されている。

日本海側各地で実施されている雷観測システムには、雷放電による電磁波信号を観測して雷撃点位置を標定するシステム(Lightning Location System; LLSと略称される)、気象観測鉄塔や火力発電所の煙突など高建造物への雷撃観測、実際の送電線での雷撃観測およびロケット誘雷実験などがある。

LLSは図1.1に示すように<sup>(1)(8)</sup>二つのシステム(LLPとLPATS)が実用されている。LLPシステム(Lightning Location and Protection社で開発されたシステム)は直交ループアンテナで磁界信号を受信し、多点で方位測定を同時に行って位置標定を行なうものである。このシステムは、主として電力会社の施設として運用されており、合計11システムが稼働中である。一方、LPATS(Lightning Position And Tracking System)は3地点以上で電磁波の到来時間差を測定して位置標定を行なうものである。このシステムは九州電力およびウェザーニューズ社(民間の気象サービス機関)の2箇所で運用されている。LPATSは最近になって設置さ



図1.1 LLPとLPATSの配置状況  
(平成元年(1989)12月現在)

れたものであり、そのデータは未だ十分に貯えられていない。それに比べて、LLPシステムは特に日本海側のシステム群においてデータの蓄積が進み、種々の成果と問題点が指摘されている。一番大きな課題は冬季雷の検出率が夏季雷に比べて異常に低いことである。その原因は、このシステムが対地雷放電と判定する基準としてアメリカの夏季雷に基づいた基準を採用していることによるといわれている。冬季雷では主放電電流の波頭長が夏季雷と比べて著しく長いものがあることが明らかとなり、日本海側冬季の雷放電に合致する判定基準に関して研究が続けられている。また、システムが設置された地形に基づく標定誤差(サイトエラー)を補正する問題についても説明が進められている。以上の研究は新潟県巻町を中心とするLLPシステムを使用し、東京大学生産技術研究所のグループが精力的に幅広く研究している<sup>(19)(20)</sup>。同様の研究は各電力会社のシステムに対しても実施されており、冬季雷の検出率の向上に向けて研究が進められている。

上記のLLSとは標定方式は異なるが、100、5MHz帯の直交アンテナによって空電の方向探知を小松空港周辺の北陸地方で実施し、航空機の発着の安全に指針を与えているシステムも運用されている。この結果を昭和54年(1979)から57年(1982)までの毎冬季4箇月間について整理し、北陸地方冬季雷の発生および襲雷様相が次のように明らかにされている<sup>(21)</sup>。

- (1) 冬季には毎月10日以上雷雲の襲来日がある。
- (2) 空電の発生点分布図をみれば、その分布の中心位置は11月には海上にあり、2月まで月が進むにつれて陸地の方へと分布中心が変化する傾向にある。
- (3) 海上で空電の発生が記録され始めてから数時間にわたる時間的変化に注目すれば、時間が進むにつれて空電の発生点が海上から陸地へと移動してくる傾向にある。
- (4) 1日の各時間帯とも平均して空電が発生する。

一方、冬季においては高建築物への雷撃が多発する傾向があり、これを対象とする雷観測も多数の地点で実施されている。東北大学・東北電力グループは新潟県巻町において、海拔125mの丘に立つ高さ約150mの気象観測塔で冬季雷の観測を昭和51年(1976)から開始している。磁鋼片とオシログラフによる雷撃電流の測定では200kA以上の正極性の電流波高値を記録し、電流波形には両極性の成分が混在することを明らかにしている<sup>(22)</sup>。

北陸電力・電力中央研究所のグループでは、石川県能登半島中央部に位置する中能登変電所のマイクロ波鉄塔(海拔140m、地上高80m)および福井県三国町の三国共同火力発電所の煙突(海拔0m、地上高200m)において、それぞれ雷観測を実施している。マイクロ波鉄塔への雷放電路光学像を記憶するため新規に全自動形雷放電進展様相観測装置を開発した。この装置で撮影した結果から、下向きリーダの平均進展速度は $2.9 \times 10^5$  m/s、上向きリーダのそれは $(0.8 \sim 2.7) \times 10^5$  m/sであることを求め、前駆リーダ放電の進展速度を明らかにしている<sup>(23)</sup>。

また、発電所の煙突へ雷撃が発生した際の雷撃電流をシャント抵抗と光ファイバーを用いて測定し、冬季の雷撃電流波形の特徴を明らかにしている<sup>(24)</sup>。さらに、この煙突の近傍に試験用配電線を建設して、煙突への雷撃が発生したときに誘起する配電線誘導雷サージを実測し、雷撃電流波形から数値計算された誘導電圧の理論的波形との比較を行ってきわめてよく一致する結果を得ている<sup>(25)</sup>。

東京電力・電力中央研究所のグループでは、新潟県柏崎市の刈羽原子力発電所構内に立つ気象観測塔(海拔約85mの地点で高さ87m)、独立避雷鉄塔(同海拔で高さ約150m)ならびに工事用のタワークレーン(高さ約140m)のそれぞれ3箇所で雷撃電流と雷放電経路を観測し、冬季雷では正極性の雷雲からの雷撃の割合が夏季雷より多いこと、および異なる地点へほとんど同時に雷撃が発生することを報告している<sup>(26)(27)</sup>。

つぎに、実際の送電線への雷撃観測も各所で実施されている。東京電力グループでは、日本海側にある発電所から関東地方への電力輸送に使用している超高圧送電線(新新潟幹線と新榛名線)において冬季雷の観測を実施し、架空地線への雷撃進入角度の統計、多数鉄塔への同時雷撃割合、雷撃と地形との関係など送電線への雷撃に関する多くのデータを得ている<sup>(28)</sup>。

北陸電力・電力中央研究所のグループでは、敦賀線および能登幹線において雷観測を実施している。雷撃電流と放電経路とともに、鉄塔-碍子間電圧を観測していることが大きな特徴である<sup>(29)</sup>。

関西電力・大阪大学・岐阜大学・名古屋大学空電研究所のグループでは、原電敦賀線など琵琶湖から北方の多数の送電線において雷観測を実施している。このグループの中心的課題は送電線における2回線同時事故であって、異地点へほとんど同時に発生する雷撃の解明に向けられており、電界変化、VTR観測などの項目について測定を実施している<sup>(20)(21)</sup>。

以上、主として日本海側地方で行われている冬季雷観測について概説したが、これらの研究において得られた冬季雷に関する結果は次のようにまとめられる。

- (1) 正極性の雷雲からの雷放電の割合が夏季におけるより多い。
- (2) ほとんど同時に異なる複数以上の地点への雷撃が多く発生する。
- (3) 雷撃電流波形では、波頭長が夏季のものより長い。これが、アメリカ規格で運用されている現在のLLSでの検出率が低い理由の一つと考えられる。
- (4) 雷撃電流波形の継続時間は数百msに達するものも多く、それに伴い放電電荷量も100Cを超える大きなものがある。これは正極性の雷雲からの雷放電に多く見られ、雷害も大となる傾向にある。
- (5) 高い建築物への雷撃の確率が高い。これは冬季の雷雲の高度が低いためと考えられる。

しかしながら、自然の冬季雷を待つ上記の研究では年度によって雷放電の頻度に差



があり、また少ない観測地点では効率が悪くデータの集積に困難が伴う。これに対し、本論文で述べるロケット誘雷実験は人為的に雷撃を誘発するものではあるが、時刻と場所とをあらかじめ設定できるため各種の同時測定が可能であり、また自然のインパルス大電流発生装置とみなすことができる。

### 1. 3 ロケット誘雷実験

#### 1. 3. 1 ロケット誘雷実験の種類

これまで図1. 2に示すように各種のロケット誘雷方法が試みられている<sup>(22)</sup>。図(a)はロケット誘雷の基本的な手法であり、帯電した雷雲が上空に襲来し地上の電界が強くなった時に、一端を接地された細い鋼線を小型ロケットによって急速に雷雲に向かって打ち上げることにより対地雷放電を誘発する手法である。そのうちの一部では図(b)のように蒸発した鋼線の途中から放電路が外れて進展するという異常誘雷放電を誘発することがある。図(c)は空中に絶縁ロープで鋼線のポビンを吊るし、この位置から地上までの長ギャップ放電を誘発する手法である。図(d)は鋼線のポビンをロケット側に取り付けて上昇させるものであり、最初に絶縁ロープを引き出した後、鋼線が引き出され、その鋼線下端から鉄塔への雷放電を誘発する手法である。図(e)は2段式ロケットを打ち上げて、上空で二つのロケット間に鋼線を張ることにより下側ロケットからの雷放電を誘発する手法である。いずれの手法によっても冬季雷放電は、上昇するロケット先端からの上向きリーダによって開始する。

以下、本節では外国およびわが国のロケット誘雷実験の結果について、その概要を述べる。

#### 1. 3. 2 外国のロケット誘雷実験

##### (1) 海上での誘雷実験

ロケット誘雷実験に世界で初めて成功したのは、1960年にアメリカのNewmanらである<sup>(23)</sup>。彼らは、アメリカ・フロリダ州のセントピーターズバーグ近くの海上で、研究船サンダーボルト号からステンレスワイヤ付きのロケットを打ち上げ、2回の対船誘雷に成功した。その後、1966年には23回のロケット打ち上げに対して17回の成功を記録した<sup>(24)</sup>。これらの結果では、第1雷撃の雷電流波高値の平均が40kAで、負極性の約1Cの電荷が放電されたことを示している。また、風に流された多重雷撃の様相を示す静止写真を得ている。

##### (2) 高原での誘雷実験

陸地で初めて誘雷に成功したのは、1973年のフランスのグループである<sup>(25)</sup>。

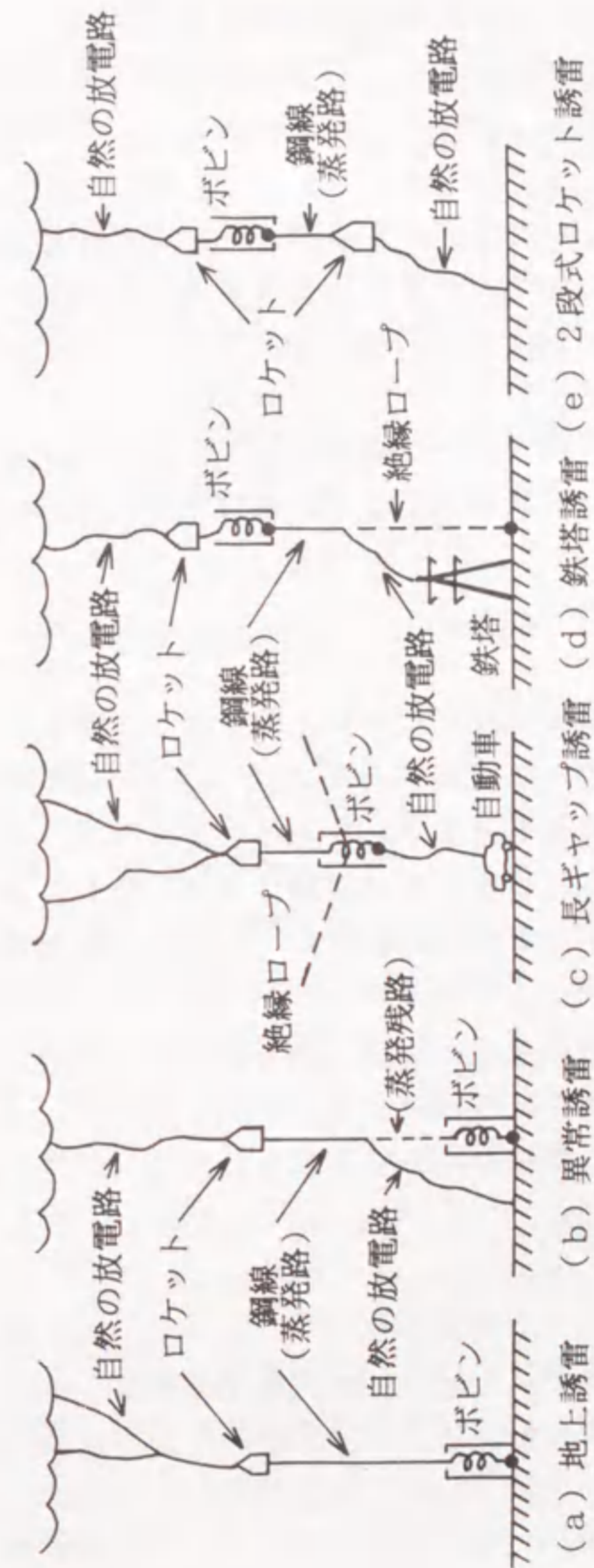


図1. 2 ロケット誘雷実験の種類

このグループは、標高1100mのサン・プリバ・ダリエール高原で夏季雷に対して実験を行った。1981年と1982年の2年の実験中断を含めて、1983年までに98回の誘雷に成功を収めた。実験では各種の測定を広範囲に実施し、多数の貴重な結果を得ている<sup>(26)</sup>。その結果では、誘雷高度は50m~530mの間であり、その平均は210mである。また、ロケット発射時の地上電界は、雷雲が負極性のとき6~15kV/m(平均値は10kV/m)であり、正極性のときは、それより高い値となっている。

このグループは1981年からアメリカのグループと共同で、アメリカ・ニューメキシコの標高3330mの地域で引き続いて実験を行なっている<sup>(27)</sup>。ここでは、誘雷高度の平均が216m、地上電界強度の平均が8.8kV/mであり、フランスでの結果と類似した結果を得ている。

1977年には西ドイツのグループが標高785mの高原で、また同年に中国のグループは標高2200mの実験場でそれぞれ誘雷実験に成功したが、測定された結果の詳細は不明である。

### (3) 平地での誘雷実験

平地(海拔0m)での誘雷実験としては、アメリカ・フロリダ州のケネディ宇宙センターとその周辺で実施された実験がある<sup>(28)</sup>。この実験での誘雷高度の平均値は380m、地上電界強度の平均値は6.3kV/mである。誘雷高度は、高原での実験結果より高いが、地上電界強度は低い結果となっている。上記の(2)項で述べた他のグループの実験では、誘雷用の鋼線としてスチールを使用し鋼線のポピンは地上に設置されている。一方、ここでの実験では、ケブラーで被覆された銅線を用いてポピンはロケット側に取り付けているため、誘雷用鋼線の電気導電率およびロケット上昇速度が他のグループの条件とは相違する。しかしながら、それらの相違が原因で誘雷時の地上電界強度が低く得られたとは考えられず、現在のところその原因は不明である。

#### 1. 3. 3 わが国のロケット誘雷実験

わが国のロケット誘雷実験は、フランスの実験を参考にして、名古屋大学を中心とする中部地区の大学・高専の協力体制で始められた<sup>(29)</sup>。実験は夏季雷と冬季雷を対象とする二つに大きく分けられる。

夏季雷を対象とする実験は、昭和51年(1976)に実施された愛知県犬山地方での現地予備観測を経て、翌年の昭和52年(1977)夏季から同地方で開始された。実験は年度毎に観測場所を移しながら昭和56年(1981)まで続けられたが、成功には至っていない。その原因としては、夏季雷は局地的であり実験場という限られた範囲の上空への襲雷がきわめて少なかったこと、夏季の雷雲の高度が高く、誘雷

するにはロケットの到達高度が不足していたこと、などがあげられる。

冬季雷を対象とするロケット誘雷実験は昭和52年(1977)から石川県金沢市北方の河北潟干拓地で開始された。実験は海拔0mの河北潟干拓地において昭和52年(1977)~60年(1985)まで実施され、その後昭和61年(1986)からは金沢市の南郊外に位置する標高928mの奥獅子吼山山頂へ移動して継続されている。本論文では平成元年(1989)までの結果を対象としている。二つの実験場の概略の位置関係を図1.3に示す。この2地点は金沢市を挟んで約30km離れており、河北潟干拓地は海岸線に近く、奥獅子吼山は海岸から約15km内陸部へ入って急激に標高が高くなる位置にある。

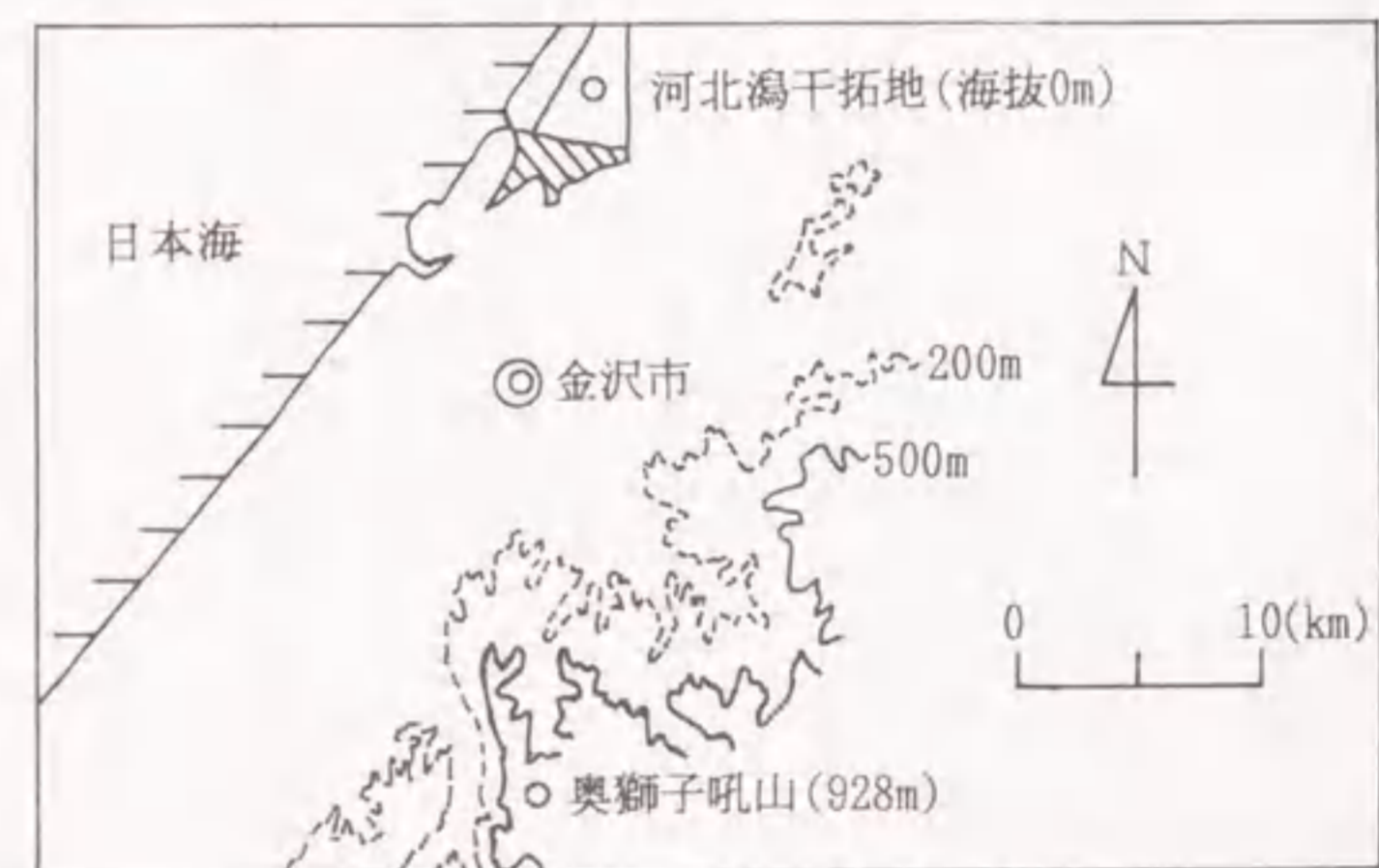


図1.3 冬季ロケット誘雷実験場の位置  
(○印の2地点)

ロケットは、昭和54年(1979)までがフランス製の電害防止用の小型ロケットを輸入したもの、昭和55年(1980)からは国産の救命索発射用のロケットを改良したものをそれぞれ用いている。

昭和52年(1977)に2回の誘雷成功を記録して以来、途中昭和58年(1983)の1年間の中断はあったが、平成元年(1989)までに全部で110例の誘雷に成功を収めている。本研究で対象とした誘雷の主要データの一覧を実験地別に表1.1と表1.2にそれぞれ示す<sup>(30)</sup>。以下では、冬季ロケット誘雷実験を、実験場の立地条件から平地と山岳地とに大別して、その結果について述べる。

#### (1) 河北潟干拓地(海拔0m)での実験

ここでの実験の主たるものは、地上誘雷すなわち大地に接地されたスチールワイヤ

表1. 1 河北瀉干拓地（海拔0m）における冬季ロケット誘雷実験結果

年度	実験番号	成功日時		地上電界強度 (kV/m)	雷電流 (波高値) (kA)	誘雷 高度 (m)	備考
		月/日	時:分				
1977	77- 2	12/22	02:01	+ 9.0	+ 2.2	78	
	77- 3	12/27	02:47	- 7.5	- 1.8	153	
1978	78- 1	12/20	00:07	+ 5.7	+ 5	100	マネキン試験
	78- 3	12/23	21:56	+ 4.8	<+1	300	
	78- 4	12/29	08:14	+ 8.5	+15	190	
	78- 6	12/29	09:23	+ 5.5	+16	167	
	78- 7	12/30	05:44	- 6.2	(10A)	240	
	78- 8	12/30	05:58	- 9.0	<-1	83	
1979	79- 2	12/ 1	23:31	+ 9.3	+3.6	96	異常誘雷
	79- 4	12/ 5	23:34	- 7.1	<-1.2	143	
	79- 5	12/10	14:15	- 9.4	<-1.2	108	
	79- 6	12/15	07:49	-10.6	-24	37	
	79- 9	12/25	11:49	- 9.4	(-41)	114	
	79-12	12/27	06:35	- 7.2	- 1.4	132	
1980	80- 5	12/ 8	00:07	+ 7.5	+12	148	自動車試験 自動車試験 変圧器試験
	80-10	12/ 9	18:09	- 9.0	- 2	159	
	80-11	12/ 9	19:01	+ 7.0	+ 5	261	
	80-15	12/18	23:54	- 7.0	-11	243	
	80-17	12/20	14:50	+11.5	+24	106	
	80-18	12/20	15:13	+11.0	<+0.5	77	
	80-19	12/23	17:00	+ 9.0	<+0.5	212	
	80-21	12/24	06:31	- 8.8	-13	89	
	80-22	12/24	06:45	- 6.2	-26	195	
	80-24	12/26	08:39	- 6.5	<+0.5	126	
1981	81- 6	12/ 2	00:36	- 9.0	- 2.8	66	変圧器試験 異常誘雷 マネキン試験 変圧器試験
	81- 7	12/ 2	01:27	- 7.1	(- 3.8)	133	
	81- 9	12/11	23:37	+ 7.2	+22.3	173	
	81-10	12/12	00:38	+ 6.0	+21.1	163	
	81-11	12/12	00:46	- 7.2	- 6.6	123	
	81-13	12/19	18:01	- 4.0	<-0.1	326	
81-16	12/24	01:25	+ 6.0	+23.8	141		

(注) 雷電流欄の括弧内は試験用配電線の誘導電圧から推定した値である。

表1. 1 河北瀉干拓地（海拔0m）における冬季ロケット誘雷実験結果（続き）

年度	実験番号	成功日時		地上電界強度 (kV/m)	雷電流 (波高値) (kA)	誘雷 高度 (m)	備考
		月/日	時:分				
1982	82- 2	11/24	18:30	+ 8.0	+16.0	129	配電線試験 異常誘雷 配電線直撃 異常誘雷 配電線試験 異常誘雷 異常誘雷 異常誘雷
	82- 4	11/24	19:20	+ 7.6	+ 6.0	134	
	82- 5	11/24	20:41	+10.0	+ 2.5	134	
	82- 9	12/ 2	06:20	- 8.0	- 8.0	150	
	82-15	12/12	20:20	+13.5	+15.8	174	
	82-16	12/12	20:29	-10.0	(-30.0)	232	
	82-17	12/12	21:10	+16.0	+16.0	206	
	82-18	12/12	21:25	-14.0	(- 3.3)	135	
	82-20	12/15	00:06	- 9.0	(- 5.3)	168	
	82-21	12/15	00:54	- 9.5	-12.0	136	
	82-22	12/18	01:19	- 4.0	(-20.0)	329	
	82-23	12/18	02:10	-12.0	- 1.0	81	
	82-24	12/18	04:10	+12.0	+ 1.0	112	
	1984	84- 3	12/ 1	19:28	-22.0	(-2.6)	
84- 4		12/ 1	9:38	+20.0	+22.8	167	
84- 7		12/17	0:22	-11.0	- 7.3	72	
84- 8		12/19	00:33	-21.0	- 5.8	50	
84- 9		12/19	01:17	-15.0	(-1.1)	123	
84-10		12/19	01:39	-15.0	-15.0	92	
84-12		12/19	06:24	-10.0	(-8.3)	210	
84-15		12/20	22:41	+14.0	>+27.0	197	
84-16		12/20	22:52	-23.0	- 1.6	116	
84-19		12/21	23:30	-25.0	- 2.5	222	
1985	85- 1	12/ 9	01:55	+ 9.0	+17.0	99	OPGW試験 OPGW試験 OPGW試験 異常誘雷
	85- 2	12/ 9	04:33	-10.0	-10.0	273	
	85- 3	12/ 9	05:05	- 6.5	<-0.5	317	
	85- 7	12/ 9	22:54	+10.0	+23.0	53	
	85- 8	12/ 9	23:12	-10.0	+12.0	52	
	85- 9	12/10	00:35	-10.0	<+0.6	188	
	85-10	12/11	00:00	+11.0	<+0.5	178	
	85-12	12/13	21:22	-13.0	- 3.0	65	
	85-13	12/14	23:11	-12.0	>-20.0	82	
	85-14	12/15	01:33	-11.0	-11.0	22	
	85-15	12/16	23:43	+20μA	+ 5.0	43	
	85-16	12/18	02:10	-14μA	-14μA	87	
	85-17	12/19	01:51	+ 8.0	-18.0	62	
	85-18	12/19	03:49	- 9.0	- 9.0	202	
	85-19	12/20	01:00	- 8.0	<+0.5	79	

表1.2 奥獅子吼山(標高928m)における冬季ロケット誘雷実験結果

年度	実験番号	成功日時		針端コ ナ電流 ( $\mu$ A)	雷電流 (波高値) (kA)	誘雷 高度 (m)	備考 (雷撃点)
		月/日	時:分				
1986	86-11	12/4	11:32	+3.0	+50.0		(上相腕金)
	86-13	12/7	18:57	-6.0			
1987	87-5	11/22	01:10	+0.7	+23.0	230	(誘雷針)
	87-7	11/22	01:31	-0.5	-8.5	211	(上相腕金)
	87-8	11/22	01:44	+1.4	-11.0	281	(架空地線)
	87-10	11/24	00:10	-2.1		268	(発射台)
	87-16	12/1	13:41	+4.2	+9.0	228	避雷器試験
	87-17	12/1	13:54	-3.0	-1.0	143	避雷器試験
	87-18	12/1	14:17	0.0	+14.0	150	(上相腕金)
	87-19	12/3	09:37	-2.2	$\leq -1.0$	188	
	87-21	12/3	10:50	+5.2		291	(中相腕金)
	87-22	12/3	11:01	-8.0	(-5.5)	180	(上相腕金)
	87-23	12/3	16:49	$\geq +10.0$	+47.5	188	
1988	88-4	11/11	09:34	-6.0			(上相導体)
	88-7	11/16	16:29	-5.0	11.4		避雷器試験
	88-12	11/24	13:13	-1.0			(架空地線)
	88-13	11/24	13:59	-1.5	4.5		OPGW試験
	88-16	11/24	15:17	+3.0			(架空地線)
	88-19	11/24	22:14	-3.0			OPGW試験
	88-20	11/25	18:45				
	88-21	11/25	19:26	+1.2			
88-22	11/25	22:27	+5.0			OPGW試験	
88-23	11/25	23:34	+2.5	>50		カーボンファイバ試験	
1989	89-4	11/18	22:22	-2.0	+25.6		(誘雷針)
	89-5	11/18	22:39	0	+6.3		(上相導体)
	89-6	11/18	22:51	-2.0	+40.0	126	避雷器試験
	89-7	11/18	23:07	0	+42.5		(上相導体)
	89-8	11/18	23:27	-2.0	+35.3	117	避雷器試験
	89-9	11/19	07:39	+5.0	-18.1		(誘雷針)
	89-10	11/19	08:06	+8.0	-4.3		(架空地線)
	89-11	11/19	17:08	-2.0	+38.6	104	避雷器試験
	89-12	11/28	11:38	+1.0	-12.0	336	地上誘雷
	89-14	11/28	14:24	-2.8	+9.9	185	避雷器試験
	89-16	11/29	02:37	+5.0	+52.5		(架空地線)
	89-18	11/29	20:09	+0.2	+46.5	160	地上誘雷
	89-19	11/29	22:37	+1.5		154	OPGW試験
	89-20	11/30	17:38	+0.8		39	OPGW試験
89-21	12/1	01:22	-3.6	+5.0		(中相腕金)	
89-22	12/1	01:43	-0.2	+42.0	124	地上誘雷	

(注) 1987年度の誘雷高度はロケットの軌道から計算された値  
1989年度の誘雷高度は引き出した鋼線の抵抗から計算された値

をボビンからロケットで急激に上空に引き上げるにより、そのワイヤに雷放電を誘発し雷電流を大地へと導くものである(図1.2(a)参照)、この手法を基盤として、ロケット誘雷を利用した各種の実験が実施された。この中には、長ギャップ誘雷、電気設備への雷撃試験などがあるが、それらについては次節で詳しく述べる。

各種の誘雷手法による成功例も合わせて河北潟干拓地で誘雷に成功した全数は、表1.1に示すように、71例である。誘雷高度は最大329m、最小22mでその平均値は146mである。ロケット打ち上げ時の地上電界強度は、正極性の雷雲に対して平均9.5kV/m、負極性の雷雲に対して平均10.9kV/mであり、全体の平均は10.2kV/mとなる。ただし、鋼線を直接接地した場合の実験と、たとえば長ギャップ誘雷(図1.2(c)参照)の実験とでは条件が異なり、誘雷高度および地上電界強度に影響を与えられ考えられるが、ここではその相違を無視して成功した全例について平均をとっている。諸外国との比較を表1.3に示す。地上電界は類似した値であるが、誘雷高度は非常に小さい値である。これは主として冬季の雷雲高度が低いことによると推察される。なお、冬季の雷雲の規模とロケット誘雷の成否の関係については第2章で詳しく検討する。

表1.3 諸国における誘雷実験

実験地	誘雷高度 (平均) (m)	地上電界強度 (平均) (kV/m)	備考
日本	146	10.2	冬季雷
アメリカ	380	6.3	夏季雷
アメリカ	3330	8.8	夏季雷
フランス	210	10.0	夏季雷

河北潟干拓地の実験で得られた主な結果は次のようにまとめられている<sup>(31)</sup>。

(a) 主放電の前に微弱な発光を伴うリーダがロケット先端から雲に向かって進展する。ロケット発射点から70m離れた地点から毎秒約1,000フレームの高速度カメラで撮影した結果によれば、この上向きリーダの進展様相は雲の電荷が正極性の場合(上向き負極性リーダ)は枝分かれが少なく、約 $(5\sim 10)\times 10^4$ m/sの速度で速く進み、雲の電荷が負極性の場合(上向き正極性リーダ)は枝分かれが多く、約 $1\times 10^4$ m/sの速度で負極性リーダより進展速度は遅い。

(b) 上記の上向きリーダでロケットと大地間のワイヤが溶断蒸発し、その部分に主放電電流が流れる。得られた電流波高値の累積分布を、他で得られた分布と比較して図1.4に示す。自然雷の雷撃電流値と比較して、ロケット誘雷では2~2.5kA以下の小さい雷撃電流値を伴う雷放電の多いことが特徴である。

(c) 多重雷の様相は夏季雷のそれとは若干異なるけれども、主放電の多重度は1~

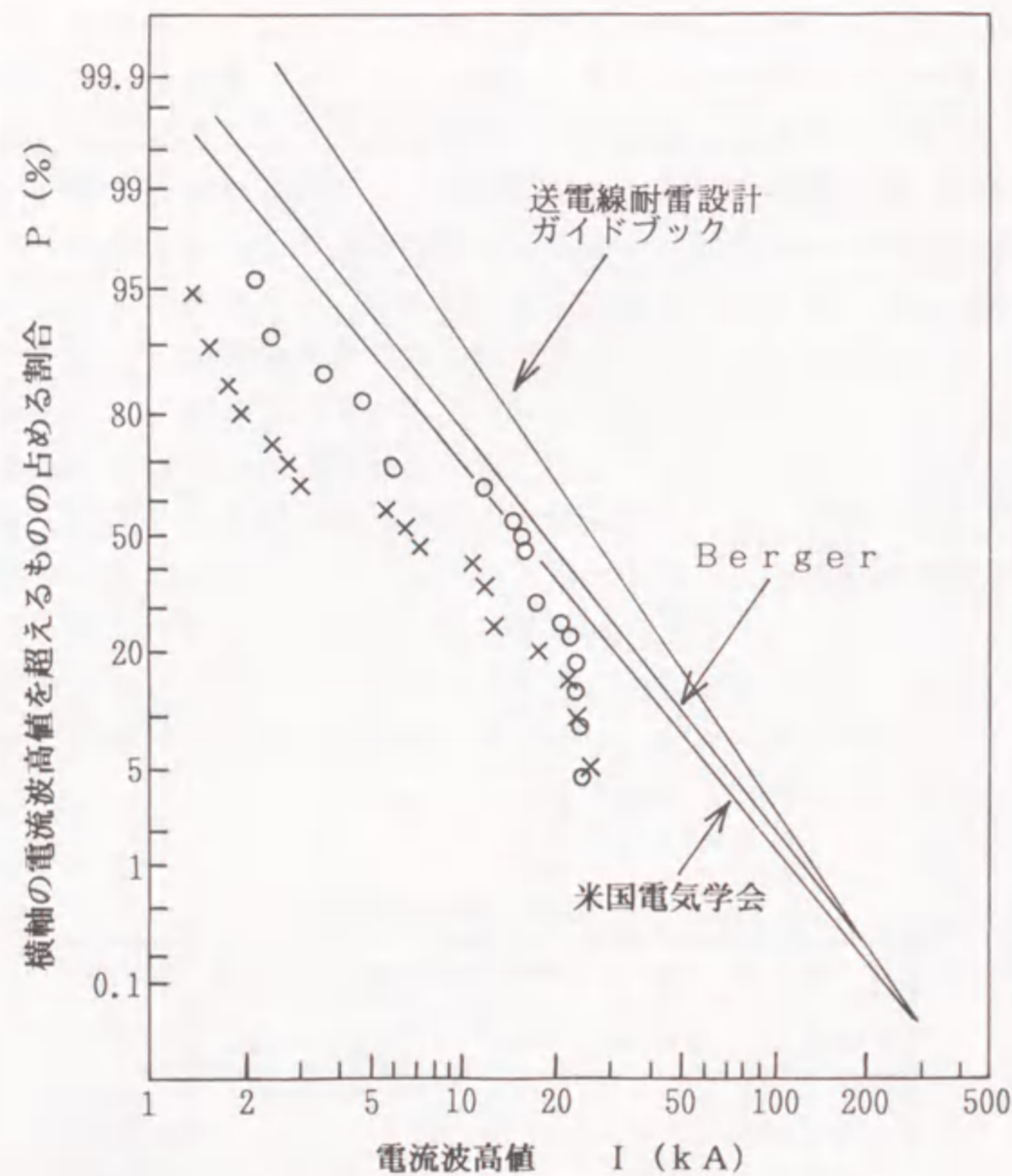


図1.4 雷電流波高値の累積分布  
(河北瀉干拓地)  
○: 正極性22例  
×: 負極性19例

4のものが多い。中には40に及ぶものもある。また、一つの雷放電の中で電流の極性が変化したもの、すなわち両極性の電流を示したものが4例ある。

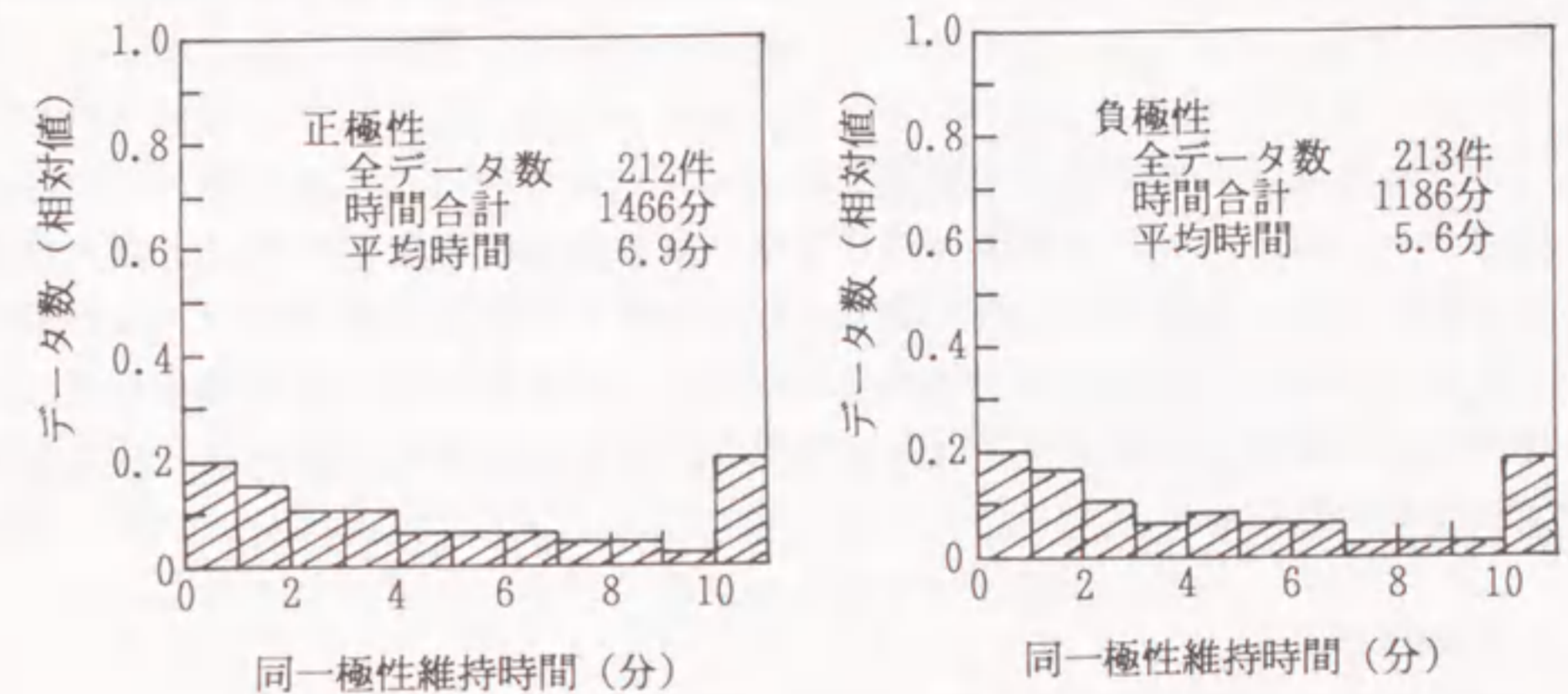
(d) ワイヤ発光部の途中から、ワイヤと別の路を作って大地に放電する異常誘雷放電が観測される。これはワイヤが蒸発した後のプラズマ導電路が消滅し、別の新しい空間をリーダが下向きに進展するため、その部分は自然雷とよく似た放電となる。この放電は最終放電ステップの検討に利用できる。詳しくは第6章に述べる。

(2) 奥獅子吼山山頂での実験

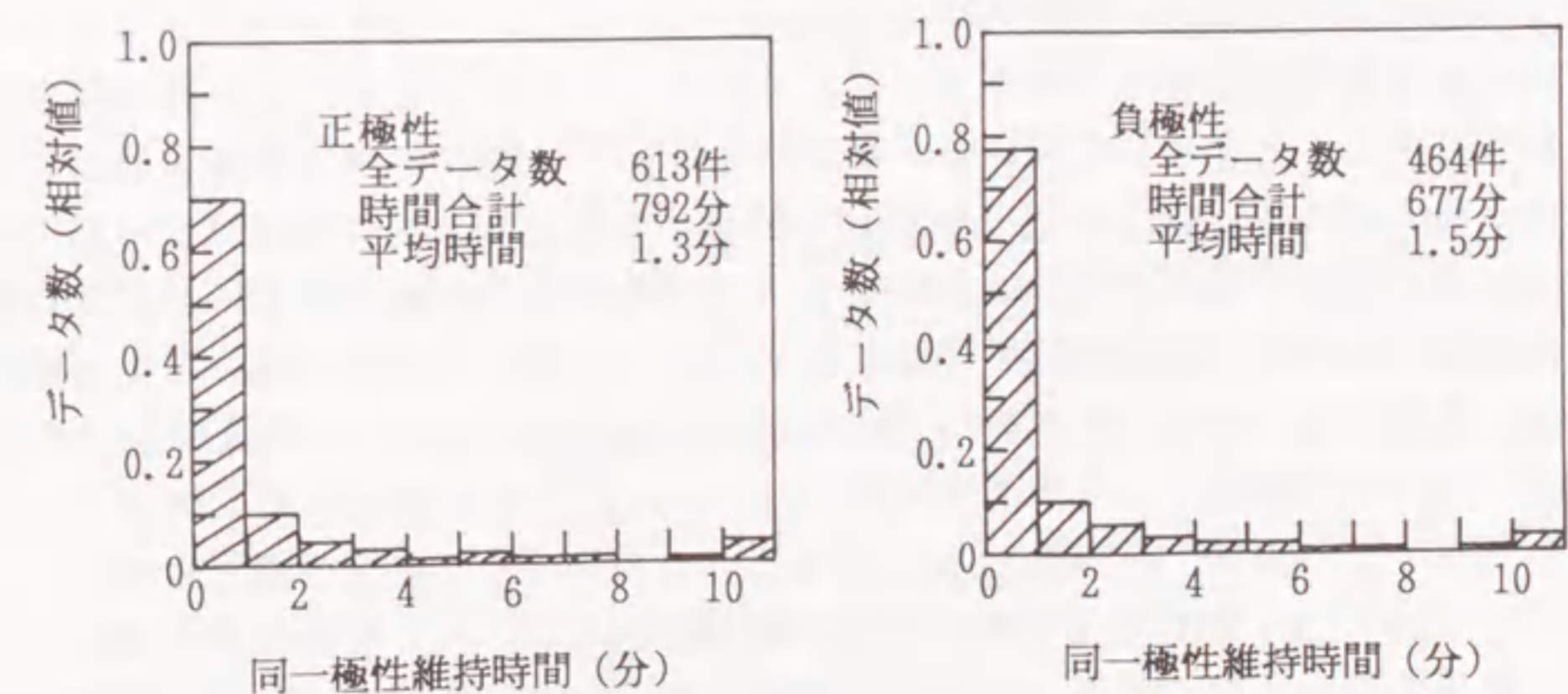
昭和61年(1986)冬から標高928mの奥獅子吼山の山頂で実験が実施されている。実験の手法は従来からの地上誘雷(図1.2(a)参照)と新たに開発され

た手法(図1.2(d),(e)参照)による送電線および鉄塔への誘雷に大きく分けられる。

実験場の標高から考えれば、海拔0mの河北瀉干拓地とは実験環境は極端に異なっている。一例として、図1.5に河北瀉干拓地と奥獅子吼山頂とにおける針端コロナ電流の同一極性維持時間の比較を示す<sup>(32)</sup>。標高の高い奥獅子吼山では、正負両極性ともデータ全体の7割以上が1分未満であり、河北瀉干拓地に比べ同一極性維持時間が非常に短い傾向にある。平均維持時間の点でも奥獅子吼では1~2分であり、河北瀉干拓地の5~7分に比べれば約1/5にしか満たない。奥獅子吼山では河北瀉干拓



(a) 河北瀉干拓地



(b) 奥獅子吼山

図1.5 針端コロナ電流の同一極性維持時間に関する分布  
(昭和61年(1986), 62年(1987))

地のように雷雲下の実験というよりも、むしろ雷雲中での実験であり、雷雲中の電荷の複雑な空間分布が直接影響するためと考えられる。このように雷雲によってもたらされる地上の静電界の時間的な変化が非常に激しい点では、山岳地でのロケット発射のタイミングが難しいといえる。

4年間の誘雷成功数は表1.2に示すように全部で39例である。厳寒でしかも激しい降雪の中では回転セクター形の地上電界計は使用不可能であり、正確なロケット打ち上げ時の地上電界は得ることができなかつた。平成元年度の地上誘雷における誘雷高度の平均は149mであり、この値は河北潟干拓地と同程度である。

実験項目のほとんどがロケット誘雷の利用を目指したものであり、それらについては次節で述べる。

### 1.3.4 ロケット誘雷放電の利用技術

前述したように、ロケット誘雷の利点はあらかじめ対地雷撃の時刻と位置とを設定できることにあり、各種の測定機器をそれに合わせて配備して各種のデータを同時に観測できることが特徴である。この利点を利用して雷放電特性そのものの研究に加えて、種々の利用技術が開発されている。本節ではロケット誘雷の直接的利用と間接的利用について概説する。

#### (1) 直接的利用

これは誘雷された雷放電の高電圧ならびに大電流を直接に利用しようとするものであり、次のような実験が行なわれている。

##### (a) 地上の電気設備への雷撃試験

これは雷放電電流を鋼線で集電リングまで導き、そこから地上に置かれた電気設備に直接印加することにより大電流の雷撃試験を行なうものである。直接大地へ雷撃電流を流す地上誘雷と同様のスチールワイヤ方式(図1.2(a)参照)を用いて、アレスタ、変圧器、放送用送信設備、光ファイバ内蔵形架空地線(以下OPGWと称する)など電気設備への雷撃試験が実施されている。この種の実験は河北潟干拓地で始められ、奥獅子吼山へ実験地が移ってから継続して実施されている。特に、冬季雷は電流の持続時間が長く、実験室では得られない大電流の試験が可能である。

##### (b) 長ギャップ放電への利用

空中に支持されたワイヤ・ポビンまで雷撃を導き、そこから大地までの気中を長ギャップ放電させる方式(図1.2(c)参照)である。この長ギャップ下の地上に置かれたマネキン人形によってヘアピン効果<sup>(33)</sup>、自動車への雷撃に対する安全性<sup>(34)</sup>などに関する実験が実施されている。

##### (c) 異常誘雷放電の利用

負極性の雷雲に対して前記(a)の実験を行なった際、スチールワイヤから外れて

途中から地上の任意点へ放電するという異常誘雷放電が発生した。これを積極的に利用する方式(図1.2(b)参照)である。この放電はワイヤから外れる点で下向きステップドリダが見られ、その点では通常自然雷と類似な特性をもっている。この誘雷放電を利用して、本論文の第6章では最終雷撃距離と雷撃電流との関係を検討している。その他に、誘雷点の近傍に多数の避雷針を設置した上で、この放電を利用することにより避雷針の保護範囲の検証実験も実施されている<sup>(35)</sup>。

#### (d) 送電鉄塔および電力線への誘雷試験

奥獅子吼山頂での実験は試験用送電線(北陸電力所有)の近傍で実施された。ロケットは試験鉄塔から約10m離れた地点から発射され、図1.2(d)の手法により鉄塔および送電線への誘雷実験が行なわれた。この方法ではワイヤ・ポビンはロケット側に取り付けられており、ロケットが上昇するにつれて引き出される。ポビンからは最初に、一端が地上に固定された100m程度の絶縁製ロープが引き出され、続いてスチールワイヤが引き出されるようになっている。この手法により、スチールワイヤの下端から気中放電を経て鉄塔あるいは送電線への雷撃を誘発するものである。

このような鉄塔直撃雷を利用して鉄塔部材の雷撃電流分流特性が詳細に測定されている<sup>(36)</sup>。また、鉄塔一碍子間の電圧測定も併せて実施され、逆フラッシュオーバー現象が観測されている<sup>(37)</sup>。加えて、誘雷箇所は必ずしも架空地線とは限らず相導体へ誘雷したものもあることから、遮蔽失敗現象の解明にも利用できる。

#### (2) 間接的利用

これは、雷撃の発生時刻、場所が定まり、その放電特性などが活用できるというロケット誘雷の利点を間接的に利用しようとするものであり、次のような実験があげられる。

##### (a) 配電線誘導雷電圧の測定

配電線では誘導雷を主な対象として耐雷設計が行なわれている。ところが、雷放電と誘導雷電圧の関係は不明な点が多く、また自然雷を対象に雷撃電流と誘導電圧を同時に観測することはきわめて困難であった。そこで、誘雷地点の近傍に試験用配電線を建設して、誘雷時の誘導電圧を測定したものであり、本論文第4章に詳しく述べている。

##### (b) 雷撃点位置標定システム(LLS)の校正試験

1.2節で述べたようにLLSは対地雷撃頻度や雷撃電流の検出に有効とされているが、そのためには実際の雷撃に対する精度の吟味が必要となる。自然雷を対象にこの種の校正試験を実施することはほとんど不可能であるが、正確な雷撃地点と雷撃電流値がわかっている誘雷放電を利用すれば、LLSの校正試験を一部実施することができる。夏季雷に対してアメリカ・ケネディ宇宙センターの誘雷実験を利用した例が報告されており、LLSは十分な精度を持っていることが実証されている<sup>(38)</sup>。

(c) 保護継電器などの感度設定への利用

ロケット誘雷実験場から数km程度離れた地点に商用の電力設備が存在している場合、誘雷放電を利用して電気設備として使用される保護継電器の感度調整、誘導誤差試験などを実施することが考えられる。一例として、本論文第5章の一部では誘雷時に動作する配電線の保護継電器の状況を明らかにし、配電線の線路配置と雷放電諸量との関係について検討している。

1.4 雷雲下における地上電界の計測

1.4.1 針端コロナ電流測定装置

雷雲下における地上電界の測定には回転セクター型電界計(フィールドミル)が一般的に用いられる。しかしながら、この電界計ではセクタを回転させるために商用電源が必要であり、容易に商用電源が得られないような野外観測には不适当である。さらに、冬季の降雪時には回転セクター板の近傍に雪がつもり正確な測定値を示さないばかりでなく、気温が下がって凍結した場合には回転部分が故障することもある。

上記の理由により、本論文では地上電界を測定するために、図1.6に示すような

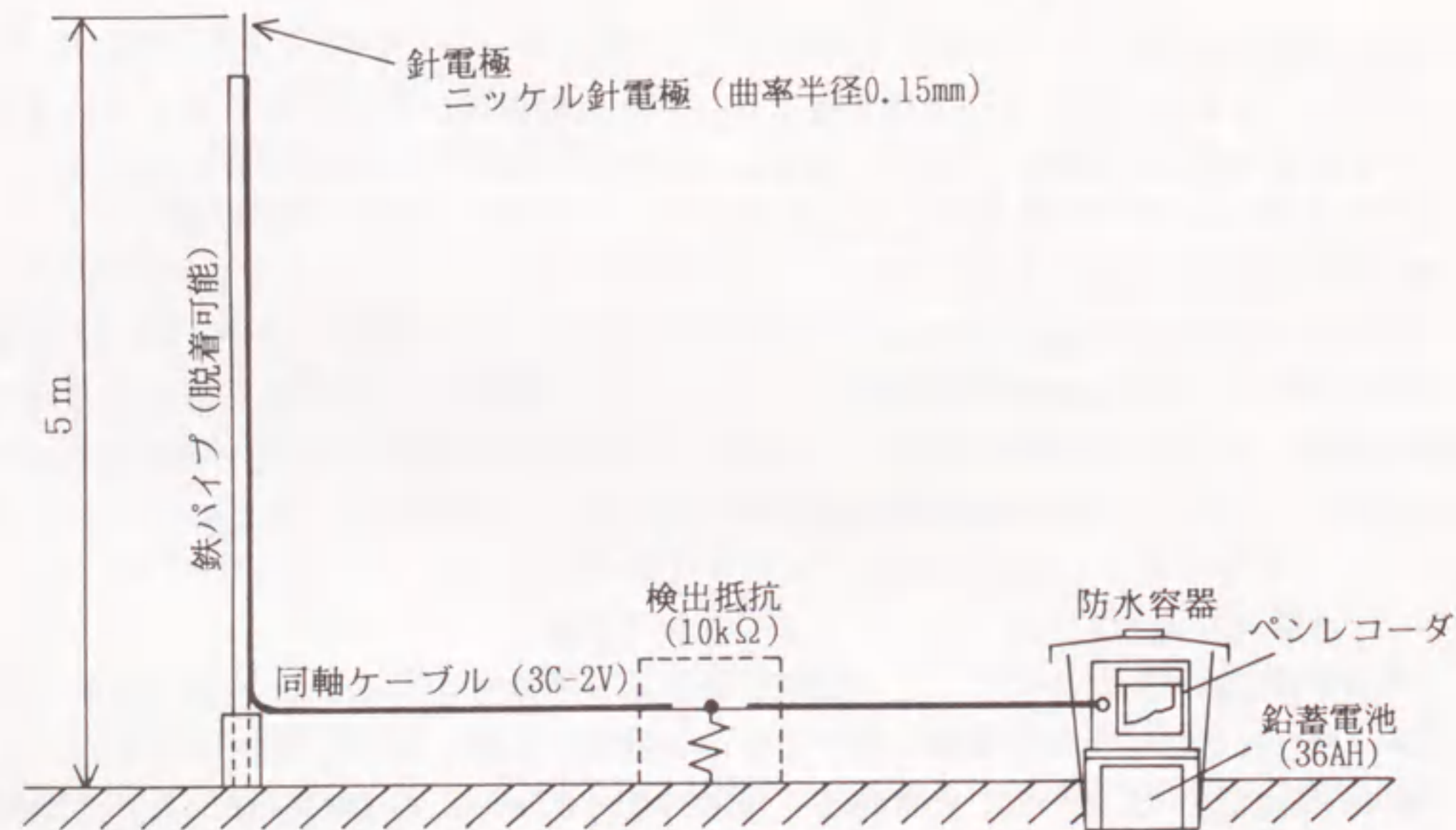


図1.6 針端コロナ電流測定装置および記録系

針端コロナ電流測定装置を用いている。これは、雷雲下の電界で針電極先端に発生するコロナ放電を利用したものである。地上高5mに設置した曲率半径0.15mmのニッケル針先端から流れるコロナ電流を、10kΩの抵抗両端に発生する電圧として鉛蓄電池駆動のペンレコーダで記録する。これによりコロナ電流の連続測定を行う。ペンレコーダと蓄電池は防水容器に収納している。記録紙および蓄電池の交換は約3日ごとに行う。この装置は次のような特長を持っており、野外観測にはきわめて適している。

- (1) 電界センサー部分には可動部分が無く、耐久性および堅牢性に優れている。
- (2) 装置本体には電源が不要である。
- (3) 電界の極性および継続時間については十分な検出能力を持っているうえに、後述するように、概略の電界強度値をも与える。

1.4.2 針端コロナ電流と地上電界強度との関係

本論文で使用した針端コロナ電流測定装置により観測された針端コロナ電流と地上電界強度との関係を図1.7に示す。横軸の地上電界は、針端コロナ電流測定装置から約5m以上離れ、その影響を受けないと考えられる地上において、回転セクター型

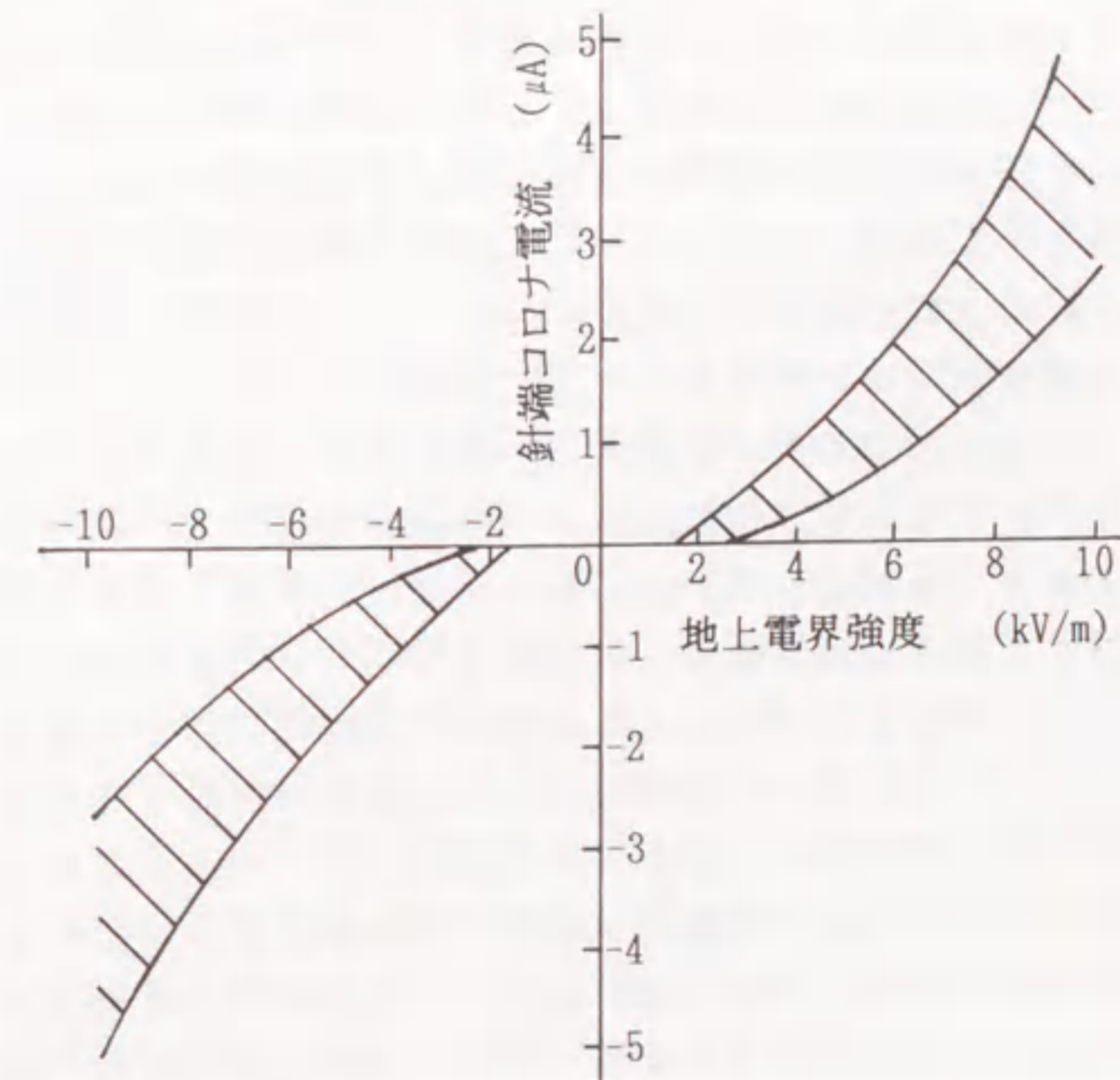


図1.7 針端コロナ電流と地上電界強度との関係

電界計で測定したものである。風や雨など気象条件の相違により、同一の地上電界でも異なるコロナ電流を示している。その範囲を斜線で示す。同図の特長的なことはコロナ電流が開始する時点の地上電界強度はほとんど気象条件の影響を受けないことである。その値は約 $1.5 \text{ kV/m}$ である。いったんコロナ電流が流れ始めると、気象条件により影響を受けるが、ほぼ地上電界の2乗に比例して流れる。この図より、コロナ電流の値から概略の地上電界値を知ることができる。

### 1.5 本研究の内容

本研究の内容は、以下のとおりである。

第1章では緒論として、わが国におけるこれまでの冬季雷に関する研究の動向ならびに外国およびわが国におけるロケット誘雷実験の成果について概説している。特に、ロケット誘雷放電の利用技術については直接的利用と間接的利用という二つの視点から詳しく述べている。さらに、本研究全般にわたって雷雲下における地上電界の簡易測定器として針端コロナ電流測定装置を利用しているため、その装置の概要およびコロナ電流値と地上電界強度との関係について明らかにしている。

第2章では、日本海沿岸においては冬季の雷雲によって夏季に加えて送電線雷故障がもたらされるので、冬季雷雲の特性をロケットで誘発された雷放電との関連で考察している。ロケットは地上電界の極性とは無関係にその絶対値が約 $4 \text{ kV/m}$ を超えた値に達すると発射している。しかし必ずしも誘雷に成功するとは限らない。これを解明するために、針端コロナ電流測定装置をロケット発射地点周辺数 $\text{km}$ の範囲に5~6台配置し地上電界を同時に測定することにより、周辺の雷雲の分布状況を観測した。この結果から、冬季雷雲の水平方向分布状況と誘雷の成否との間に相関性があることを指摘している。すなわち、雷雲内で同一極性の電荷が水平に分布している幅が河北潟干拓地（南北 $5.2 \text{ km}$ 、東西 $4 \text{ km}$ ）程度以上大きく、ロケット発射点が雷雲の中央部に位置する場合は誘雷しやすいといえる。一方、誘発された雷放電のうち鋼線の溶融した部分を除き、その上方に自然の気中放電として形成された放電回路の発光継続時間が $700 \text{ ms}$ に達する長時間のものがある。このような事例はすべて雷雲が負極性のものに限られており、しかもその前後において地上電界が高い値で少なくとも30分程度の期間にわたって継続している。このことから雷雲が大規模なときに長時間持続する放電が起こりやすいのではないかとこのことを指摘している。ロケット誘雷放電は人為的に誘発されたもので自然雷とは若干異なるが、上述のようにその成否や放電持続時間の長短を雷雲の広がりに関連づけて考察した結果、冬季雷雲が上空を覆う持続時間が長く、広がりが大きいとき雷放電が起きたとすれば自然雷の持続時間が長くなる可能性があると思われ。

第3章では、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撃が大きな比率を占めるに至っているという観点に立ち、雷雲の襲来時にどのような地点で対地雷放電が発生するかを実際に検証しようとしている。雷放電が発生する前提条件を検討する場合には雷雲内の電荷分布を把握することが望ましいが、これを直接に測定することはきわめて困難である。そこで、雷雲によって生じる電界強度を地上で測定することにより、雷雲電荷の極性と分布状況を間接的に推定することが考えられる。本章では冬季の雷雲下において実際に針端コロナ電流測定装置を使用して地上電界の多点観測を行い、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ている。日本海側冬季雷では海上で形成された雷雲内の電荷配置がある程度保たれながら風に流されて移動してくるという前提のもとに、3地点の観測データから雷雲の移動方向と移動速度とを求める。これらの値から作図により電界極性の地上分布を求めるものである。結果として、地上電界分布が地図上で視覚的にわかるようになり、雷雲の大きさもおおよそ推定できるようになった。さらに、この方法によって得られた地上電界の地域分布とロケット誘雷の放電路とを関連づけてみたところ、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ている。すなわち、ロケット誘雷の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にあることを明らかにしている。本推定法は自然の雷放電の発生環境にも適用可能であり、電力施設の雷害防止対策などを検討するうえで有用となると思われる。

第4章では、ロケット誘雷実験を利用して配電線系統に誘起するサージ電圧および架空地線の電圧抑制効果の検討を行なっている。従来、高圧配電線系統の耐雷設計は主として誘導雷電圧を対象に行なわれ、最も一般的な保護方法として架空地線と避雷器が併用されることが多い。この保護方法が冬季雷に対しても有効であるかどうかを検討するためには、冬季雷の放電現象と誘導雷電圧の性状とを把握しておく必要があると考える。送配電線の近傍に雷撃があると、前駆放電および主放電に伴う静電誘導および電磁誘導によって線路上に電圧が誘起され、これが進行波となって線路上を伝搬する。ロケット誘雷実験では、対地雷放電の位置と雷放電諸量が同時に確実に得られるという特長を有するので、近傍に架設された試験用配電線への誘導雷電圧の観測は現象解明にきわめて有利となる。このような観点から、昭和54年（1979）および55年（1980）のロケット誘雷実験において誘導雷電圧の観測を行い、その実測結果に基づいて雷放電電流と誘導雷電圧との関係を明らかにしている。主放電電流との関係では、雷雲が負極性のとき生ずる正極性誘導雷電圧は急峻なパルス電圧を多く含んで全体の継続時間が長い。一方、雷雲が正極性のとき生ずる負極性誘導雷電圧ではパルス電圧は1個ないし2個程度と少なく全体の継続時間も短い。これはそれぞれの極性の雷撃放電の特性に対応しているものと考えられる。さらに、架空地線による誘導雷電圧の抑制について、今回の試験用配電線の配置では誘導雷電圧が $60 \sim$



70%に抑制されたことにより、架空地線の抑制効果が実証されている。

第5章では、配電線系統の保護継電器の表示のみの動作と雷放電との関連を検討している。一般に配電線系統では、故障を速やかに検出し故障区間を正確に特定することにより停電範囲の縮小を図っている。その一つとして配電用変電所では種々の保護継電方式が採用される。このうち、地絡方向継電器(DGリレー)は故障配電線を特定し、所要の遮断器に動作信号を提供するものとしてきわめて重要な役割を持っている。ところが冬季には雷放電によってDGリレーの出力は表示するが、遮断器動作にまでは至らないものが頻発する。そのような表示動作は冬季の雷放電発生時に多数の線路で記録され、動作線路の広がりも多岐にわたる傾向にある。冬季雷に対する配電線運用を検討する際にはこのようなDGリレーの表示状況を十分に把握しておく必要があると考えられる。本章では、対象とする実用の配電線系統を石川高専周辺の線路に限定し、各変電所に設置されたDGリレーの表示動作を調査し、この結果を石川高専で得られた針端コロナ電流による襲雷様相およびビデオ画像上の放電路と関連づけている。さらに、石川高専から約4km離れた河北潟干拓地においてロケット誘雷実験が実施されており、そこで得られた雷放電諸量とも関連づけて検討している。このような検討を通じて、DGリレーの表示動作は雷放電に伴う電圧や電流によって誘発されるよりは、上空の雷雲電荷が変化するため、線路に誘起されていた電荷が解放されることによって起きると推定している。

第6章では、雷放電におけるファイナルジャンプ、すなわち最終雷撃距離について検討している。Armstrong-Whiteheadの理論(A-W理論)に基づいて送電線の耐雷設計を行う場合、最終雷撃距離は架空地線の雷遮蔽効果を検討するための重要な因子となる。雷放電電流波高値と最終雷撃距離との実験式はこれまで多くの文献で提案されているが、自然雷の実測データによってその関係を確認した例はほとんどない。ロケット誘雷実験では、至近距離からのカメラや高速度カメラによって放電路を撮影することが可能である。通常のロケット誘雷では、上向きリーダはロケットにより引き上げられた接地ワイヤ先端から始まり、リーダ電流で蒸発されたワイヤ部分の金属プラズマに沿って主放電が誘起される。ところが、昭和57年(1982)までの45回の誘雷成功のうち、7回は主放電が高度約100mの地点でワイヤ蒸発路から外れて、自由空間へ下向きリーダを伴って異常に進展する例が得られた。このような異常誘雷放電では、ワイヤ蒸発路から外れた部分で下向きリーダ放電を伴うことから自然の雷放電に類似しているものと考えている。さらに、異常誘雷放電の雷撃地点は発射台近くの限られた地点に集中するので、最終雷撃放電路の形状を知ることが容易であるとともに、電流値の推定にも有利である。本章では異常誘雷放電における放電路の静止写真解析から最終雷撃距離を推定し、主放電電流値との関係を検討した。その結果、電流への依存性が従来提示されている実験式におけるよりも少ないという結果を得ている。もしそうであるとすればA-W理論によるかぎり、従来の推定より遮蔽失

敗の起きる確率が高く算定されることになる。

第7章では、本研究で得られた知見を総括して述べている。さらに本研究の今後の課題として、冬季雷の発生予知技術、送・配電線の新しい耐雷設計、配電線保護継電方式への新機能付加および冬季雷放電現象のメカニズム解明について、それぞれ言及している。

#### 参考文献

- (1) 雷撃特性調査専門委員会：「最近における雷研究の動向と問題点」、電気学会技術報告(Ⅱ部)第278号(昭和63年8月)
- (2) 室岡：「1000kV設計送電線の概要」、電気評論、74、p.557(平成元年5月)
- (3) 大和、三谷、松本、岸嶋、井上：「日本海沿岸の雷性状の検討事項と実測装置」、電力中央研究所研究報告178075(昭和54年5月)
- (4) T.Takeuti, M.Nakano, M.Brook, D.J.Raymond, P.Krehbiel: "The Anomalous Winter Thunderstorms of the Hokuriku Coast", Journal of Geophysical Research, 83, p.2385(1978)
- (5) 竹内：「北陸における冬季雷の研究」、電気学会雑誌、98、p.1156(昭和53年12月)
- (6) 大和、三谷：「雷害事故実態」、電気学会雑誌、98、p.1151(昭和53年12月)
- (7) 大和：「500kV送電線の雷害事故」、電気学会高電圧研究会資料HV-81-37(昭和56年10月)
- (8) 河村、石井：「小特集雷Ⅱ. 雷を捕える—最近の雷観測技術とその成果—」、電気学会雑誌、110、p.4(平成2年1月)
- (9) 河村、三宅：「統計的手法による落雷位置標定システムの標定精度向上」、電気学会放電高電圧研究会資料ED-86-125/HV-86-45(昭和61年11月)
- (10) 北条、石井、河村、鈴木、小室、塩釜：「落雷に伴う電磁界変化波形の特性と評価法」、電気学会論文誌、108-B、p.165(昭和63年4月)
- (11) 櫻野、田屋、堀井：「針端コロナ電流と空電方向探知からみた北陸冬季の襲雷様相」、石川工業高等専門学校紀要、20、p.33(昭和63年3月)
- (12) K.Narita, Y.Goto, H.Komuro, S.Sawada: "Bipolar Lightning in Winter at Maki Japan", Journal of Geophysical Research, 94, p.13191(1989)
- (13) 三宅、横山：「雷放電進展様相観測装置の開発とリーダ進展速度の測定」、電気学会論文誌、109-B、p.81(平成元年2月)

- (14) K.Nakahori, T.Egawa, H.Mitani: "Characteristics of Winter Lightning Currents in Hokuriku District", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-101, p.4407(1982)
- (15) S.Yokoyama, K.Miyake, H.Mitani, A.Takanishi: "Simultaneous Measurement of Lightning Induced Voltages with Associated Stroke Currents", IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, PAS-102, p.2420(1983)
- (16) 岸嶋, 三宅, 原: 「柏崎地点の冬季雷の雷撃電流観測結果」, 電気学会高電圧研究会資料 HV-84-32 (昭和59年9月)
- (17) 多田, 藤波: 「日本海側冬季雷における同時雷撃現象」, 電気学会論文誌, 105-B, p.802 (昭和60年9月)
- (18) 原, 高橋, 安井: 「日本海沿岸地域における500kV送電線を対象とした冬季雷観測」, 電気学会論文誌, 108-B, p.289 (昭和63年7月)
- (19) 井上, 三谷, 多田, 藤波, 三宅, 稲葉, 小林, 田村: 「154kV敦賀線における冬季雷観測結果(昭和58年度)」, 電気学会高電圧研究会資料 HV-84-33 (昭和59年9月)
- (20) 山本, 相木, 松原, 松浦, 木下, 有馬, 竹内, 鈴木, 齊川: 「冬期, 夏期の雷実測結果について(その3)」, 電気学会放電高電圧研究会資料 ED-89-108/HV-89-51 (平成元年10月)
- (21) 有馬, 渡辺, 高木, 木下: 「多地点同時雷撃現象に関する基礎的研究」, 電気学会論文誌, 107, p.299 (昭和62年6月)
- (22) 堀井: 「小特集: 雷 IV. 雷は制御できるか?—ロケット誘雷など—」, 電気学会雑誌, 110, p.21 (平成2年1月)
- (23) M.M.Newman, J.D.Robb: "Protection for Aircraft", Lightning 2 edited by R.H.Golde, p.671(1977) Academic Press
- (24) M.M.Newman, J.R.Stahmann, J.D.Robb, E.A.Lewis, S.G.Martin, L.V.Zinn: "Triggered Lightning Strokes at Very Close Range", Journal of Geophysical Research, 72, p.4761(1967)
- (25) R.P.Fieux, C.H.Gary, P.L.Hubert: "Artificially Triggered Lightning above Land", Nature, 257, p.212(1975)
- (26) R.P.Fieux, C.H.Gary, B.P.Hutzler, A.R.Eybert-Berard, P.L.Hubert, A.C.Meesters, P.H.Perroud, J.H.Hamelin, J.M.Person: "Research on Artificially Triggered Lightning in France", IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, PAS-97, p.725(1978)
- (27) P.Hubert, P.Laroche, A.Eybert-Berard, L.Barret: "Triggered Lightning in New Mexico", Journal of Geophysical Research, 89, p.2511(1984)
- (28) M.A.Uman: The Lightning Discharge, p.217 (1987), Academic Press
- (29) 堀井, 宮地: 「ロケットによる雷放電トリガの実験」, 電気学会雑誌, 98, p.1160 (昭和53年12月)
- (30) 和田, 堀井: 「冬季ロケット誘雷実験データの検討」, 電気学会放電高電圧研究会資料 ED-89-135/HV-89-78 (平成元年10月)
- (31) K.Horii: "Experiment of Artificial Lightning Triggered with Rocket", Memoirs of the Faculty of Engineering, Nagoya University, 34, p.77 (1982)
- (32) 堀井: 「ロケットによる電力線路および保護装置への雷撃試験」, 昭和62年度文部省科学研究費補助金(試験研究(1))研究成果報告書(昭和63年3月)
- (33) 宮地, 堀井, 鬼頭, 東山, 武藤, 中村, 北川, 池田, 角, 饗庭, 櫻野: 「北陸における昭和53年12月冬期ロケット誘雷実験」, 電気学会論文誌, 99-A, p.393 (昭和54年8月)
- (34) 堀井, 鬼頭, 山下, 東山, 武藤, 中村, 池田, 角, 饗庭, 櫻野, 北川, 石橋, 宮地: 「ロケットを利用した自動車, 電気機器への雷撃実験」, 電気学会論文誌, 101-B, p.500 (昭和56年8月)
- (35) 角, 池田, 堀井: 「誘雷実験で観測されたステップドリーダの特性」, 電気学会放電高電圧研究会資料 ED-85-70/HV-85-21 (昭和60年10月)
- (36) 葛城, 川島, 福井, 宮地, 堀井: 「63年度冬季雷電流の鉄塔脚部伝播特性観測結果」, 電気学会放電高電圧合同研究会資料 ED-89-132/HV-89-75 (平成元年10月)
- (37) 高島, 松田, 二宮, 横山: 「鉄塔雷撃時の碍子間電圧観測結果」, 電気学会放電高電圧研究会資料 ED-88-106/HV-88-67 (昭和63年10月)
- (38) M.W.Maier, W.Jafferis: "Locating Rocket Triggered Lightning Using the LLP Lightning Locating System at the NASA Kennedy Space Center", 10th International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, p.337(1985)

## 第2章 冬季雷雲の規模からみたロケット誘雷放電の特徴

### 2.1 緒言

日本海沿岸の冬季雷に起因する送電線雷故障は、従来から知られている夏季のそれとは異なり、2回線にまたがる故障の比率が高いなど特異な故障様相を示すことが指摘されている<sup>(1)(2)</sup>。このような冬季の雷故障を解明するための一つの過程として、ロケットで誘発された雷とそれをもたらす冬季雷雲の特性との関連をみることに有用であると考えられる。

冬季の雷雲はシベリア寒気団と対馬暖流との温度差ならびに湿度差によって日本海海上で発生する。この雷雲は季節風に流されて局地的にみれば帯状の雲となって日本海沿岸に到来する<sup>(3)</sup>。また、冬季雷雲の高度は非常に低く雲頂高度は4~6 kmであり、雲底も300~700 mまで低下することがある<sup>(4)</sup>。そのためと思われるが、冬季雷雲下の地上電界は夏季雷に比べて高く、雷雲が到来し始めると海岸線付近で2 kV/mをはるかに超えることが多い<sup>(5)</sup>。

昭和52年(1977)12月以来<sup>(6)</sup>、昭和60年(1985)12月末まで、9年間にわたり石川県河北潟干拓地内において冬季雷を対象としたロケット誘雷実験が実施された。この場合、雷放電は人為的に誘発されたもので自然雷とは異なるが、その成否や放電持続時間の長短を雷雲の広がりに関連づけて考察を進めることにより、冬季雷雲の一つの側面を明らかにすることができた。

ロケットは地上電界の極性にかかわらず絶対値が約4 kV/m以上に達すると発射しているが、必ずしも誘雷に成功するとはかぎらない。この疑問を解明する目的で、地上電界の簡易測定器として針端コロナ電流測定装置<sup>(7)</sup>をロケット発射地点周辺数kmの範囲に5~6台配置して同時観測を行い、周辺の地上電界分布を推測した。このような針端コロナ電流の多地点同時観測によって、冬季雷雲の水平方向分布状況と誘雷の成否との間に相関性のあることが指摘できた。

さらに、誘発された雷放電のうち溶融した鋼線部分を除き、その上方に自然に形成された放電路の発光継続時間が700 msにも達する長時間のものがある。このような放電が生じたのはすべて雷雲が負極性のものばかりで、しかもその前後において地上電界が高い値で長時間継続する。このことから雷雲が大規模なときに長時間にわたって持続する放電が起こりやすいのではないかとということが考えられた。

以上の考察を通じて、冬季雷雲が上空を覆う持続時間が長く、広がりが大きいとき

に雷放電が起きたとすれば、自然雷においても持続時間が長くなる可能性があると思われる。

### 2.2 ロケット誘雷の成否および発光時間の長い雷放電の発生

#### 2.2.1 地上電界の強さとロケット誘雷の成否

鋼線を引き上げるロケットを雷雲に向かって打ち上げることによって誘発された雷放電は、雷雲の極性にかかわらずすべて鋼線の先端から上空に向かって放電路が進展している<sup>(8)</sup>。このような上向きのロケット誘雷放電は、鋼線先端へ集中する電界がある値を超えたときから開始するものと思われる。

上向き雷放電誘発時におけるロケット発射直前の地上電界の強さと鋼線到達高度との関係を図2.1に示す。昭和52年(1977)から57年(1982)まで毎冬季のロケット誘雷実験における45例の誘雷成功<sup>(9)</sup>を○(雷雲極性:正)、●(雷雲極性:負)で示し、19例の誘雷失敗を△(雷雲極性:正)、▲(雷雲極性:負)で示した。なお、同図ではロケットの早期爆発および鋼線切れによる誘雷失敗の例は除いてある。

ロケット発射直前の地上電界は約4~16 kV/mの範囲にあり、地上電界が高いときに打上げた場合ほど鋼線到達高度が低くても誘雷される傾向が認められる。ところが発射前の地上電界が高く、鋼線が十分な高度に達しているにもかかわらず誘雷に至らないものがある。すなわち、同じ地上電界の強さでも、鋼線先端から放電路が進展していく場合と、しない場合とがある。その一つの理由として、鋼線先端は曲率半径が小さいので電界は集中するが、鋼線先端が侵入していく空間の電界の強さが上空にいくほど強くなっているような場合には、放電路がますます進展を助長され、誘雷が起きやすくなると考えられる。

#### 2.2.2 雷放電の発光継続時間

ロケット誘雷実験においてはロケット打上げ地点から70 mの至近点から上空に向けて、1,000コマ/sの高速度カメラにより、放電路の進展を撮影している。鋼線の先端から上方に形成された放電路のフィルム画像の黒化度から発光強度の変化を求めた<sup>(8)</sup>。測定箇所は鋼線の先端より上方で、自然に形成された樹枝状の放電路が1本に収束した部分にあたる位置にとった。それは上方で枝分かれした放電路から供給される全電流が通過する点という意味である。この発光している期間は放電路にかなりの導電性があると判断してよい<sup>(10)</sup>。

撮影に成功したもののうちから、上述のようにして求めた放電路の発光継続時間を大きさの順に並べて示したものが図2.2である。この結果によれば発光が、618

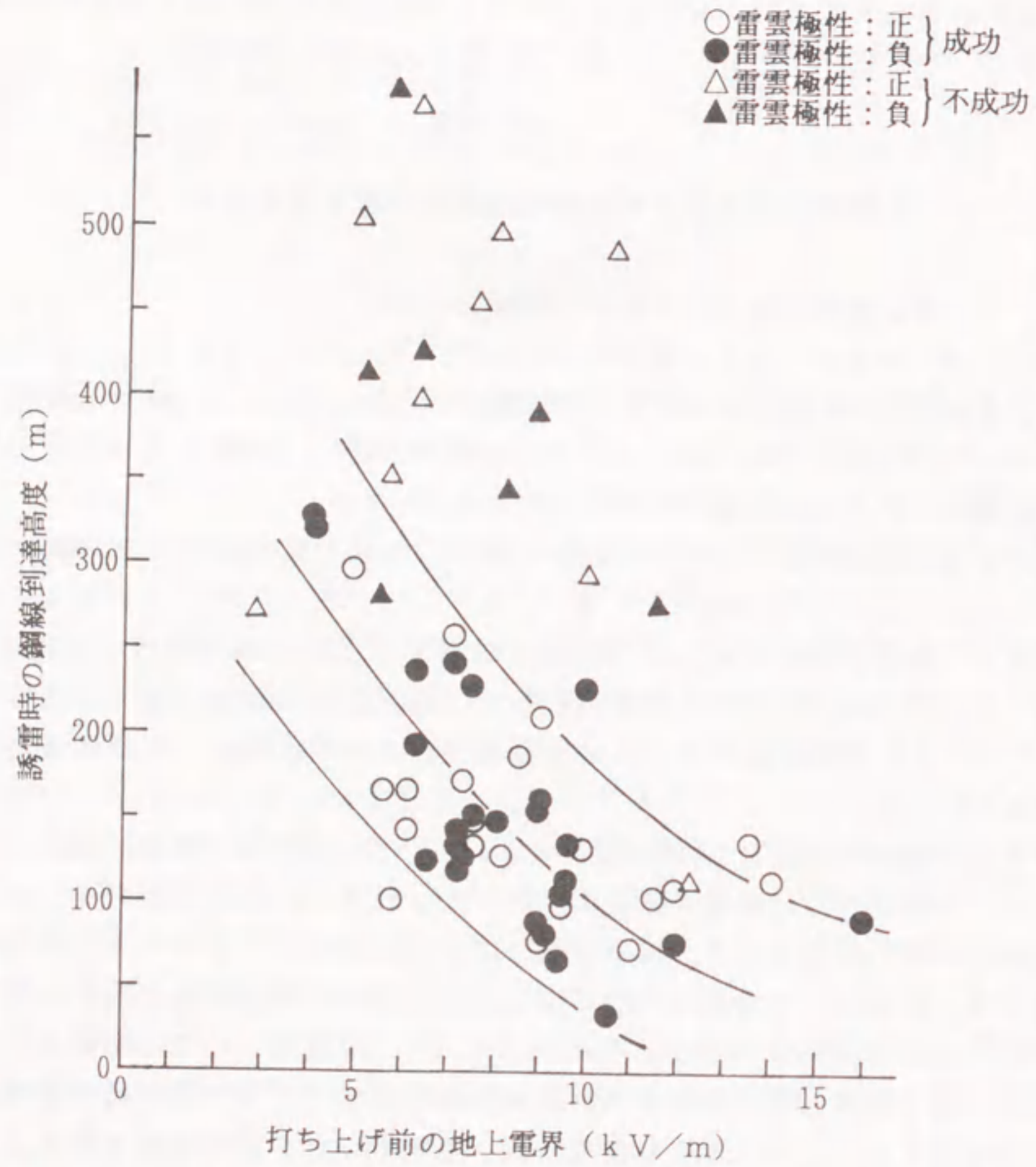


図2.1 地上電界強度と誘雷時の鋼線到達高度

ms 以上にわたり継続した例が34例中4例観測されており、最も長いものは707msに達している。現在までの観測で得られたこの4例はいずれも雷雲が負極性の場合である。ちなみに、618msは50Hzの31サイクル、60Hzの37サイクルに相当し、送電線故障時の高速度再閉路における無電圧時間約30サイクルを上まわるものである。放電路が発光を持続する場合数千度の高温に達していると考えられ、放電路の導電性はかなり高いと推定される。

このような600msを超える雷放電は、角氏らの夏季の自然雷観測においても273例中11例記録されているが<sup>(11)</sup>、その割合は冬季の誘雷放電に比べ少ないと

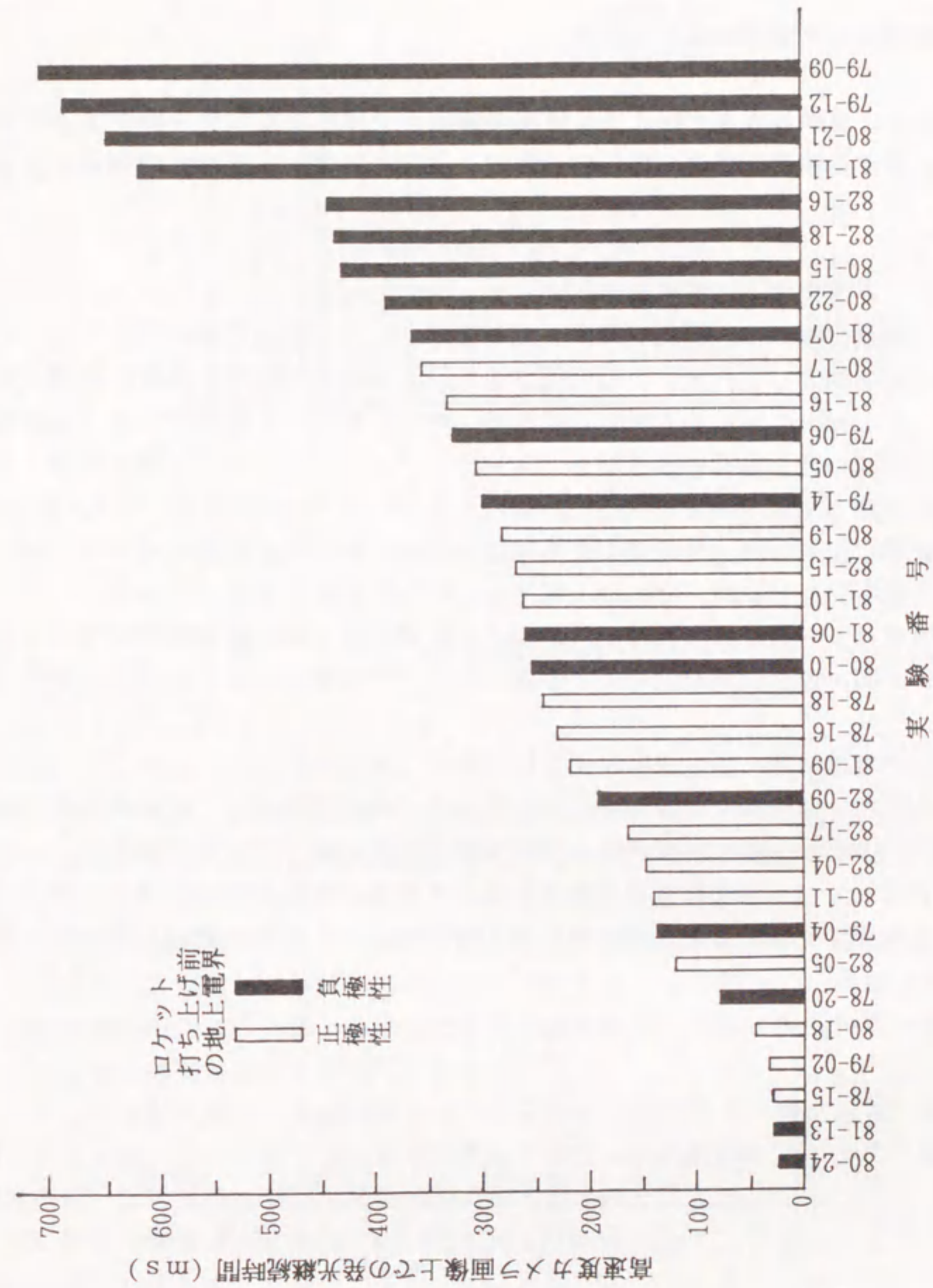


図2.2 70mの距離から撮影した高速度カメラ画像上での発光継続時間

考えられる。

### 2.3 針端コロナ電流からみた検討

前節で示した実験事実がどのような雷雲の環境下で発生したのかを検討するために、針端コロナ電流の観測結果から得られる雷雲の規模とロケット誘雷との関連性を検討してみた。

#### 2.3.1 冬季雷雲下の電界分布とロケット誘雷の成否

ロケット誘雷実験では、回転セクター式の電界計による地上電界の測定とともに針端コロナ電流を測定している。この電流は地上5mの高さに地面に垂直に設置された半径0.15mmのニッケル電極から生じるコロナ放電に伴う電流である。この配置ではコロナ電流は地上電界の強さが1.5~2kV/m以上になると流れ始め、その大きさはほぼ地上電界の強さに対応して変化する<sup>(7)</sup>。しかしながら、この大きさは気象条件などに左右され、絶対値にあまり意味をもたせることは避けたいが、正、負の極性や持続時間などについては地上電界のそれらと完全に対応している。

本節ではロケット発射点における針端コロナ電流の同一極性継続時間に着目し、雷雲下において同一極性の電荷が分布する幅とロケット誘雷の成否との間の関係に着目している。

針端コロナ電流の同一極性継続時間とは、図2.3に示すように、ロケット打上げ前後において打上げ時刻を含み同極性の針端コロナ電流が継続して流れた時間Tである。ただし、ロケット打ち上げ前後の針端コロナ電流の測定データに限れば、コロナ電流が零となっている時間は2分以内のものと5分以上のものに明確に分かれるので、コロナ電流が消滅後2分以内に前と同じ極性のコロナ電流が流れた場合はこれを

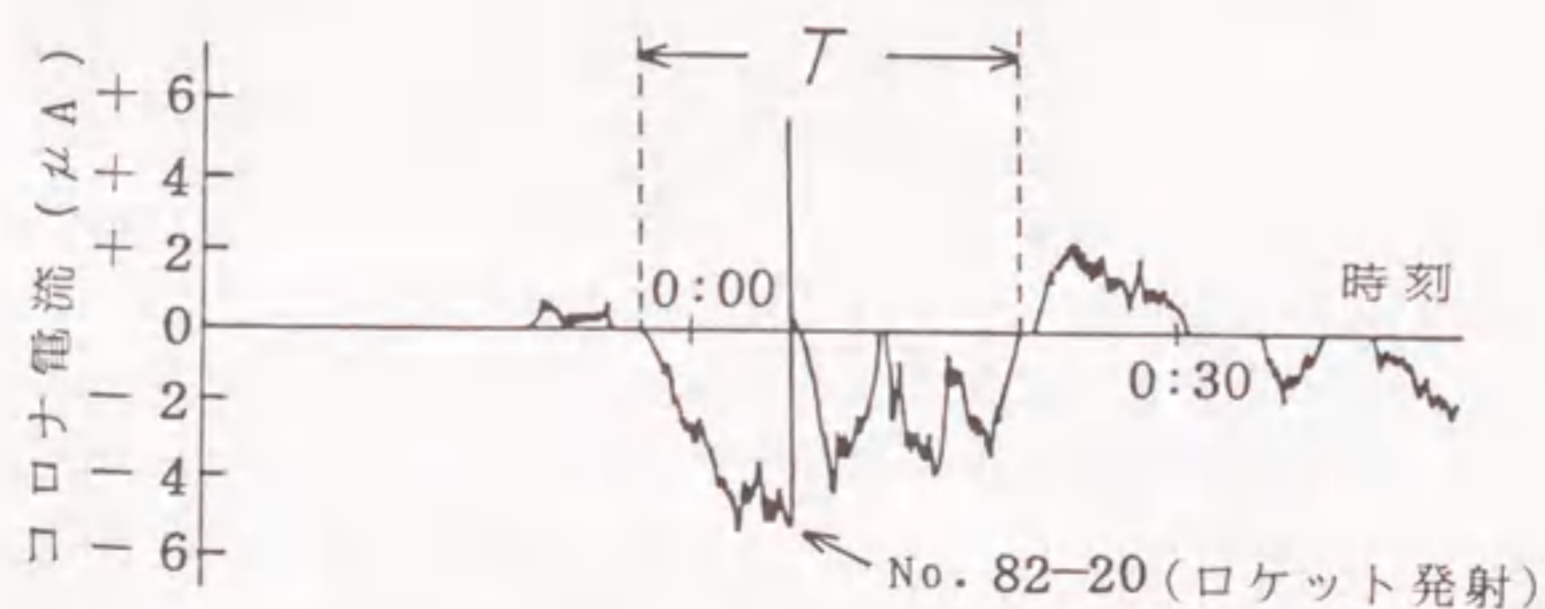


図2.3 針端コロナ電流同一極性継続時間Tの定義

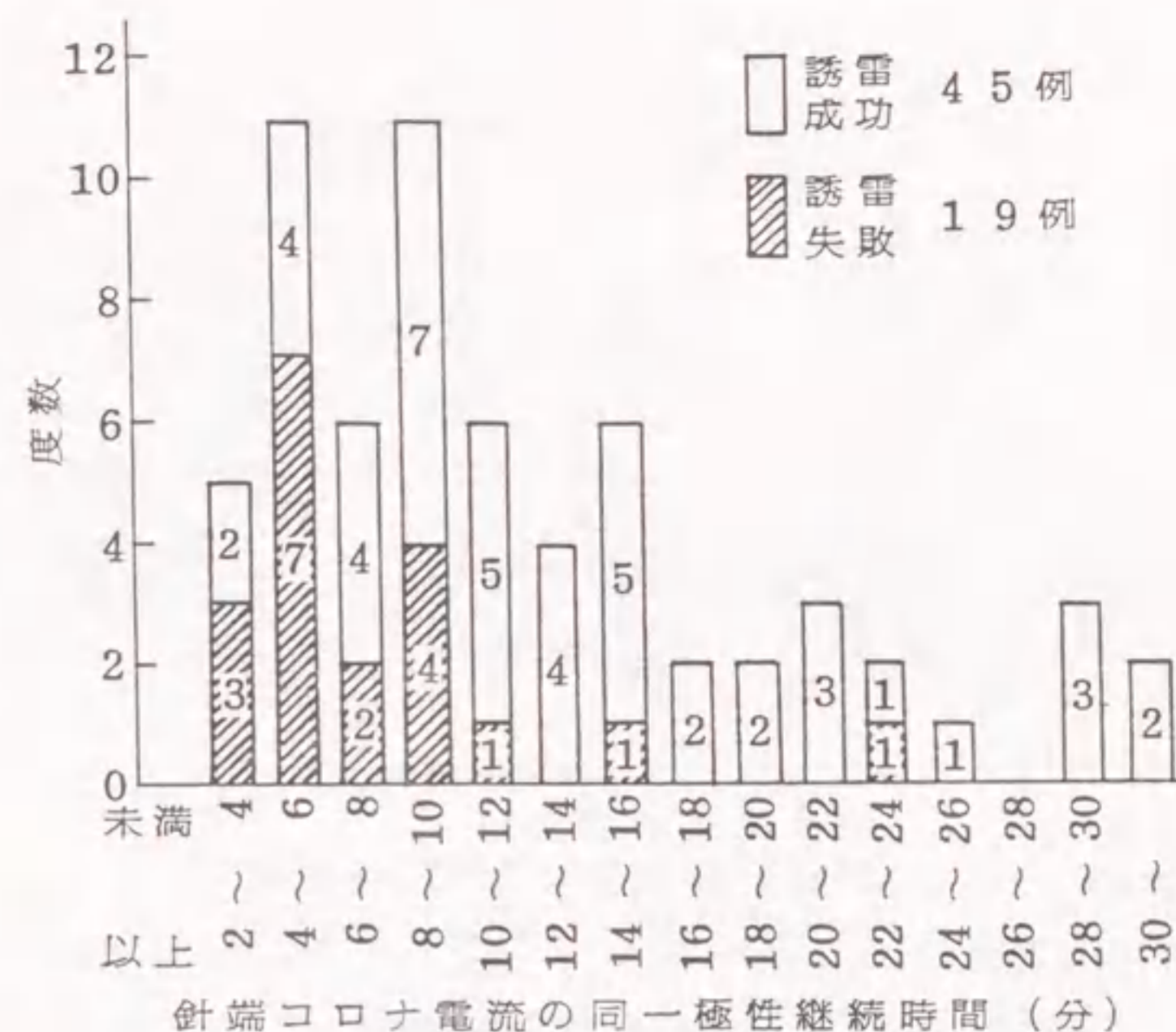
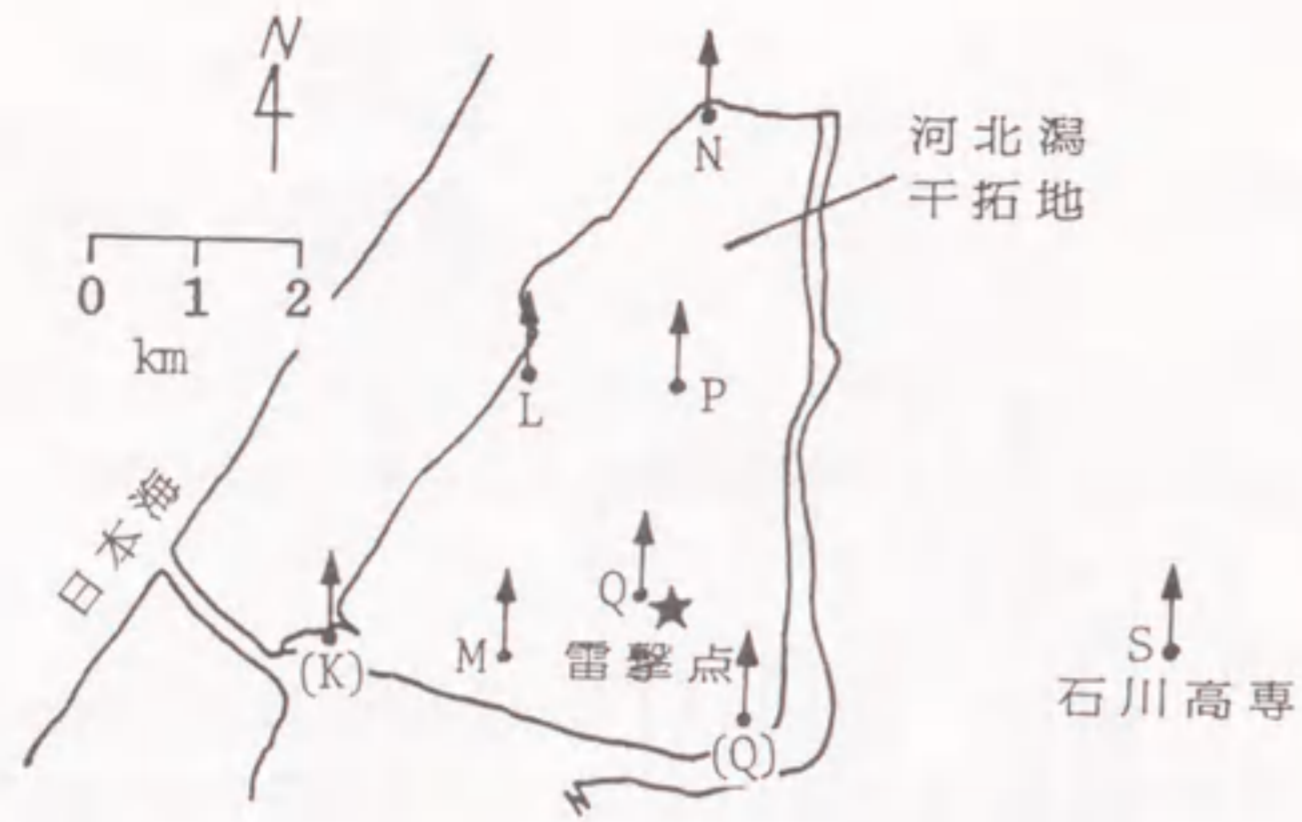


図2.4 ロケット発射前後における針端コロナ電流同一極性継続時間の分布

継続したと考えた。また、針端コロナ電流の極性が反転しても2分以内に元の極性のコロナ電流が流れる場合には、上空の雷雲内では同じ極性の電荷がほぼ連続していると考えて、これも同じ極性が継続しているとした。

冬季雷雲は、気象台のレーダエコー図などでも明らかなように平行する帯状の形状をしており、この帯とはほぼ直角の方向に移動する。したがって、針端コロナ電流の同一極性継続時間は、上空を通過した冬季雷雲内において同一極性の電荷が分布している帯の幅にほぼ対応すると考えられる。

ロケット発射時機をはさんで発射点で測定された針端コロナ電流の同一極性継続時間の分布を図2.4に示す。誘雷に失敗した場合は2例を除いて、すべて針端コロナ電流の同一極性継続時間が12分未満である。12分以上の2例については、後述のように雷雲の進行方向前縁でロケットを打上げた時であり、ロケット発射のタイミングが早すぎたことによるものである。これを除けば、12分以上同一極性が継続した場合にはすべて誘雷に成功している。このことは、同程度の地上電界であっても、冬季雷雲内で同一極性の電荷が分布している幅が数km程度と大きい場合には誘雷しやすく、この幅が小さい場合には誘雷しにくいことを意味する。



(注) 1. L, M, N, P, Q, Sは昭和57年度の観測地点を示す。  
2. 昭和58年度には (K) を新設し, Qを (Q) へ移動した。

図2.5 針端コロナ電流の観測位置

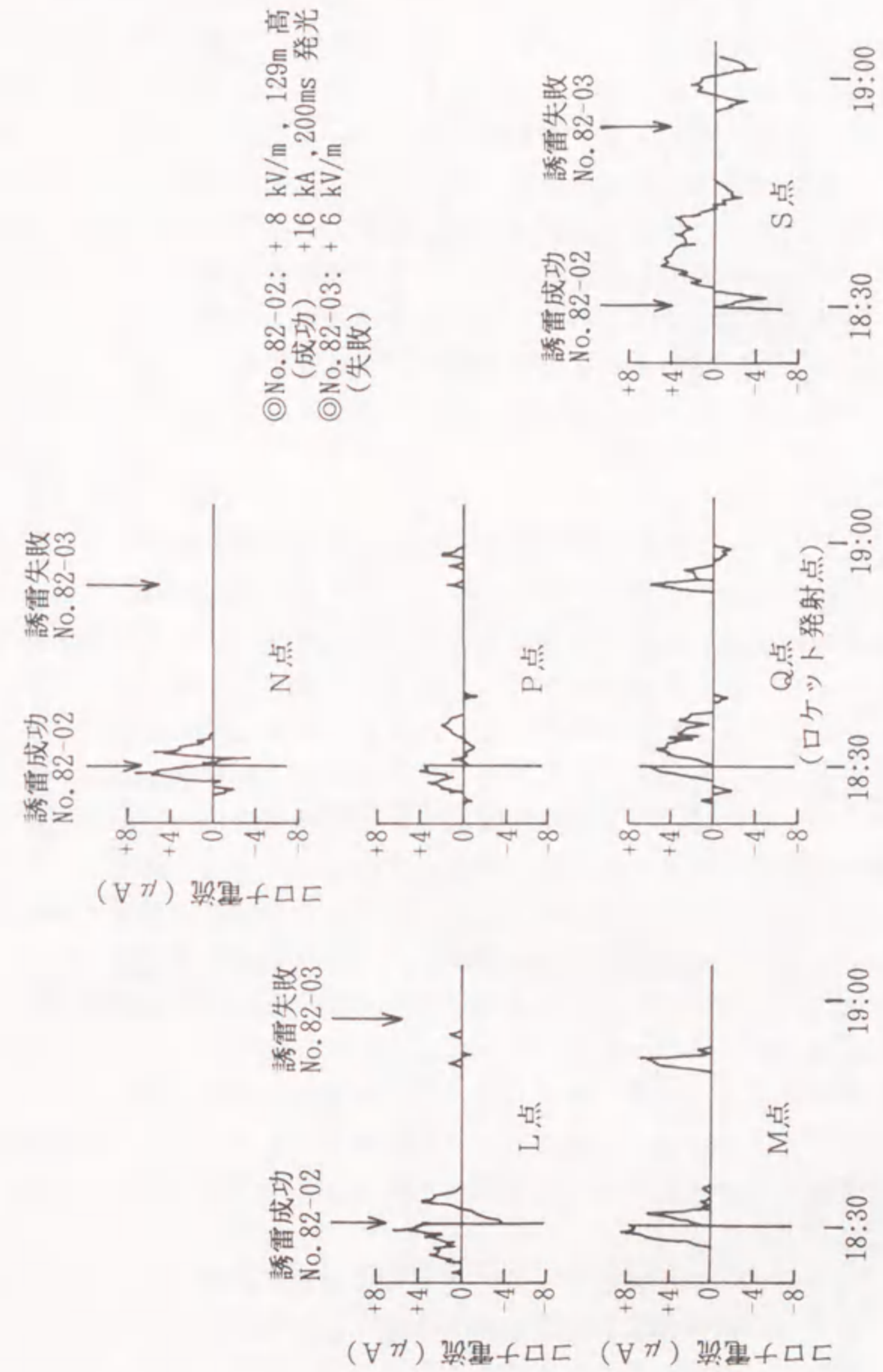
### 2.3.2 針端コロナ電流の6地点同時観測

前節で述べたようにロケット誘雷に成功したときには、少なくとも発射地点上空を幅広い雷雲が通過中であることが予想される。しかし、単にそれだけでは説明できない事実もある。端的に言えば、図2.4で14~16分および22~24分に認められる2件の誘雷失敗例である。

昭和57年度(1982)の冬季ロケット誘雷実験では、冬季雷雲の水平方向分布状況を知るために、針端コロナ電流測定器を河北潟干拓地内に5箇所および石川高専内に1箇所の合計6箇所に分散配置した。その観測位置を図2.5に示す。西方向から進行してくる雷雲に対しては次のような3段階構えで把握する。すなわち、ロケット発射点を含む南北線上に、北からN, P, Q点、この線から西へ1.5 km離れた南北線上にL, M点、およびロケット発射点から東へ4.5 km離れた石川高専(S点)の各点で把握する。また、北西方向から到来する雷雲に対してはN, L, K線上, P, M線上, およびS点で把握する。

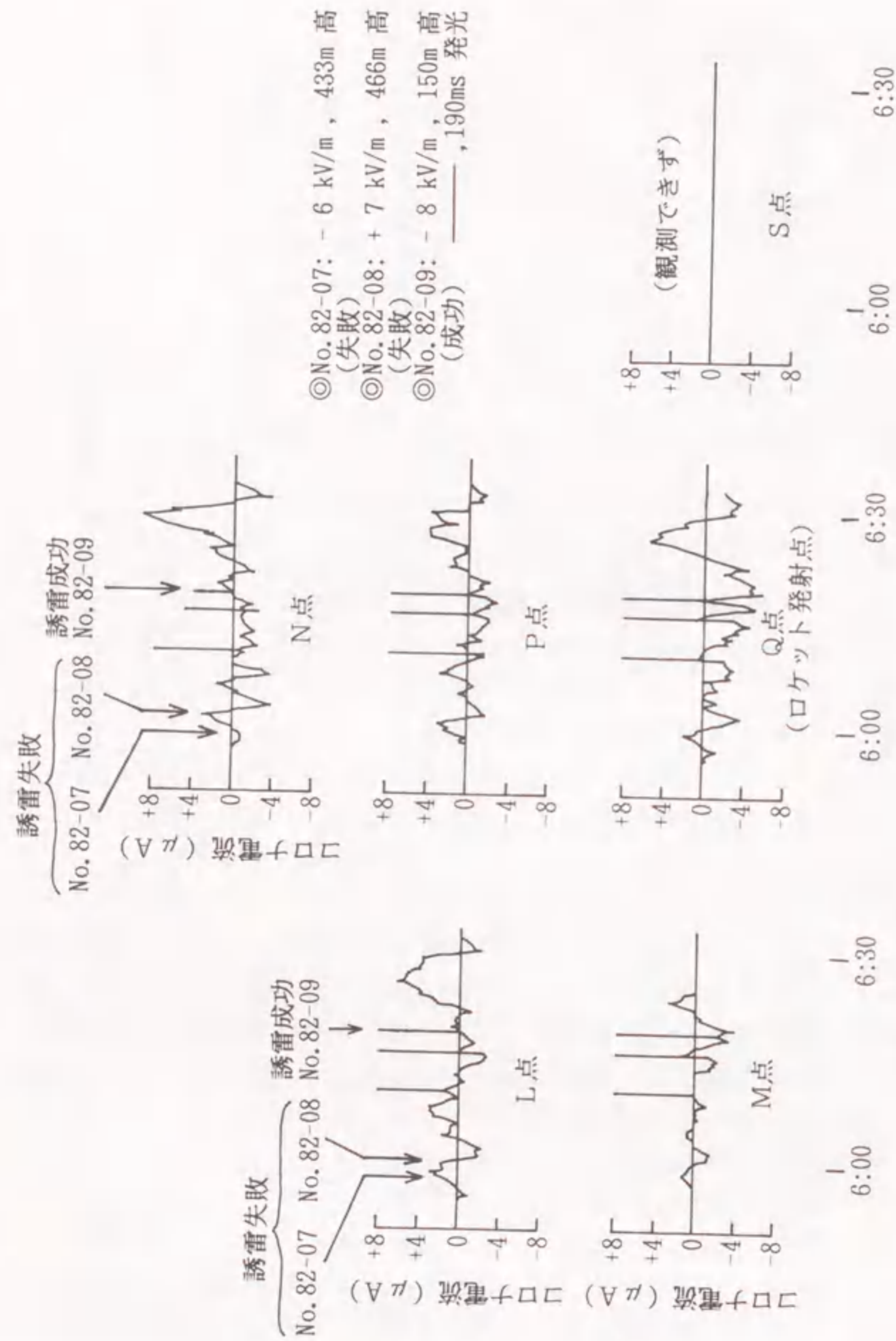
### 2.3.3 針端コロナ電流の分布からみた冬季雷雲の水平方向分布

昭和57年度(1982)の冬季ロケット誘雷実験において、ロケット発射前後の針端コロナ電流が6箇所の観測点すべてで観測されたのは5例である。また、別の3例は石川高専(S点)を除いて河北潟干拓地内5箇所で観測できた。代表的な測定例を図2.6(a), (b)に示す。波形はだいたいにおいて各観測点の位置にそれぞれ



(a) 実験番号 82-02, 82-03 の例 (昭和57年(1982)11月24日)

図2.6 各観測地点での針端コロナ電流波形



(b) 実験番号 82-07, 82-08, 82-09の例  
(昭和57年(1982)12月2日)

図2.6 各観測地点での針端コロナ電流波形(続き)

れ対応させて示してある。

図2.6(a)は、11月24日18時30分頃から19時頃までの各観測点での針端コロナ電流波形で、これらを相互に比較すると、南北に5km離れた2点N, Q点でのコロナ電流のピーク値は両地点とも $7\mu\text{A}$ でほぼ等しい。これに反して、東西に4.5km離れたQ, S点での18時30分頃のパルス波形の直前におけるコロナ電流の大きさはQ点では $7\mu\text{A}$ , S点では0であって全く異なっている。S点では、この後にコロナ電流が流れ始め、Q点と類似した波形が現れてくる。針端コロナ電流の大きさはその地点での地上電界の強さに対応するから、上空の雷雲の電荷分布に対応すると考えられる。したがって、上記の事実は南北方向には少なくとも5kmにわたりにかなりの量の電荷が連続的に分布し、東西方向には電荷が断続していることを示している。このような傾向は今回の測定例の全体を通して認められ、冬季雷雲の電荷はほぼ帯状の形状をなし河北潟干拓地付近ではほぼ南北方向に分布していると推定される。

#### 2.3.4 冬季雷雲の位置とロケット誘雷の成否

2.2.1節で述べたように、ロケット打上げ直前の地上電界が高く、鋼線が十分な高度に達しているにもかかわらず誘雷に成功しなかったものがある。針端コロナ電流の波形では、図2.6の(a)図において実験番号No.82-3, (b)図においてNo.82-7, No.82-8がその例に相当する。ロケット打上げ前の発射点における地上電界は3例とも6~7kV/m(回転セクター型電界計による測定)とかなり高かったにもかかわらず、誘雷に失敗している。

そこで、誘雷に成功した場合と失敗した場合のロケット打上げ前後の各測定点での針端コロナ電流を比較してみる。図2.6(a)において誘雷に成功したNo.82-2では、河北潟干拓地内のすべての観測点で針端コロナ電流が十分流れている。このような場合には雷雲は干拓地を広く覆っていたと考えられる。また、図2.6(b)の成功例No.82-9においては、L, N地点ではたまたま針端コロナ電流は零付近にあるが、M, PおよびQ点(発射地点)では確かにある程度の大きさのコロナ電流が流れている。そのような相違はあるが全地点とも少なくとも30分間はコロナ電流が持続しており、干拓地はかなり帯電した雷雲で覆われていたことがむしろ重要である。

これに対し、誘雷に失敗したNo.82-3前後では、針端コロナ電流が $2\mu\text{A}$ 以上流れているのはMおよびQ点のみであって、北方向の観測点ではコロナ電流がほとんど流れていない。すなわち、雷雲は干拓地の南側を通過したと考えられる。また、No.82-7, No.82-8の場合には、各地点で針端コロナ電流が流れ始めて数分でロケットを打ち上げている。これは、到来する雷雲の前縁でロケットを打ち上げたことを意味する。

図2. 1のように、同一地上電界でも誘雷に成功したり失敗したりした原因は、ロケット発射点のみで地上電界を測定している段階では説明できなかった。針端コロナ電流によって地上電界を多地点で同時に観測し、ロケット発射点と雷雲との相対的位置についてデータが得られて、初めてロケット発射点が雷雲の中央部に位置する場合には誘雷しやすく、発射点が雷雲の端部に位置する場合には誘雷しにくいことが実証できた。このような傾向は他のロケット発射時に測定された例でも認められる。

2. 3. 1節と本節の考察より地上電界が同程度であっても、冬季雷雲中における同一極性電荷の分布する幅が大きく、かつその中央部であるほど上空の電界は高くなっていると推定される。そのような空間に鋼線が侵入していくと、発生した放電路の進展が助長され、ついには誘雷に至る。

### 2. 3. 5 発光時間の長い雷放電の発生前後における針端コロナ電流の変化

2. 2節で述べたような長時間にわたって発光が持続するような雷放電の起きた前後における雷雲の飛来状況を示すものとして、再びロケット発射地点の針端コロナ電流の経時変化に着目する。図2. 7は誘発された放電路が長時間にわたって発光が継続した5回の誘雷前後の状況であり、図2. 8は逆に短時間の放電が誘発された4回の誘雷前後のものである。図2. 7においてはコロナ電流のレベルも相対的には大きく、しかも誘雷の前または後に少なくとも30分程度の期間連続して流れ続けている。これに比べ図2. 8においては大きさが相対的に小さく、断続的に流れている。これ以上電流がとぎれた場合には2. 3. 1節で示したように誘雷にすら成功しなくなる。

ロケット・ワイヤ方式で誘発した冬季雷の中でも長時間にわたり発光が持続したものは、上空に雷雲が連続して到来したときに起きやすいことが指摘できる。昭和57年(1982)までの45例中4例がそれに相当する。

### 2. 3. 6 自然の状態での冬季雷雲の飛来様相

これまでの検討はロケット発射の前後における針端コロナ電流からのものであった。ここではロケット誘雷実験から離れて、自然の状態での雷雲の飛来様相について針端コロナ電流の継続時間から検討する。

上記の目的で昭和58年度(1983)の冬季1ヶ月間、河北潟干拓地内で針端コロナ電流の6地点同時観測を行った。この年はロケット誘雷実験は実施されなかった。測定地点の配置はL, M, NおよびP点については昭和57年度(1982)と同様とし、新たに図2. 5の括弧で示すようにK点を加え、Q点を移動させた。この配置により、針端コロナ電流波形の極性、出始めやピークの時間的ずれおよび継続時間などから冬季雷雲の移動状況をいっそう適確に把握できるようにした。

干拓地全体を覆うような広範囲の雷雲の襲来は35回であった。このとき得られた針端コロナ電流波形をピークごとに極性別に整理し、正極性88例、負極性90例の

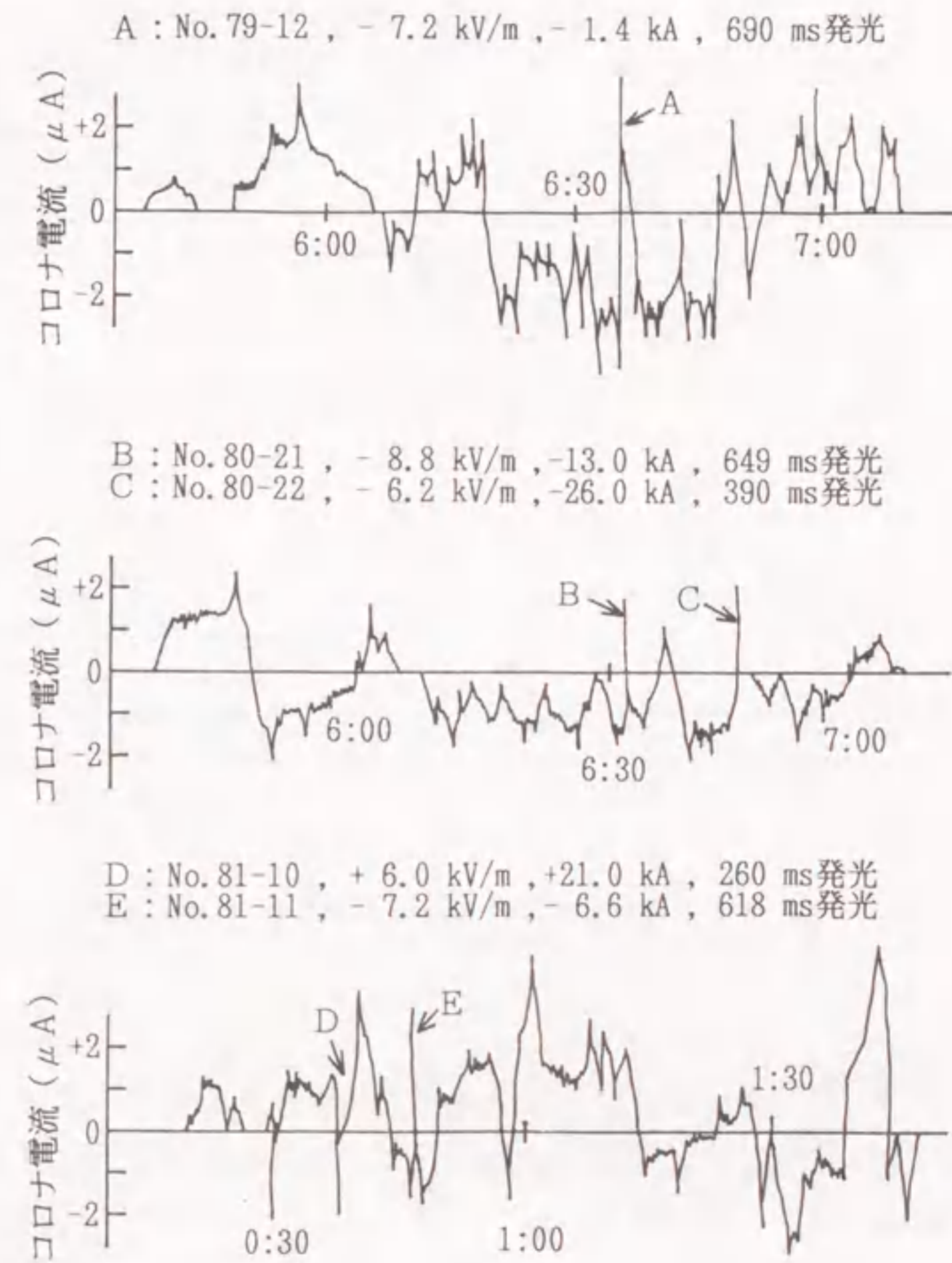


図2. 7 長時間放電誘発時の針端コロナ電流



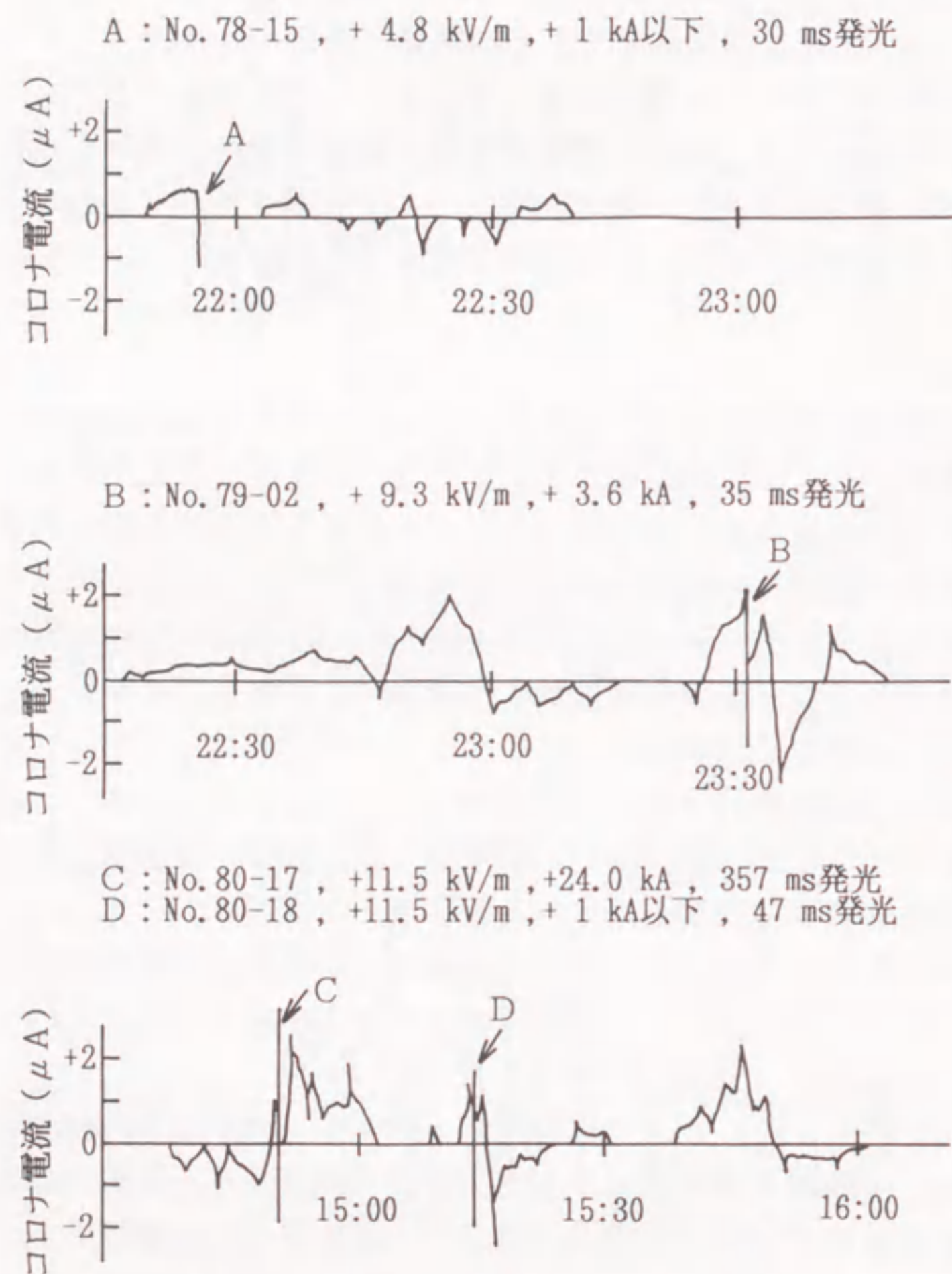


図2. 8 短時間放電誘発時の針端コロナ電流

コロナ電流の 継続時間 (分)	度 数			
	10	20	30	40
5 未満	35			
5 ~ 10	24			
10 ~ 15	15			
15 ~ 20	5			
20 ~ 25	6			
25 以上	3			

(a) 正極性の場合

コロナ電流の 継続時間 (分)	度 数			
	10	20	30	40
5 未満	31			
5 ~ 10	36			
10 ~ 15	12			
15 ~ 20	8			
20 ~ 25	1			
25 以上	2			

(b) 負極性の場合

図2. 9 自然の状態で飛来する雷雲による針端  
コロナ電流同一極性継続時間の分布

それぞれについて継続時間の分布を求めた結果を図2. 9に示す。

2. 3. 1節で示した誘雷に成功しやすい条件, すなわち同一極性の針端コロナ電流の継続時間12分以上の雷雲は図2. 9の10分~15分以上の持続時間に相当し, それらは両極性合わせて52例であった. この割合は今回の観測例全体の約30%程度である。

また, 2. 3. 5節で示した長時間にわたって発光が継続する雷放電の発生しやすい条件, すなわち同一極性の針端コロナ電流が30分程度以上継続する雷雲は図2. 9の25分以上の持続時間に相当し, それらは両極性合わせて5例あり, 今回の観測例中約3%に相当する. さらに冬季雷雲では, ほとんどの波形は正, 負の極性のものが図2. 7に示すように相次いで到来するので, コロナ電流の極性が変化しながらとぎれることなく継続時間が30分以上にわたるものまで対象を広げれば, 図2. 9の15分~20分以上の持続時間に相当し, それらは両極性合わせて25例になった. これも含めれば, ロケット誘雷において長時間発光が継続する雷放電の発生しやすい

条件を満たす雷雲が襲来する割合は、今回の観測例全体の約14%程度とみなされる。

このような状態で自然の対地雷放電が発生するかどうかは必ずしもわからないが、ロケット誘雷実験からの類推が許されるとすれば次のように指摘できる。すなわち、2.3.1節の結果から、大規模な雷雲に覆われた高層建築物からいったん放電路が伸び始めれば、それは助長され大地と雷雲とを橋絡し、対地雷放電に至る可能性が高くなる。また、発生した対地雷放電の持続時間は2.3.5節の結論から長くなるのではないかと考えられる。

#### 2.4 結言

冬季ロケット誘雷実験で得られた誘雷の成否や放電持続時間の長短を検討し、それらを針端コロナ電流の多地点観測結果から得られた雷雲の規模と関連づけることにより、ロケット誘雷の特徴について次のような結論を得た。

(1) 地上電界が同程度であっても、雷雲内で同一極性の電荷が分布している水平幅が河北潟干拓地(南北5.2km, 東西4km)程度以上大きく、ロケット発射点が雷雲の中央部に位置する場合には誘雷しやすい。このことから、冬季雷雲中における同一極性電荷の分布幅が大きく、かつその中央部であるほど上空の電界は高くなっていると推定される。

(2) 長時間にわたって発光が持続する雷放電を誘発したときにはコロナ電流はそのレベルも大きく、しかも誘雷の時機をはさんで少なくとも30分程度の期間連続して流れ続ける。雷雲が次々と続いて到来するとき自然雷が起こるか起きないかは別の問題として存在するが、そのような状態で自然雷が発生すれば長時間持続するものとなる可能性があることを示している。

(3) ロケット誘雷実験を離れて、自然の状態での雷雲の飛来様相を針端コロナ電流により観測した結果、正、負両極性にわたって30分以上長時間持続する雷雲の存在が認められ、その割合は観測178例中25例(約14%)であった。

以上のようなロケット誘雷からみた冬季雷雲の特徴、特に長時間にわたって発光が継続する雷放電が送電線路の雷故障において起きたとすれば、次の指摘ができる。

現在、送電線の故障時の高速度再閉路においては系統周波数の30サイクル程度の無電圧時間を経て再投入が行われている。したがって、それ以上の時間にわたって雷放電路の導電性が維持されているとすれば、再閉路によって電圧が印加されたときに再度フラッシュオーバーに至るわけであるから、再閉路は失敗に帰する。そのみならず、もし放電路が風に流されて移動するとすれば、たとえば風速60km/hとし600ms間に約10mの移動があり、ちょうど送電線の他の回線まで移動することとなるので2回線にまたがる故障に進展する一要因ともなりうる。ここでの観測では、飛来

する雷雲のうち約14%が連続する形態をとっているという結果を得た。

#### 参考文献

- (1) 大和：「500kV送電線の雷害事故」，電気学会高電圧研究会資料 HV-81-37 (昭和56年10月)
- (2) 上之園：「500kV送電線の雷害事故様相とそれに対する考察」，電気学会高電圧研究会パネル討論会資料 (昭和58年7月)
- (3) 鬼頭，堀井，東山，中村，櫻野：「ロケット誘雷実験からみた送電線冬季雷害事故様相の考察」，電気学会高電圧研究会資料 HV-82-17 (昭和57年7月)
- (4) T. Takeuti, M. Nakano, M. Brook, D. J. Raymond, P. Krehbiel: "The Anomalous Winter Thunderstorms of the Hokuriku Coast", Journal of Geophysical Research, 83, p.2385 (1987)
- (5) 池田：「夏季雷と冬季雷」，電気評論, 66, p.650 (昭和56年7月)
- (6) 堀井，宮地：「ロケットによる雷放電トリガの実験」，電気学会雑誌, 98, p.1160 (昭和53年12月)
- (7) 東山，武藤，堀井：「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」，電気学会論文誌, 99-A, p.441 (昭和54年9月)
- (8) 東山，鬼頭，堀井，宮地：「ロケット・ワイヤー方式で誘発された冬季雷の放電様相」，電気学会論文誌, 100-B, p.681 (昭和55年11月)
- (9) 堀井：「高速飛行体による誘雷方式の開発と電力線路の冬季雷害対策の研究」，昭和57年度文部省科学研究費補助金(試験研究(1))研究成果報告書(昭和58年3月)
- (10) 松村，鬼頭：「軸方向強制対流を伴う安定化空気アークの過渡応答」，電気学会論文誌, 106-A, p.23 (昭和61年1月)
- (11) 角，池田，堀井：「春日井地区における夏季雷の多重度と継続時間の観測」，昭和59年電気学会全国大会, 1011

## 第3章 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

### 3.1 緒言

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<sup>(1)</sup>。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きわめて有効である。第2章で指摘したように、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かぎらない。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を指摘した。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意義のあることと考えられる。

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ことが考えられる。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<sup>(2)</sup>。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。本章では、わ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、その推定方法を取り上げている。

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ー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。この他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<sup>(3)</sup>。

前章に述べたように、実際に針端コロナ電流測定装置<sup>(4)</sup>を使用して地上電界の多地点観測を行っているうちに、その結果から冬季雷雲下に限れば地上電界の地域分布が推定できることに気づき、その方法を新たに考案した。さらに、この方法によって得られた地上電界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

うな条件は冬季雷が海岸線を越えて内陸部を進行する際、それぞれの短距離内での相互比較をするにあたって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。

ここで使用した針端コロナ電流測定装置はきわめて簡易で可動部分がなく、したがって大きな電源を必要としないなどの特色を持つ反面、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、回転セクター型電界計のような高級な器具を多数揃えれば、さらに定量的に良好な成果を得るものと思われる。

### 3.2 雷雲の移動方向と移動速度の算出

#### 3.2.1 針端コロナ電流の多地点観測

ロケット誘雷実験の中で、針端コロナ電流の多地点観測を行うようになってきた。観測期間は表3.1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第2章で既に記述した。記録には自動平衡方式のペンレコーダを用いており、針端コロナ電流のDCから2Hzの成分が記録され、ここではそれを「針端コロナ電流波形」と記述することにする。各観測点の位置については図2.5に示すとおりである。

各地点における針端コロナ電流波形の測定結果の例を図2.6に示す。同図にみられるように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み取れ、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を示唆している。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地へと移動する<sup>(5)</sup>。したがって、河北潟干拓地程度の移動距離(約5km)では雷雲内の電荷配置はさほ

表3.1 針端コロナ電流の多地点観測期間  
(本章で使用したデータ)

年 度	観測期間(月/日)
昭61(1986)	11/30~12/26
昭60(1985)	11/30~12/16
昭59(1984)	11/20~12/20
昭58(1983)	11/22~12/18
昭57(1982)	11/25~12/18

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、河北潟干拓地内の中央付近（後述の図3.2のP点近傍）である。コロナ電流の大きさは上限2Hz程度のペンレコーダ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、時刻合わせに役立つ。そのような現象に基づいて後に示す図3.3の電界分布の地理的、時間的対応を確定している。

### 3.2.2 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3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とを算出する手法を新たに開発した。

図3.1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、両者のなす角を $\theta$ とする。雷雲Mが矢印のように、移動方向 $\alpha$ （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。電界が最も高くなるのは、図3.1を参照すれば各観測点に最も近い距離に雷雲が来たときと考えられる。それぞれ時刻を $t=0$ ,  $t=t_A$ ,  $t=t_B$ とする。移動速度vを一定とすると次式が成り立つ。

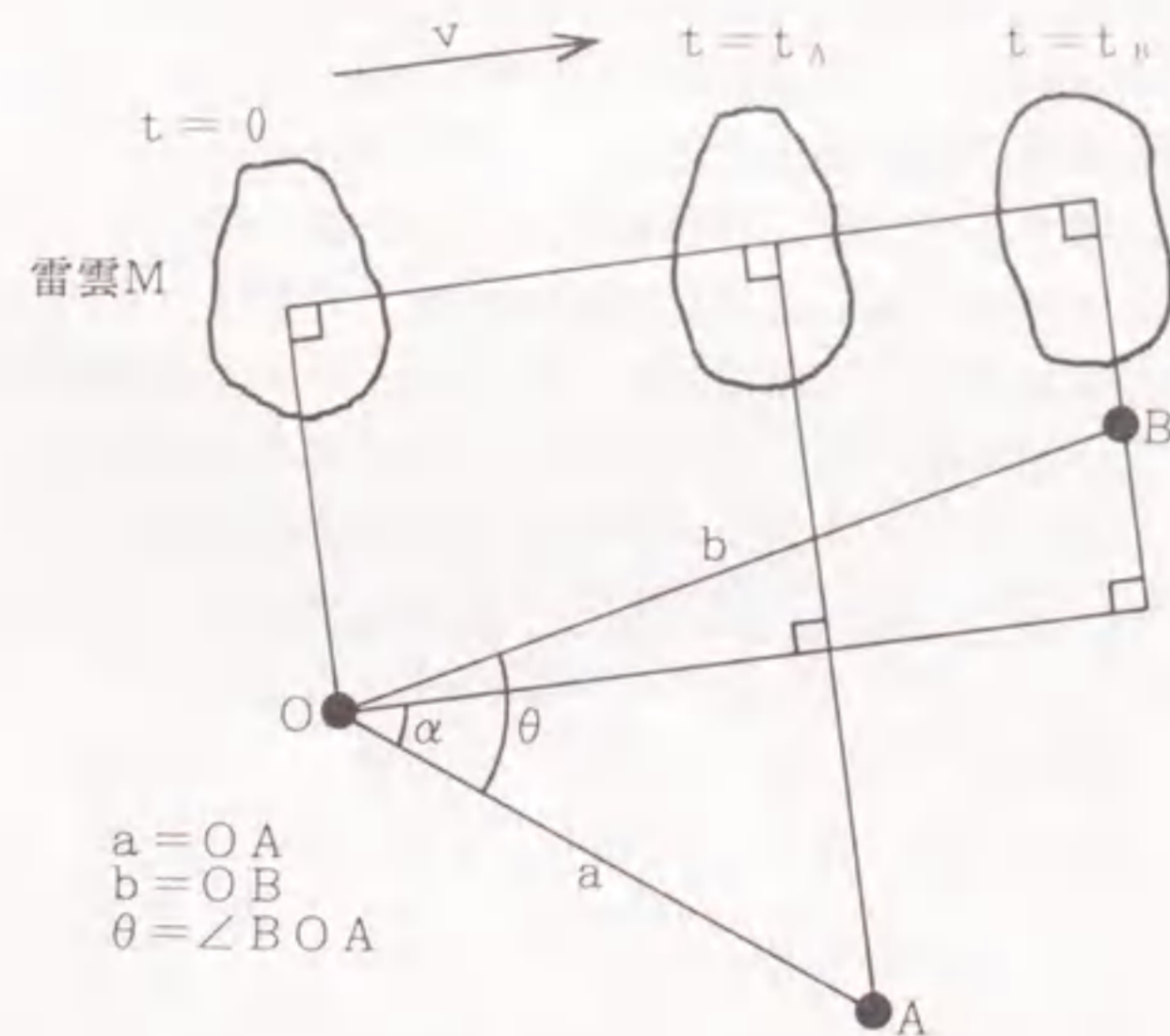


図3.1 雷雲の移動方向と移動速度の算出  
(針端コロナ電流の観測点: O, A, B点)

$$v \cdot t_A = a \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$v \cdot t_B = b \cdot \cos (\theta - \alpha) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

(3.1)式と(3.2)式より

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{t_B \cdot a - t_A \cdot b \cdot \cos \theta}{t_A \cdot b \cdot \sin \theta} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$v = \frac{a \cdot \cos \alpha}{t_A} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$t_A$ ,  $t_B$ は、上のように定めればO点とA点およびO点とB点の針端コロナ電流波形上の対応する極大値の発生する時間差である。

### 3.2.3 算出結果と吟味

(3.3), (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3.2に示す。6地点のうちから3地点を選んで、それぞれ雷雲の移動方向と移動速度とを算定することができる。たとえば同図(a)で、 $\triangle NLP$ ,  $\triangle LMP$ ,  $\triangle PMQ$ の3個を選んで求めた移動方向(矢印)と移動速度(丸印の数字, km/h)をそれぞれの三角形の中に記入してある。複数の三角領域からの結果がある程度一致しているため、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。

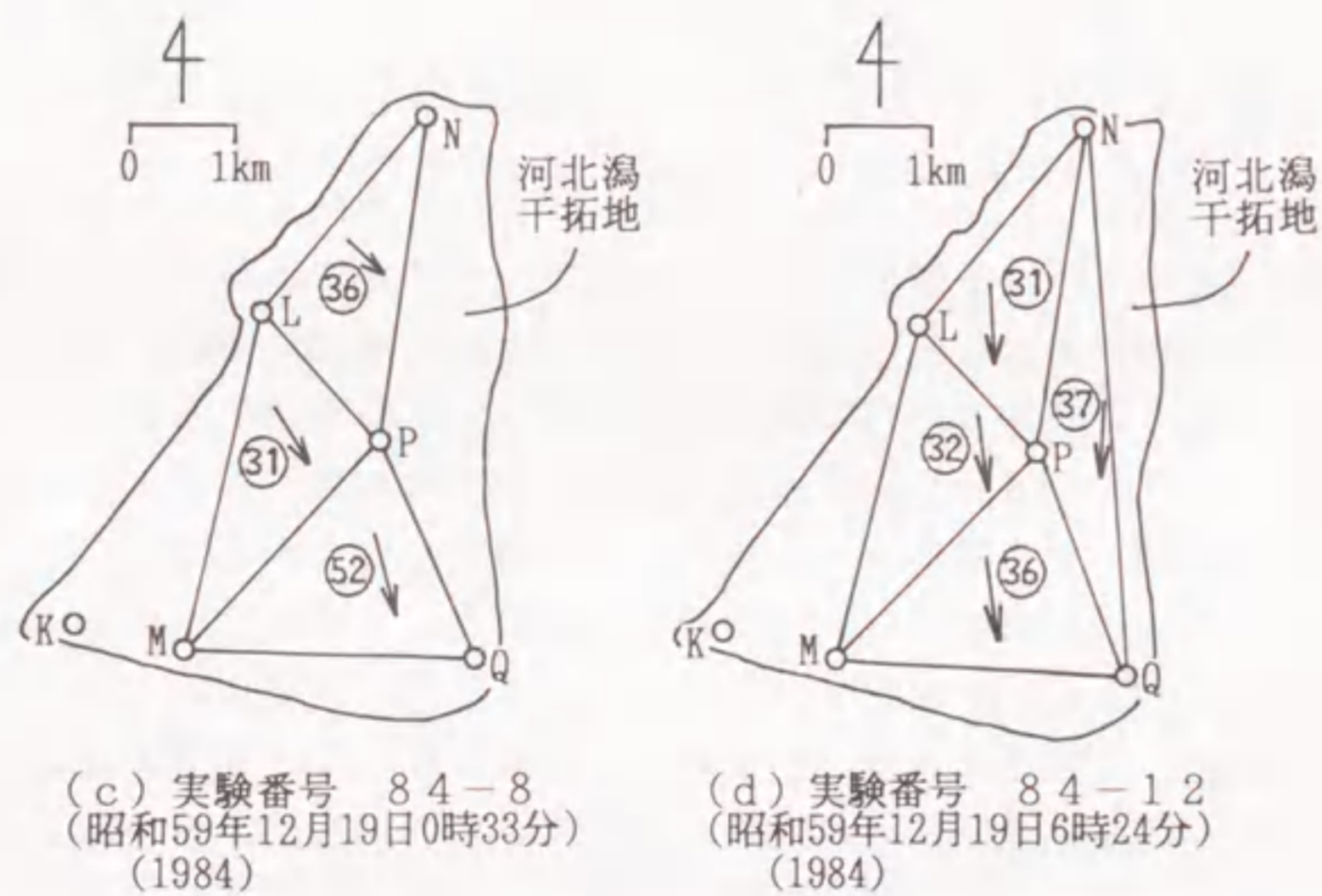
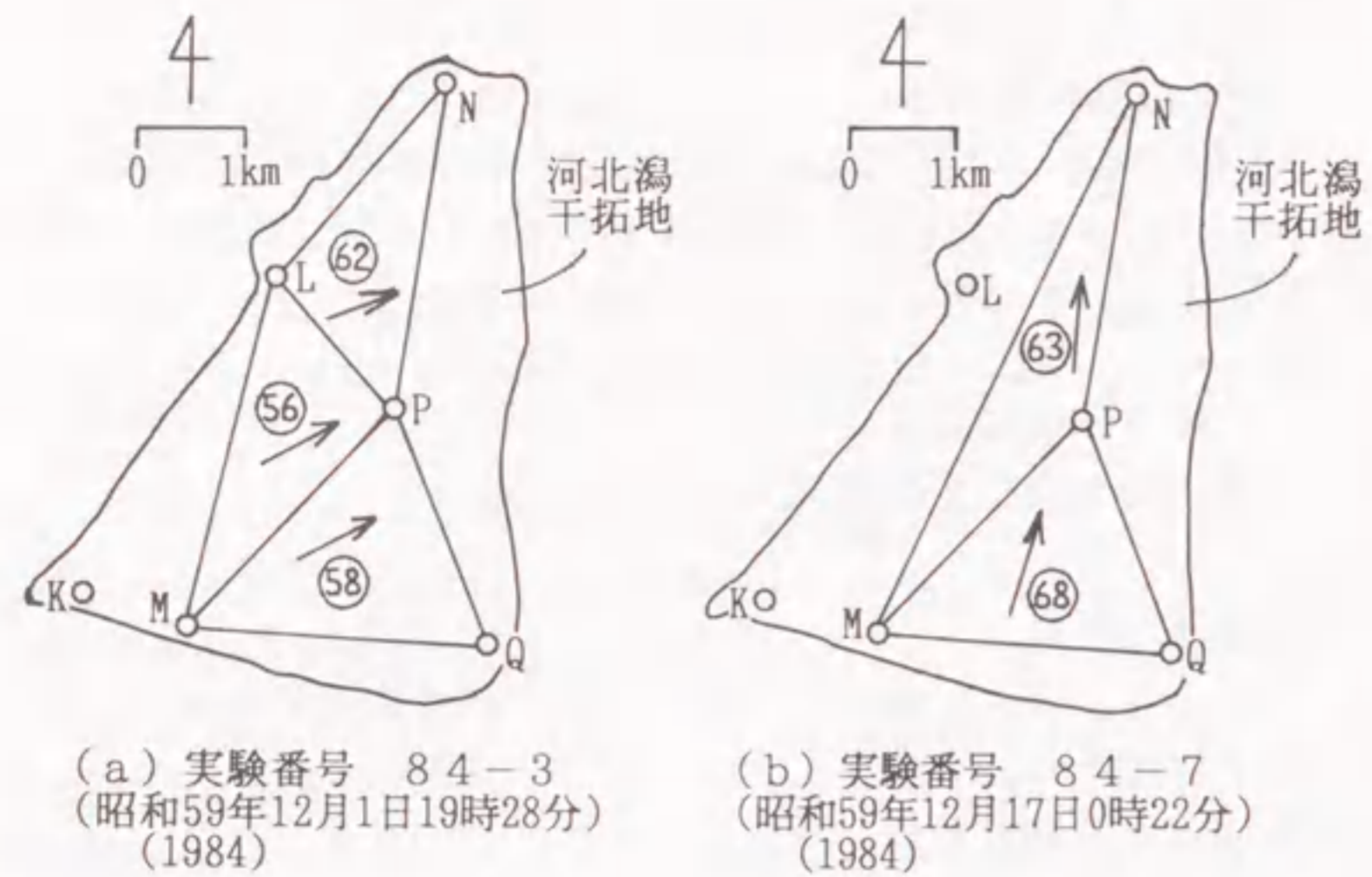
一般に雲の動きは気象レーダのエコーを連続観測することによっても広い範囲で知ることができる。冬季ロケット誘雷実験においては、金沢地方の気象レーダの観測から求められた雷雲の移動状況を問い合わせ、そのつど実験日誌に記録している。この移動状況は、主として日本海上から本土沿岸までについてのものであるが、冬季の雷雲は季節風の方向に移動し続けるのが通常であるので、河北潟干拓地についてもほぼ同様とみなされ、針端コロナ電流から求めた値を吟味するために用いた。

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(1985)について表3.2に示す。移動方向は気象レーダに合わせて両者とも北を0度として右回りを正としている。針端コロナ電流観測による雷雲の移動方向および移動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。

### 3.3 地上電界極性の地域分布の推定

3.2.2節の方法で移動方向、移動速度が求まると、ここで述べる作図法により地上電界の地域分布が推定できる。一例として、昭和59年(1984)12月19



(注) 図中、たとえば⑥②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撃の移動速度 (km/h) と移動方向とを示す。

図3. 2 雷雲の移動方向と移動速度の算出結果

表3. 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(1985)のデータについて)

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	3:25	90	60
	4:30	80	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度として右まわりを正としている。  
 (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。

日0時33分に誘雷成功した実験No. 84-8のロケット打ち上げ直前の地上電界の分布を図3. 3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6地点すべてに発生するもので、時刻あわせに利用できる。ここではそれをN点に対応させて以下の処理をすすめている。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わせて求めた距離BCを直線AB上にとる。それに次ぐ負の期間 ( $T_3 - T_2$ ) 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3. 3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3. 3全体としてみれば、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、ロケットを打ち上げた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北西から南東の方向へ推移していくと考えられる。

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、さらに有用な地域分布が得られることとなる。

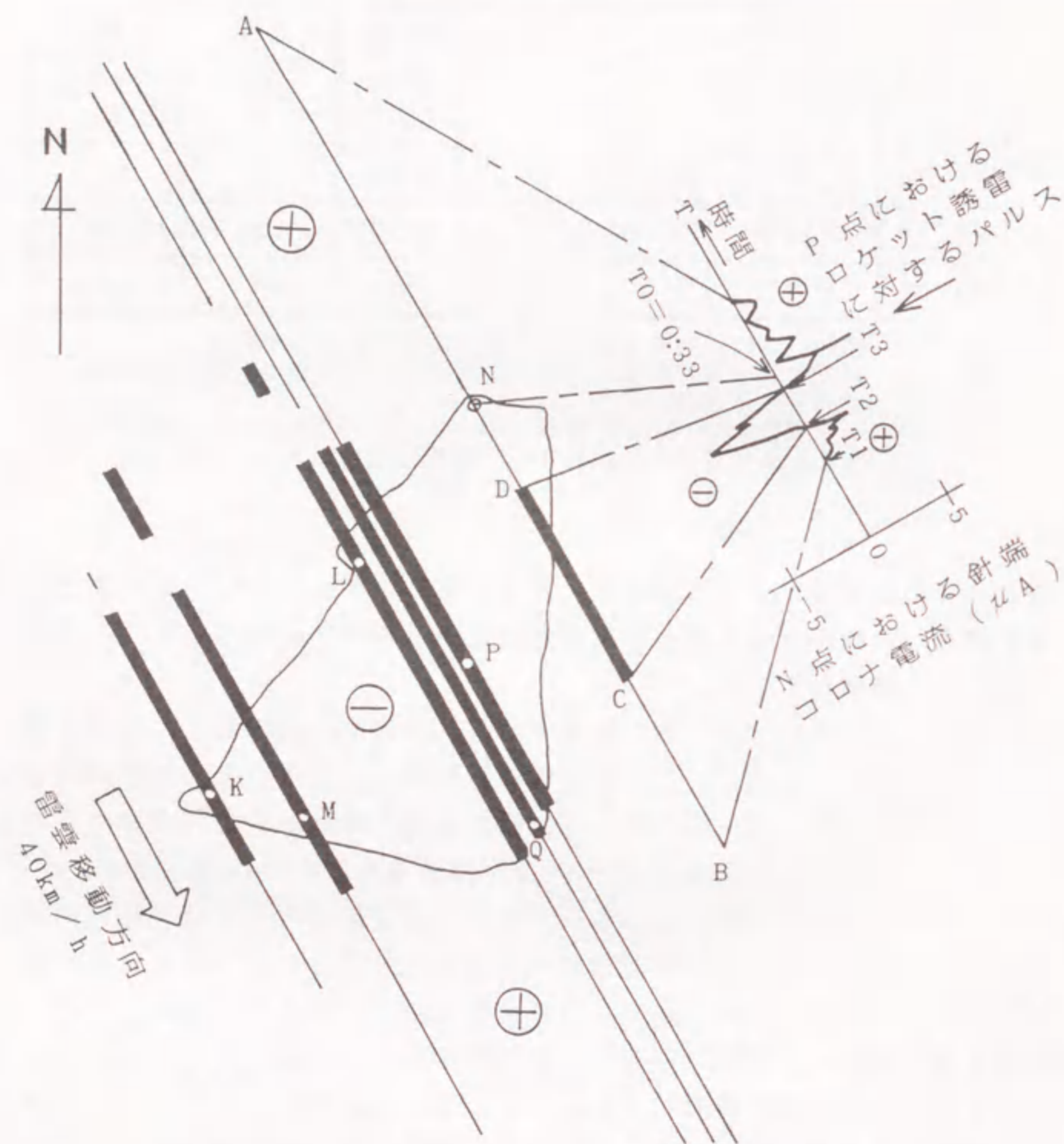


図3.3 地上電界の地域分布の推定例  
(実験番号 84-8, 昭和59年(1984)12月19日 0時33分)

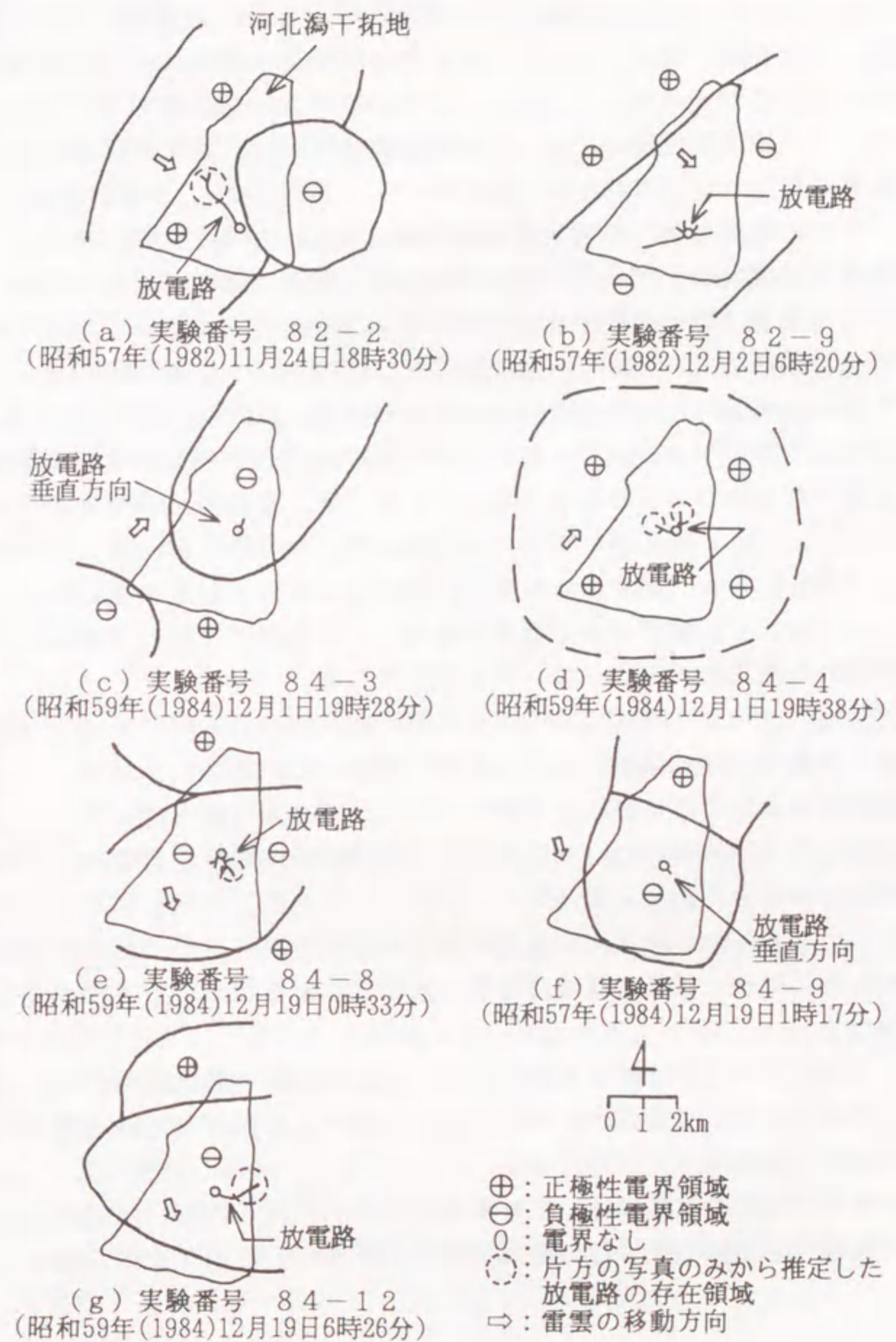


図3.4 地上電界の地域分布とロケット誘雷放電路の投影図

### 3. 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、2方向からの静止写真が必要となる。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、雷撃地点と時刻と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<sup>(6)</sup>。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の関連性について述べる。

図3.4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、3.3節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静止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って進展する傾向があると結論される。たとえば、帯状の地上電界の分布を持つ(a)、(b)、(e)図においては、放電路は帯の中央部に向かう。その他の(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1km以上にわたって横に進展している。これはロケットを打ち上げた位置が電荷密度の高い雲の中央部ではなく、端の方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、誘雷点はその極性領域の中央部にある場合、たとえば(b)、(d)、(e)、(f)図などでは放電路が枝分かれしているものもあるが、地面に対してほぼ垂直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ち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。

なお、自然の対地雷放電についても本手法は適用可能であり、雷撃地点と地上電界分布との相関関係を明らかにして雷撃発生予知技術への応用を検討している<sup>(7)</sup>。

### 3. 5 結言

針端コロナ電流の多地点観測から地上電界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変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分布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。自然の対地雷撃の場合にも、放電路が横に長く伸び出す例がいく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、また有効な対地雷放電警報を提供できるものと推察される。

### 参考文献

- (1) 例えば、大和、三谷：「雷害事故実態」、電気学会雑誌、98、p.1151（昭和53年12月）、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（昭和60年2月）
- (2) 鬼頭：「雷電界、空間電荷の観測」、昭和60年電気学会全国大会、S. 13-4
- (3) R.B.Anderson：“Measuring Techniques”, Lightning 1 edited by R.H.Golde, p.440 (1977) Academic Press
- (4) 東山、武藤、堀井：「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」、電気学会論文誌、99-A、p.441（昭和54年9月）
- (5) 池田：「夏季雷と冬季雷」、電気評論、66、p.650（昭和56年7月）
- (6) 松原、鬼頭、村下、堀井：「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会資料 ED-85-71/HV-85-22（昭和60年10月）
- (7) 櫻野、鬼頭、五十住、才田：「北陸地方冬季雷の対地雷撃地点に関する一仮説」、電気学会論文誌、111-B、p.38（平成3年1月）

## 第4章 冬季ロケット誘雷放電に伴う配電線誘導電圧

### 4.1 緒言

雷放電が電力設備にどのような影響を与えるかを把握することは絶縁設計上重要な問題である。特に、系統電圧の低い配電線では、たとえ直撃雷でなくても配電線の近傍に對地雷撃放電があると、配電線路上に誘導雷電圧（以下、略して誘導電圧とする）が発生し、これが過電圧サージとなって線路上を進行して柱上変圧器や碍子などの電力設備に被害を与えることがある。従来から、6.6 kV配電線の耐雷設計は誘導電圧を対象に行なわれており、その一般的な保護手段としては架空地線と避雷器とが最も普遍的に施設されている<sup>(1)</sup>。日本海側地方における冬季雷は夏季雷とは特性を異にするといわれているので、この保護方法が冬季雷に対しても有効であるかどうかを検討することは、日本海側地方の配電線系統にとって意義がある<sup>(2)</sup>。

對地雷撃の発生時に、その近傍の配電線路上に誘起する誘導電圧の原因としては次の3通りが考えられる<sup>(3)</sup>。

- ① 雷雲の電荷によって線路上に拘束されていた誘導電荷が、雲間あるいは對地雷撃放電の発生により拘束を解かれるとき生ずる電圧。
- ② 對地雷撃放電の進展過程において、前駆放電路から直接誘導を受けることにより発生する電圧。
- ③ 對地雷撃放電の進展過程において、主放電路から直接誘導を受けることにより発生する電圧。

このうちで、①は雷雲と大地との距離が大きいため電圧波高値は小さいと考えられている。それゆえ、本章では②と③を対象として、雷撃地点から100 m程度に近接した配電線路上に発生する誘導電圧を検討することとした。このうち②は夏季雷のように上方からステップドリーダが降下する場合、静電的に配電線に電圧が誘起するものである。これに対し③は主放電において流れる雷電流による電磁的誘導によって誘起するものである。

ロケット誘雷実験は、自然雷とは若干異なるとはいえ、對地雷撃放電の雷撃位置と前駆放電および主放電に伴う雷放電諸量が同時に確実に得られるので、配電線への誘導電圧の観測は、他の誘導電圧の観測に比べて、現象解明に有利な側面をもっている。このような観点から筆者は、河北潟干拓地における冬季ロケット誘雷実験において、昭和53年（1978）の予備観測<sup>(4)</sup>を経て、昭和54年（1979）および55

年（1980）の両年には発射地点の近傍に試験用配電線を設置し、誘導電圧の測定を実施してきた。冬季の北陸地方における同種の観測としては、日本海沿岸の福井県にある三国共同火力発電所の煙突への自然の雷撃放電を利用した誘導電圧観測が報告されている<sup>(5)</sup>。

本章では、冬季ロケット誘雷実験における実測結果を誘雷放電における前駆放電段階および主放電段階の諸量と関連づけて誘導電圧の性状について明らかにしている。さらに、架空地線によって誘導電圧がどの程度抑制されるかを実測し、架空地線の抑制効果の定量的な検証を行う。ただし、前駆放電段階といっても、ロケット誘雷の場合は鋼線を通して流れる電荷の移動に伴う誘導電圧のことである。夏季雷のようにステップドリーダの配電線への接近に伴う静電的な誘導電圧とは趣きを異にする。

### 4.2 試験用配電線と測定回路

#### 4.2.1 試験用配電線の構成

ロケット誘雷実験場の誘雷地点近傍に全長1500 mの試験用配電線を架設した。試験用配電線と誘雷地点の位置関係は図4.1に示すとおりであり、誘雷地点と線路までの最短水平距離Y (m)は年度によって異なる場合があり、後述の表4.1に示してある。線路の両端についてはA点は10 k $\Omega$ （ただし、54年（1979）は分圧器2台並列で5 k $\Omega$ ）の抵抗分圧器で終端され、B点は完全に開放してある。線路サージインピーダンス約540  $\Omega$ と比較すればA点でも開放とみなされ、条件としては両端開放となる。この試験用配電線は絶縁設計上は6.6 kV級の實用の高圧配電線を模擬したものであるが、線路配置は図4.2に示すように上線、下線の2線だけで構成されている。線路導体はいずれも22 mm<sup>2</sup>の裸銅線を用いている。上線は200 mの距離ごとに接地をとることができるようになっており、架空地線を模擬で

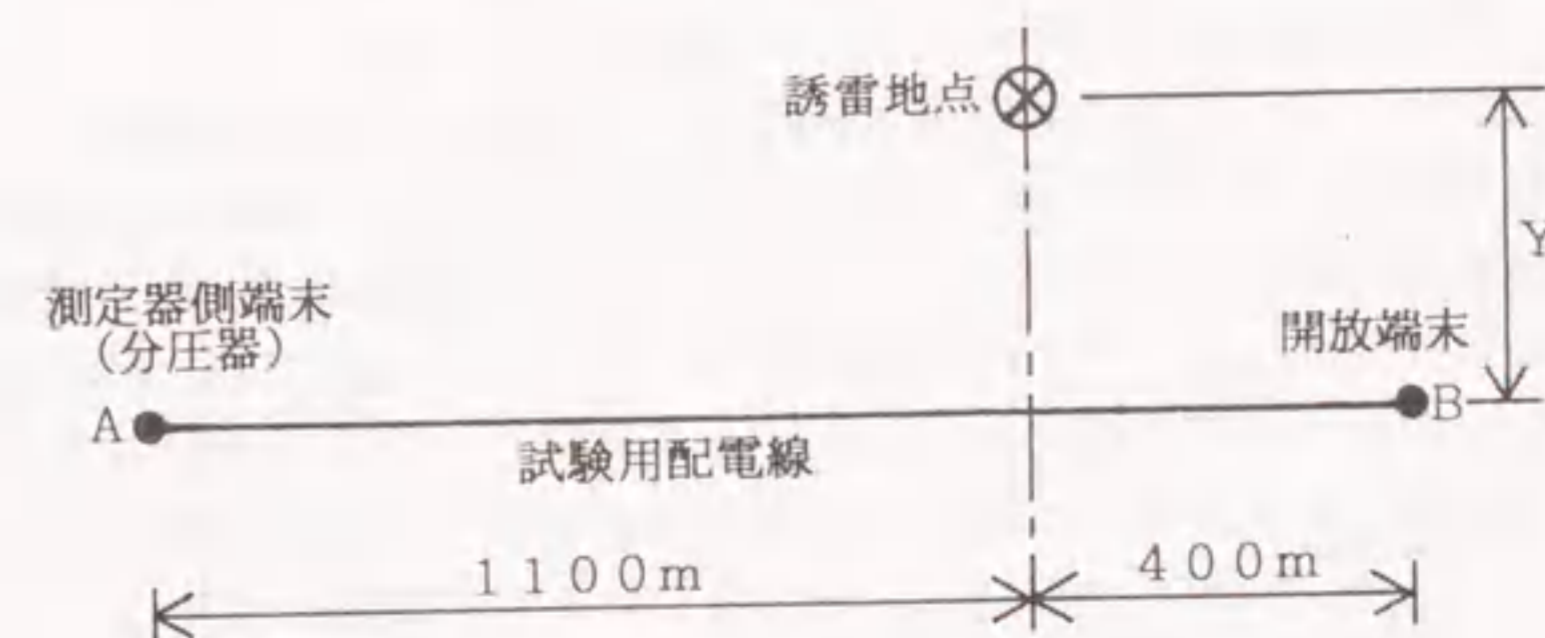


図4.1 試験用配電線と誘雷地点との配置関係





表 4. 1 誘導電圧の実測結果 (波高値電圧計による)

実験番号	実験条件		誘導電圧実測値						雷放電諸量			
	状態	Y (m)	最大値 (kV)		継続時間 (ms)		パルス数 (個)	雷電流 (kA)	発光継続時間 (ms)	多重度 (回)	地上電界 (kV/m)	
			上線	下線	前駆 (UL)	全体						
79-2	A	80	-11.6	-9.4	0.9	25	1	+3.6	30	1	+9.3	
79-4	A	80	+1.0*	+0.8*	6.1	14	1	<-1.2	113	1	-7.1	
79-5	A	80	+0.3*	+0.2*	23.8	24	1	<-1.2	26	—	-9.4	
79-6	A	80	+37.2	+31.1	5.7	100	3	-24.0	330	3	-10.6	
79-9	A	150	+35.7	+29.8	13.6	176	29	—	707	4	-9.4	
79-12	B	80	0	+1.2*	13.3	152	26	-1.4	760	2	-7.2	
79-14	B	80	0	+8.9	23.8	156	23	-12.0	320	23	-7.4	
80-10	A	77	+14.6	+13.4	11.9	93	4	-2.0	250	—	-9.0	
80-11	A	60	+14.6	+12.9	3.8	105	3	—	140	—	+7.0	
80-15	A	77	+24.1	+22.4	20.0	266	5	-11.0	427	1	-7.0	
80-17	A	60	-85.1	-72.2	≒0	81	2	+24.0	357	2	+11.5	
80-18	A	77	-4.4*	-4.4*	≒0	20	1	<+0.5	47	1	+11.0	
80-19	B	77	0	-2.4*	—	—	—	+0.5	284	1	+9.0	
80-21	B	77	0	+4.5*	8.6	408	17	-13.0	649	多	-8.8	
80-22	B	82	0	+32.8	6.7	368	11	-26.0	390	多	-6.2	

(注1) \*印: 電磁オシログラフによる値。  
 (注2) 状態欄: Aは上線, 下線とも誘導電圧を測定した場合, Bは上線を架空地線として用い, 下線の誘導電圧を測定した場合。  
 Y (m): 配電線までの距離は80mあるいは77mであるが, 異なる異常誘導雷電流がある場合は発射点から地上へ向かって流れる方向とす。この場合, 雷雲は正である。  
 (注3) 雷電流: 「正」は雲から地上へ向かって流れる方向とす。

併せて示してある。実験番号は誘雷実験に共通した番号として示してある。

実験条件の欄において, 状態Aは, 上線, 下線ともに誘導電圧を測定した場合を, 状態Bは, 上線を架空地線として用い, 下線の誘導電圧を測定した場合をそれぞれ示す。誘導電圧実測値の欄で最大値は波高値電圧計による測定値を示す。ただし, トリガレベル (5 kVに設定) 以下であって波高値電圧計では測定できなかったもの, ならびに継続時間および多重雷に対するパルス数については電磁オシログラフまたはデータレコーダで記録した結果を示す。継続時間欄のうちで「前駆」の欄には前駆放電段階で発生した誘導電圧の継続時間を, 「全体」の欄にはひとつの雷放電において前駆放電によって誘導された電圧を含めて最終の主放電による誘導電圧が消滅するまでの時間をそれぞれ示す。主放電の過程で複数のパルス電圧が記録されることもあるが, それですべて終了するまでの時間を算定してある。また, 「パルス数」の欄には, その雷放電中に含まれる誘導電圧のパルス成分の個数を示す。

表中の雷放電諸量としては, (1) 磁鋼片により得られた雷電流, (2) 高速度カメラによる放電映像から得られた発光継続時間, (3) 同じ映像から得られた放電の多重度, および (4) 回転セクター形電界計によるロケット打ち上げ直前の地上電界強度を, それぞれ示す。

4. 3. 2 リーダに伴う誘導電圧

鋼線付きロケットが打ち上げられると, 引き上げられた細い鋼線の先端から雷雲に向かって上向きの前駆放電, 次いでリーダ放電が進展する<sup>(7)</sup>。したがって, 誘雷時における試験線への誘導電圧は最初に, この上向き放電路に流れる電流によって誘起すると推察される。

ロケット誘雷実験においてワイヤの引き上げ過程で流れる電流については, 数百μAから数A程度の微小電流と1A以上100A程度のパルス状電流との2種類がある。これらは感度の異なる2種類の測定回路を用いて同時に測定している。その結果から, 主放電に至るまでの特徴は次のようにまとめられている<sup>(8)</sup>。

- (1) 初期の微小な電流はロケット発射直後から流れ始め, ロケットの上昇と共に増加する。これは前駆放電に伴う電流と考えられる。これが5mA程度に達すると, パルス状の電流が現れる。初期パルスの電荷量はμCのオーダーであり, ロケットがさらに上昇すると100μCを超える大きなパルスが発生する。初期の微小電流波形全体について積分したところ, 各ケースによってばらつきはあるが, その電荷量は2~20mCの範囲にあった。
- (2) 誘雷前100~500msの間に数mCにも達するパルス状電流が断続的に発生する。このパルス電流はストリーマ放電やパイロット放電といわれる放電に伴って発生するものと推定される。
- (3) 雷雲が負の場合, 主放電に至る前に数十アンペアオーダーの電流が観測される。

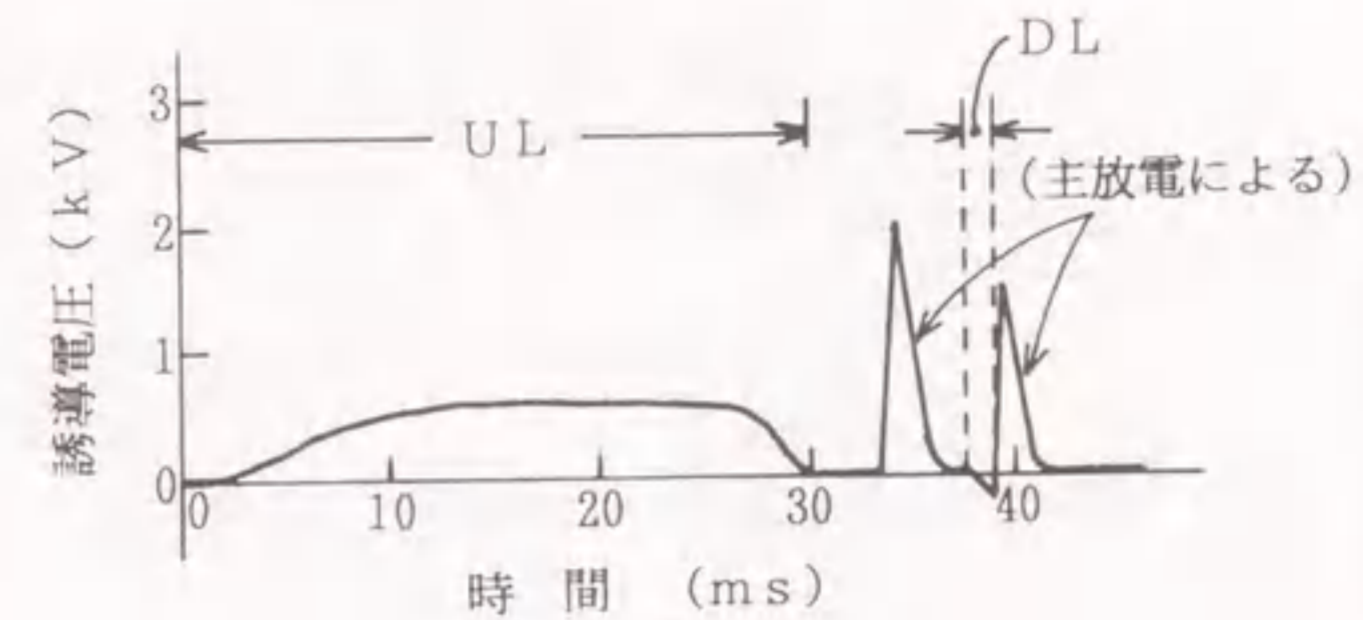
これはリーダ放電に伴う電流と考えられる。この電流は、最後のパルス状電流がゼロとなる前に増大してゆく場合と、一旦ゼロになり数ms～十数ms後に立ち上がる場合とがあった。これに伴う放電電荷量は電流波形の積分から0.15～0.3Cであった。誘雷失敗の場合にも1秒を超える期間、この種のパルス状電流が観測された。(4) 雷雲が正の場合、上記(3)項で述べたような電流は明確な形で得られなかった。雷雲が正のときに発生する上向きの負極性リーダは、雷雲が負のときに発生する上向きの正極性リーダよりも1桁ほど進展速度が大きく、電流も大きいので測定器感度の制約から主放電電流との区別が難しいためと考えられる。

そこで、雷雲が負の場合について、リーダ放電に伴う電流が最高値に達するまでの時間を求めたものが表4.2である。同表の3ケース(No. 79-6, No. 79-9, No. 79-14)では高速度カメラから得られたリーダ発光時間と電流の継続時間とがほぼ対応している。

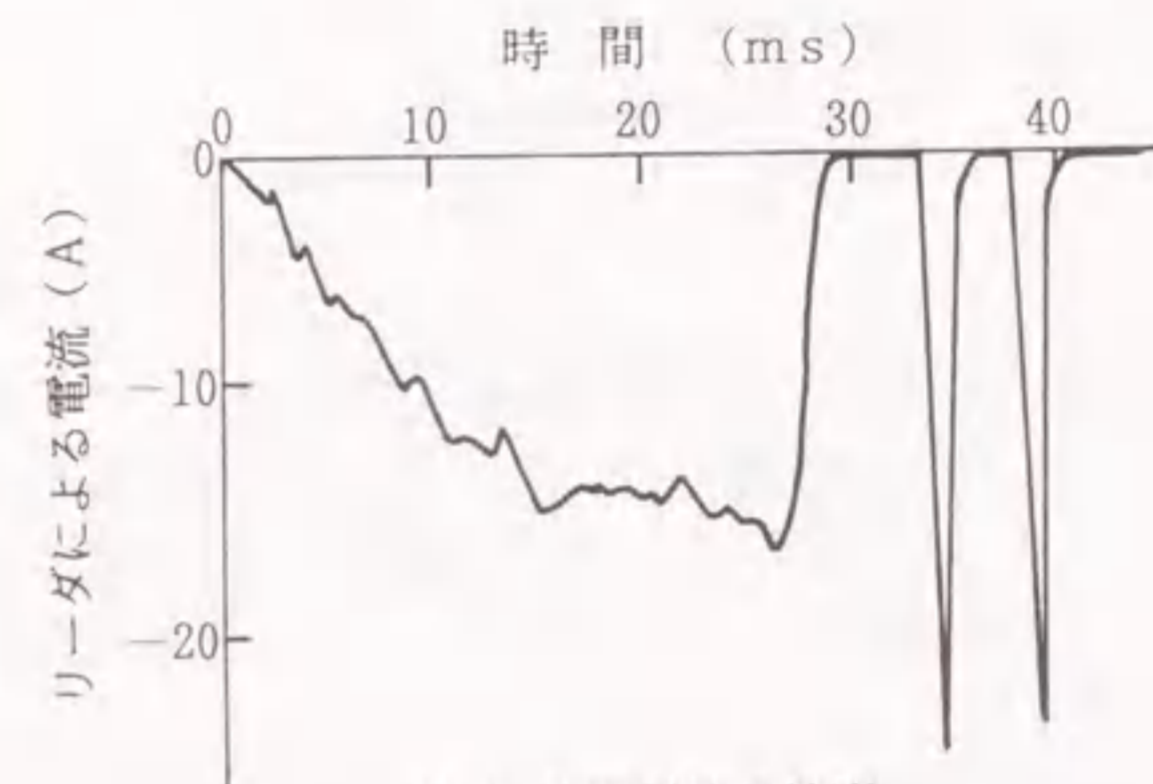
表4.2 負極性雷雲へのリーダ放電に伴う電流の継続時間

実験番号	誘雷高度 (m)	電流継続時間 (ms)	リーダ発光時間 (高速度カメラ) (ms)	誘導電圧 (UL部分) の継続時間 (ms)
79-6	37	6	7.5	5.7
79-9	114	15	14.5	13.6
79-14	231	28	24.5	23.8

上述のようなリーダによる電流で誘起される誘導電圧の波形例を図4.4, 図4.5のそれぞれのUL部に示す。図4.4は実験番号79-14の結果であり、このときの雷雲は負極性で、地上電界 $-7.4 \text{ kV/m}$ のときロケットを打ち上げ誘雷に成功している。同図(a)は誘導電圧の波形であるが、UL部に続く二つのパルスは主放電によるものと推察される。この波形は周波数特性数kHzまでの電磁オシログラフで記録したもので、図の波高値は必ずしも正しい値とはいえない。応答のよい波高値電圧計による測定では、最大値は $+8.9 \text{ kV}$ である。UL部として正極性の電圧が $23.8 \text{ ms}$ 継続し、次のパルスまで $6.2 \text{ ms}$ の間は電圧は誘起されていない。また同時に測定した鋼線部を流れる前駆放電電流の波形を図4.4(b)に示す<sup>(4)</sup>。両者はよく対応している。このときの高速度カメラの放電映像(時間分解能 $1 \text{ ms}$ )によれば、鋼線溶断の前に $24 \text{ ms}$ にわたり上向きに上昇するリーダが記録され、それから $7 \text{ ms}$ 程度放電路、鋼線部ともに発光が消滅し、その直後突然に発光する主放電が記録されている<sup>(7)</sup>。なお、同図(b)の原点すなわちアンペアオーダの電流が発生する時点に至るまでに約 $600 \text{ ms}$ にわたって間欠的に微弱なパルス性的前駆電流が記録されたが、試験用配電線にはこれに対応する誘導電圧は感度不足のために検



(a) 誘導電圧の波形



(b) 前駆電流の波形

図4.4 誘導電圧と前駆放電電流の波形 (実験番号79-14, 雷雲:負極性)

出できていない。また、高度 $300 \text{ m}$ 以上まで正常にロケットが上昇したにもかかわらず誘雷しなかった例においては、誘導電圧は記録されなかったことから推定すると、鋼線が溶断しないような微小な前駆電流による誘導電圧は小さく、ここでは検出できないと考えられる。

以上の測定結果では、放電路の発光、前駆電流および誘導電圧の3種類の継続時間は完全に一致する。このことより、図4.4(a)のUL部は前駆放電段階のうちリーダに流れる電流による誘導電圧であることがわかる。このUL部の電圧極性は雷雲の極性とは逆になるが、これは前駆放電路の電荷が雷雲とは逆極性になるためである。

図4.5は実験番号80-5において、誘導電圧をデータレコーダによって測定した結果である。このときの雷雲は正極性である。UL部の継続時間は約 $580 \mu\text{s}$ であり、図4.4と比べて短い。

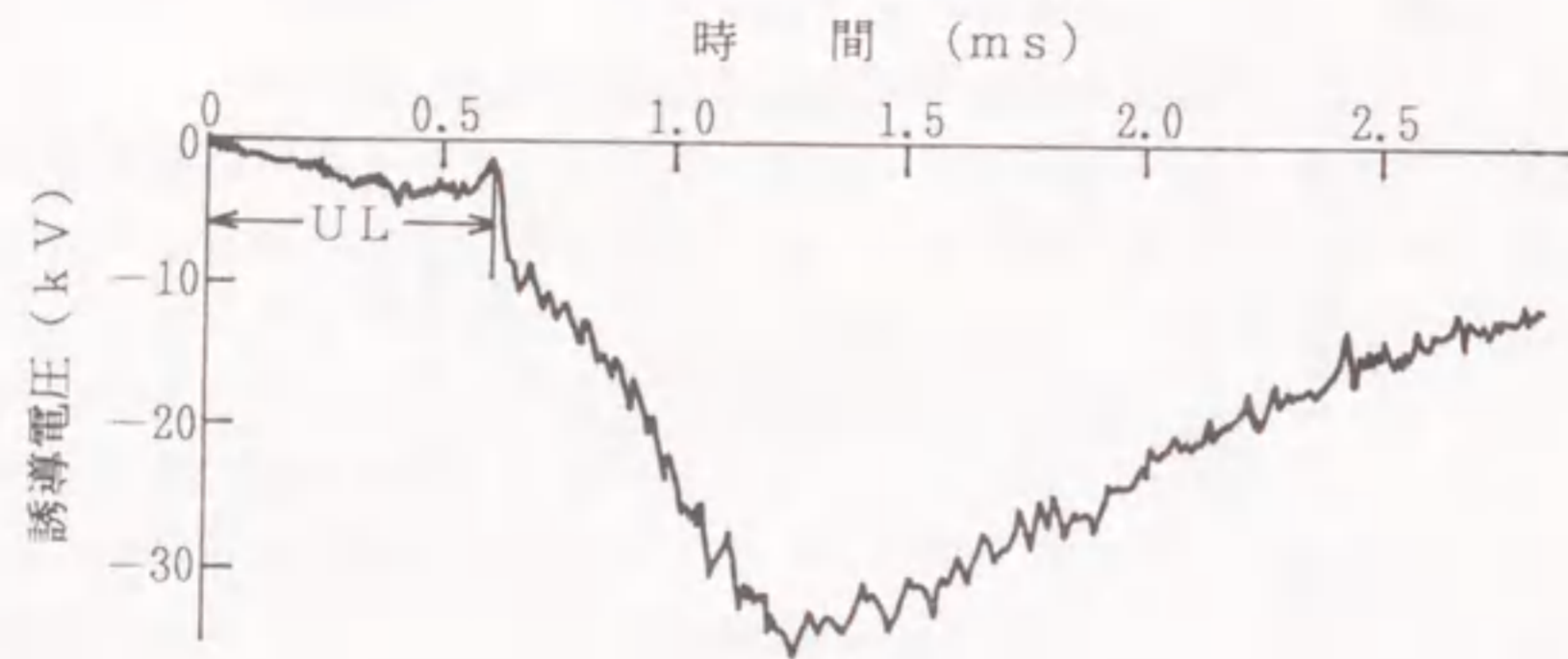


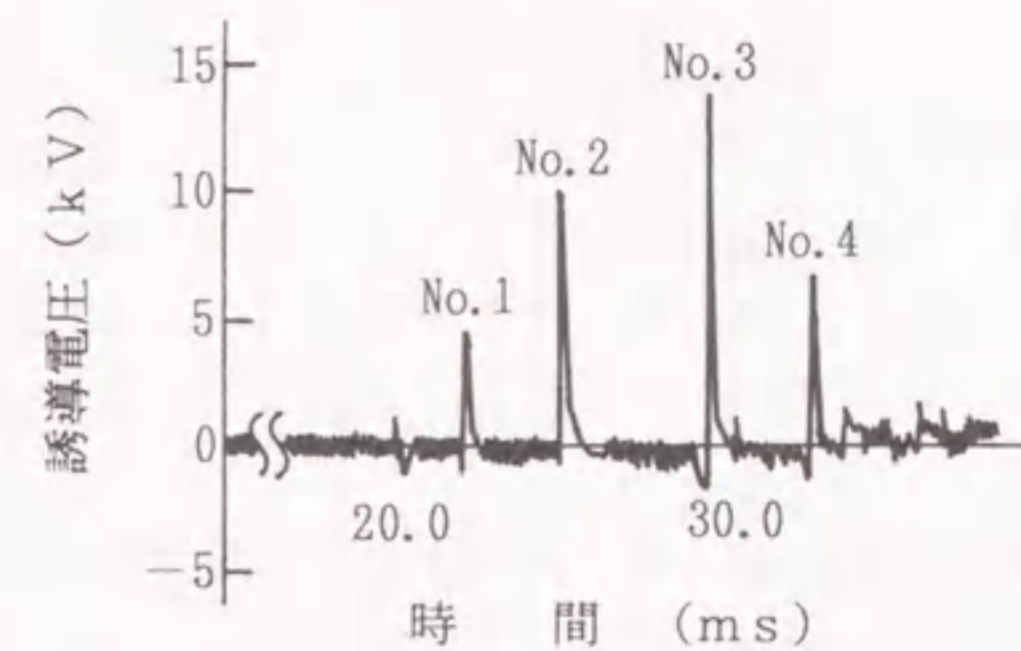
図4.5 誘導電圧の波形  
(実験番号 80-5, 雷雲: 正極性)

同様に、他の誘雷成功時においてもUL部の継続時間を測定して、表4.1に整理して示してある。こうして得られた継続時間とロケット打ち上げ直前の地上電界の極性を比較すると明らかに極性効果が見られる。地上電界すなわち雷雲が負極性で鋼線から上向きの前駆放電が進展する場合、この段階で発生する誘導電圧は正極性で、その継続時間は数msから数十msという長いものである。逆に、地上電界すなわち雷雲が正極性で鋼線から上向きの前駆放電が進展する場合、この段階で発生する誘導電圧は負極性で、その継続時間は1ms以下と短い傾向にあった。雷雲が負の場合の誘導電圧(UL部分)の継続時間について、表4.1のデータを表4.2にも示した。これらは前駆電流の継続時間の傾向と一致する。

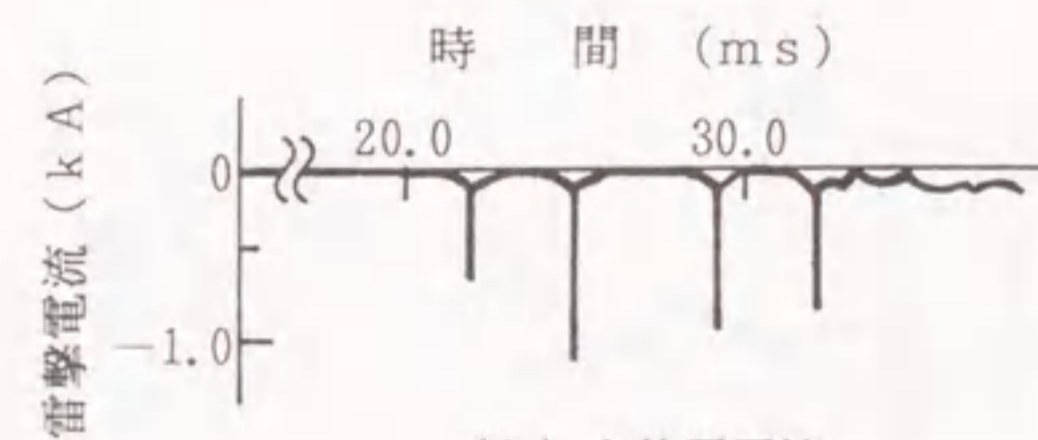
#### 4.3.3 主放電による誘導電圧

鋼線溶断前の前駆放電による試験用配電線への誘導電圧に引き続き、主放電による誘導電圧が測定される。実験番号80-15の結果を図4.6に一例として示す。図(a)はデータレコーダによる誘導電圧の測定結果であり、図(b)はデータレコーダによる雷放電主電流の結果である<sup>(10)</sup>。図(a)における時間軸の起点は、上向きリーダーによって誘導電圧が発生し始めた時点に設定し、図(b)はこれに対応して示してある。

図4.6(b)にみられる4個のパルス電流は多重雷撃によるものと思われ、同図(a)ではそれに対応して4回の誘導電圧がみられる。個々のパルスは後述するように終端での進行波の反射と波尾の重なりの影響を受けるが、この図の時間の尺度ではこの影響をみることはできない。このような雷撃放電による誘導電圧は図4.6の



(a) 誘導電圧



(b) 主放電電流

図4.6 誘導電圧と主放電電流波形  
(実験番号 80-15, 雷雲: 負極性)

No. 4のパルス以降にも発生するが顕著なものはほとんどなく、約250msの時点で最後のパルスを記録して終了している。このように時間の起点を初期誘導電圧発生時にとり、最終的に誘導電圧が消滅するまでの時間をひとつの雷放電における誘導電圧継続時間と定義し、この値を前記表4.1継続時間の「全体」に示している。

これらの結果から、誘導電圧継続時間(○印)およびパルス数(△印)についての分布状況を図4.7に示す。雷雲が正極性のときにはプラス記号、負極性のときにはマイナス記号が書き加えてある。雷雲が負極性のとき誘導電圧は正極性で、継続時間が長く、パルス数も多い傾向を示す。一方、雷雲が正極性のとき誘導電圧は負極性でパルス数が少なく、1個ないし2個程度であり、継続時間は正極性の誘導電圧に比べて短い傾向にある。

なお、この傾向をはずれる例として10mの気中ギャップにおいて自動車へ雷撃させた実験番号80-11の場合は正極性の雷雲に対して正極性の誘導電圧が記録され

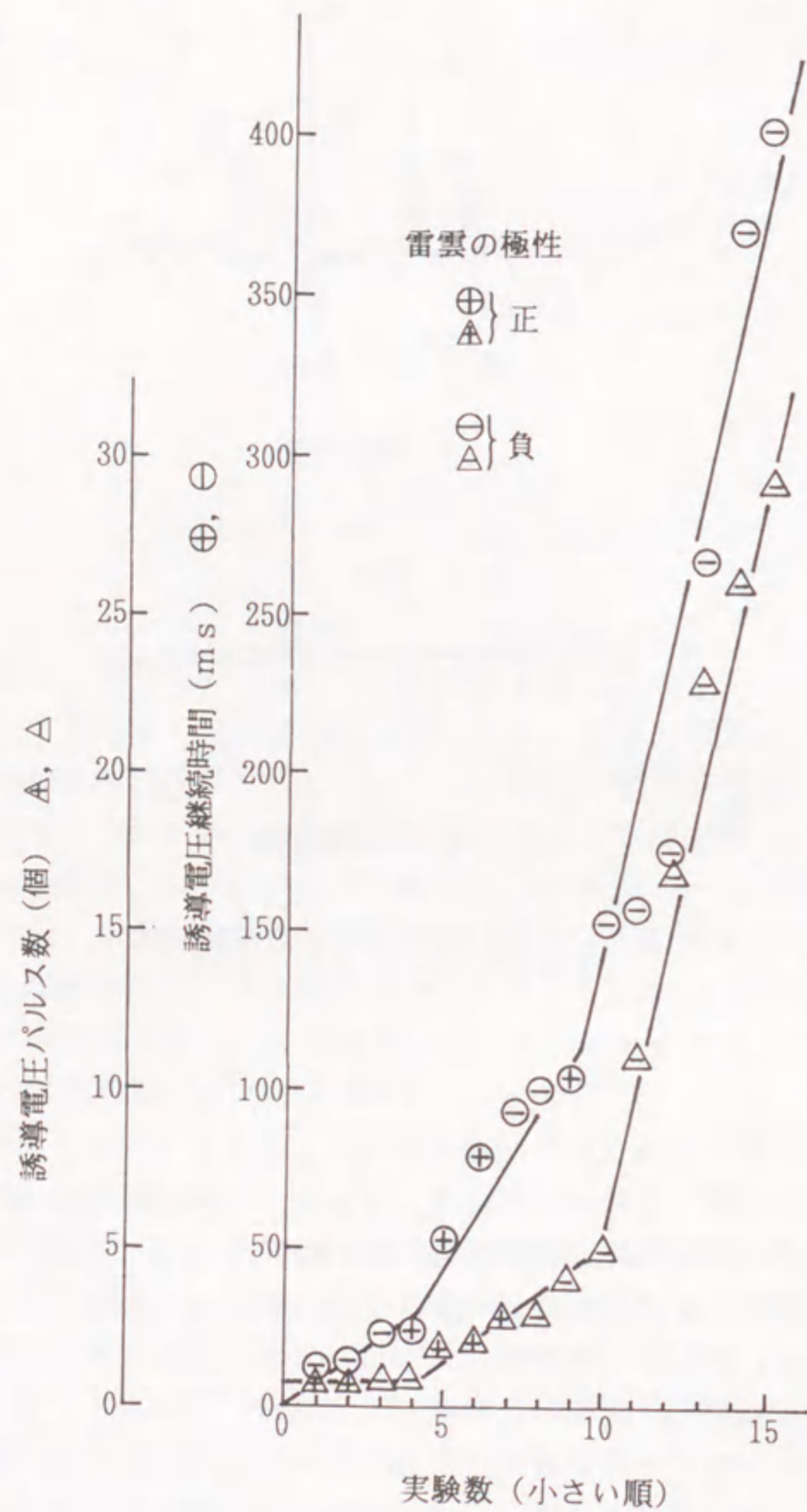


図4.7 誘導電圧の継続時間とパルス数の分布

ているが、この原因については不明である。

#### 4.3.4 電圧極性によるパルス性誘導電圧波形の相違

前節で述べた誘導電圧のパルス性成分について、周波数応答の良い2素子シンクロスコープまたはデジタルメモリーによる測定例を図4.8, 図4.9にそれぞれ正極性誘導電圧, 負極性誘導電圧として示す。なお, 波形の起点は図4.8(c)を除いて, 主放電の開始時刻にとっている。いずれも多重雷撃のうち振幅が最大のものを示した。

図4.8の正極性誘導電圧波形はいずれも, 進行波の往復反射現象によって生じた繰り返し波形を示している。主放電の発生によって線路上には急峻に立ち上がるサージ電圧が誘起され, それが進行波となって測定端(図4.1のA点)に到達し, 終端条件で決まる反射と重なり, パルス①として観測される。パルス②は①とは反対方向

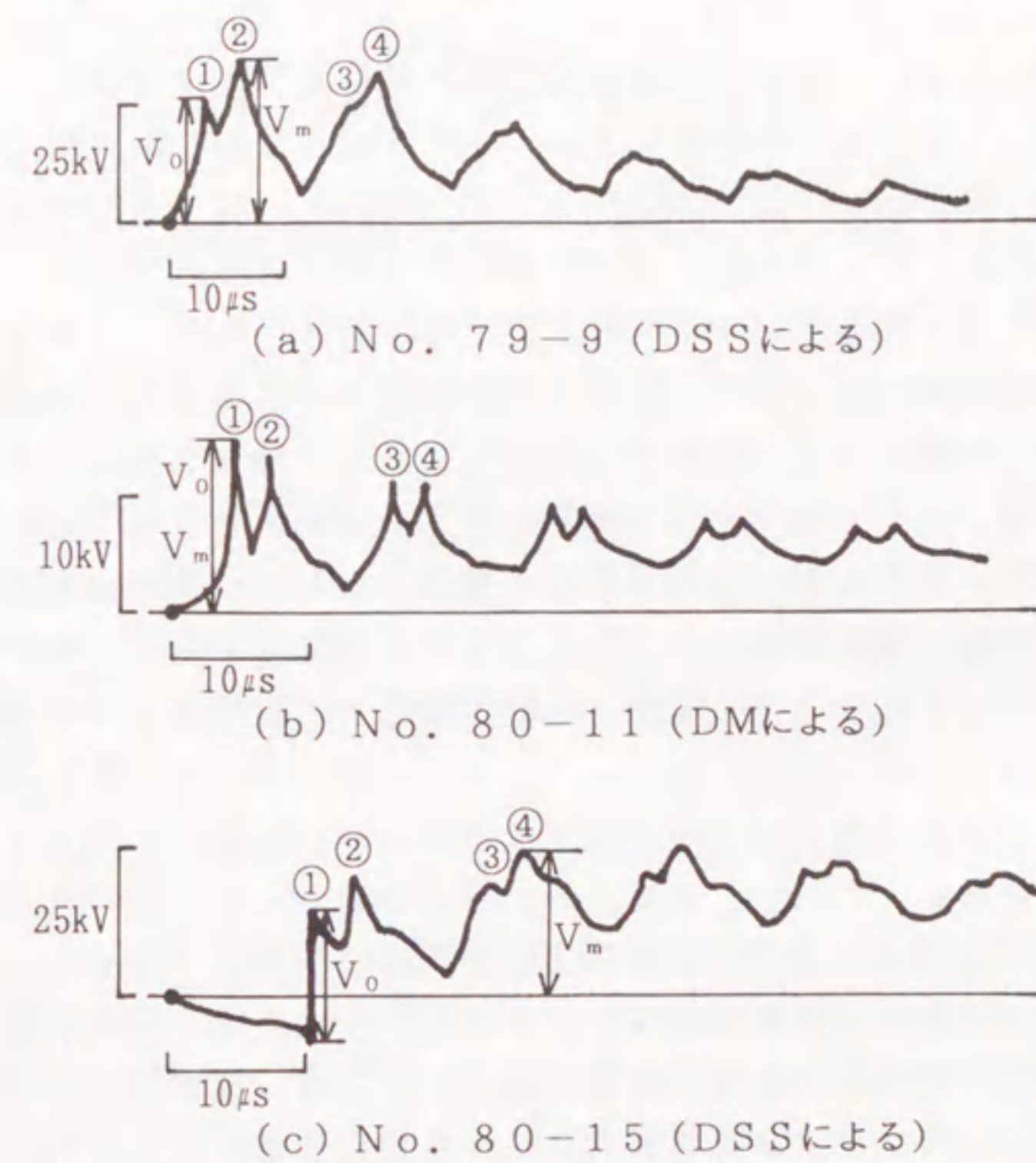


図4.8 正極性のパルス性誘導電圧の波形

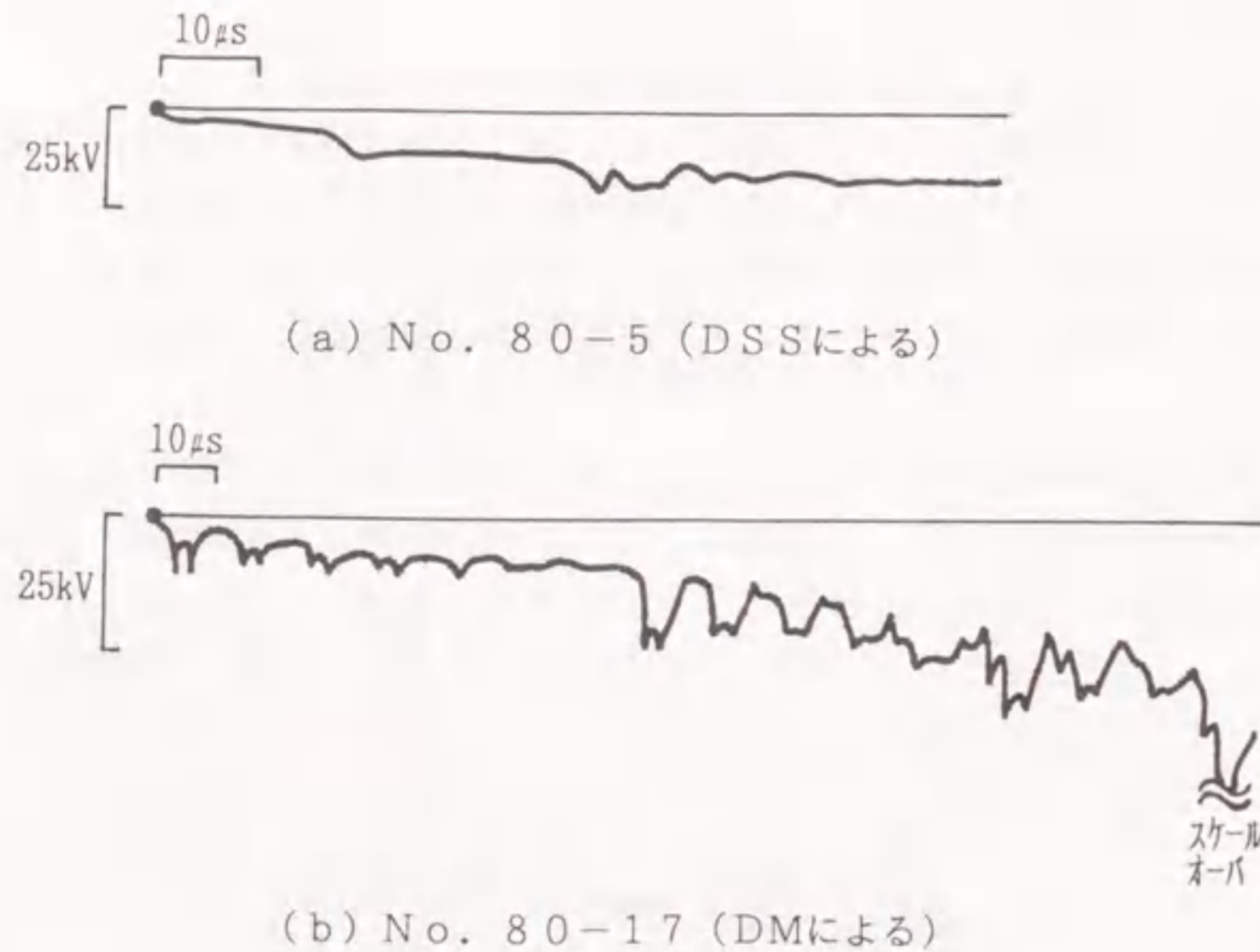


図4.9 負極性のパルス性誘導電圧の波形

に進行した成分が開放端(図4.1のB点)で全反射され約 $3\mu\text{s}$ の遅れをもって測定端に到達したものであり、パルス①の波尾に重なって観測される。①と②の波形を一对として、往復 $3\text{km}$ の線路長の伝搬に要する時間約 $10\mu\text{s}$ を経過して、パルス③と④がパルス①、②の波尾に重なりながら観測される。以下順次減衰しながら往復反射する進行波が測定端に到達する。このことから伝搬速度はだいたい光速に近い。なお、図4.8(c)①では主放電前の前駆放電による誘導電圧が若干負の方にふれて記録されている。

他方、図4.9の負極性誘導電圧の波尾はほぼ完全に重なり、全体としてゆるやかに上昇する波形となる。これは、図4.8と大きな違いを示している。この場合は図4.8に示した正極性のような波動の第1波を明確に判定できない。

以下においては正極性誘導電圧についてのみ検討を加える。正極性誘導電圧の第1波の大きさは波形が観測された場合容易に読みとれるが、波形観測に失敗した場合には波高値電圧計によって測定される最大電圧から推定せざるをえない。波高値電圧計は図4.8の電圧①( $V_0$ で示す)または電圧②以降のうちで波尾の重なりによる影響を受けた最大の電圧( $V_m$ で示す)を測定することとなる。図4.8の3例について、 $V_0$ と $V_m$ の値を比較すると表4.3となる。これより $V_m$ は $V_0$ の値の1から

表4.3  $V_0$ と $V_m$ の比較

実験 比率	No. 79-9	No. 80-11	No. 80-15
$\frac{V_m}{V_0}$	1.25	1	1.23

1.25倍の間に入ると考えられる。以下の検討は、波形が観測されていない場合上記の誤差を見込んで、やむをえず波高値電圧計の値をもってサージ電圧の第1波と近似できるものとした。

#### 4.3.5 誘導電圧最大値の検討

前節の考察からA端の電圧 $V_A$ は入射波 $U_0$ とすると、

$$V_A = \frac{2 \cdot R}{Z_0 + R} U_0 = k U_0 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

で与えられる。 $k$ については、試験用配電線の波動インピーダンスをおおよそ $Z_0 = 540\Omega$ とし、測定端の抵抗分圧器 $R = 10\text{k}\Omega$ のとき、 $k = 1.9$ となる。これより、入射波 $U_0$ の大きさは、実測値を1.9で除すことによって得られる。そのような操作を加えて主放電電流値と誘導電圧最大値との関係をプロットしたものが図4.10である。ただし、誘導電圧は試験用配電線の高さに正比例し、雷撃地点との離隔距離に反比例するものとして、ここでは $U_0$ を同一条件( $h = 10\text{m}$ ,  $Y = 77\text{m}$ )で換算した値をプロットした。主放電電流値は、磁鋼片により観測された値であり、実測結果を示す実線は最小2乗法により求めた。

ここで実測された誘導電圧は、大地から放電路に沿って上向きに流れる雷撃電流によって生ずる磁束が試験用配電線と鎖交することにより試験線に誘起されたものと考えられる。この考え方で誘導電圧の波高値 $U_{0m}$ を求めると(4.2)式となる。[式の誘導は本章の付録を参照]

$$U_{0m} = \frac{9.2 \cdot I_m}{\Delta t'} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし、 $U_{0m}$ は $k\text{V}$ で表し、雷撃電流波形は三角波で近似し、その波高値を $I_m$ ( $k\text{A}$ )、波高値までの立ち上がり時間を $\Delta t'$ ( $\mu\text{s}$ )とする。さらに、ロケットの打ち上げは危険防止のため、発射台から約 $30^\circ$ の方向で試験用配電線から離れる角度で行っているため、電流値としてその垂直成分を考慮している。

(4.2)式で $\Delta t'$ を2, 5, 10ならびに $20\mu\text{s}$ と仮定したときの関係を図4.10に一点鎖線でそれぞれ示す。筆者らの実測結果は立ち上がり時間を $10\mu\text{s}$ と仮定した雷撃電流のときとだいたい一致している。 $2\mu\text{s}$ を仮定したものは大き

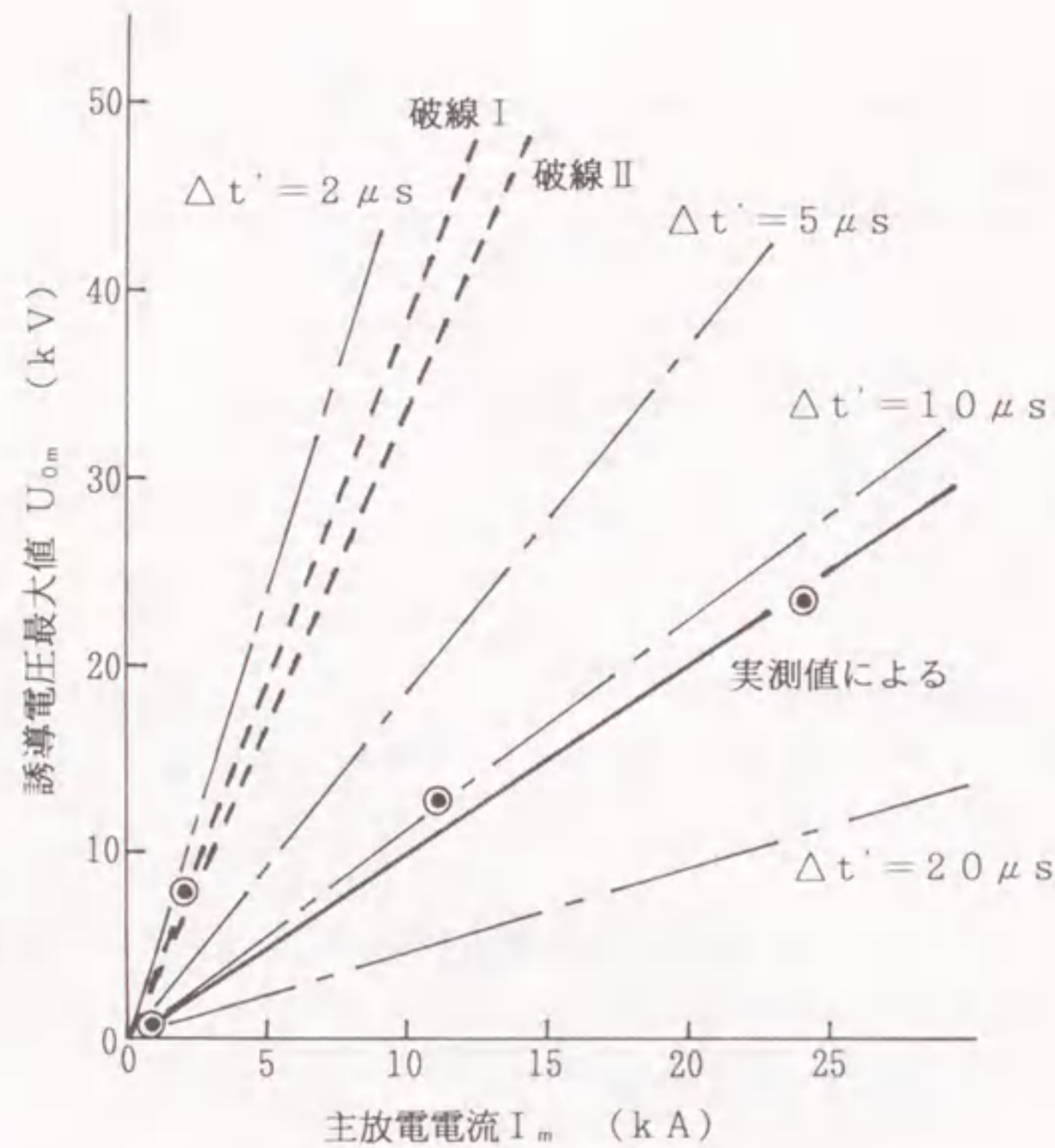


図4.10 誘導電圧と主放電電流の関係

異なる。冬季の雷撃電流の波頭長は夏季のもの（一般に  $2 \mu s$  程度）に比べて長いといわれており、たとえば Nakahori らの報告<sup>(11)</sup>では負極性雷電流波形で約  $9 \sim 11 \mu s$  の立ち上がり時間の実測例があり、また後藤らの報告<sup>(12)</sup>でも約  $15 \mu s$  の立ち上がり時間の実測例がある。そうであるとすれば実測値にかなり近い推定値を得たことになる。

誘導電圧の発生に関する理論的研究はこれまで数多くなされている。そのうちで、主放電段階で発生する誘導電圧としては、前駆放電路の電荷が順次減少することによるものおよび主放電電流の電磁界によるものが主な要因と考えられている。これらを考慮した誘導電圧最大値  $U_{0m}$  に対する理論式は、Rusck が (4.3) 式のように与えている<sup>(13)</sup>。

$$U_{0m} = \frac{30 \cdot I \cdot h}{Y} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{(2 - \beta^2)^{1/2}}\right) \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで、 $I$  は主放電電流波高値 (kA)、 $\beta$  は帰還雷撃進展速度の光速度に対する比、 $h$  は線路の地上高 (m) であり、 $Y$  は図4.1に示されているように誘雷地点と

配電線との最短距離である。

本式は、矩形波状の雷電流および無限長線路を仮定し、雷撃地点近傍の線路上で左右両方向からの誘導電位の和を求めて誘導電圧を導き出したものである。筆者の実験においては  $\beta$  が実測されていないが、1 に比べて小さいと考えられるので (4.3) 式括弧内の第2項は省略して考える。これは上記の発生要因では、前駆放電路の電荷による電界変化が主要因と考えることに相当する。

また、横山氏は  $2/40 \mu s$  の三角波雷電流による誘導電圧を数値解析によって求めている<sup>(14)</sup>。これをここでの実験にあてはめると  $U_{0m}$  と  $Y$  の関係は次式で近似できる。

$$U_{0m} = \frac{26 \cdot I \cdot h}{Y} \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、それぞれの記号は (4.3) 式と同様である。

図4.10には (4.3) 式および (4.4) 式の関係それぞれ破線 I、破線 II で示している。(4.2) 式と比較すれば、 $\Delta t' = 2 \mu s$  とした場合に対応しており、ここでの実測値とはかなり相違している。

#### 4.4 架空地線の誘導電圧抑制効果

##### 4.4.1 抑制効果の検証

上線を  $200m$  ごとに接地し、これを架空地線の代用として下線に生じる誘導電圧の測定を実施した。合計5回の実験を行い、その結果を前記表4.1実験条件欄の「状態B」に示している。その中で正極性電圧は4回であった。

この4例について、4.3.5節と同様にして、主放電電流値と誘導電圧との関係を図4.11に破線で示す。実線は架空地線 (GW) を用いないときの誘導電圧の測定結果として図4.10の実測直線を再掲したものである。GWの有、無で比較すると、GWが施設されている場合には電圧は約66%に抑制されている。測定点数が4個と少ないため厳密なことは言えないが、波高値電圧計の測定による誤差を考慮しても架空地線の有無による相対的比較により、架空地線の存在によって誘導電圧は60~70%に抑制されている。

##### 4.4.2 上線地絡に伴う抑制現象

上線の誘導電圧が  $6.6kV$  級配電線の絶縁レベルを超過して、高圧ピン碍子がフラッシュオーバーに至ったと推定される例が実験番号80-17の1例だけ記録された。図4.12にデータレコーダによって得た結果を示す。時間軸の起点は主放電の開始時刻とっている。

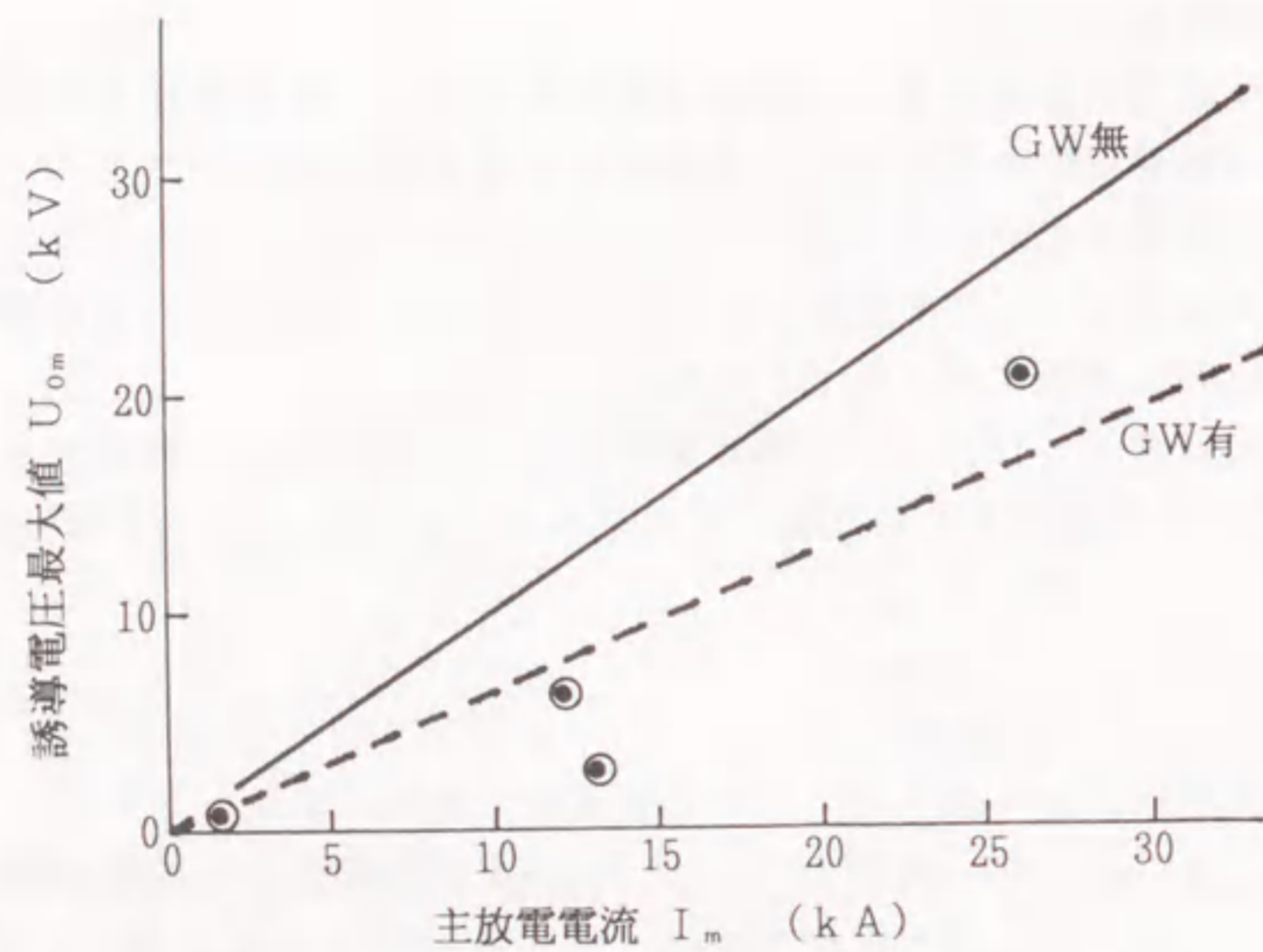


図4.11 架空地線の有無による誘導電圧の比較

図4.12 (a)の波形において約0.3ms経過した時点において上線がフラッシュオーバーし、その後しばらくゼロ電位となっていることがわかる。図(b)ではフラッシュオーバーにより上線が接地された瞬間、下線の誘導電圧が低下している。同図に示す破線で破壊直後の誘導電圧(○印)を推定すれば、この下線の誘導電圧は、上線のフラッシュオーバー直前の、すなわち架空地線の無い状態で発生する電圧の約60%に抑制されている。この値は前節に述べた架空地線による抑制率と一致している。対地雷撃時に、配電線系統に誘導される雷電圧が架空地線の有無によって大きな影響を受ける度合を、実験80-17は1雷放電現象の中で端的にしかも数量的に示したものと見える。

#### 4.4.3 抑制効果の検討

一般に、架空地線による誘導電圧の抑制効果は架空地線と導体との電磁結合を考慮した(4.5)式で検討される<sup>(1)</sup>。

$$V' = V_p \left( 1 - \frac{Z_{PG}}{2 \cdot R_G + Z_{GG}} \cdot \frac{h_G}{h_P} \right) \quad (4.5)$$

ここで、 $V'$ は架空地線によって抑制された誘導電圧、 $V_p$ は架空地線が存在しないときの誘導電圧、 $R_G$ は接地抵抗、 $Z_{GG}$ は架空地線の自己サージインピーダンス、 $Z_{PG}$ は架空地線と導体との相互サージインピーダンス、 $h_G$ 、 $h_P$ は架空地線、導体のそれぞれの地上高さである。

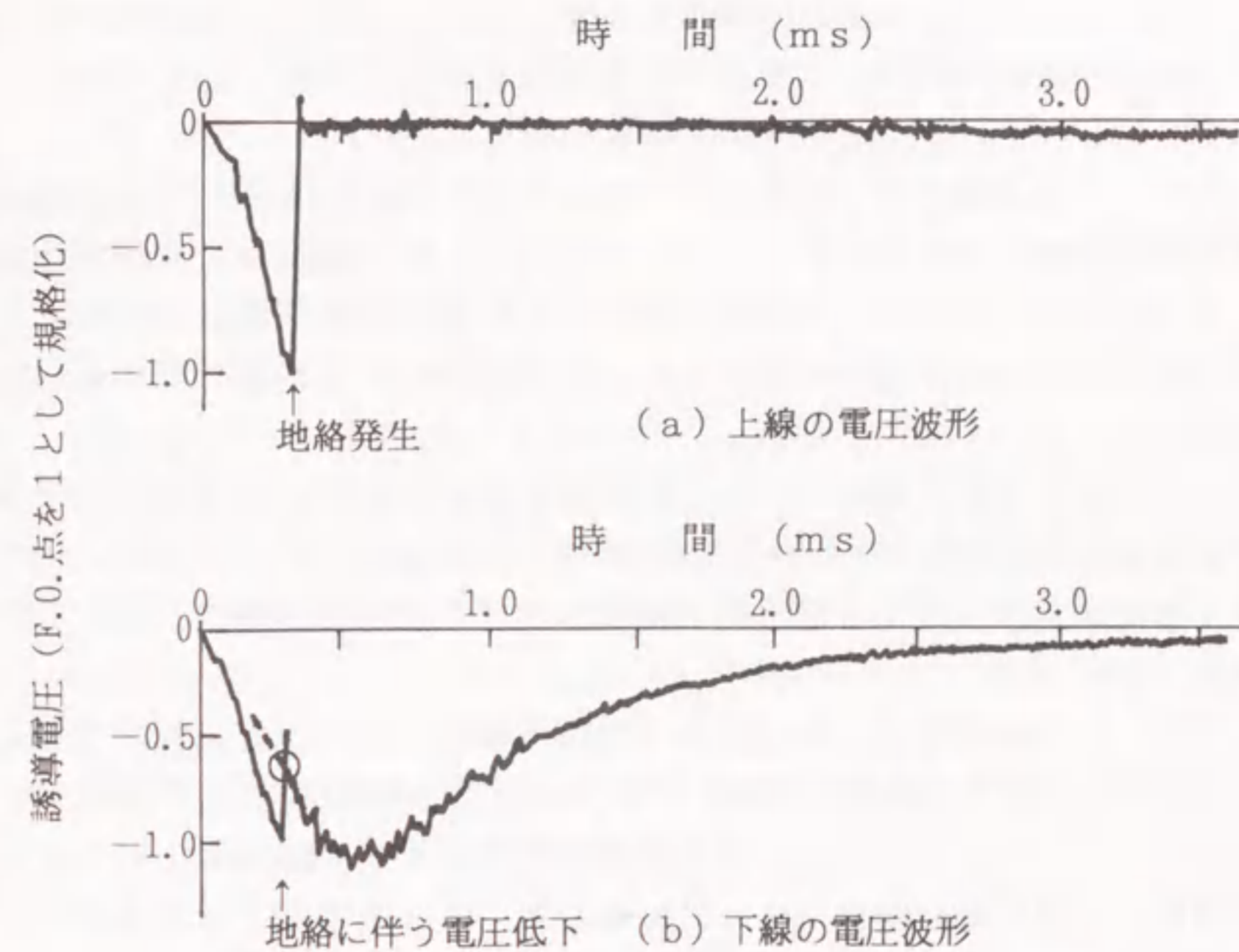


図4.12 上線地絡時における誘導電圧波形 (実験番号 80-17, 雷雲: 正極性)

昭和55年(1980)の線路形状では、 $R_G = 2 \Omega$ 、 $Z_{GG} = 540 \Omega$ 、 $Z_{PG} = 160 \Omega$ 、 $h_G = 10 \text{ m}$ 、 $h_P = 9 \text{ m}$ であることから  $V'/V_p = 0.67$ となる。同様な計算の結果、54年では0.66となる。

実測による抑制率は図4.11からGW無とGW有の結果を比較して、60~70%となり理論値にほぼ等しい値である。加えて、4.4.2節の結果が約60%となることも併せて考えれば、(4.5)式で抑制効果を考えることは妥当であると結論される。

#### 4.5 結言

北陸地方冬季に実施されたロケット誘雷実験において、雷撃地点近傍の試験用配電線に誘起する電圧を測定した。その結果に基づいて、冬季雷の放電現象と誘導電圧の性状について検討し、さらに架空地線による誘導電圧の抑制効果を検証した。その結果は次のようにまとめられる。



(1) 前駆放電による誘導電圧は誘雷用鋼線の溶断前では雷雲と反対極性である。鋼線溶断前の誘導電圧継続時間では、雷雲が負極性のとき、正極性に比較して、その継続時間が長く数ms以上に及ぶという極性効果が見られた。

(2) 主放電による誘導電圧については、雷雲が負極性のとき生ずる正極性誘導電圧には急峻なパルス電圧を多く含むものが多い。これは、多重度が多く継続時間の長い雷撃放電に対応している。一方、雷雲が正極性のとき生ずる負極性誘導電圧には、パルス電圧は1個ないし2個程度しか含まれず、多重度が少なく継続時間の短い雷撃放電に対応している。

(3) 急峻で短波尾となる正極性のパルス性誘導電圧について、誘導電圧最大値と主放電電流との関係を実験的に求めた。この結果は、雷撃電流によって生ずる磁束が試験用配電線と鎖交することによって誘起する電圧として求めた理論式(4.2)式で説明できることを示した。

(4) 架空地線による誘導電圧の抑制効果を架空地線の有無による比較から検証した。その結果、本実験における試験用配電線の構成では、架空地線により誘導電圧は60~70%に抑制されることを示した。主放電路の電荷によって配電線上に生ずる誘導電圧は架空地線との電磁的な結合によって抑制され、これを考慮する誘導電圧抑制式(4.5)式が有効であることを確認した。

#### 参考文献

- (1) 耐雷設計基準委員会：「配電線耐雷設計ガイドブック」，電力中央研究所報告 175030 (昭和51年3月)
- (2) 大和，三谷，松本，岸嶋，井上：「日本海沿岸の雷性状の検討事項と実測装置」，電力中央研究所報告178075 (昭和54年5月)
- (3) 横山：「配電線誘導雷現象の解析とその実証に関する研究」，東京大学学位論文 (昭和61年)
- (4) 櫻野，堀井：「ロケット誘雷実験における配電線誘導電圧の測定」，石川工業高等専門学校紀要，12，p.73 (昭和55年3月)
- (5) S.Yokoyama, K.Miyake, H.Mitani, A.Takanishi: " Simultaneous Measurement of Lightning Induced Voltages with Associated Stroke Currents ", IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems, PAS-102, p.2420(1983)
- (6) A.J.Eriksson, D.V.Meal: " Lightning Performance and Overvoltage Surge Studies on a Rural Distribution Line ", IEEE, 129, Pt.C, p.59(1982)
- (7) 東山，鬼頭，堀井：「日本海側冬季雷の放電様相」，電気学会放電研究会資料 ED-80-72 (昭和55年7月)

- (8) 中村，櫻野，饗庭，堀井：「ロケット誘雷実験における先駆放電電流と地上電界遮へい」，電気学会論文誌，107-B, p.381 (昭和62年8月)
- (9) 山下，堀井，中村：「ロケット誘雷時における前駆放電電流と地上電界」，電気学会高電圧研究会資料 HV-82-12 (昭和57年7月)
- (10) 角，池田，堀井：「冬季北陸のロケット誘雷実験における雷電流測定と誘雷条件」，電気学会論文誌，102-B, p.289 (昭和57年5月)
- (11) K.Nakahori, T.Egawa, H.Mitani: " Characteristics of Winter Lightning Currents in Hokuriku District ", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-101, p.4407(1982)
- (12) 後藤，成田，小室：「冬季雷放電電流波形の特徴と分類」，電気学会放電高電圧研究会資料 ED-90-161/HV-90-48 (平成2年10月)
- (13) S. Rusck: "Protection of Distribution Systems", Lightning 2 edited by R.H.Golde, p.747(1977) Academic Press
- (14) 横山：「数値解析手法による誘導雷サージ現象の解明」，電気学会論文誌，96-B, p.561 (昭和51年11月)

[第4章の付録]

磁束鎖交による配電線誘導電圧の計算

大地と垂直な放電路に沿って流れる雷撃電流はその放電路近傍に磁束を生ずる。この磁束が試験用配電線と鎖交することにより線路上に電圧が誘起することとなる。この考え方に基づいて誘起電圧の波高値を理論的に求めてみた。

雷撃地点と試験用配電線との位置関係を付図1のような座標系にとる。雷撃電流は紙面の表から裏へ垂直方向に流れるものとし、その波形は付図2のように直線的に上昇するとする。立ち上がり時間 $\Delta t$ 、電流波高値 $I_m$ とする。付図1において、雷撃地点から配電線までの最短水平距離( $y$ とする)を与える配電線上の点をX座標の原点とし、そこから $x$ だけ離れた点での磁束を考える。磁界の強さを $H$ (Y座標成分を $H_y$ とする)、雷撃地点から $x$ 点を見たときの交差角度を $\theta$ として、AB面を垂直に通過する磁束密度 $B$ を求める。

$$B = \mu_0 H_y = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi\sqrt{x^2+y^2}} \cdot \cos\theta = \frac{\mu_0 I_m x}{2\pi(x^2+y^2)}$$

ただし、 $\mu_0$ は真空の透磁率。

$x$ 点における微小距離 $\Delta x$ あたりの誘起電圧 $\Delta e$ は、線路高さを $h$ 、微小時間 $\Delta t$ とすれば次式となる。

$$\Delta e = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\mu_0 I_m x}{2\pi(x^2+y^2)} \cdot h \cdot \Delta x \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

ゆえに、

$$\frac{\Delta e}{\Delta x} = -\frac{\mu_0 I_m h}{2\pi(x^2+y^2)} \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

ここで、電圧測定端A点までの1100mにわたって積分すれば、

$$e = \int_{1100}^0 \frac{\Delta e}{\Delta x} dx = -\frac{\mu_0 I_m h}{2\pi\Delta t} \int_{1100}^0 \frac{x}{x^2+y^2} dx$$

積分公式を使って積分を行えば次式を得る。

$$e = -\frac{\mu_0 I_m h}{2\pi\Delta t} \{0.5 \ln y^2 - 0.5 \ln(1100^2 + y^2)\}$$

ここで、 $y = 77\text{m}$ 、 $\Delta t = \Delta t' \times 10^{-6}\text{s}$ 、 $h = 10\text{m}$ 、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ を代入すれば次式となる。

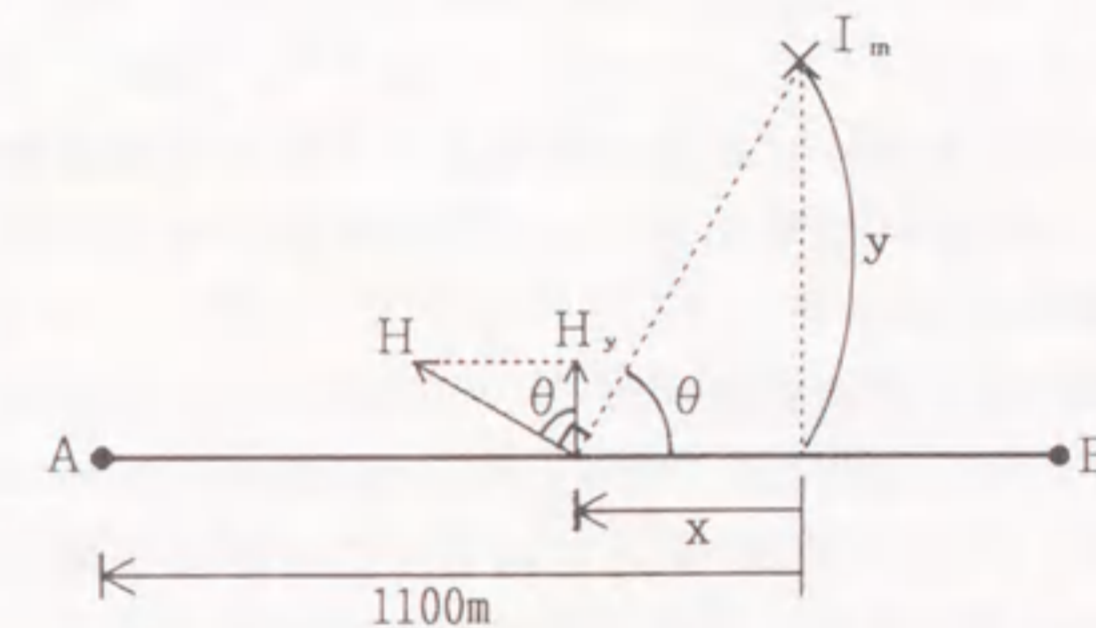
$$e = \frac{5.3 I_m}{\Delta t'}$$

さらに、雷電流の大地に対する影像分を考慮し、誘起電圧 $e$ を $U_{0m}$ に書き直すと次式となる。

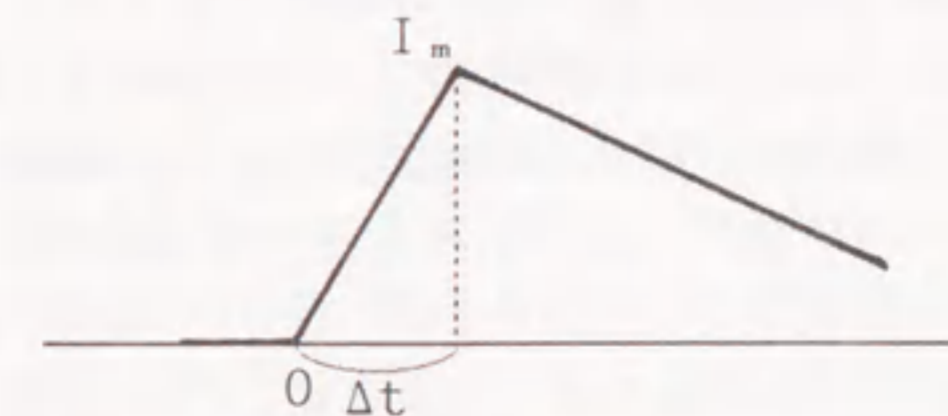
$$U_{0m} = \frac{10.6 I_m}{\Delta t'}$$

実際のロケット誘雷実験では、ロケットの打ち上げ角度は危険防止のため試験用配電線から約30度の方向で離れるように傾けてあるので、雷電流値としては大地に対する垂直成分を考慮することとして、最終的に次式を得る。

$$U_{0m} = \frac{10.6 \times I_m \times 0.86}{\Delta t'} = \frac{9.2 I_m}{\Delta t'}$$



付図1 雷撃地点と試験用配電線との位置関係 (採用した座標系)



付図2 仮定した雷撃電流波形

## 第5章 冬季雷対地雷撃時における配電線 地絡保護継電器の表示動作

### 5.1 緒言

情報化の進む社会においては需要家に安定な電力を供給することが必要不可欠である。とりわけ、配電線系統は需要家に直結する設備であり供給信頼度の向上が一段と求められている。最近の高圧配電線における故障発生率を原因別にみれば、雷放電に伴うものが大きな比率を占めるに至っている。特に、北陸地方では夏季だけでなく冬季にも雷放電が多く発生し、配電線の雷故障を減少させることが信頼度向上に大きく寄与するものと考えられる。一般に配電線系統では、故障を速やかに検出し故障区間を正確に特定することにより停電範囲の縮小を図っている。このために配電用変電所では種々の保護継電方式を採用している<sup>(1)</sup>。このうち、地絡方向継電器（以下、D Gリレーと略す）は母線に接続する複数の配電線の中から地絡故障が発生した配電線を検出し、遮断器に対して動作信号を送り、その線路を系統から切り離すというきわめて重要な役割を持っている。

ところが、実際に線路上に地絡故障が無くとも襲雷時にD Gリレーが表示動作をする事例が多く見受けられる。これは単にD Gリレーが動作したという表示が行われるのみで、遮断器動作にまでは至らないものである。このような動作は配電線近傍に地雷撃が発生し、配電線上に誘導された何らかの電圧や電流によって引き起こされると予想される。配電線上にこのような電圧や電流が誘起される原因としては、前駆放電によるもの、主放電によるもの、ならびに雷雲によって拘束された線路上の電荷が解放されることによるものなどが考えられる。

このようなD Gリレーの表示動作は冬季の襲雷時に多数の線路において発生している。冬季雷襲来時における配電線運用を検討する際にはこのようなD Gリレーの表示動作を十分に把握しておく必要があると考える。最近では、上記の表示動作を微地絡の発生を表示しているのではないかとこの観点から配電線系統の故障予知に利用しようとする試みがある<sup>(2)</sup>。その意味でもD Gリレーの表示動作は重要な検討課題であると考えられる。

筆者は石川高専において、昭和53年（1978）以来毎年11月から翌2月までの冬季4箇月間にわたり針端コロナ電流によって雷雲による地上電界の状況を測定し、北陸地方冬季の襲雷様相を観測してきた<sup>(3)</sup>。このうち昭和60年（1985）までは毎年度12月に、石川高専から約4 km離れた河北潟干拓地においてロケット誘雷

実験が実施されており<sup>(4)</sup>、そこで得られたデータも襲雷様相の把握に活用している。昭和60年（1985）冬からはビデオカメラを用いた自然雷の放電様相の観測を始めて、対地雷撃地点の標定も試みている<sup>(5)</sup>。

本章では襲雷時に動作する配電線地絡保護継電器の表示出力に注目し、これと上記の雷放電様相との関連性について検討する。すなわち、上述の各種観測や実験が行われた石川高専周辺の配電線系統を対象とし、各変電所に設置されたD Gリレーの表示動作を調査し、この結果を石川高専で得られた針端コロナ電流による襲雷様相およびビデオ画像上の放電路と関連づけてみた。これにより、一つの雷放電によってどのような地域を通過する配電線でD Gリレーが表示しているかの実態を明らかにし、併せて放電諸量が数値的に得られているロケット誘雷放電との対応のあるものについては、対地雷撃地点（誘雷地点に相当）や雷撃電流の大きさとD Gリレーが表示動作した配電線の地域範囲とを関連づけて検討している。

### 5.2 ビデオカメラによる冬季雷放電の観測

#### 5.2.1 観測の概要

市販のホームビデオカメラを3台使用し、図5.1に示すような撮影範囲で昭和60年（1985）から石川高専（図中×印）において自然雷を観測している。同図には、河北潟干拓地で実施しているロケット誘雷実験の誘雷地点（⊗印）も併せて示してある。ビデオ1は北西方向に約36度、ビデオ2は北方向に約59度、ビデオ3は南方向に約38度の視野を保ち、それぞれ同時撮影を行なう。撮影可能な時間はビデオ1、2が8時間、ビデオ3が2.7時間である。石川高専周辺の雷雲の襲来状況は校舎屋上において針端コロナ電流を測定することによって把握する。針端コロナ電流は雷雲のもたらす地上電界と対応関係にあることはすでに第2章で述べている。だいたいはこの針端コロナ電流が流れ始めた時点からビデオカメラを起動し、それぞれの記録可能時間の間、連続撮影している。

昭和60年（1985）11月中旬から61年（1986）2月までの冬季3箇月間の撮影では、画像上に放電路がかすかに認められるものを含めて196例の雷放電を記録している。10例のロケット誘雷放電を除き、自然雷は186例で、そのうちで雷道が明らかに確認できたものは50例である。この中にはビデオのコマ送りから識別された同じ地点への多重雷6例、複数の地点への放電路が同一画面（1コマ当り1/30秒）に記録されている、すなわち1/30秒以内に生じた多重雷10例が含まれている。なお、1月以降は降雪の中で1日に1回だけの雷放電が発生するという例のように撮影条件としては悪く、以下の検討は主として昭和60年（1985）の11月、12月に得られた結果について行う。

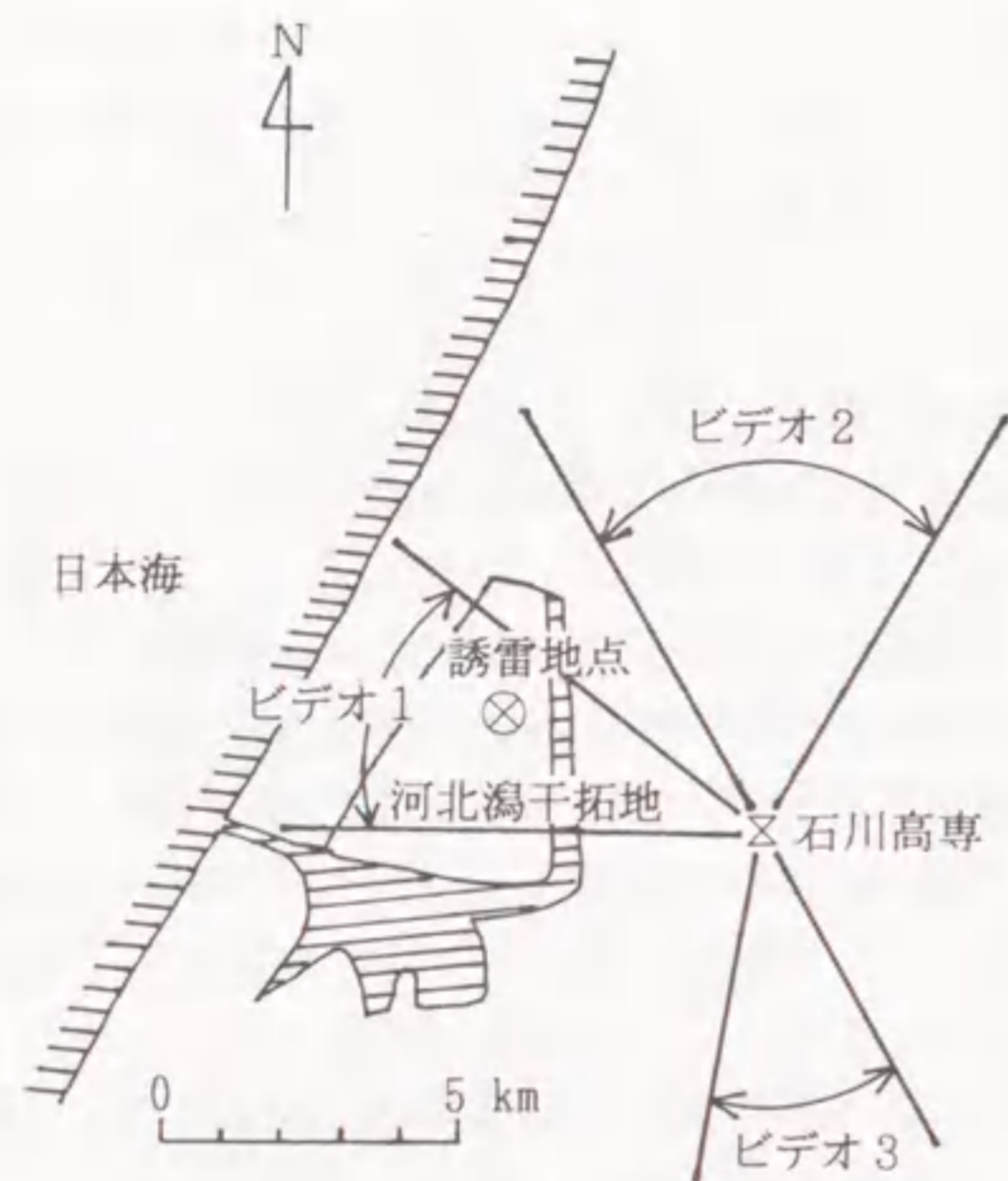


図5.1 ビデオカメラの配置と撮影範囲

### 5.2.2 ビデオ画像と針端コロナ電流の対応

ビデオ画像で記録された雷放電とその時間帯の針端コロナ電流波形とを対応づけてみる。一例として、図5.2は昭和60年(1985)12月14日22時30分から24時までの1時間30分の間に得られた針端コロナ電流の波形である。この電流波形は図上のパルス性のものを除けばだいたい負側に偏っており、地上電界はおおよそ負極性であったことを示している。波形上のパルスには順に1から16までの番号を付してある。このうち※印のものはビデオ画像との対応がとれていないものである。ただし、この波形はペンレコーダ(周波数特性DC~2Hz)で記録されたものであるから、パルス状に見える部分も数秒にわたる電界変化に対応している。また、時間軸から引き出された数値(49, 52など)は後述のようにDGリレーが表示動作した時刻を示している。

番号2から16までの時刻とビデオ画像上で検出された雷放電の発生時刻は完全に一致している。これにより針端コロナ電流の急変化部分は雷放電によって発生したものと考えてよい。ただし、※印のみはビデオ画像上で雷放電を記録できなかったが、これはカメラの撮影範囲を外れたことによると思われる。なお、番号1の時点では雷撃によって送電線の故障が発生し、その事故の波及により当地方が瞬時停電したことによる急変化である。さらに、約3時間後の12月15日1時48分には後述のように⑦アサダ線(石川高専に電力を供給している配電線)が瞬時停電している。

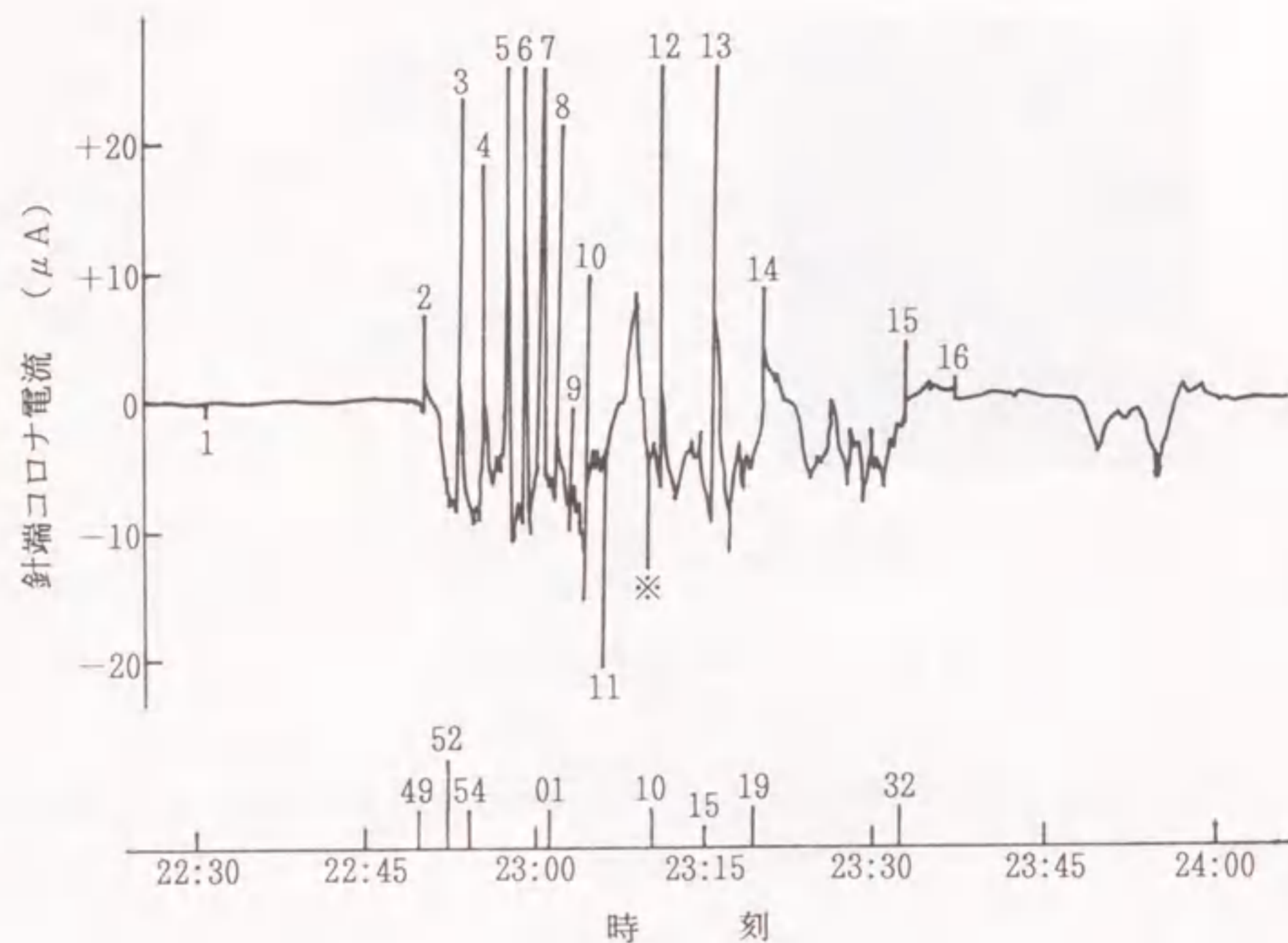


図5.2 針端コロナ電流波形の一例  
(昭和60年(1985)12月14日, 観測地点: 石川高専)

備考: この波形はペンレコーダ(周波数特性DC~2Hz)で記録されたものであるから、パルス状に見える部分も数秒にわたる電界変化に対応している。

ビデオの再生画像の一例を図5.3に示す。同図(a), (b)はそれぞれ図5.2の番号4, 番号12の雷放電に対応している。図(a)は自然雷を撮影したもので、雷鳴の最大音の到達時間より算定して、石川高専から約3km(音速を330m/秒として換算。以下同様に換算している)離れた地点への対地雷放電と推定される。図(b)はロケット誘雷放電を撮影した画像から放電路をスケッチしたもので雷鳴から算定された離隔距離は約4.3kmである。これは石川高専から河北潟干拓地内の誘雷地点までの距離とよく一致している。この誘雷放電(誘雷実験グループの実験番号ではNo. 85-13に相当)は大きな負の電流のあとに小さな正の電流を含む両極性の雷放電であり、磁鋼片により雷撃電流が-20.0kA以上と記録されている。

図5.2の中の番号12のパルスはロケット誘雷放電に伴って発生したものである。ここでは負のコロナ電流に正極性の大きなパルスが重畳したことを示している。これは上記磁鋼片の主放電電流からわかるように負極性の雷雲への放電のとき生ずる電界変化に対応している。この結果から類推すると、番号2から番号16(ただし、番号



(a) 図5.2のNo.4に対応 (b) 図5.2のNo.12に対応  
(放電路のトレース, 誘雷実験No.85-13)

図5.3 ビデオ画像上の雷放電

11および※印を除く)の自然雷はいずれも負の雷雲からの雷放電であったと推察される。

### 5.2.3 異地点への多重雷

ビデオのコマ送りを用いて一つの放電路の濃淡の時間的推移を調べ、いくつかのコマの間に淡い放電路が識別できるような場合、それは一種の多重雷とみなされる。このように調べた結果、今回の観測例では6例の多重雷が認められている。これらの多重雷の時間間隔を調べたところ、最も長いもので200msを超えるものが1例だけあった。

つぎに、1コマの画像内において異なる地点へ向けて複数の放電路が認められるものの再生画像(トレース)の一例を図5.4に示す。これは11月11日17時24分にビデオ3の方向(図5.1参照)で記録された雷放電である。同図(a)の時点では対地雷撃地点は1箇所であるが、その放電路上空のハレーション部分から別の下向き放電路が途中まで進展している。次の1コマ目は全体に画面が薄くなり、2コマ目に図(b)の像が記録された。これは図(a)で見られた下向き放電路が大地へ到達したものと考えられる。すなわち、2コマ(最小約33~最大100ms)の時間間隔で発生した、異なる地点への2本の主放電路が撮影されたことを示している。このように記録された雷撃10例の発生時間間隔を求め、その時間分布を示したものが図5.5である。この結果によれば、33ms以内、すなわち1コマの画像内に複数の放電路が記録された例が最も多く6回であった。ビデオ画像による判別では、これ以上の時間分解能は期待できない。このような例が真に同一時刻に複数の雷撃があったのか、33ms以内の時間間隔で多重の雷撃であったのかは判別できない。図5.

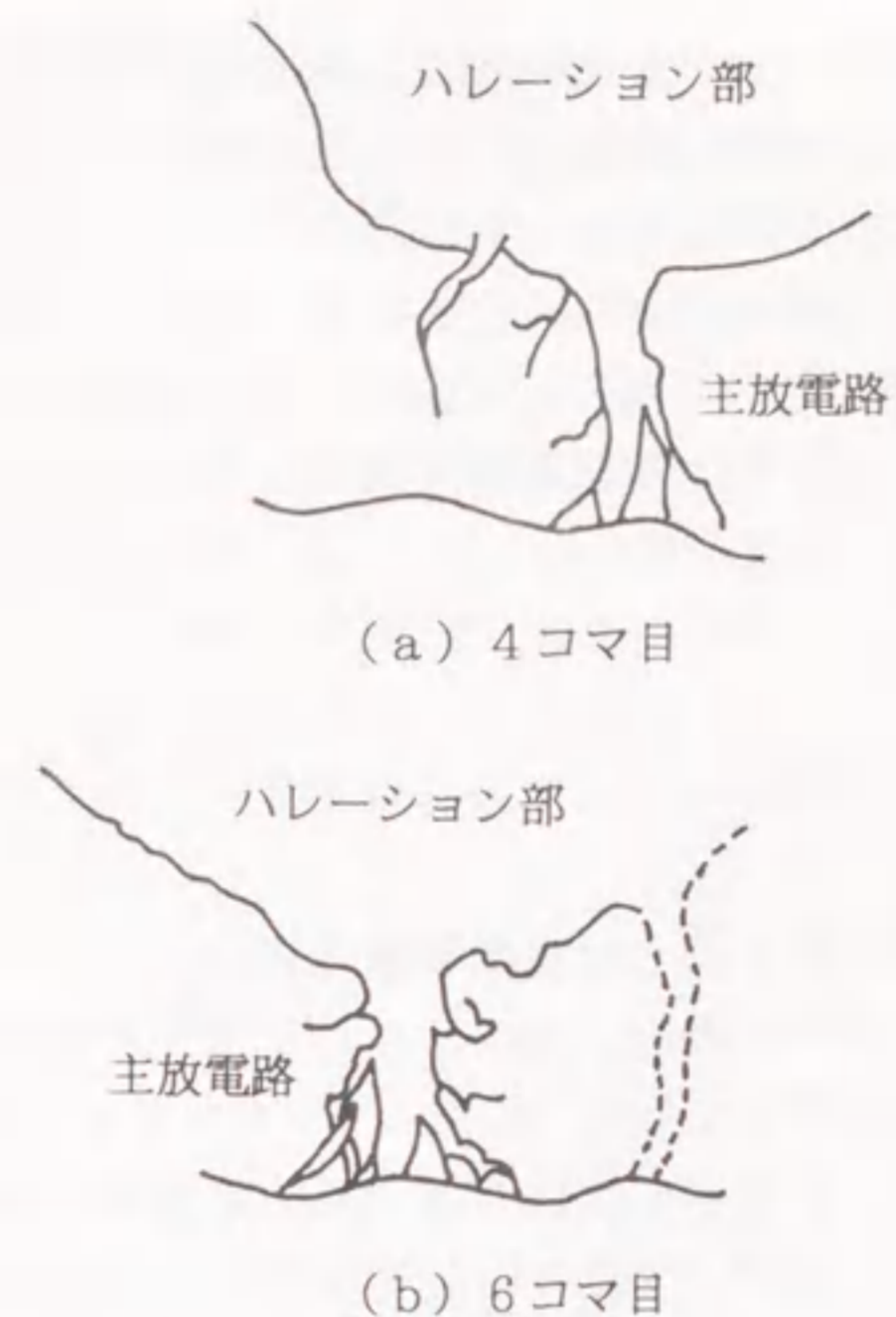


図5.4 異地点への多重雷撃の一例(トレース像)  
(昭和60年(1985)11月11日 17時24分)

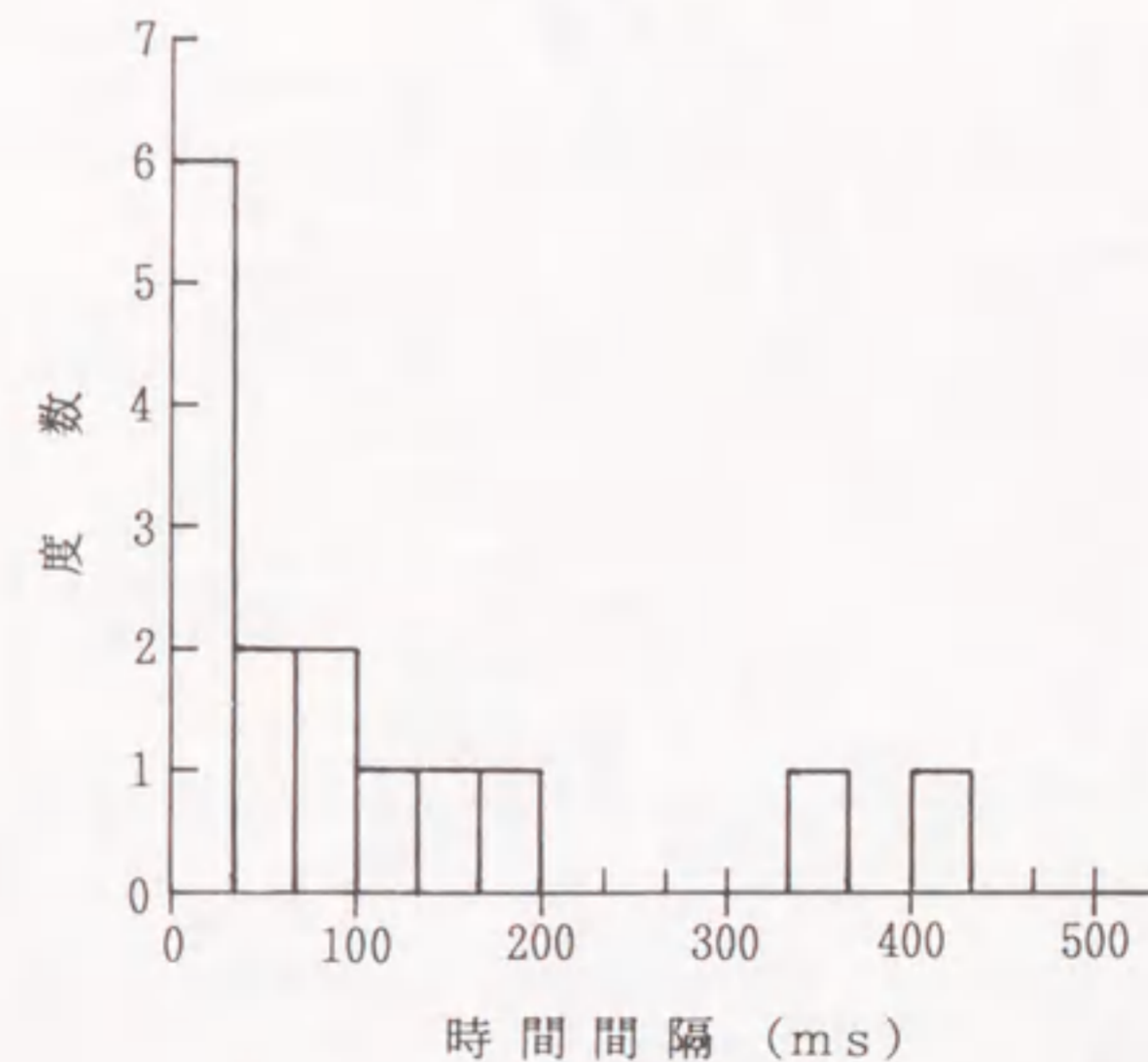


図5.5 異地点への多重雷撃における時間間隔の分布

5によれば、冬季雷の観測では33ms程度以内の時間間隔で発生する多重雷が最も多く記録されている。これに対し夏季雷では100msを超える長い時間間隔を経て異なる地点への多重雷が多く発生するという報告<sup>(6)</sup>がある。100ms程度の時間が経過すれば初期放電路の導電性がなくなると考えられるので、初期放電路とは別の新たな路を進展して雷撃が発生することが原因として挙げられている<sup>(6)</sup>。夏季雷と比較して冬季雷における多重雷の時間間隔が明らかに小さいのは、その発生原因が夏季雷とは異なることを示唆している。

### 5.3 地絡方向継電器 (DGリレー) の表示動作

#### 5.3.1 地絡方向継電器方式と対象配電線系統

非接地方式の配電線系統では通常、図5.6に示すような地絡方向継電器 (DGリレー) を配電用変電所に設置している<sup>(1)</sup>。DGリレーは、2次側オープン・デルタ結線の接地変圧器 (GPT) で検出される零相電圧と各配電線路に設置された零相変流器 (ZCT) で検出される零相電流との位相関係によって故障が配電線1で起きたのか2で起きたのかを判別する。これは、地絡が発生した故障回線と健全な回線における零相地絡電流の位相が逆になることを利用している。実際にはこのようにして故障回線が特定されても直ちに遮断器に指令が与えられない。DGリレーには、適当

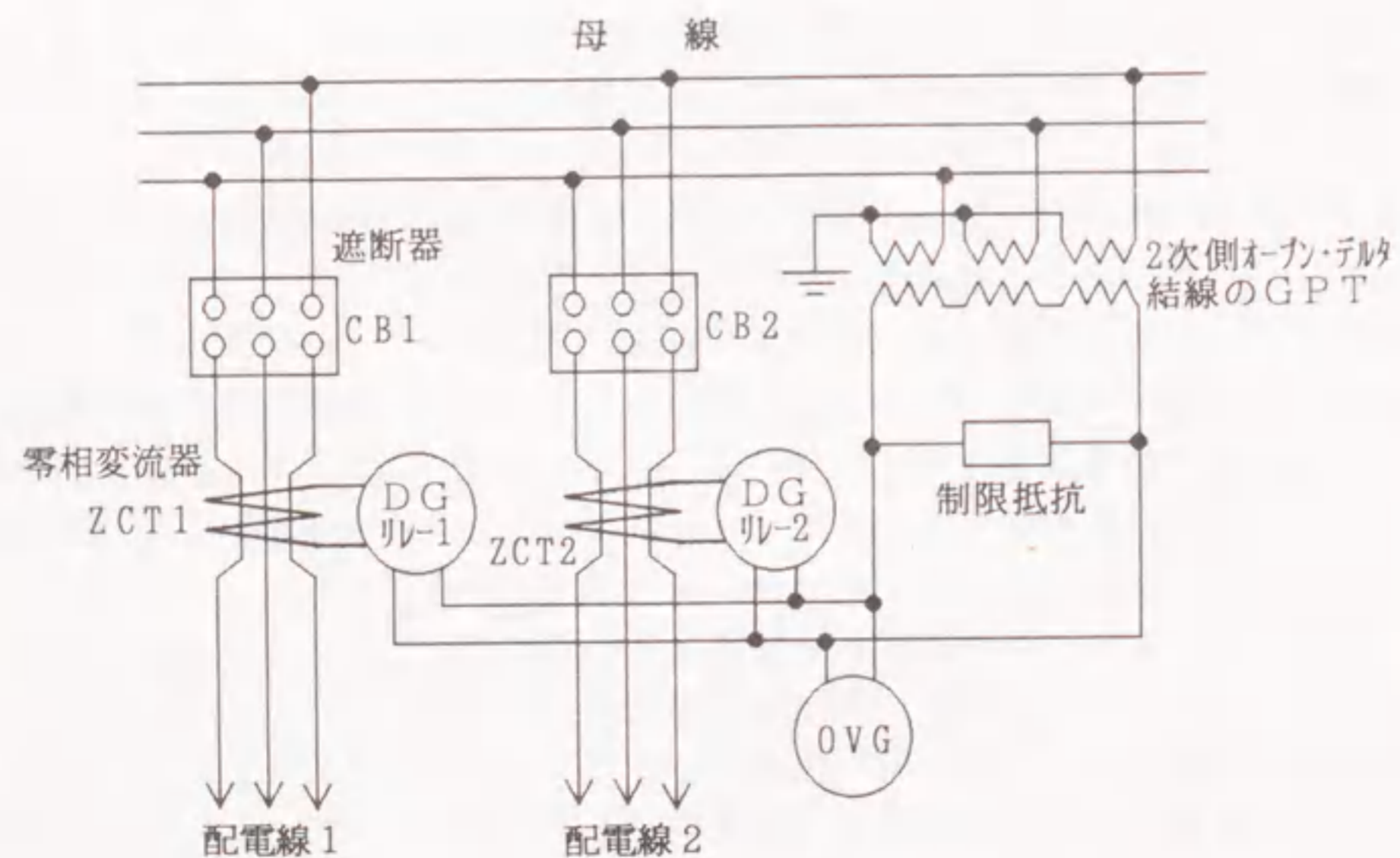
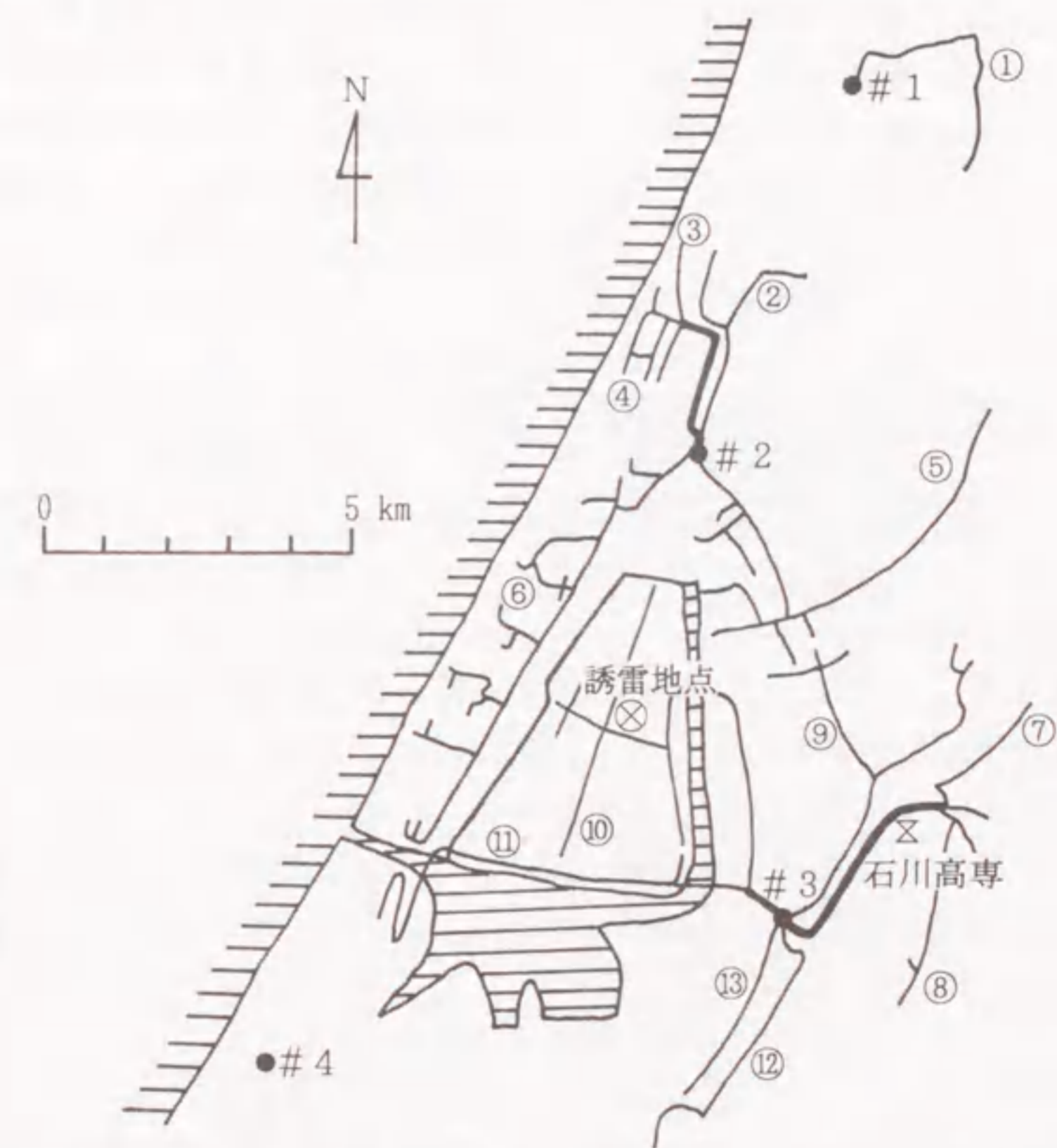


図5.6 配電線の地絡方向継電器 (DGリレー) システム

な時限特性がもたせてあり、ある遅延時間の後、故障のある配電線の遮断器 (CB) を動作させるという方式をとる。また、地絡過電圧継電器 (OVG) と併用させることにより、誤動作を防止している。本章で取り上げたDGリレーの表示動作とは、上記条件が満足された直後にDGリレーからその旨を制御盤に表示することをいう。したがって、リレーの時限特性の範囲内のごく短時間で動作条件が解消される場合には遮断器動作にまでは至らず、表示動作のみにとどまる。

石川高専周辺の配電線系統のうち、本章で検討対象として取りあげた線路の概略的位置を図5.7に番号①から⑬として示す。また、津幡営業所管内の変電所の位置を



- (注1) 線路の番号は、①ナカソウ線 ②ナナクボ線 ③マツハマ線  
④トウツカ線 ⑤ノセ線 ⑥サキユウ線 ⑦アサダ線  
⑧タケノハシ線 ⑨シミズ線 ⑩カワシリ線 ⑪オオネブ線  
⑫ミタニ線 ⑬ウメダ線 を示す。  
(注2) 線路の太線部分は2つの配電線を併架している箇所を示す。  
(注3) 変電所は、#1高松SS #2宇の気SS #3津幡SS #4大浜SS を示す。

図5.7 石川高専周辺の配電線の概略位置

#1:高松SS, #2:宇の気SS, #3:津幡SS, #4:大浜SSとして示す。石川高専(×印), 河北潟干拓地のロケット誘雷実験場(⊗印)もそれぞれ図中に示す。河北潟干拓地内の配電線は中央部が⑩カワシリ線, 南側沿岸部が⑪オオネブ線であり, いずれも#3津幡SSから引き出されている。石川高専は⑦アサダ線から電力の供給を受けている。

### 5.3.2 DGリレーの表示動作

各配電線に設置されたDGリレーの表示動作は津幡営業所で一括して印字される。そのような表示結果を一例として前掲図5.2の時間帯について示したものが表5.1である。結果は月/日, 時刻(時:分), 配電線および変電所の名称, 表示記号の順に打ち出される。同表には, 参考として, 図5.2の時間帯の後に12月15日1時48分に⑦アサダ線で遮断器が動作し, その後再閉路が成功したという出力結果も合わせて示してある。石川高専のビデオはこの瞬時停電以降停止し, 記録がとれていない。

表5.1 DGリレーの表示動作の一例

月/日	時刻(時:分)	配電線路名 変電所名	表示記号	図5.2で対応する針端 コロナ電流パルス番号
12/14	22:49	オオハマ	OVG1	2
12/14	22:52	タケノハシ	DG	3
12/14	22:54	タケノハシ	DG	3, 4
12/14	23:01	アサダ	DG	7, 8
12/14	23:01	ウメダ	DG	
12/14	23:01	カワシリ	DG	
12/14	23:10	トウヅカ	DG	※, 12
12/14	23:10	サキユウ	DG	
12/14	23:10	ノセ	DG	
12/14	23:15	ノセ	DG	13
12/14	23:15	シミズ	DG	
12/14	23:19	ノセ	DG	14
12/14	23:32	ノセ	DG	15
12/15	01:18	アサダ	DG	
12/15	01:48	アサダ	CB DG	
12/15	01:49	アサダ	CB再閉路	

(注) DG: 地絡方向継電器表示動作あり  
OVG1: 零相電圧V<sub>0</sub>のレベル1  
CB: 遮断器動作

DGリレーの表示動作, 針端コロナ電流, ビデオ画像は時刻合わせがしてあるとはいえ, それぞれが別々に時刻を記録している。前述のように, 雷放電発生時の針端コロナ電流パルスの発生時刻とビデオ画像の時刻は完全に対応している。これらとDGリレーの表示動作時刻とを比較検討した結果, 相互に最大1分程度の誤差はあるもののだいたいにおいて一致していることが分かった。表5.1には図5.2で対応する針端コロナ電流パルスの番号を併せて示してある。これはDGリレー表示動作時刻から±1分以内の範囲にあるパルスを示している。以上のような方法を各襲雷期間ごとに適用し, DGリレーの表示動作, 針端コロナ電流およびビデオ画像の時刻を対応づけている。

### 5.4 雷放電様相とDGリレー表示動作

#### 5.4.1 単一の配電線における表示動作

1回の雷放電が発生した際に, DGリレーが単一の配電線だけで表示動作した例をとりあげる。ビデオ画像による雷放電路の一例を図5.8に示す。これは図5.1に示すビデオ2の撮影方向(北方向)で得られたものである。画面の時間表示7:57:19:37(7時間57分19秒37)は11月17日20時42分(ビデオカメラ撮影開始時点)からの経過時間を示しており, この対地雷撃放電の発生時刻は11月18日4時39分19秒である。同図の放電路は枝分かれを持って複雑な様相を示し, 図(a)では1箇所への対地雷撃, 図(b)では2箇所の異なる地点への雷撃が認められる。雷撃地点と推定した位置を図中の矢印でそれぞれ示してある。雷鳴の最大音は6秒後に記録されており, 石川高専から約3km遠方の位置に雷撃があったと推定される。図5.8(a), (b)の雷撃地点を図5.9に2個の⊕印で示す。ただし, ビデオ画像上で発光強度が強い二つの放電路の対地雷撃地点について示してあり, 発光強度の微弱な図5.8(b)左側の放電路については雷鳴の最大音への寄与が少ないものと考えて省略してある。

この雷放電でDGリレーが表示動作した線路は⑤ノセ線のみであり, 他の配電線では表示動作はない。⑤ノセ線が通過している位置を図5.9の太線で示す。この配電線は山間部に延びており, 他の配電線からは孤立している。したがって⑤ノセ線近傍に対地雷撃があったこととDGリレー動作とが関係あったと推定される。

しかしながら, そのような説明のつかない例も若干存在する。前掲の図5.3(a)の自然雷は12月14日22時55分に発生しているが, その時刻には⑧タケノハシ線だけがDGリレーの表示動作を示している。⑧タケノハシ線の配置と画像から推定された雷撃地点(⊕印)とを図5.10に示す。画像から判断すればこの放電路は垂直に1本だけであり, 単調な放電路であったと推察できる。対地雷撃によってDGリ



(a) 4コマ目



(b) 6コマ目

図5.8 複雑な枝分かれを示す放電路の一例  
(昭和60年(1985)11月18日 4時39分)

レーの表示動作が起きるとすれば、この例のようにいくつかの配電線が密集している地域へ雷撃があった場合、近接する配電線の多くにおいて同時に表示動作が起きるはずである。この例では、雷撃点よりむしろ反対方向に延びている⑧タケノハシ線のみでDGリレーが表示動作している結果となっている。

#### 5.4.2 複数の配電線における表示動作

1回の雷放電によって複数の配電線におけるDGリレーが表示動作する例として、11月18日4時35分に発生した雷放電で表示動作した線路を図5.11に太線で示す。図5.1のビデオ1(北西方向)の撮影には失敗したので正確な対地雷撃地点との対応はとれない。参考としてビデオ2(北方向)の撮影方向で得られた放電様相

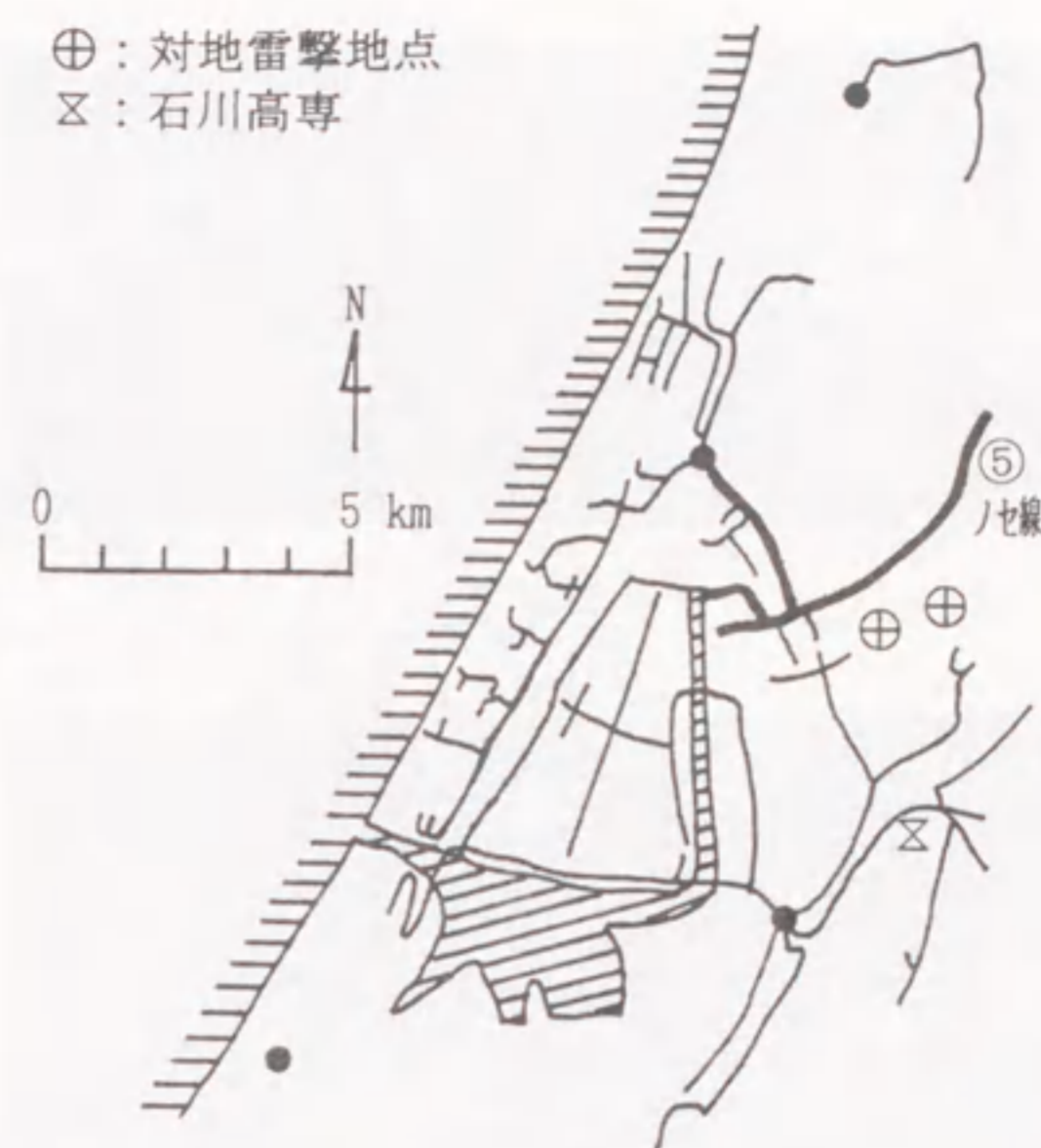


図5.9 図5.8の雷放電によってDGリレーが表示動作した配電線(太い実線)と対地雷撃地点

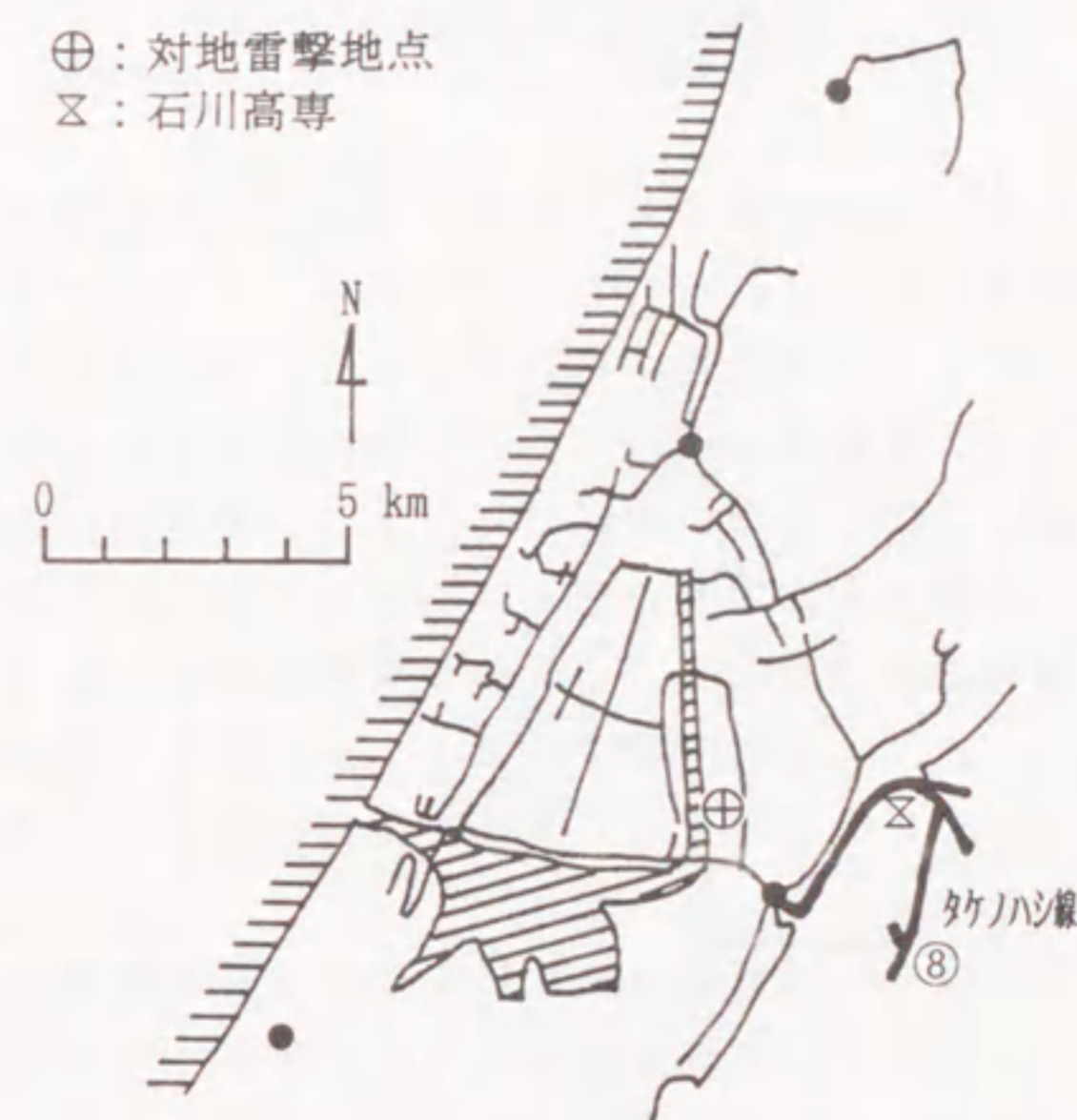


図5.10 図5.3(a)の雷放電によってDGリレーが表示動作した配電線(太い実線)と対地雷撃地点



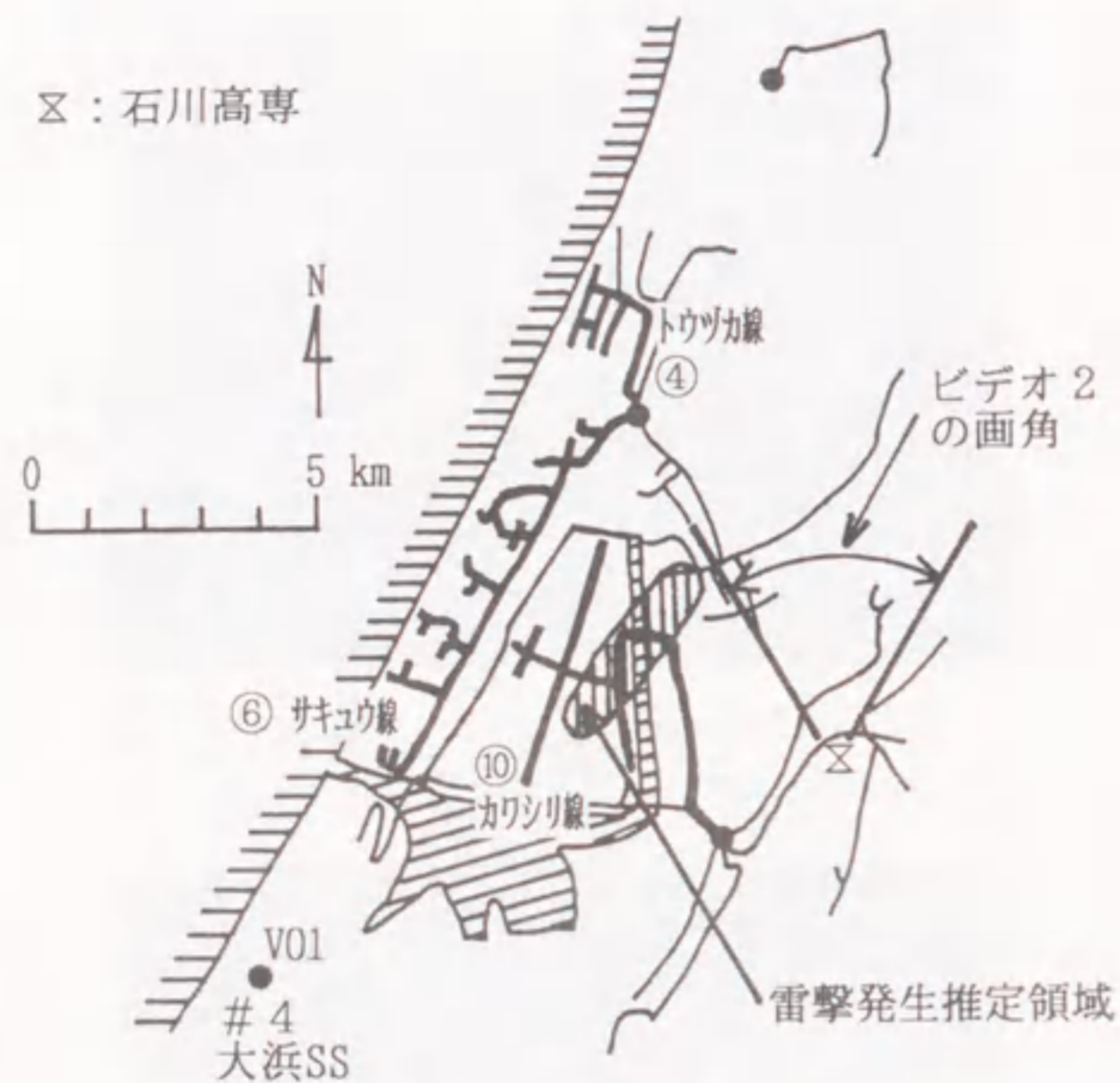


図5. 11 雷放電によって複数の配電線のDGリレーが表示動作した例(太い実線)  
(昭和60年(1985)11月18日 4時35分)

は次のとおりである。最初の1コマで画面左端にかすかな発光が認められ、そのあと6コマ目までは消えてしまう。続いて7コマ目から10コマ目まで再び発光が画面左側に見え、11コマ目でその発光が再び強くなり、13コマ目以降は次第に残光が薄くなって消えていく。放電路は9コマ目で左端に少し見える程度で全体的に発光だけが記録されている。このことから雷撃はビデオ2(北方向)の撮影範囲の左側であったと推定される。雷鳴から距離を推定してみたところ、石川高専から約4 kmであり、雷放電のあった概略の位置は図5. 11の斜線部と推定される。この位置は⑩カワシリ線の位置に近い。また、大浜変電所(#4)、④トオヅカ線、⑥サキユウ線も動作しており、これはビデオに記録された発光の強弱に相当して多重雷撃があったため次第に誘発されたのではないと思われる。

つぎに、12月14日19時58分に得られたビデオ画像の例を図5. 12に示す。この画像は北西(ビデオ1)方向を撮影するビデオカメラで得られたものである。同図(a)は発光開始から6コマ目の再生像であり、(b)は8コマ目の再生像である。全体の放電路様相は次のとおりである。まず、1コマ目で画面右側で強い発光が記録され、この位置に最初の雷撃があったことがわかる。2コマ目にはその発光が薄くなってくる。3コマ目になると再び発光が強くなり、しかもその発光が画面左側まで拡大し



(a) 6コマ目



(b) 8コマ目

図5. 12 雲底を水平に進展する雷放電の一例  
(昭和60年(1985)12月14日 19時58分)

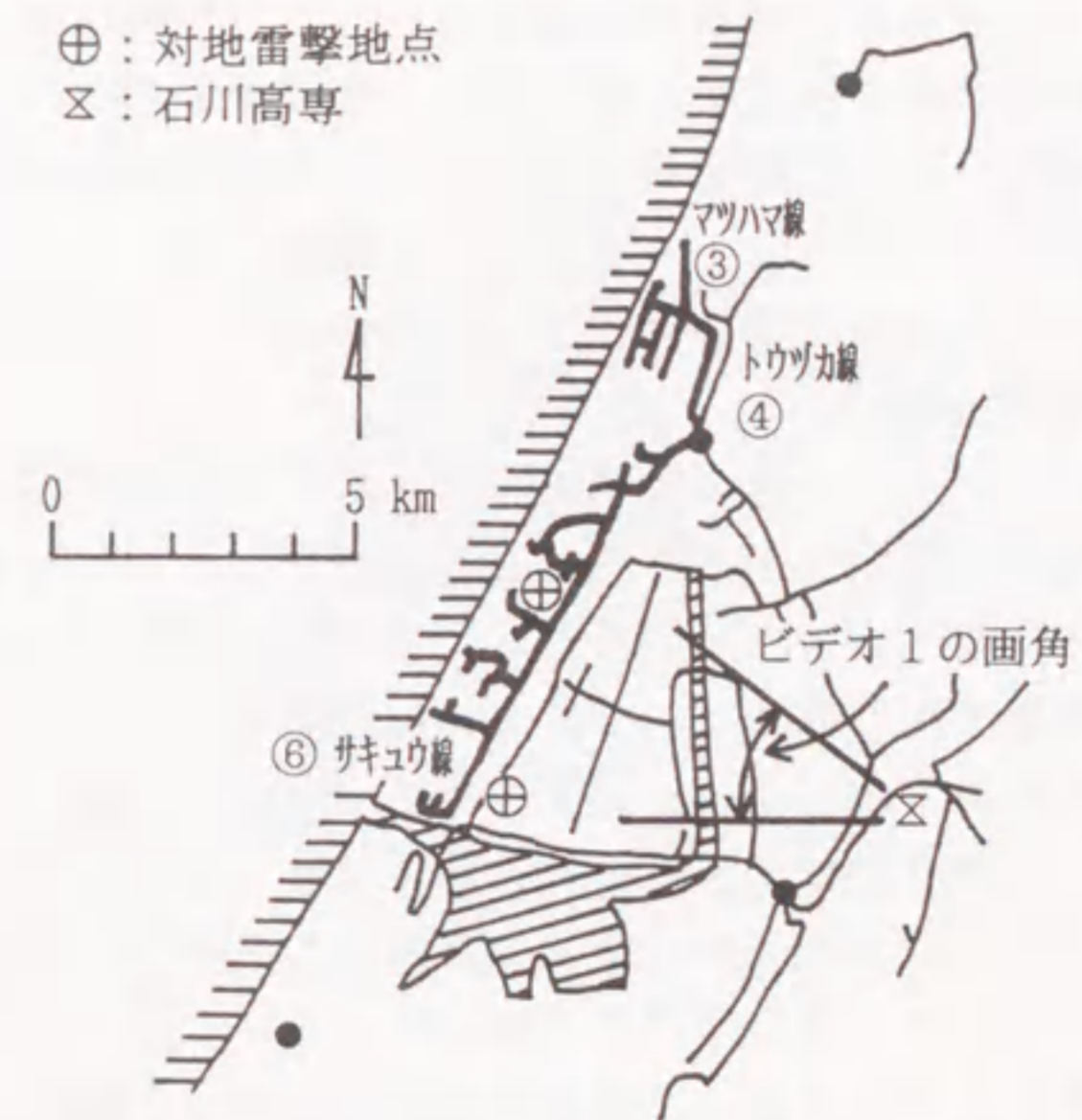


図5. 13 図5. 12の雷放電によってDGリレーが表示動作した配電線(太い実線)

てくる。4, 5コマ目ではそのままの状態わずかに発光が弱まり、左端に別の雷撃地点が見える。図5.12(a)の6コマ目では左右2地点への対地雷撃が撮影されており、その間を放電路が雲底を水平に進展していることが明らかである。8コマ目になって同図(b)に示すように右端の雷撃地点がはっきりと識別できるようになる。これ以降は残光が次第に消えていく。図(a)と図(b)とを比較すると、図(a)の放電路は右側の雷撃点から更に右方向へも水平に放電路が延びていたように見える。

この雷放電があったときDGリレーが表示動作した三つの配電線(③マツハマ線、④トウツカ線および⑥サキユウ線)を図5.13にそれぞれ太線で示す。推定の雷撃地点(⊗印)も併せて示してある。同図中に示される三つの配電線の位置と雷鳴から推定された二つの雷撃地点および右側雷撃点を超えて延びている水平な放電路の位置とはよく対応している。

以上のようにビデオ画像上でみて、一つの雷放電のなかに多数の発光が存在し、しかも継続時間の長い多重雷放電や、水平な放電路を持ち異地点への多重雷撃のときは広い範囲で複数の配電線のDGリレーが表示動作をするということが分かった。

#### 5.4.3 ロケット誘雷放電に伴う表示動作

河北潟干拓地で行われたロケット誘雷実験<sup>(4)</sup>で誘発された雷放電によってDGリレーが表示動作した例がある。それらを主放電電流値とともに表5.2に示す。雷撃地点は河北潟干拓地内の決められた地点にあり時刻もはっきりしている。この場合は明らかに誘発された対地雷撃放電によってDGリレーが表示動作したことになる。同表では、電流の大きな放電のときに複数の配電線でDGリレーが表示動作した傾向にある。表示動作を示した配電線と誘雷地点との位置関係を2例について図5.14と図5.15に示す。図5.14の場合の放電路は図5.3(b)に示すものである。画面右方向へ水平に伸びた雷放電によって誘雷地点北方の配電線について表示動作があったものと推察される。

つぎに、図5.15の場合の放電路を図5.16に示す。これは、誘雷地点から1 km離れた観測所(河北潟干拓地内に設置)で撮影されたものであり、1本の放電路が上方方向に伸びフレームからはみ出している。放電路の明るさから推定して観測点の頭上を超えて進展を続けており、その方向は北方向と考えられるがそれ以後の放電路は雲中に入ったためわからない。石川高専のビデオ1で得られた画像では画面全体の強いハレーションが4コマ目まで続き、中でも2コマ目は一段と強力であった。5コマ目のわずかに弱くなったハレーション部をみると右側(北方向)へ傾いている。7コマ目になってワイヤー蒸発路だけが残っている。このときの電流値は+23 kAと大きなものである。DGリレーの表示動作については、図5.15に示すように、誘雷地点から北方向に遠く離れた①ナカソウ線でも表示している。石川高専の針端コロ

表5.2 ロケット誘雷放電によってDGリレーが表示動作した配電線路名と主放電電流値(昭和60(1985)年度)

月/日	時刻(時:分)	配電線路名 変電所名	表示記号	主放電電流(kA) (磁鋼片による)	実験番号
12/09	04:33	アサダ	DG	- 2.8	85-2
12/09	04:33	ミタニ	DG		
12/09	22:54	ナカソウ	DG	+ 23.0	85-7
12/09	22:54	トウツカ	DG		
12/09	22:54	ノセ	DG		
12/09	23:12	ノセ	DG	+ 12.0 *	85-8
12/13	21:22	オオハマ	OVG1	- 3.0	85-12
12/13	21:22	ミタニ	DG		
12/14	23:11	トウツカ	DG	> - 20.0	85-13
12/14	23:11	サキユウ	DG		
12/14	23:11	ノセ	DG		
12/16	23:43	サキユウ	DG	+ 5.0	85-15
12/16	23:43	ノセ	DG		
12/19	01:51	ナカソウ	DG	- 18.0 *	85-17
12/19	01:51	ナナクボ	DG		
12/19	01:51	トウツカ	DG		

(注) \*印は両極性の電流を含む雷放電であることを示す。



図5.14 ロケット誘雷放電とそれによってDGリレーが表示動作した配電線との位置関係。放電路は図5.3(b)。 (昭和60年(1985)12月14日 23時11分 No.85-13)

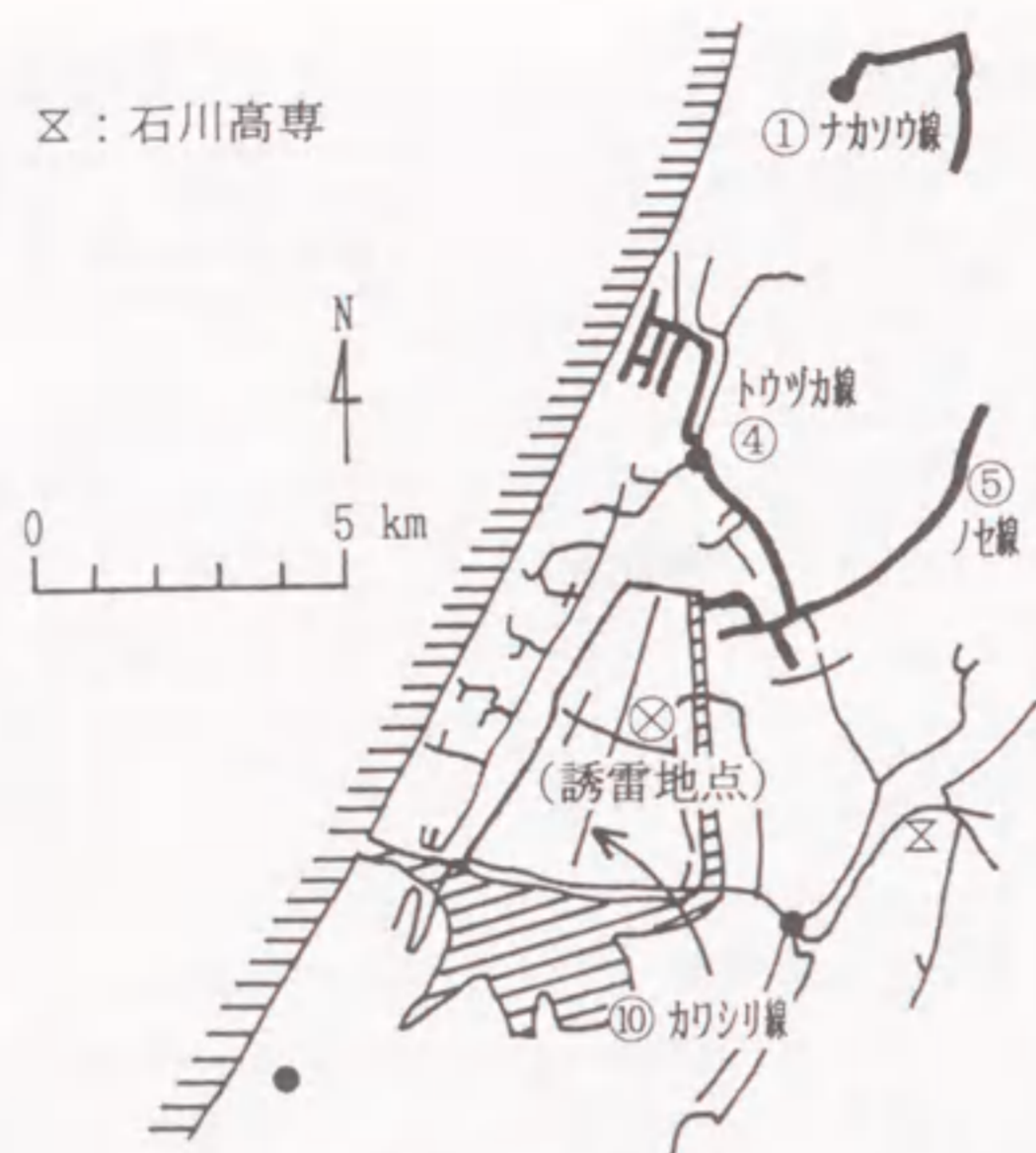


図5. 15 ロケット誘雷地点から遠く離れた配電線のDGリレーが表示動作した例  
(昭和60年(1985)12月9日 22時54分 No.85-7)



図5. 16 ロケット誘雷 (No.85-7) の放電路様相  
(誘雷地点から1 km離れた観測所から撮影)  
(図5. 15に対応)

ナ電流波形には、この誘雷放電の前後の時刻には自然雷による電流パルスは記録されていないので、①ナカソウ線のDGリレーの表示動作は確かにこの誘雷放電によるものと推察される。

ロケット誘雷放電で特徴的なこととして、誘雷地点に一番近接した⑩カワシリ線で一度もDGリレーが表示動作していないこと、および遠方では①ナカソウ線が表示動作した例のあることが指摘できる。遠方の①ナカソウ線については、放電路が長距離にわたって進展していけば配電線に誘導された静電電荷を広範囲に解放することがありうるので、その放電電流が原因でDGリレーが表示動作に至ることもあると推定される。

#### 5. 4. 4 雷放電とDGリレー表示動作との関連性

配電線が直撃雷を受けた場合には、地絡あるいは短絡事故となり配電用変電所の遮断器が動作して供給支障となる可能性が高い。本章ではDGリレーが表示動作だけを示し、遮断器動作にまでは至らない場合を対象としているので、雷放電が対地、雲間を問わず配電線近傍に発生した場合に限って検討する。

図5. 17に対地雷撃地点と配電線および変電所の配置を示す。雷撃によって配電線上に誘起される誘導電圧の原因としては、第4章で述べたように、前駆放電によるもの、主放電によるもの、ならびに雷雲によって拘束された線路上の電荷が解放されることによるものがある。このうち主放電による誘導電圧は継続時間が数～数十 $\mu$ sの領域にありZCTには検知されたとしても、リレー動作には至らないと考えられる。通常のZCTは商用周波数程度の地絡事故に伴う零相電流を検出するための性能しか持たないことと、ある程度の継続時間がなければならないためである。さらに、実用のDGリレーでは表示動作を行うために機械的に接点を閉じる機構となっており、

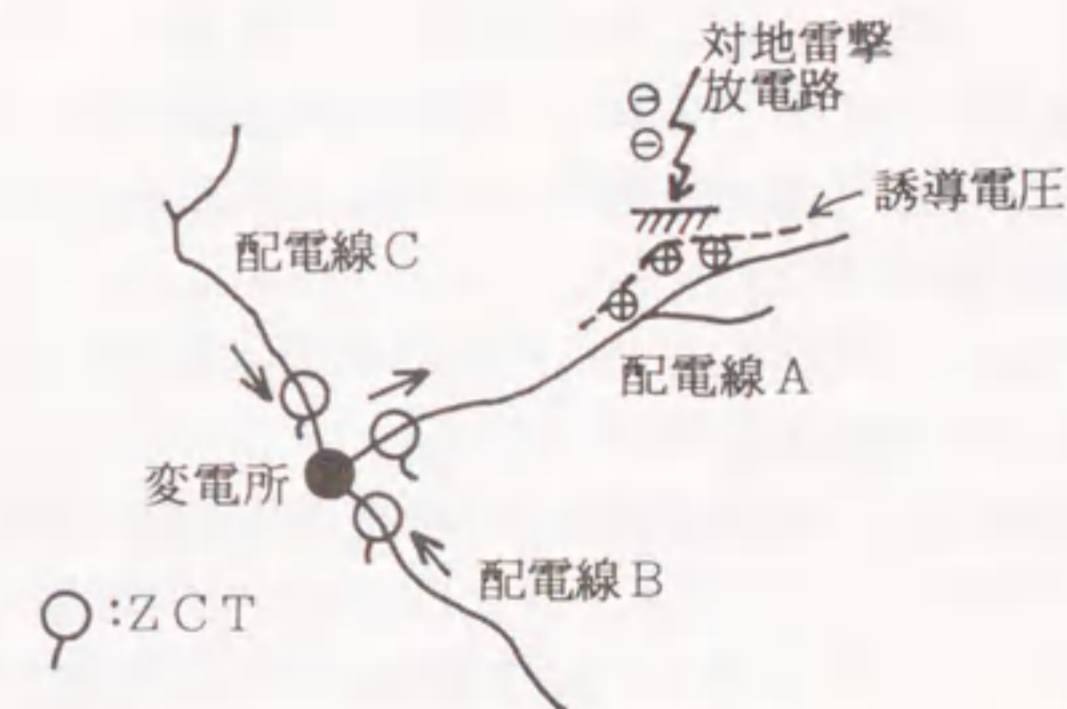


図5. 17 配電線近傍への対地雷撃によるDGリレーの動作状況

その動作に必要な所要時間は約20ms～50msである。主放電によって誘起される誘導電圧はこの所用時間より早く終了するので、DGリレーはこの点でも表示動作をしないと考えられる。

上記の主放電によるものに比べて、雲側からゆっくりと下降してくる前駆放電による誘導電圧に対してはZCTとDGリレーは十分に追従できる。簡単のため、対地雷撃の放電路が大地に対して完全に垂直方向と仮定すれば、この前駆放電による誘導電圧は対地雷撃地点から最近接の配電線(図5.17では配電線A)において最も大きく、しかも線路上に三相同時に誘起されるので見掛け上零相電圧となって発生する。このとき零相電流が変電所から配電線Aへ流出することとなる。この現象は通常の大地との高抵抗を介した地絡故障と類似の現象が発生したかのように変電所からは見える。これによって配電線AのDGリレーの動作信号が出力されるとともに、それを示す表示動作も起きると推察される。さらに、放電路が配電線と約30度の角度で斜めに交差するように進展した場合には、大地に垂直に進展したときと比べて最大5倍の電界強度となり、これに伴って配電線上に誘起される誘導電圧も大きくなる可能性があることが指摘されている<sup>17)</sup>。この場合には、雷放電路と交差する配電線のDGリレーが表示動作する割合が高くなるものと考えられる。

一方、雷雲の接近によって、雷雲電荷と逆極性の電荷が配電線上に集められる。この電荷は変電所接地用変圧器(GPT)や配電線の漏洩抵抗を通して配電線上に集められるものであり、雷雲電荷による線路上の電位を打ち消すように拘束される。この状態で、対地雷撃あるいは雲間放電が発生すると、拘束されていた電荷が解放されて配電線上を伝搬し、変電所へと侵入してくる。夏季の襲雷時ではこの原因による誘導電圧は小さいとされている。しかしながら、冬季の場合には雷雲高度が低く、地上電界も明らかに夏季よりは高い。したがって、拘束される電荷は夏季のものとは比べて大きいと考えられ、この原因による誘導電圧も大きくなるものと考えられる。このような誘導電圧に対応して線路上に流れる電流がZCTを経て出力され、DGリレーの動作信号が出力されることになると推察される。この場合には、対地雷撃地点と配電線との位置関係よりも、むしろ雷雲電荷の地域的分布状態と配電線との位置関係によってDGリレーが表示動作するといえる。

以上のことから、雷放電によってDGリレーが表示動作を示す要因としては

- (1) 前駆放電によって誘起した電圧によるもの
- (2) 雷雲によって拘束された電荷が解放されるとき誘起した電圧によるものが考えられる。

5.4.1節から5.4.3節までの結果についてみれば、図5.9と図5.13は上記(1)でも説明はつくが、図5.10、図5.11およびロケット誘雷放電における図5.14と図5.15は説明がつかない。北陸地方冬季の雷放電路は水平方向に長い距離にわたって伸長することがあり、広範な領域で雷雲内の電荷に変化が生

ずると思われる。このような場合には上記(2)の要因によって、雷撃地点とは遠く離れた箇所の配電線にも誘導電圧が生じてDGリレーが表示動作に至ることもありうる。

ロケット誘雷放電において誘雷地点に一番近接した⑩カワシリ線で一度もDGリレーが表示動作しなかった原因としては次のことがあげられる。ロケット誘雷では前駆放電が上方から地上に向かって延びることは絶対がないので(1)の原因による誘導電圧は考えられない。放電路が接近してほぼ垂直に形成され放電電流あるいは電磁波によって電圧が誘起するとしても、きわめて高周波成分のものが主体となる。そのような成分ではDGリレーは表示動作を起こすことはできない。つぎに、ロケット誘雷では接地電位の鋼線がロケットによって引き上げられる。このため一種の静電的な遮蔽効果が生じ、地上電界がむしろ低下することが指摘されている<sup>18)</sup>。このようなことは近接する配電線に対しても同様であり、DGリレーの動作をむしろ抑制する方向に作用していると思われる。

以上のことから、第3章で述べた雷放電発生時の地上電界の地域分布と本章で述べた配電線DGリレーの表示動作とは密接に関連しているものと考えられる。

## 5.5 結言

襲雷時に配電線路に地絡故障が発生していないにもかかわらず配電線のDGリレーが表示動作のみを起こすことが知られている。この場合、表示は出るけれども遮断器のトリップは起きない。このようなDGリレーの表示動作とビデオ画像で観測された雷放電様相との関係について検討した。その結果、自然の雷放電が地域的広がりを持ちその中に多数の発光が存在したり、水平に進展する放電路のとき、複数の配電線においてDGリレーが動作している傾向が得られた。

さらに、ロケットによる誘雷放電が起きたときのDGリレーの動作状況を検討した結果、雷撃電流が20kAを超えるような雷放電のとき、複数の配電線においてDGリレーが表示動作している。さらに、そのような放電のとき誘雷地点から10km以上遠くに離れた配電線においてさえDGリレーが表示動作する例があった。

以上の結果から、本章で取り上げたDGリレーの表示動作の原因は、対地雷撃の前駆放電によって配電線上に誘起された電圧によるよりも、むしろ雷雲によって配電線上に拘束された電荷が雲間あるいは対地放電の発生によって解放され、それが零相電圧として検出されるのではないかと推察された。この意味では、雷放電が発生したときの地上電界の地域分布がDGリレーの表示動作と強い相関性があると考えられる。

## 参考文献

- (1) 中島, 松岡, 安藤, 岡村, 鈴木: 「保護継電工学」, 電気学会大学講座 (昭和57年3月)
- (2) 嶋田, 財家, 濱田, 辻, 堀野: 「配電線故障波形の観察結果」, 平成2年電気学会電力・エネルギー部門全国大会, 175 (1990)
- (3) 櫻野: 「針端コロナ電流による北陸冬季雷の観測」, 石川工業高等専門学校紀要, 14, p.57 (昭和57年3月)
- (4) 堀井: 「ロケットによる電力線路および保護装置への雷撃実験」, 文部省科学研究費補助金 (試験研究 (1)) 研究成果報告書 (昭和63年3月)
- (5) 櫻野, 堀井: 「ビデオカメラによる冬季雷の放電観測」, 昭和61年電気関係学会北陸支部大会, A-31 (1986)
- (6) 木下, 松原, 山本, 有馬, 渡辺, 中原, 高原, 樋口: 「冬期, 夏期の雷実測結果について (その2)」, 電気学会放電高電圧合同研究会資料 ED-85-64/HV-85-15 (昭和60年10月)
- (7) 上林: 「雷放電に伴う電磁界」, 電気学会東海支部若手セミナー資料 (ロケット誘雷と雷害防止), No.85-5-13 (昭和60年8月)
- (8) 中村, 櫻野, 饗庭, 堀井: 「ロケット誘雷実験における先駆放電電流と地上電界遮へい」, 電気学会論文誌, 107-B, p.381 (昭和62年8月)

## 第6章 ロケット誘雷放電におけるファイナル・ジャンプ

### 6.1 緒言

対地雷放電に先立ってステップリーダが雷雲から進展してくる。それが、たとえば最終的に送電線に到達するとき、最後のステップすなわち最終雷撃放電がとる距離が対地雷放電のファイナルジャンプ (以後、最終雷撃距離と称する) といわれるものである。これは、送電線における架空地線の雷遮蔽効果をArmstrong-Whiteheadの理論<sup>(1)</sup>に基づいて検討する場合の重要なパラメータの一つとなっている。これまでも最終雷撃距離と雷撃放電電流の波高値とを関係づける実験式は多くの文献で提案されている<sup>(1)(2)</sup>。しかし、至近距離からの自然雷の放電路観測がきわめて困難なため、実測データによってその関係を検証することは至難であった。この理由により、最終雷撃放電に関する実証的な研究はあまり進展していないように思われる。

ロケット誘雷実験では、誘雷場所と時刻とを予じめ知ることができるのが特長である。したがって、至近距離からの静止写真、高速度カメラによる時間分解写真ならびに雷撃電流値を得ることが、自然雷観測に比べて、容易に可能である。通常のロケット誘雷では、ロケットにより引き上げられた接地ワイヤの先端から上向きリーダが開始し、このとき流れるリーダ電流によって鋼線は溶断し蒸発する。その直後に蒸発された鋼線部分の金属プラズマに沿って主放電が誘起される。ところが、昭和57年度 (1982) までの45回の誘雷成功のうちで、7回は主放電が高度90~150mの地点でワイヤ蒸発路から外れて、自由空間へ下向きリーダを伴って異常に進展する例が得られた。このような誘雷放電をここでは異常誘雷放電と呼んでいる。この種の異常誘雷放電はフランスの誘雷グループの実験でも同様に観測されている<sup>(3)</sup>。

異常誘雷放電は上向きリーダで始まる通常の誘雷放電と異なり、ワイヤ蒸発路から外れた部分は下向きリーダを伴うことから自然の雷放電に類似すると考えられる。加えて、異常誘雷放電は最終的に鋼線の根元を中心として約100mの範囲内の大地上あるいは発射台近くに架設された試験用配電線などに至ることが多い。このように、最終雷撃地点が限られた範囲内に分布している場合には、写真観測によって容易にその形状を知ることができる。

本章では、河北潟干拓地における冬季ロケット誘雷実験によって得られた異常誘雷放電について、放電路の静止写真から最終雷撃距離を求め、それを主放電電流値と関係づけて検討している。

## 6. 2 異常誘雷放電の発生と雷撃電流値の推定

### 6. 2. 1 異常誘雷放電の発生機構の推定

河北潟干拓地における実験では、極性にかかわらず地上電界強度が約  $4 \text{ kV/m}$  以上に達して数分程度持続するときを目安としてロケットを発射している。ロケットは最大速度約  $100 \text{ m/s}$  で上昇し、地上に設置したワイヤボビンから直径  $0.2 \text{ mm}$  の鋼線を引き上げる。ロケットの上昇中、鋼線を伝わってコロナ電流が流れ、それは  $\mu\text{A} \sim \text{mA}$  オーダに増加する。ロケットの高度が約  $100 \text{ m}$  に達したとき、小さなパルス電流がコロナ電流に重畳する。誘雷直前には  $1 \sim 100 \text{ A}$  程度のリーダ電流が流れて鋼線は溶断する。地上電界強度と誘雷成功時の高度との関係は第2章の図2.1ですでに示されているが、この高度でロケット先端から上向きのリーダ放電が開始すると考えられる。

本実験で使用している鋼線は、実験室での模擬実験の結果<sup>(4)</sup>によれば、約  $1 \text{ A}$  の電流によって赤熱し、溶断する。さらに、 $10 \text{ A}$  では約  $20 \text{ ms}$  で、 $100 \text{ A}$  では  $1 \text{ ms}$  以内に爆発的に蒸発する。この結果から推定すれば、誘雷直前のリーダ電流で鋼線は蒸発し、その部分に金属蒸気を含むプラズマが存在するものと考えられる。

正極性の雷雲へ向かって鋼線先端から上昇するリーダ（負極性リーダ）は、ほとんど枝分かれをしないで  $1 \times (10^5 \sim 10^6) \text{ m/s}$  と速く進展するので、そのリーダ電流は急峻に立ち上がる傾向にある。それにより鋼線は蒸発し、高温でしかも導電性の良いプラズマへと変化する。それゆえ、主放電は鋼線の蒸発後、直ちにその蒸発路に沿って生じると考えられ、この場合には正常な誘雷放電となる。

一方、負極性の雷雲への上向きリーダ（正極性リーダ）は、多数の枝分かれをしながら  $1 \times (10^4 \sim 10^5) \text{ m/s}$  と負極性リーダに比べてゆっくりと進展する。この正極性リーダ電流は徐々に増加する電流波形となることから、鋼線蒸発路のプラズマは導電性が低くなると推定される。加えて、鋼線が蒸発した後、場合によっては数十  $\text{ms}$  にわたる発光休止期間において主放電が発生する例があり、このようなときには鋼線蒸発路のプラズマの導電性は一層低下する。鋼線蒸発路の導電性が低下すれば、必ずしもこれに沿って放電が発生するとは限らない。このことが負極性の雷雲に対するロケット誘雷で異常誘雷放電が起きやすい主な原因の一つと考えられる。

上述のようなリーダの進展機構の相違から、異常誘雷放電は負極性の雷雲のときに発生すると推察される。この推察は次のような実験事実からも裏付けられる。すなわち、昭和57年（1982）までの45回の誘雷成功のうちで雷雲が負極性であったものは25例、正極性のもは20例であった。これらのうちで、異常誘雷放電が発生したものは7例（第1章の表1.1参照、備考欄に異常誘雷と記したもの）であり、いずれも雷雲が負極性のものに限られている。実験番号で示せば、79-9, 81-7, 82-9, 82-16, 82-18, 82-20, 82-22である。

異常誘雷放電の静止写真によれば、鋼線の蒸発路から離れて大地へ向けて下向きに枝分かれするリーダが観測されている。このような異常誘雷放電を高速度カメラにより観測した結果では<sup>(5)</sup>、ワイヤ先端から上向きリーダが進展した後、ワイヤ蒸発路の途中から下向きリーダが開始している。この下向きのリーダは、ワイヤ先端からの上向きリーダを伴う点を除けば、負極性の雷雲からステップドリダが伸びる自然の対地雷撃放電と類似のものと考えられる。

### 6. 2. 2 異常誘雷放電の電流値の推定

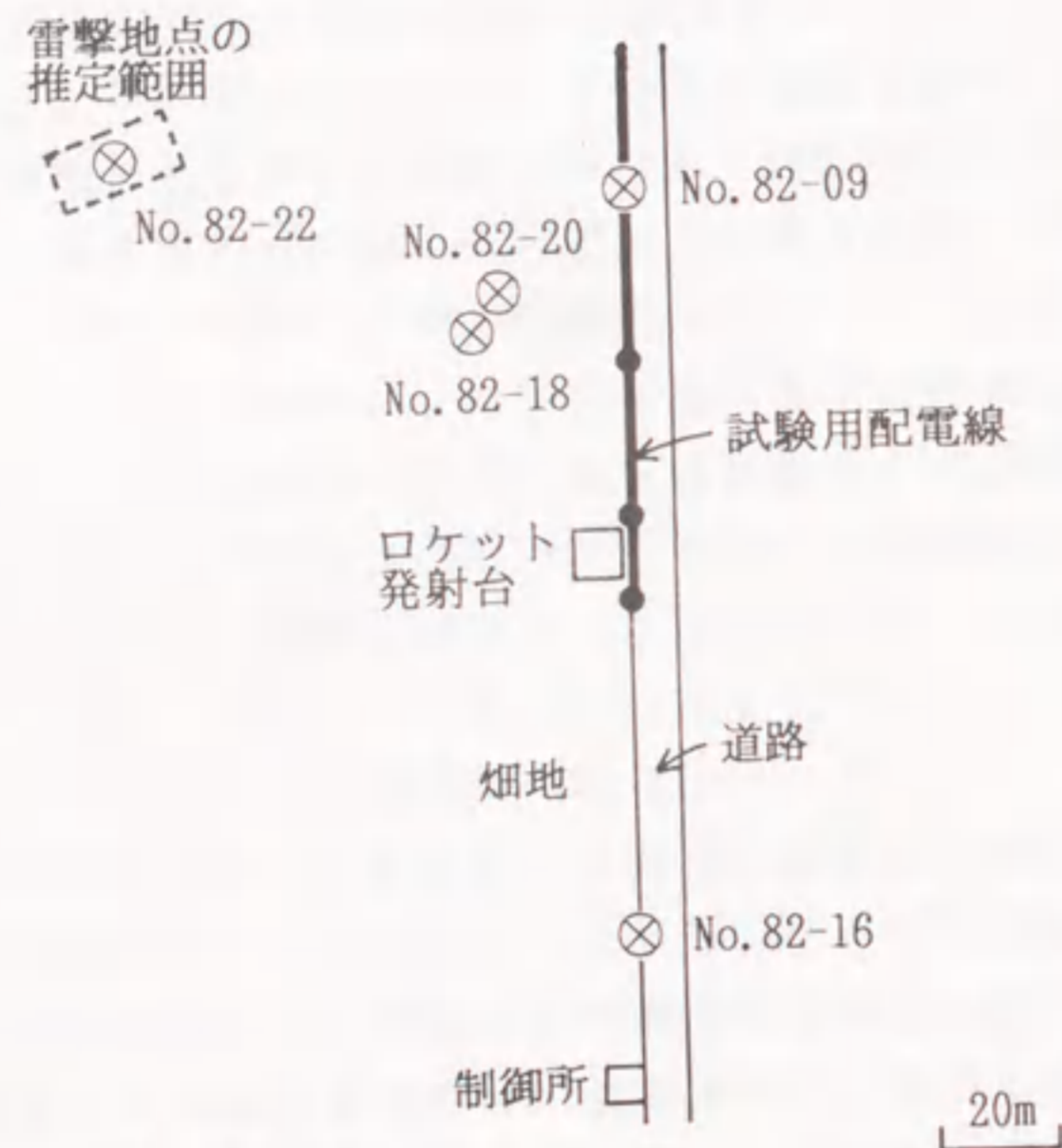
通常の誘雷放電では、主放電電流は地上に置かれた集電リングによって1箇所によって集められるので、集電リングに取り付けた磁鋼片や分流器を介したオシロスコープによって記録することが可能である。しかしながら、異常誘雷放電では最終雷撃点が集電リングに達しないわけであるから、上記の方法では電流値を記録することはできない。

雷撃地点近傍の試験用配電線に生ずる誘導電圧の大きさと雷撃電流波高値との関係は、すでに第4章の図4.10に示すように実験的に得られている。そこで、本章に関しては試験用配電線に誘起された誘導電圧によって、異常誘雷放電の雷撃電流値を推定することとした。ただし、誘導電圧の大きさは雷撃地点と線路との最短水平距離に反比例して変化するので、ここでは異常誘雷放電の最終雷撃地点を調査し線路との正確な距離を求めることにより、上記の実測直線に適用している。

7例の異常誘雷放電について、上記の方法で推定した雷撃電流値の結果を後掲の表6.1に示す。No. 82-9の雷撃電流値は推定することができなかったが、これは後述するように、この雷撃が試験用配電線を直撃したことにより誘導電圧自体が測定できなかったことによる。また、No. 82-22は正確な雷撃地点が明らかにできなかったが、静止写真の撮影視野から雷撃地点の範囲を推測し、それから電流値を推定した。

## 6. 3 異常誘雷の放電様相からみた最終雷撃距離

図6.1にロケット誘雷実験場における発射台、制御所（ロケットの発射制御と至近距離からのカメラ撮影を実施）および試験用配電線の配置を示す。実験場の配置は毎年度少しづつ異なるが、同図は昭和57年度（1982）のものを示している。さらに、同図には同年度の実験で得られた5例の最終雷撃地点も併せて示してある。昭和57年（1982）までに得られた異常誘雷放電は、上記の他に昭和54年（1979）1例、昭和56年（1981）1例の合計7例である。それぞれの雷撃の詳細な状況は次のとおりである。



(注) ⊗印は異常誘雷放電の最終到達地点を示す。

図6.1 実験場の配置と異常誘雷の雷撃地点  
(昭和57年度(1982))

### 6.3.1 試験用配電線およびその近傍の大地への雷撃

昭和57年度(1982)において試験用配電線を直撃した雷撃および線路近傍の大地への雷撃の例として、実験番号No. 82-9, No. 82-18, No. 82-20およびNo. 82-22の4例がある。誘雷地点から約2km離れたカメラ観測所において撮影した放電路の全景写真を図6.2に示す。さらに、図6.3には発射台から約80m離れた至近距離の制御所から撮影した静止写真を示す。ただし、No. 82-22では放電路が至近距離の撮影視野から途中で外れたことにより、最終雷撃地点の撮影はできていない。

図6.3から主要な放電路をそれぞれスケッチし、それらを図6.4に示す。図中の3例は制御所から雷撃地点までの距離がだいたい等しく、かつ制御所からの写真撮影に成功したものである。同図から最終雷撃距離について推定してみる。

厳密にはこの種の静止写真から放電の最後のジャンプを推定することはできない。しかし、放電路が屈曲している点において放電路の進展が一時停滞し、そこから新たな方向へ向かったと推定してみた。そのような観点から図6.4を検討し、次のよう



(a) No. 82-09の放電様相  
(1982年12月2日, 雷雲: 負)  
(推定雷撃電流: —)



(b) No. 82-18の放電様相  
(1982年12月12日, 雷雲: 負)  
(推定雷撃電流: -3.3kA)

200m



(c) No. 82-20の放電様相  
(1982年12月15日, 雷雲: 負)  
(推定雷撃電流: -5.3kA)



(d) No. 82-22の放電様相  
(1982年12月18日, 雷雲: 負)  
(推定雷撃電流: -20.0kA)

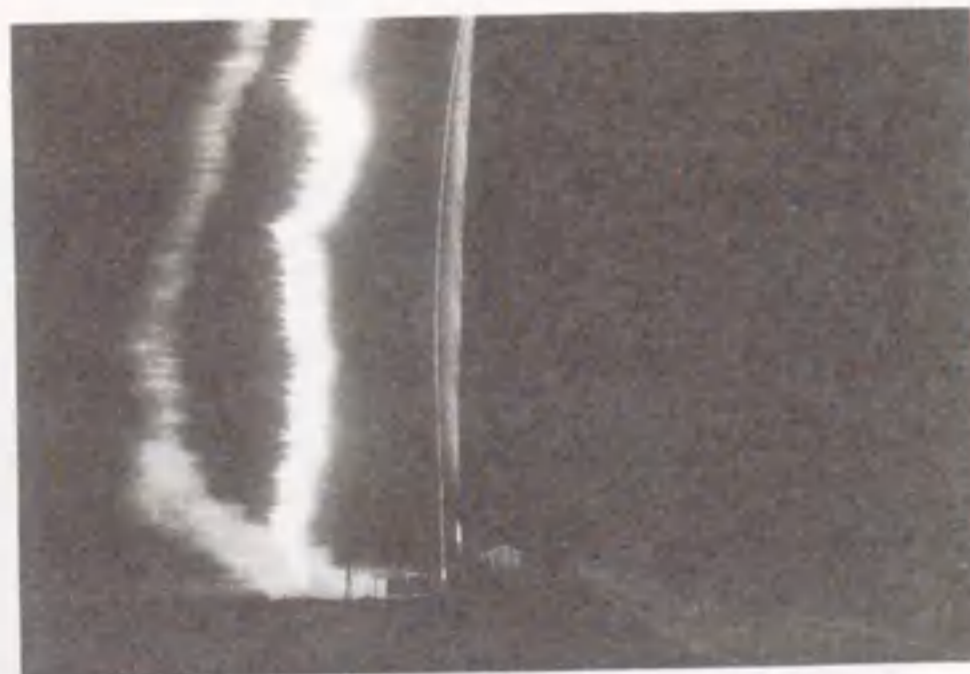
図6.2 2km離れて撮影された異常誘雷放電の全景静止写真



(a) No. 82-09の放電様相



(b) No. 82-18の放電様相



(c) No. 82-20の放電様相

(撮影視野の外で大地に到達)

(d) No. 82-22の放電様相

図6.3 異常誘雷放電路の至近距離からの静止写真  
(図6.2に対応)

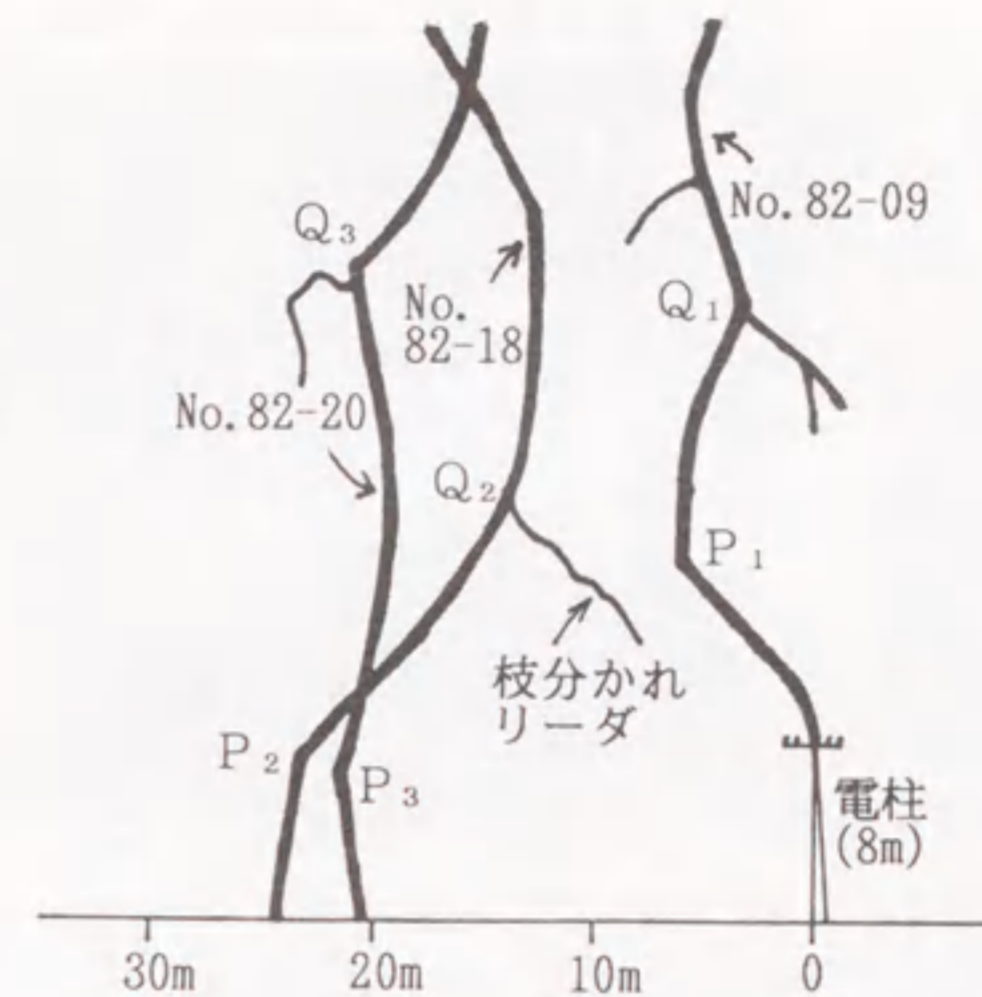


図6.4 試験用配電線あるいはその近傍の大地への異常誘雷放電路のスケッチ

に処理を行った。最終雷撃距離を求める基準として、最終雷撃地点へ向けて進展する放電路のうちで最後に屈曲した点をP点と表し、P点に次ぐ高度にある屈曲点をQ点と表すことにし、事例ごとに添数字をつけて識別する。さらに、至近距離からの撮影に失敗した場合には、約2 kmの遠方から撮影した静止写真からQ点に相当する最終雷撃距離を概算することとする。

No. 82-9の雷撃は高度110 mでワイヤ蒸発路から離れ(図6.2参照)、図6.4に示すように約10 mごとに折れ曲がりながら進展し、最終的に地上高8 mの試験用配電線を直撃したものである。放電路は地上高16 mのP<sub>1</sub>点の付近で最後に急激に折れ曲がり、ほぼ直線的に試験用配電線へ向けて進展している。P<sub>1</sub>点と試験用配電線の距離は10 mである。つぎに、P<sub>1</sub>点に次ぐ高度にあつて折れ曲がり点で下向きの枝分かれが発生している屈曲点を調べるとQ<sub>1</sub>点となる。Q<sub>1</sub>点の位置は地上高27 mにあり、Q<sub>1</sub>点と試験用配電線の距離は20 mである。参考として、遠くからの撮影ではあるが図6.2(a)から判断すれば、最後に大地へ向けてほぼ垂直に放電した地上高は約27 mと概算できる。これは上記のQ<sub>1</sub>点の地上高に対応しているものと考えられる。

No. 82-18とNo. 82-20の異常誘雷放電は、それぞれ別の日に成功したものであるが、よく似た経路で畑の中に互いに約10 mと離れていない地点に放電している。雷撃地点と試験用配電線との水平距離は前者が20 m、後者が23 mである。また、両者の雷撃は地上高135 mおよび90 mの位置でワイヤ蒸発路から離



れ、その後、図6.4に示すように地上高21mの $Q_2$ 点(No. 82-18)および地上高29mの $Q_3$ 点(No. 82-20)において最後の枝分かれを伴いつつ、比較的大きく屈曲している。図6.2(b)と(c)から最後に大地へ向けて垂直に放電した地上高はそれぞれ30m、26mと概算できるが、これらの値は $Q_2$ 点および $Q_3$ 点にだいたい対応している。つぎに、前記No. 82-9と同様に、地上付近で最後に発生した折れ曲がり点は、No. 82-18では地上高8m( $P_2$ 点)、No. 82-20では地上高6m( $P_3$ 点)の位置にあると判定できる。

No. 82-22の放電は、大地近傍での放電路は制御所のカメラ視野の外にあり正確な雷撃地点は撮影できなかった。図6.2(d)の全景静止写真によると、高度215mで一旦ワイヤ蒸発路から外れた後再びワイヤ蒸発路に沿って進展し、最終的に高度130mの点で改めてワイヤ蒸発路から外れている。その後の放電路は下向きの枝分かれをもって折れ曲がりながら大地へと進展している。遠くからの撮影ではあるがこの図から判断すると、前記のQ点に相当する距離として約30m( $Q_4$ 点)と概算できる。

### 6.3.2 制御所近傍の道路への雷撃

No. 82-16の雷撃は、図6.5(全景写真)に示すように、地上高150~100mでワイヤ蒸発路から外れて、約70m程度水平に進展した後、高度100mで垂直に大地へ向けて大きく折れ曲がっている。その後、雷撃放電路は何回かの短い折れ曲がりをもって進展し、最終的に図6.6の至近距離からの静止写真に示すように、地上高14mの点( $P_5$ 点)から道路の路肩へ垂直に放電している。この雷放電



図6.5 制御所近傍の道路への異常誘雷放電全景写真  
(No. 82-16, 1982年12月12日, 雷雲: 負)  
(推定雷撃電流: -30.0kA)

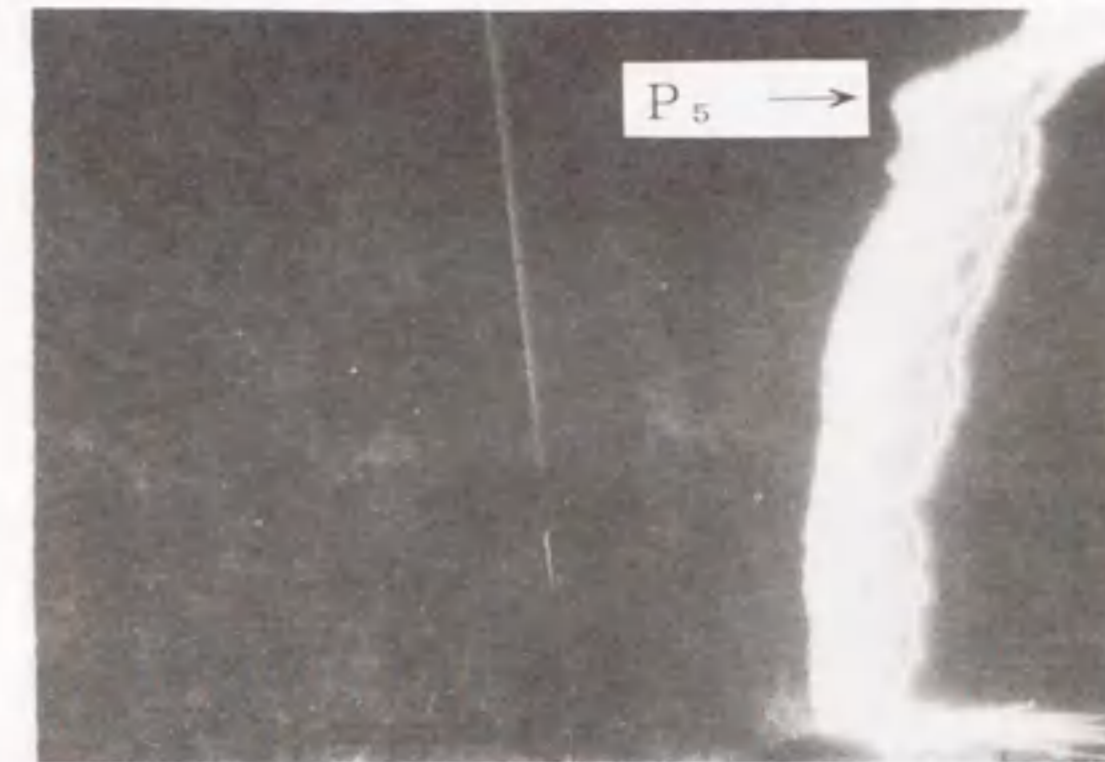


図6.6 異常誘雷放電No. 82-16の至近距離からの静止写真  
(風に流された多重雷撃と道路上に発生した沿面放電)

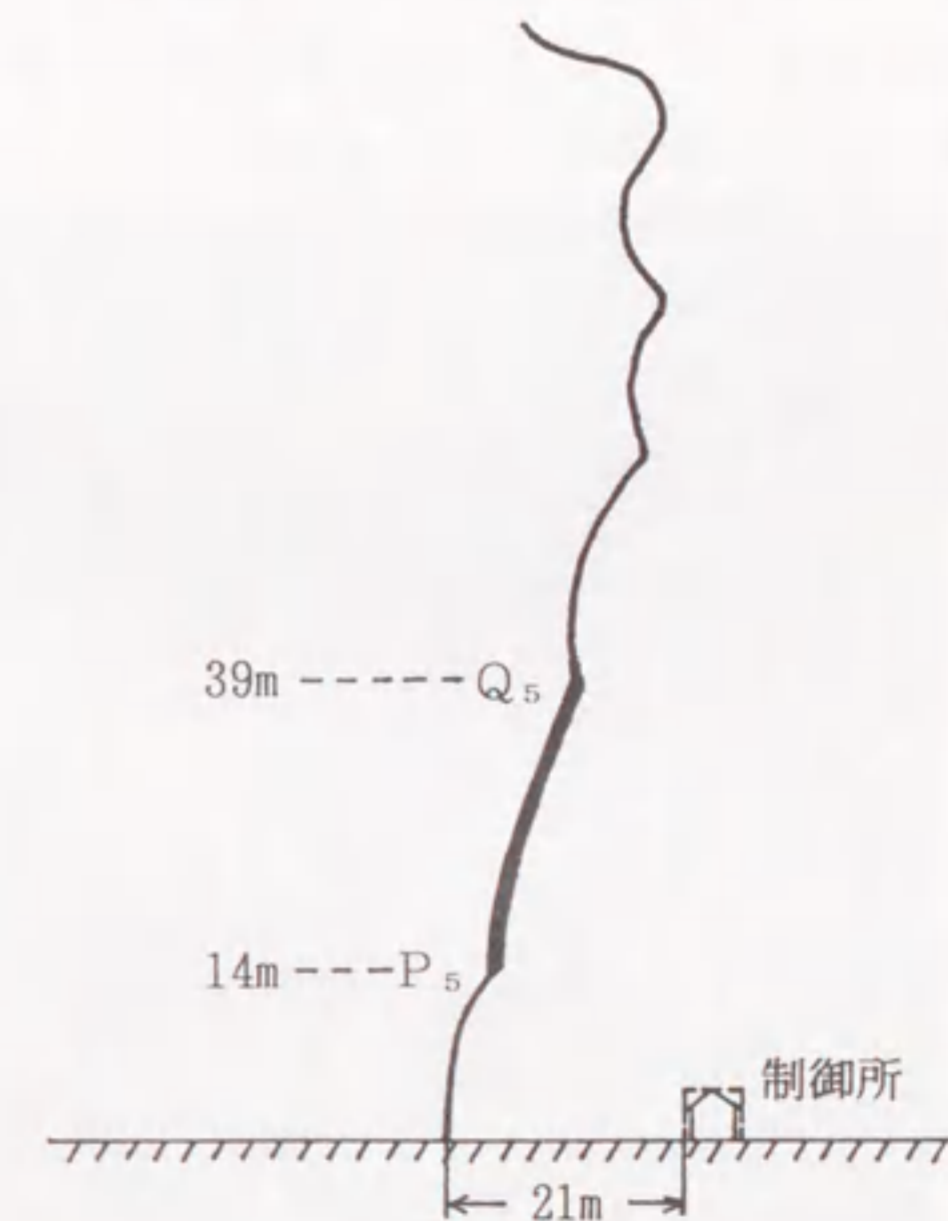


図6.7 図6.5の拡大図からスケッチされた大地近傍の放電路様相(No. 82-16)

は、左から右に向かって吹く風によって放電路が流され、40回の多重雷撃が0.4s間に記録された。それに伴って、幅5.5mの道路上に沿面放電が放射状に進展している。さらに、この放電の雷撃点は制御所の真前で、しかも21mしか離れていない超至近距離の位置にあり、P点に次ぐ高度にある屈曲点(Q点)は図6.6では撮影されていない。そこで、図6.5の全景写真から放電路をスケッチして示した図6.7によれば、Q点として39mが推定される。

### 6.3.3 試験用配電線からかなり離れた大地への雷撃

No. 79-9の雷撃は試験用配電線から約150mというかなり離れた大地へ放電している。放電路の形状について、図6.8は雷撃地点から約2.2km、図6.9は同じく約1km離れた地点からの静止写真を示す。この異常誘雷放電は、鋼線蒸発後約50msというきわめて長い休止時間のあとで主放電が発生したものである。主放電電流波高値は約41kAと推定され、ロケット誘雷実験のうちでも大電流の雷放電であった。大地近傍の放電路の状況を図6.9からスケッチして図6.10に示す。放電路は高度約60mの点(Q点)で大きく折れ曲がり大地へ向けて進展している。地上近くに至って約19m(P点)において最終的に屈曲がみられる。

雷撃地点から約20~30m離れて高さ3mの土手があつて、図6.10に示すように、その傍には鉄管が施設されていた。測定装置類も発射台の周辺に設置されており、また、発射台は高さ5mの鉄製アングルで構成されており、雷撃地点から70m離れていた。このように、垂直に折れ曲がる点から大地までの距離60m(Q点)および地上近くの最後の屈曲点(P点)からの距離19mはいずれも土手、鉄管および発射台までの距離に比較して短かく(図6.10の円弧を参照)、それらからの影響は少ないことにより大地へ雷撃が発生したと推定される。

### 6.3.4 発射台を直撃した雷撃

No. 81-7の実験における遠距離からの全景静止写真を図6.11に示す。この雷撃は、地上高110mの点でワイヤ蒸発路から放電路が外れ、ワイヤ蒸発路に沿うように下向きに進展し、最終的に高度20~30m(平均値として25m)の点から金属で構成された発射台を直撃した。これはここまでに述べてきた区分ではQ点(Q<sub>7</sub>=20~30m)に相当するとみなされる。しかしながら、放電路の至近距離からの撮影ができていないので、P点については明らかではない。

### 6.3.5 異常誘雷放電路から判定された最終雷撃距離

6.3.1節~6.3.4節において、異常誘雷放電の静止写真から判定した最終雷撃距離をP点とQ点の二つの基準について整理し、推定された雷撃電流とともに表6.1に示す。P点については、至近距離からの静止写真が容易に得られるロケット



図6.8 2.2km離れた地点から撮影された異常誘雷放電No. 79-09の全景写真  
(1979年12月25日, 雷雲: 負)  
(推定雷撃電流: -41kA)



図6.9 1km離れた地点から撮影されたNo. 79-09の放電路

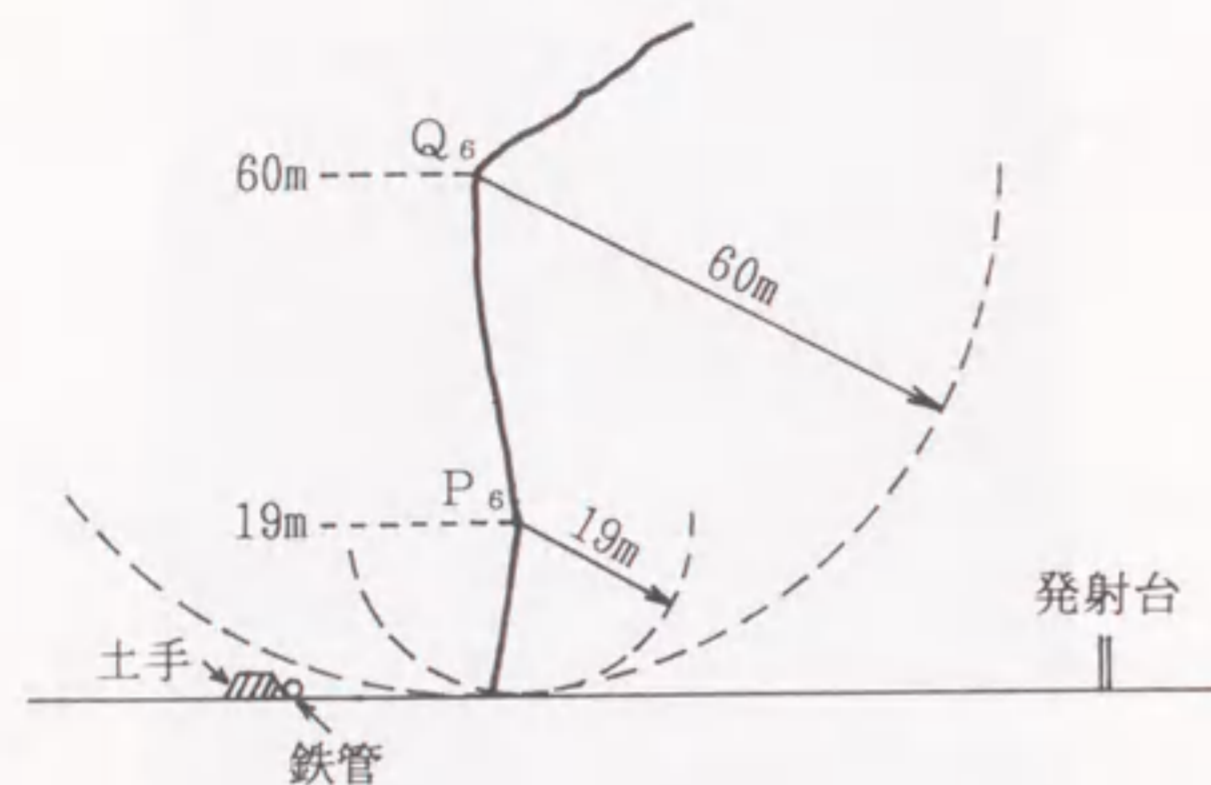


図6.10 図6.9からスケッチされた大地近傍の放電路様相(79-09)



図6.11 発射台を直撃した異常誘雷放電の全景写真  
(No. 81-07, 1981年12月2日, 雷雲: 負)  
(推定雷撃電流: -3.8kA)

誘雷実験で初めて明らかにされたものである。一方、Q点については、遠く離れた距離からの静止写真によって判定したものであって、これは従来の研究でいわれている最終雷撃距離に相当すると思われる。二つの基準を採用して求めた最終雷撃距離は、雷撃電流波高値が3.3~41kAに対して、P点は6~19mの範囲に、Q点は20~60mの範囲にあることがわかる。

表6.1 試験用配電線およびその近傍への雷撃で推定された最終雷撃距離

静止写真の撮影状況	実験番号	雷撃電流の推定(kA)	最終雷撃距離を推定した基準	
			最後に屈曲した点P(m)	P点に次ぐ高度にある屈曲点Q(m)
比較的近距离から撮影されたもの	79-09	41	19	60
	82-09	—	10	20
	82-16	30	14	39
	82-18	3.3	8	21
	82-20	5.3	6	29
2km離れて撮影されたもの	81-07	3.8	—	25
	82-22	20	—	30

#### 6.4 最終雷撃距離と雷撃電流との関係

##### 6.4.1 従来の実験式との比較

前節の表6.1で示された二つの基準、すなわちQ点による場合(×印)とP点による場合(●印)から求めた最終雷撃距離と雷撃電流との関係を図6.12に太い実線(a), (b)でそれぞれ示す。この両者において、最終雷撃距離 $r_s$ (m)と雷撃電流波高値 $I$ (kA)との関係式は、それぞれ次のように求められる。

$$r_s = 15.0 I^{0.34} \quad \text{----- 実線(a): Q点から求めた式}$$

$$r_s = 4.9 I^{0.34} \quad \text{----- 実線(b): P点から求めた式}$$

これまで提案されている関係式には次のようなものがある<sup>(1)(2)</sup>。それらを細い実線(1)~(4)で表し、図6.12に併せて示してある。

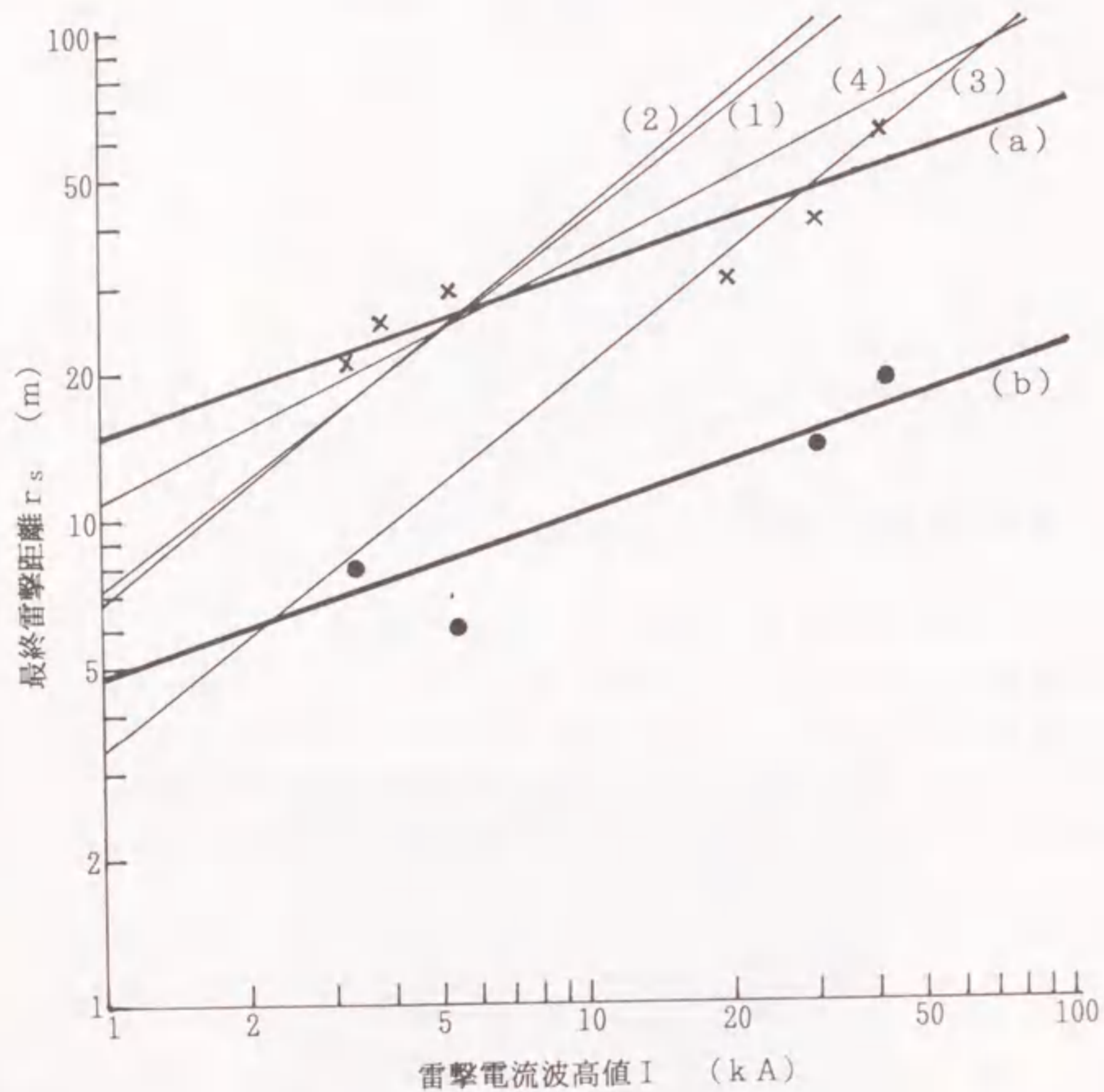
$$r_s = 7.1 I^{0.75} \quad \text{----- (1): Brown and Whitehead}$$

$$r_s = 6.7 I^{0.8} \quad \text{----- (2): Armstrong and Whitehead}$$

$$r_s = 3.3 I^{0.78} \quad \text{----- (3): Golde and Chan}$$

$$r_s = 10.6 I^{0.51} \quad \text{----- (4): Wagner}$$

Armstrong-Whitehead理論(A-W理論と呼ばれている)によれば<sup>(1)</sup>、地上の物体のどの点に雷撃が生ずるかは、最終雷撃距離で決定される。すなわち、対地雷放電の対象物が最終雷撃距離の範囲内であれば、その物体が雷撃を受けるとされている。図6.12においてQ点から求めた直線(a)はだいたい式(1)~(4)の示す直線群と同様の領域にあるが、勾配は緩やかである。またP点から求めた直線(b)は



- ロケット誘雷実験  
 (a)  $r_s = 15.0 I^{0.34}$  ---- 静止写真Q点から求めた式  
 (b)  $r_s = 4.9 I^{0.34}$  ---- 静止写真P点から求めた式
- 従来の提案式  
 (1)  $r_s = 7.1 I^{0.75}$  ---- Brown and Whitehead  
 (2)  $r_s = 6.7 I^{0.8}$  ---- Armstrong and Whitehead  
 (3)  $r_s = 3.3 I^{0.78}$  ---- Golde and Chan  
 (4)  $r_s = 10.6 I^{0.51}$  ---- Wagner

図6.12 最終雷撃距離と雷撃電流波高値との関係

その約1/3の大きさで、最終雷撃距離としては非常に短い結果となっているが、勾配は直線(a)とほぼ同じである。この傾向からもQ点から求めた距離が従来いわれる最終雷撃距離に相当すると思われる。しかし、雷撃電流約5 kA以上では直線(a)は式(1)~(4)より低く位置しており、約30 m~70 mという値を得ている。いずれにしても最終雷撃距離の雷撃電流に対する依存性は従来いわれているよりは少ないものになっている。直線(b)は非常に至近距離からの観測による雷放電のいわば新しい構造を指摘したもので、もしこれが最終雷撃距離とすれば従来の送電線雷遮蔽設計に大きな影響を与えることになる。

#### 6.4.2 送電線耐雷設計への影響

今回の観測結果だけから雷遮蔽について考察すれば、次のようなことがいえる。

ここで得られた最終雷撃距離についての実験式は500 kV送電線の遮蔽理論として現在日本で採用されているA-W理論と比較して、雷撃電流値のべき乗数がきわめて小さい結果を得た。このことは雷撃電流値が大きくなればなるほど、A-W理論よりも最終雷撃距離が短くなるということを示している。このような短い最終雷撃距離が冬季雷の特異性によるものか、あるいは誘雷された雷放電の特異性によるものかは更に吟味する必要がある。また、ループアンテナを用いて磁界変化を検出する方法など、より正確に異常誘雷の主放電電流を測定する必要もある。しかしながら、ここで得られた結果は大きな雷撃電流に対して従来算定されているよりは遮蔽失敗が生ずる可能性が大きくなることを示唆しており、送電線の耐雷設計の面からは少なくとも過酷な条件となることを意味している。

#### 6.5 結言

どの地点が最終的な雷撃箇所になるかは、その地点への最終雷撃放電によって決定されるといわれている。昭和57年(1982)までのロケット誘雷実験において得られた7回の異常誘雷放電では、それぞれの放電路は、自然雷とよく似た放電様相を示し約10 m毎の折れ曲がりをもってステップを踏みながら高度100~200 mの点から下向きに進展することが観測された。そのような放電路を至近距離からの静止写真によって、最後に屈曲したP点およびP次に次ぐ高度にある屈曲点Q点という二つの判定基準で整理した結果によれば、最終雷撃距離はP点については6~19 m、Q点については20~60 mをもって発生していることがわかった。Q点から求めた最終雷撃距離を試験用配電線の誘導電圧から推定した主放電電流値と関連づけて検討したところ、電流への依存性が従来いわれているよりは少くなっている。また大きさについていえば、雷撃電流値が約5 kAを超えて大きくなればなるほど従来の研究で

提案されていた諸式よりも最終雷撃距離が短くなるのが指摘できた。平均的な雷放電電流とされている30kAと比較すると従来の値約100mに比べて、今回は約50mである。このような短い最終雷撃距離は、冬季雷の特徴によるものかあるいはロケット誘雷放電の特徴によるものかは今後さらに吟味を要するが、少なくともこの結果を送電線耐雷設計における雷遮蔽についてみれば、遮蔽失敗などがより発生しやすいこととなり設計条件としては過酷側になるものと考えられる。また、P点から求めた最終雷撃距離はさらに短く、これがそうであるとすると従来の耐雷設計は根底から変更を余儀なくされる。

今後、ロケット誘雷実験を重ねて、異常誘雷放電の放電路に関する詳細なデータを蓄積し、最終雷撃距離と雷放電電流との関係が更に明らかになれば送電線の雷害防止技術にとって有効なものになると考えられる。

#### 参考文献

- (1) H. R. Armstrong, E. R. Whitehead: "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-87, p.270(1968)
- (2) G. W. Brown, E. R. Whitehead: "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding, Part II", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-88, p.617(1969)
- (3) R.P.Fieux, C.H.Gary, B.P.Hutzler, A.R.Eybert-Berard, P.L.Hubert, A.C.Meesters, P.H.Perroud, J.H.Hamelin, J.M.Person: "Research on Artificially Triggered Lightning in France", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-97, p.725(1978)
- (4) 堀井:「落雷条件の考察」, 電気学会放電研究会資料 ED-83-82 (昭和58年8月)
- (5) 東山, 鬼頭, 堀井, 宮地:「ロケット・ワイヤー方式で誘発された冬季雷の放電様相」, 電気学会論文誌, 100-B, p.681 (昭和55年11月)

## 第7章 結論

ロケット誘雷実験は従来の自然雷を対象とする雷研究に新しい一分野を築いたものと考えられる。本論文では、電力設備の雷害防止技術を最終目標として、ロケット誘雷実験を通して明らかとなった冬季雷放電現象に関する諸特性について述べている。その主なものの一つは、針端コロナ電流の多地点観測から雷雲規模ならびに地上電界の極性分布を求めることができ、冬季ロケット誘雷の放電特性と雷雲との関係を初めて明らかにしている。この結果は対地雷放電の発生予知にとって有用な知見となる。他の一つは、ロケット誘雷実験の特長を利用して送電線耐雷設計の基礎となる誘導雷電圧の発生、雷放電時の配電線DGRリレーの表示動作および最終雷撃距離の実態について検討できた。以下、本研究で得られた知見をまとめ、さらに今後の検討課題について述べる。

### 7.1 本研究で得られた知見

#### (1) 冬季雷雲の広がりとおケット誘雷放電 (第2章)

冬季ロケット誘雷実験で得られた誘雷の成否や放電持続時間の長短を検討し、それらを針端コロナ電流の多地点観測結果から得られた雷雲の規模と関連づけることにより、ロケット誘雷の特徴について明らかにしている。ロケットは地上電界の大きさがあるしきい値を越えると発射することになっている。地上電界がその値を越えたといっても、雷雲内で同一極性の電荷が分布している水平幅が河北潟干拓地程度以上大きく、ロケット発射点が雷雲の中央部に位置する場合には誘雷に成功する確率がきわめて高くなる。これに反し、しきい値を越えていても雷雲の端であったり小規模の雷雲では誘雷に成功しない。さらに、長時間にわたって発光が持続する雷放電を誘発したときには、コロナ電流はそのレベルもある程度維持され、しかも誘雷の時機をはずさず少なくとも30分程度の期間連続して流れ続け、大規模な雷雲からの放電を誘発したことを指摘している。

#### (2) 冬季雷雲下における地上電界極性の地域分布 (第3章)

針端コロナ電流の多地点観測から地上電界の地域分布を推定する方法を提案している。日本海側冬季雷のように、日本海上で形成された後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し、3地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する方法を考案している。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、作図により地上電界極性の地域分布が求められる。この手法を適用することにより、雷雲下の地上電界の分布状況がよくわかるようになり、さらに雷雲の大きさもおおよそ推定できた。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結果、ロケット誘雷による放電路が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にあることを明らかにしている。

### (3) ロケット誘雷による配電線誘導電圧 (第4章)

ロケット誘雷実験を利用して誘雷地点近傍の試験用配電線に誘起する電圧を測定し、次のようなことを明らかにしている。すなわち、前駆放電による誘導電圧の極性は誘雷用鋼線の溶断前では雷雲と反対極性である。さらに、鋼線溶断前の誘導電圧の継続時間については、雷雲が負極性のときにはその継続時間が長く数ms以上に及ぶが、正極性のときには1ms以下という短い継続時間であって極性効果が見られる。主放電による誘導電圧については、雷雲が負極性のとき、急峻なパルス性電圧が多く発生し、全体の継続時間が長い。一方、雷雲が正極性のとき、パルス性電圧の発生は1個ないし2個程度で継続時間は短い傾向にある。主放電電流との関係は、雷撃電流によって生ずる磁束が試験用配電線と鎖交することに原因するとして導いた理論式により説明できることを示した。

架空地線の誘導電圧抑制効果については、試験用配電線への架空地線の有無による実験的比較から、架空地線により誘導電圧が60~70%に抑制されることを確認している。

### (4) 雷放電発生時における地絡保護継電器の表示動作 (第5章)

配電線系統の保護継電器の表示動作と雷放電との関連を検討している。配電用変電所における保護継電方式のうち、地絡方向継電器(DGリレー)は故障配電線を特定し、遮断器動作の信号を提供するものとしてきわめて重要な役割を持っている。そこで襲雷時に動作するDGリレーの出力に注目し、これと針端コロナ電流およびビデオ画像から得られた雷放電様相との関係について検討した。その結果、雷放電が地域的広がりを持ちその中に多数の発光が存在したり、水平に進展する放電路のとき、複数の配電線においてDGリレーが動作する傾向にあることが分かった。対地雷撃地点との関係については、ロケット誘雷放電において遠くに離れた配電線においても動作する例が明らかとなり、これは雷雲によって拘束された配電線上の電荷が対地雷撃によって解放されることによるものと推定される。

### (5) 最終雷撃放電の雷撃距離 (第6章)

対地雷撃放電における最終のステップである最終雷撃距離について検討している。

雷撃箇所はその地点への最終雷撃放電によって決定される。ロケット誘雷実験の異常誘雷における至近距離からの静止写真から、放電路のうち最後に屈曲した点P、あるいはその次に次ぐ高度にある屈曲点Qから大地までの距離を最終雷撃距離とみなして整理してある。その結果、最終雷撃距離としてP点-大地間とすれば6m~19m、Q点-大地間とすれば20m~60mを得た。この最終雷撃距離を試験用配電線への誘導電圧から推定された主放電電流と関連づけたところ、どちらも $I^{0.34}$ に比例し、従来提案されている $I^{0.4}$ よりも電流への依存性が緩やかである。すなわち、電流値が5kAを超えて大きくなればなるほど、従来の研究でいわれている諸式よりも短い最終雷撃距離を示すことが明らかとなった。このことは、送電線の雷遮蔽についてのArmstrong-Whiteheadの理論からすれば遮蔽失敗率が多くなることを意味しており、耐雷設計の条件としては従来の条件より苛酷なものになると予想される。

## 7.2 今後の検討課題

本研究をさらに進めて今後の発展を図ろうとするとき、次のような課題について検討する必要がある。

### (1) 冬季雷発生予知に対する課題

本論文第3章では地上電界の地域分布の推定方法が提案されている。これによって得られる分布図と自然雷の発生地点との相対的位置関係を明らかにすれば、気象レーダと比べて、冬季雷の発生を地域的にきめ細かく予知できると考えられる。その後、河北潟干拓地全域にわたるVTRによる光学観測から自然の対地雷放電の雷撃地点を同定し、地上電界極性の地域分布図の上に重ねあわせたところ、雷撃地点は地上電界の正、負極性の境界付近、あるいは両極性が混在する地域に存在する傾向が指摘されている<sup>(1)(2)</sup>。このような相関関係をさらに厳密に把握できれば、実用の雷撃発生予知技術としての発展が期待される。たとえば、地上電界の極性が変わり始めたことを検知することにより、電力所における警戒体制を強めるための指針が得られれば有用となる。

### (2) 配電線耐雷設計に対する課題

第4章では、配電線誘導電圧の大きさと架空地線による誘導電圧抑制効果から、現在の誘導雷を主対象とされた耐雷設計を冬季雷に適用しても十分であることが示されている。最近では、誘導雷だけでなく直撃雷による雷故障の防止も積極的に検討されている<sup>(3)</sup>。また、配電線系統が絶縁電線化されたことに伴い、アークの1点集中による電線溶断事故が問題となっており、絶縁特性の面からの検討も重要となつてく

る<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>。今後、アレスタの適切な選定および配置を含めて配電線の耐雷設計を行なうとき、冬季雷の電氣的諸量ならびに誘導雷電圧波形の特性を十分に把握しておく必要がある。特に、第4章で指摘したような雷放電の極性による相違は重要であると考えられる。それゆえに、今後のロケット誘雷実験において、実配電線を模擬した試験線に直接誘雷させることにより、直撃雷に関するデータを蓄積することは有益であると考えられる。

### (3) 配電線保護継電方式における新機能付加に対する課題

第5章では、配電線近傍で雷放電が発生すれば、その系統に零相電圧・電流に相当する成分が誘発され、地絡方向継電器からの表示動作のみが出力されることを示した。電力会社の中では、これを積極的に利用して管内襲雷警報システムとして利用している所もある<sup>(6)</sup>。高度情報化が進んでいる現在では瞬時の停電も許されず、また事故復旧の迅速化が急務となっている。しかし、送電線と比較して絶縁階級が低い配電線では雷故障を皆無にすることは経済的に困難である。そのため、既設の零相電圧・電流の測定、検出系を利用して、雷放電に伴う過渡的な零相電圧・電流成分を正確にきめ細かく把握することにより、現在の保護継電方式に高速の事故判断機能および故障点位置標定機能を付加する手法の開発が予想される。

### (4) 送電線の耐雷設計に対する課題

第6章では、雷放電の最終雷撃距離と雷撃電流との関係をロケット誘雷実験の異常誘雷放電から求めて、現在提案されている諸式と比較している。この結果は、雷撃電流の大きい領域において最終雷撃距離が従来いわれているよりも小さいという傾向を示した。もしそうだとすると、これは現在予想されているよりも遮蔽失敗の確率が高くなるということになり、A-W理論に基づく送電線の雷遮蔽に関する設計面では苛酷な条件と言える。この傾向が冬季雷の特性によるものか、あるいはロケット誘雷放電の特性によるものかは今後更に吟味する必要があるが、これが事実とすれば送電線の耐雷設計をもう一度見直す必要があると考えられる。そのためには架空地線の3条化や送電線用避雷装置<sup>(7)</sup>の効果冬季雷に対して早期に検証することが重要となる。

### (5) 冬季雷放電現象のメカニズム解明に対する課題

本論文の全体を通して、雷雲電荷の極性の相違によって放電現象に差異が生ずることを指摘している。たとえば、雷放電の発光継続時間が長いものは雷雲極性が負極性のものに多いこと、またそれに伴って誘起する配電線誘導電圧では雷雲が負極性のとき発生する正極性の電圧にパルス数が多く、個々のパルス波形は負極性の電圧に比べて波頭が急峻になるなどである。これらは冬季雷に対するロケット誘雷実験において

初めて数量的に明らかになったことで、これらのデータに対する理論的検討には至っていない。夏季雷についてもいえることであるが、特に冬季雷について自然の雷放電の発生機構については未だ十分に解明されていない。雷放電に近い放電形態として開閉サージによる長ギャップ放電があると思われ、これらについて得られた成果も参考にすべきであろう。さらに今後は最先端の計測技術を使用して雷放電を多角的に実測することも重要で、両者を併せて新たな知見に至るものと考えられる。

以上の検討課題に対して、ロケット誘雷実験の果たす役割は大であり、今後更なる実験の進展が期待される。またこの実験を通して、冬季雷の放電現象の解明を更に進め、電力系統の雷故障防止技術の発展に役立たせたい。

### 参考文献

- (1) 鬼頭：「襲雷時の地上電界分布の過渡推移観測からみた電力施設への雷撃予測」、平成元年度文部省科学研究費補助金（一般研究（C））研究成果報告書（平成2年3月）
- (2) 櫻野，鬼頭，五十住，才田：「北陸地方冬季雷の対地雷撃地点に関する一仮説」、電気学会論文誌B，111，p.38（平成3年1月）
- (3) 横山，浅川：「配電線直撃雷応答特性の実験的検討」、電気学会放電高電圧合同研究会資料 ED-88-112/HV-88-73（昭和63年10月）
- (4) 西，櫻野，石橋，高嶋：「架空絶縁電線のがいし支持点近傍におけるインパルス沿面放電特性」、電気学会論文誌B，110，p.209（平成2年3月）
- (5) 西，櫻野，石橋，高嶋：「絶縁電線表面における連続インパルス沿面放電の特性」、電気学会論文誌B，111，p.1269（平成3年12月）
- (6) 浦野，鍋島：「雷サージ検出装置による避災停電方式の検証について」、昭和57年電気学会全国大会講演論文集[12]，1128
- (7) 小西，堀出，中山，大橋，市岡：「冬季雷に対する送電用避雷装置の動作特性測定結果」、電気学会放電高電圧合同研究会資料 ED-89-146/HV-89-89（平成元年10月）

## 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に対して、常に学術上の御指導と御鞭撻を賜りました名古屋大学工学部教授 鬼頭幸生先生に心から御礼を申し上げます。

本論文の作成にあたり、懇切丁寧な御指導を賜りました名古屋大学工学部教授 水谷照吉先生、ならびに同助教授 山部長兵衛先生に深く感謝申し上げます。

本研究は、著者が昭和53年度に名古屋大学へ内地研究員として留学しロケット誘雷実験への参加の機会を得たことが契機となっています。豊田工業高等専門学校長 堀井憲爾先生（当時、名古屋大学工学部教授）には、内地留学をお引き受けいただき終始懇切なる御指導を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

ロケット誘雷実験への参加に際し、広い視野から御配慮と御激励を賜った愛知工業大学教授 宮地 巖先生（当時、名古屋大学工学部教授）、中部大学副学長 武藤 三郎先生（当時、名古屋工業大学学長）、大阪避雷針工業（株）技術顧問 池田義一先生（当時、中部大学工学部教授）、豊田工業高等専門学校教授 仲野 貧先生（当時、名古屋大学工学部助教授）に深く感謝致します。

金沢工業大学教授 石橋 鑠造先生（当時、金沢大学工学部教授）には、著者が金沢大学在学中から石川工業高等専門学校に奉職し現在に至るまで終始温かい励ましを賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

冬季ロケット誘雷実験を通して有益な御討論と御助言を賜りました金沢工業大学教授 饗庭 貢先生、名古屋工業大学助教授 中村光一先生、中部大学工学部講師 角 紳一先生、愛知工業大学助教授 依田正之先生、沼津工業高等専門学校教授 若松勝寿先生、熊本大学工学部助教授 秋山秀典先生（当時、名古屋大学工学部助手）の諸先生方に深く感謝致します。厳寒のなか、ロケット誘雷実験に参加された、名古屋大学大学院工学研究科博士課程学生 東山禎夫氏（現、山形大学工学部助教授）、同 和田 淳氏（現、（財）電力中央研究所）をはじめとする参加各大学・高専の学生諸氏の御協力に感謝致します。

ロケット誘雷実験を遂行するにあたって、実験場の設営をはじめ多大なご尽力をいただきました北陸電力株式会社、中部電力株式会社をはじめ実験参加各企業の関係各位に厚く御礼申し上げます。

## 本研究に関連して公表した論文

章	論文題目	掲載誌	共著者
第2章	冬季雷雲の規模からみたロケット誘雷の特徴	電気学会論文誌B V.106-B, No. 8, p. 685-692(1986)	日置 功 鬼頭 幸生 堀井 憲爾
	針端コロナ電流の多地点同時観測結果からみた冬季ロケット誘雷の成否	電気学会論文誌B V.103-B, No. 10, p. 707(1983)	鬼頭 幸生 堀井 憲爾 日置 功 中村 光一
第3章	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	電気学会論文誌B V.109-B, No. 8, p. 355-360(1989)	松原 亮滋 村下 直久 鬼頭 幸生
第4章	冬季ロケット誘雷に伴う配電線誘導電圧ならびに架空地線による抑制効果の測定	電気学会論文誌B V.105-B, No. 4, p. 331-338(1985)	饗庭 貢 石橋 鑠造 堀井 憲爾
第5章	冬季雷発生時における配電線地絡保護継電器の動作	RESEARCH LETTERS ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY V.8, No. 2, p. 81-90(1988)	堀井 憲爾
第6章	Observation on Final Jump of the Discharge in the Experiment of Artificially Triggered Lightning	IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems V.104, No. 10, p. 2910-2917(1985)	K. Horii



