

ISM 0914-7896

DENCHUKEN REVIEW

電中研レビュー

電力施設の雷害防止のために
冬季雷の研究成果と将来の課題



NO.19 1989.1

電中研レビュー 第19号 ● 目 次

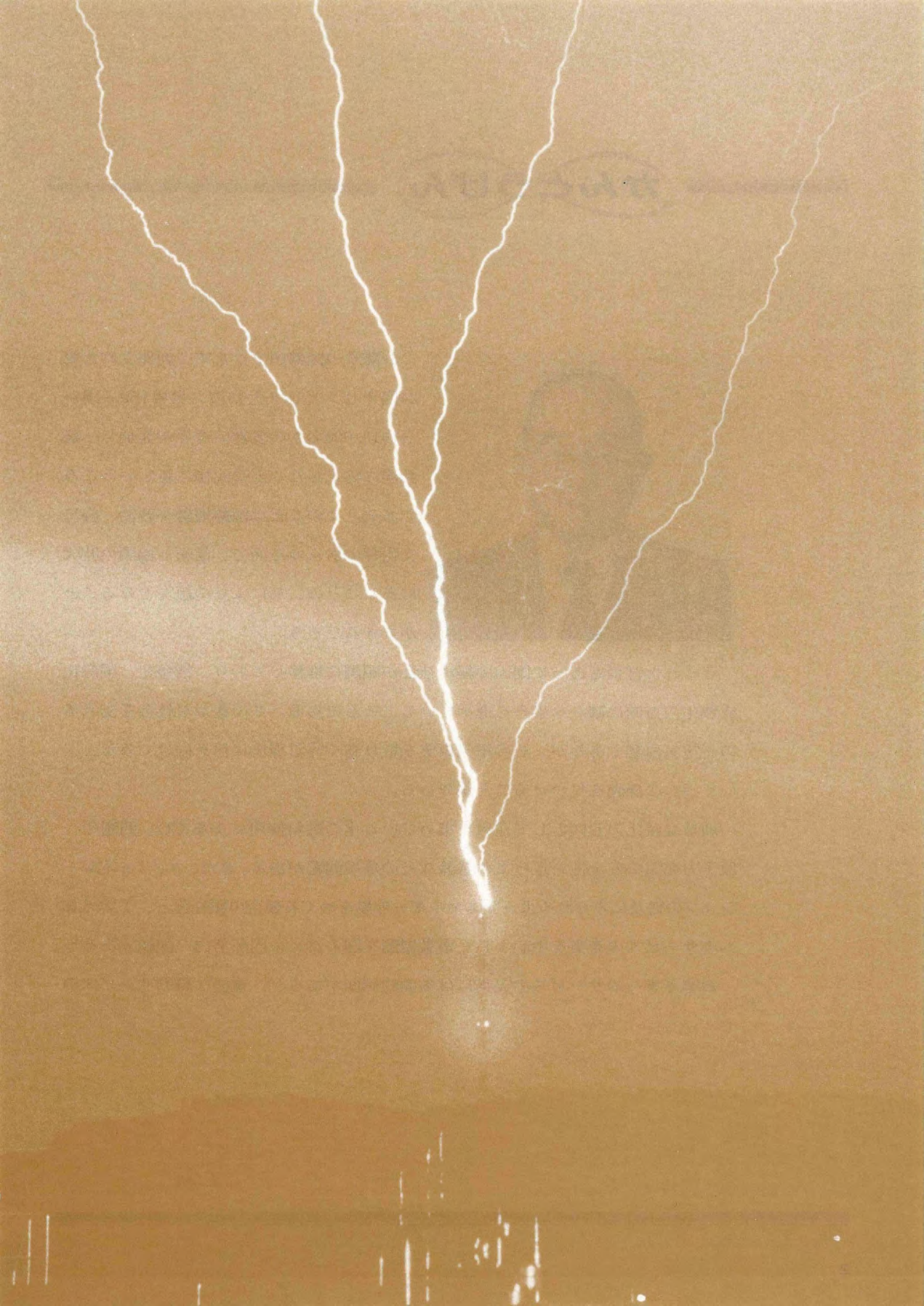
電力施設の雷害防止のために

— 冬季雷の研究成果と将来の課題 —

編集担当 ● 粕江研究所 送変電部長 鈴木 俊男

送変電部 絶縁研究室長 佐々木三郎

巻頭言	北陸電力株式会社 取締役副社長 高橋 宏	2
はじめに	理事 粕江研究所長 中島 隆雄	5
第1章 概 論		
1-1 ● 概 論		9
第2章 雷による送電線の事故の状況		
2-1 ● 我が国の送電線雷事故の状況		13
2-2 ● 冬季雷による送電線事故実績		14
第3章 冬季雷の性状		
3-1 ● 観測方法		19
3-2 ● 高構造物への雷撃特性		22
3-3 ● 冬季雷放電現象		25
3-4 ● 冬季雷予知技術		28
第4章 冬季雷による2回線同時事故の原因		
4-1 ● 雷しゃへい		31
4-2 ● 雷サージの伝搬特性		37
4-3 ● がいし装置のフラッシュオーバ		41
4-4 ● 2回線同時事故原因の検討		45
第5章 雷事故率の予測手法		
5-1 ● 雷事故率の予測手法		51
第6章 雷事故防止対策		
6-1 ● フラッシュオーバ防止策		57
6-2 ● 雷事故防止対策の効果		59
6-3 ● 冬季雷に対する対策		62
第7章 将来の課題		
7-1 ● 将来の課題		65
おわりに	参事 粕江研究所副所長 瀬田 泰助	67
関連する主な研究報告書等		68





お隣りの国韓国ソウル市で開催された第24回オリンピック大会に、世界160ヵ国から約13,600名もの多数の選手が参加し、盛会裡に終了したことは記憶に新しいところである。このことは国際情勢が政治、経済、文化等のあらゆる面で、信頼と協調の時代にあることの、なによりの証左とみることができるだろう。

そうした背景もあって国内の経済社会が順調に推移しており、情報化、国際化、成熟化の方向に確かな歩みを進めているところである。この豊かな社会を支えるのが電気事業であるが、その電気事業を取り巻く経営環境に目を向けてみると、いくつかの課題を見つけることができる。

地球温暖化の元凶として注目を集めている化石燃料使用によるCO₂問題や、原子力発電の安全性を巡っての議論などの環境問題がある。また、コ・ジェネレーションの普及にみられるようなエネルギー市場をめぐる競合の顕在化と、お客さまへのサービスの充実を中心とした事業展開を図るための内部努力の課題であろう。

お客さまへのサービスの充実には多面的側面があるが、重要な質的サービスの

一つに無停電供給がある。今日のように社会の隅々にまで高度に、多様に電気が利用されている時代には、作業停電は言うに及ばず、瞬間的な低電圧現象といえども容認できないという厳しい要請が一部にある。

この観点にたって供給支障の要因を調べてみると、雷の影響を無視することができないのである。全送電線の供給支障のうち50%が雷に起因しているとの報告があり、また配電線では25～45%が雷事故であるとの調査結果があるからである。

雷の被害防止を目指して以前から先輩諸兄により研究が続けられてきており、大きな成果をあげてきたところであるが、なにぶん大自然の中で生じる事象であり、雷そのものの性状を含めまだ解明途上にあるとみるのが至当であろう。今後とも電気事業が中心になり関係機関の協力を受けて、強力に研究に取り組んでゆかねばならない。

一方、雷現象の解明の進展が切に望まれる。気象に関係する人達に加えて地球物理学者や通信技術者などが一緒になり、最近の高い技術力を集約して雷現象の究明に挑んでもらえるよう期待する。

特に、北陸を中心とする日本海側に発生する冬季雷に関係者の関心が高まっている折、今回の『雷害防止特集』はまことに時宜をえた企画であり、今後の研究の進展と被害軽減に寄与することが大きいと確信する。

北陸電力株式会社 取締役副社長

高橋 宏

〔電力中央研究所 参与〕

電中研「雷害防止の研究」関連研究の歩み（昭和27年～）

昭和 (西暦)	電力中央研究所	所 外
27 (1952)	雷害防止委員会設置 北関東地区で雷実測 各地発電所で耐雷性向上のための現地試験実施	AIEE 推奨設計法発表（25年） 超高圧送電線の運転が始まる（新北陸幹線） 発電所の雷害事故は1年間に100件近く発生していた
31 (1956)	雷害防止委員会終了。設計指針を示す 耐雷設計基準委員会設置 雷害事故調査委員会設置	送電線の高速度再開路方式が実用化される
35 (1960)	送電線耐雷の動的解析手法を樹立する 不平衡絶縁方式を提案 配電線架空地線を提案 500kV 送電の実証研究開始 塩原実験場で実験開始 不平衡絶縁の実験	配電線 6kV 昇圧始まる 関西電力、四国電力不平衡絶縁を実用。好成績をあげる 配電線架空地線の実用が始まる
38 (1963)	配電線耐雷設計基準要綱発表	
39 (1964)	発電所耐雷設計基準要綱発表 (発電所雷害事故の1桁低減に成功)	
40 (1965)	無線中継所、テレビ放送塔の耐雷設計法の確立	
41 (1966)		架空地線の効果に関する新学説（A-W理論）がアメリカで発表される 最初の500kV房総幹線が建設された
43 (1968)	22～33kV配電線耐雷の研究 送電線耐雷設計基準要綱発表	22～33kV配電線実用化
44 (1969)		大容量火力電源線の高速度再開路の制約が問題となる
46 (1971)	送電線耐雷設計基準要綱発表	
48 (1973)		500kV房総幹線昇圧
51 (1976)	発電所耐雷設計ガイドブック発表 送電線耐雷設計ガイドブック発表 配電線耐雷設計ガイドブック発表	
53 (1978)	冬季雷の研究開始	
61 (1986)	耐雷設計基準委員会を耐雷技術委員会に改組	

はじめに

理事 狛江研究所長 中島 隆雄



停電が極力少ない高品質の電力を供給することは、電気事業の基本的使命の一つである。厳しい自然環境にさらされている送電線は、全事故の約65%が自然現象によるものであり、その内の約70%は雷によって惹起されている。

雷の研究は古くから行われてきているが、雷から電力施設を護る耐雷技術の研究は、高信頼性の電力輸送のための基本技術として、現在でも重要な地位を占めている。

我が国の耐雷技術の研究は、斯界の専門家で構成された当所の「耐雷設計基準委員会」を中心に推進され、昭和50年代初頭に一応の完成をみた。

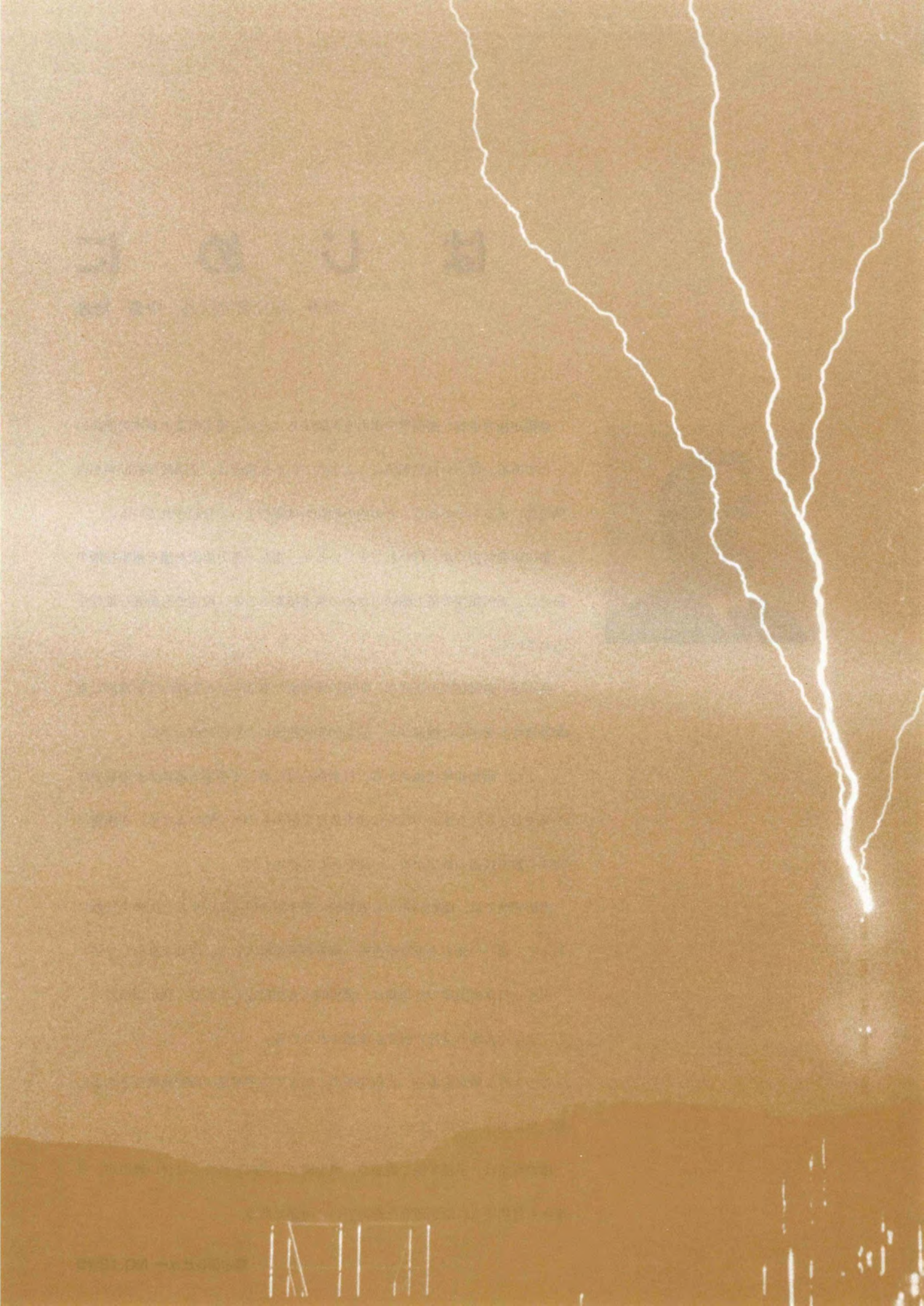
しかし、昭和40年代後半から、日本海沿岸において冬季の雷による停電事故が発生し、これら事故の状況は従来の夏季雷のものとは異なるため、冬季雷に対する耐雷技術の確立が新しい課題として登場した。

当研究所では、昭和53年から本格的に冬季雷の研究に取組み、従来の技術に加えて、新しい光および電子技術、解析技術を導入して、研究を推進してきた。

現在、日本海沿岸の冬季雷は、世界的にも注目されており、我が国においても、大学や各電力会社で研究が実施されている。

このような状況を鑑み、当研究所のこれまでの冬季雷の研究成果をとりまとめ、世に問うことにした。

雷の現象は、多種多様で奥深く、現段階では完成されたとは言い難いが、今後とも目標達成に鋭意研究を進めていく所存である。



第 1 章

概 論

第1章 概 論 ● 目 次

粕江研究所 送変電部長 鈴木 俊男

1-1 概 論	9
---------	---

1-1 概 論

北陸地方や東北地方の日本海沿岸では、毎年11月頃になると冬の雷が発生することが多い。これは、昔から「雪おこし」や「ブリおこし」と呼ばれ、雪の到来や美味の寒ブリ漁など季節の代名詞とされてきた。また、「ハタハタ」という魚は、冬季雷が活発になる11月頃に秋田地方で漁が行われることからカミノリウオとも呼ばれ、鱈とも書かれる。

この、世界的にも稀な冬の雷の発生は、シベリアからの冷たい季節風と日本海を北上する暖流、対島海流との温度差により生ずる激しい上昇気流によって雷雲が生成されることによるものとされている。

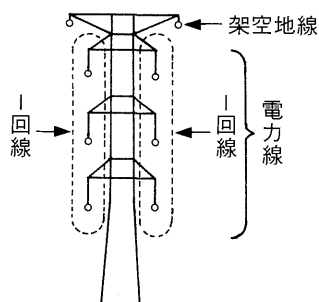
確かに統計を見ても、北陸地方や東北地方の日本海沿岸の年間の雷雨日数は30日から40日の地域が多く、夏に雷の多い北関東や中部山岳地方などと同程度あるいはそれ以上の日数となっている。

この日本海沿岸において、昭和40年代後半から、大容量発電所からの電力輸送のため、高鉄塔の超々高圧基幹送電線が建設され、これらの送電線において、冬季の雷により送電線停止事故がみられるようになった。

従来、我が国における送電線耐雷設計は、耐雷設計基準

※：2回線事故

我が国の送電線は一般に右図に示すように1つの鉄塔で3相の送電線を2組構成している。これを、2回線送電線と呼ぶ。この両回線とも送電停止になる事故を、2回線事故という。



委員会で取りまとめられた「送電線耐雷設計基準要綱」（昭和46年）と「送電線耐雷設計ガイドブック」（昭和51年）に基づいて実施されている。その基本とするところは、上方から下りてくる雷放電に対し、送電線への雷撃を避けるため、送電鉄塔の塔頂部に架空地線と呼ぶアース線を張ってこれに落雷させ、電力線への直撃を避け、かつ、鉄塔の脚部の接地抵抗を小さくして雷による過電圧の大きさを抑制するものである。そして、万一の場合でも、2回線送電線のうちの1回線の送電を確保し、送電電力の供給停止を避けることとしている。

しかしながら、冬季雷による送電線停止事故は、2回線事故[※]の割合が多いことや、冬季雷は架空地線が溶損するような大エネルギーを発生するなど、従来の雷では見られない現象が発生しており、夏季雷を対象とした現行の耐雷設計では十分に対処できないことが明らかになった。

このため、当所では、昭和53年度から本格的に冬季雷に対する耐雷設計の研究に取り組んだ。

送電線の耐雷設計は、耐雷性の評価と雷害防止対策とに大別できる。

耐雷性の評価とは、従来の雷事故実績を考慮しつつ、対象送電線の雷事故率を予測し、所定の許容レベル以内か否かを評価することである。このためには、まず雷性状を把握する必要があり、つぎに、送電線における雷の現象、即ち、雷撃を電力線に直撃させず架空地線に誘導させる方策（雷しゃへい）や、架空地線に雷撃した場合の鉄塔上の過電圧による事故の発生機構を解明してその対策を確立するとともに、さらに、これらに基づいた精度の高い雷事故率予測計算法を開発する必要がある。

また、雷害を皆無とするためには、上記の耐雷性の評価

と平行して、新技術を応用した雷害防止対策も開発していく必要がある。

以上に基づき、当所が行っている耐雷研究をまとめると図1-1-1のとおりである。送電線への落雷以降の諸現象は、夏季雷、冬季雷とも共通であるが、雷性状、雷しゃへいに関

しては、冬季雷独自の現象解明および耐雷技術の開発を推進する必要がある。

本レビューは、このような背景から、電力中央研究所が進めている冬季雷に対する送電線の耐雷技術の研究について、その現状と将来の課題を紹介するものである。 ●

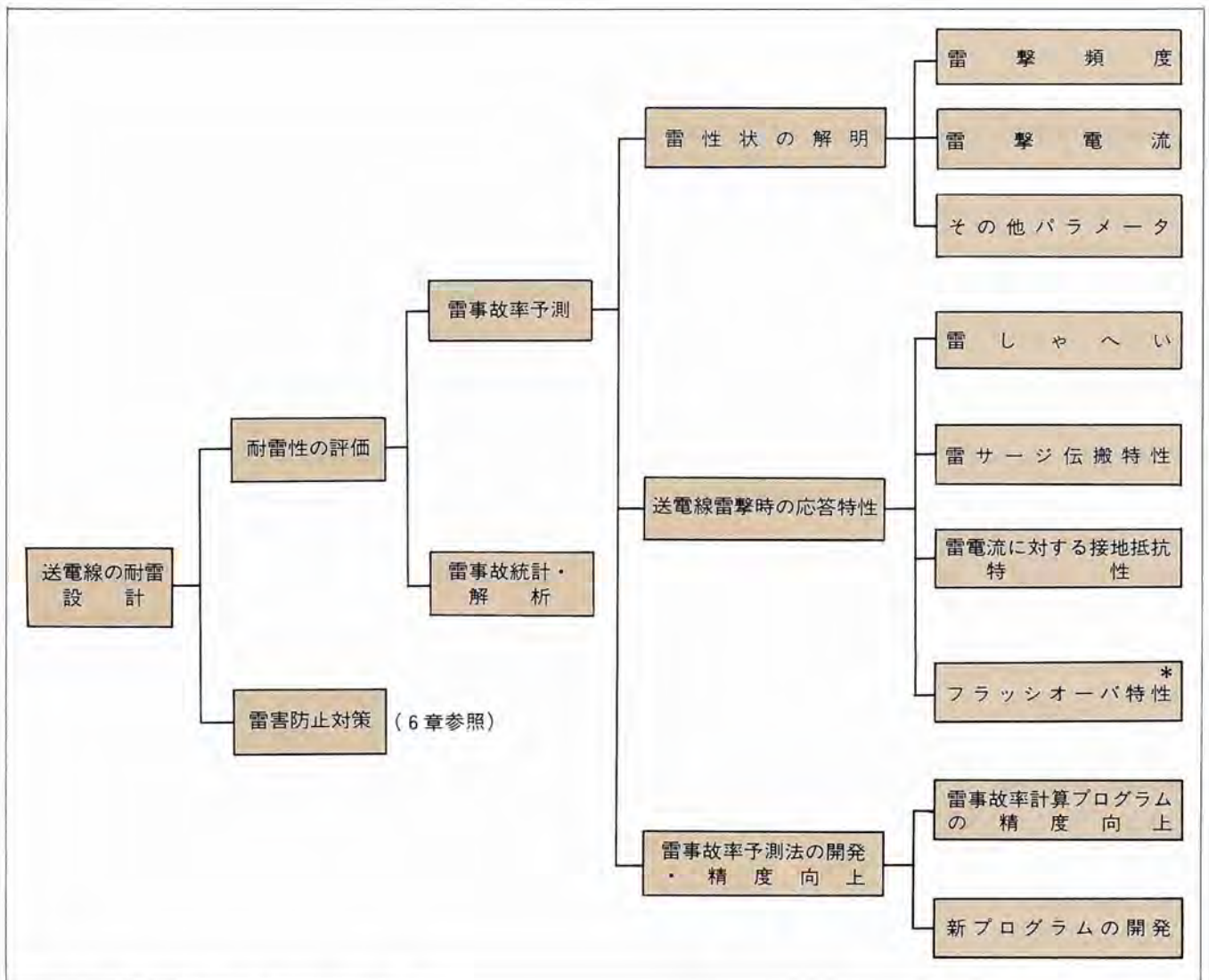
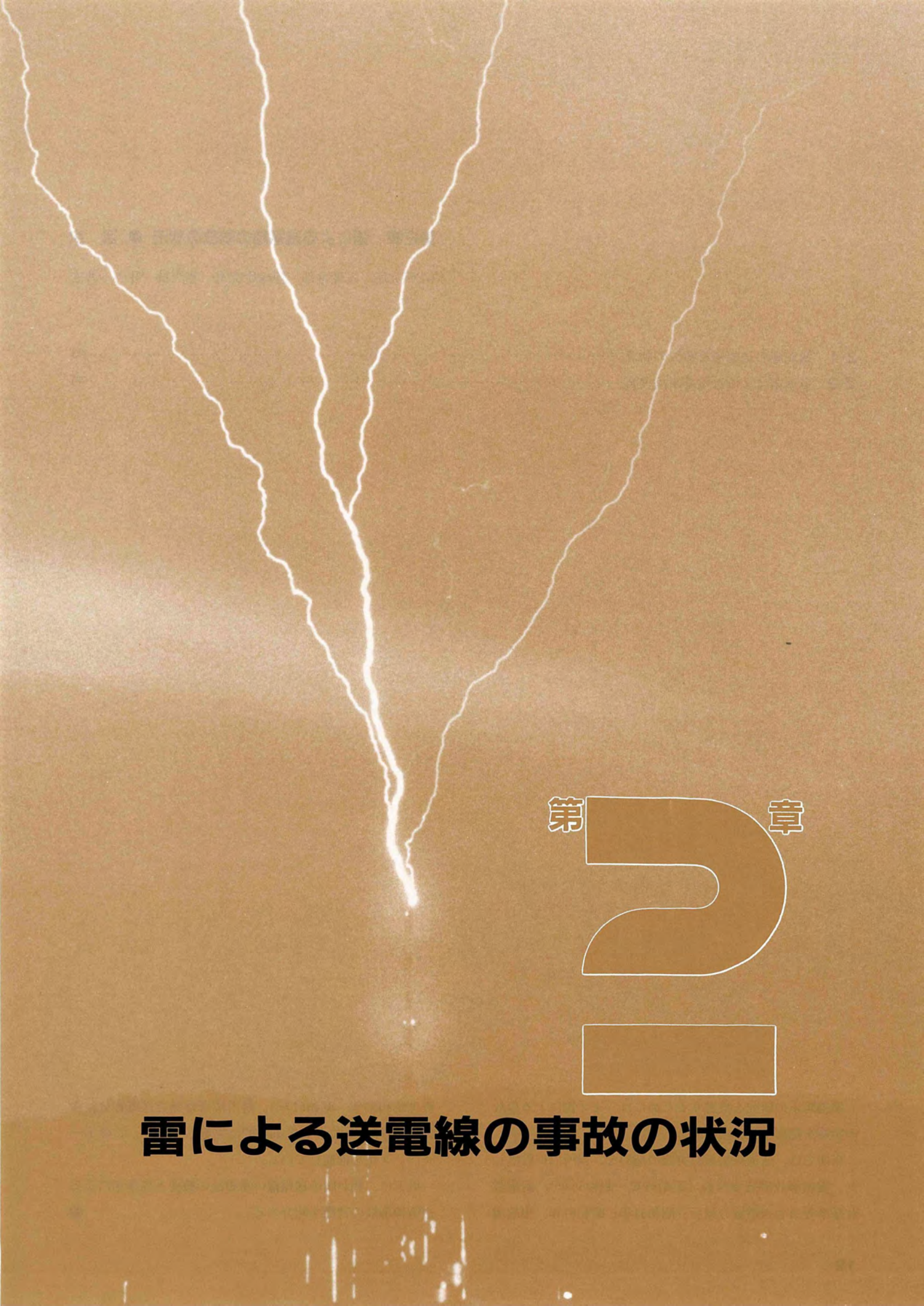


図1-1-1 送電線耐雷技術の研究フロー図

注) *：フラッシュオーバー：電極に加わる電圧がある値以上となり放電することをいう。送電線の場合は、がいしやがいしに近接して設置されている放電ギャップ（アークホーン）などで放電が起こる。鉄塔や架空地線への雷撃により鉄塔上に過電圧が発生するが、この過電圧によりがいしやアークホーンが放電し、電力線に雷撃が侵入することを、とくに逆フラッシュオーバーという。



第 章

三

〇

雷による送電線の事故の状況

第2章 雷による送電線の事故の状況 ● 目次

狛江研究所 送変電部 絶縁研究室 専門役 井上 敦之

2-1 我が国の送電線雷事故の状況.....	13
2-2 冬季雷による送電線事故実績.....	14

雷害防止の研究を推進するためには、まず雷による事故の実態を把握する必要がある。

当所では、送電線雷事故実態の把握を、当所内に設置した、雷害事故調査委員会（昭和31年～昭和56年）、耐雷設計基準委員会送電線分科会（昭和31年～昭和61年、事故調

査は昭和56年～昭和61年）、耐雷技術委員会送電線分科会（昭和61年～）において継続的に実施しており、このデータベース化を推進している。

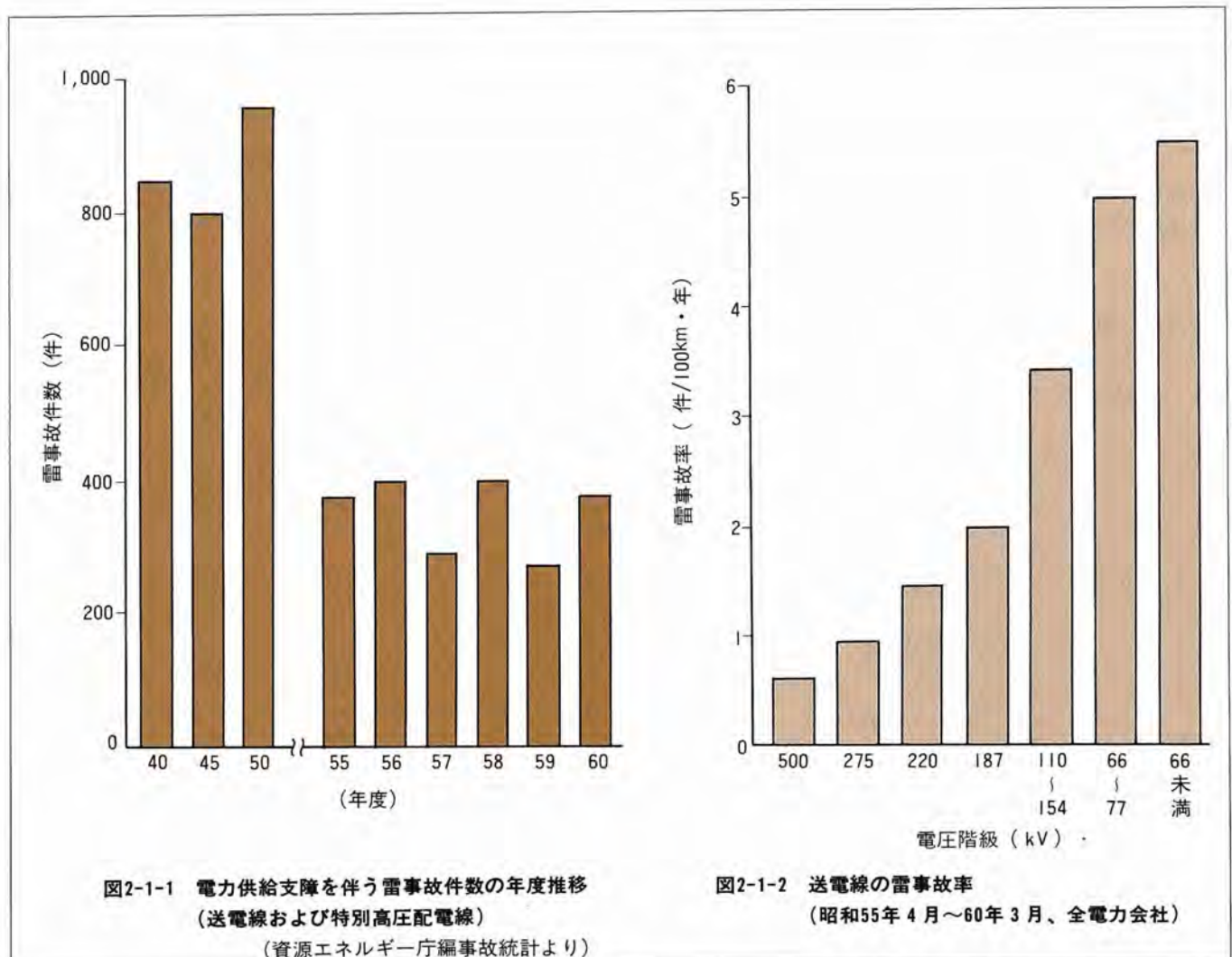
以下に、我が国の送電線の雷事故の概要と冬季雷による送電線事故の特徴を紹介する。 ●

2-1 我が国の送電線雷事故の状況

図2-1-1は、送電線および特別高压配電線の電力供給支障件数の年推移であるが、昭和50年までに比べ55年以降は半減している。また、図2-1-2は最近5年間の電圧階級

別の雷事故率(1年間100km当りのトリップ件数)を示したものである。154kV以下の送電線の事故率は比較的高く、今後の研究課題であるが、電圧階級が高くなるに

従って雷事故率は減少し、275kVおよび500kV送電線では1年間に100km当り1件以下と設計予想値内に収まっているのが現状である。



2-2 冬季雷による送電線事故実績

表2-2-1は、昭和41年2月から57年3月までの500 kV 設計送電線31線路（運転電圧275 kV を含む）、調査亘長約17,600km・年の雷事故件数と雷事故率（件/100km・年）を示したものである。同表より、日本海側の雷事故はその他の地域と大きく異なり、同一絶縁方式である平衡高絶縁方式の場合で比較すると、総事故率で約5.5倍、2回線事故率では約25倍となっていることがわかる。日本海側の事故は、2回線事故になる比率が46%と極めて大きいのが特徴である。

図2-2-1は、冬季雷、夏季雷による雷事故率を比較して示したものである。また、

図2-2-2は、表2-2-1の2回線事故の内容をさらに詳しく調査したものである。送電ルートが遮断されるかどうかは、採用されている再閉路方式によるが、高速度再閉路方式の場合でも、6線中4線以上の事故の場合は、送電を継続できる可能性が低く、夏季雷の場合はこの件数が0件なのに対し、冬季雷の場合は16%（6件）発生していることがわかる。

また、冬季雷の発生地域としては、昭和45年から55年における若狭湾以北の日本海側の500 kV 送電線5線路、275 kV 送電線17線路、154 kV 送電線95線路、計117線路を対象とした調査（調査線路亘長 約30,000

km・年）により、下記の点が明らかとなった。

1 標高の影響

夏季雷による事故は標高に無関係にほぼ一様に発生するのに対し、冬季雷による事故は、標高が高くなるに従って増加する（図2-2-3）。

2 海岸からの距離

夏季雷による事故は海岸からの距離に関係なく発生するのに対し、冬季雷による事故は、全事故の95%が海岸から35km以内で発生している。

表2-2-1 500kV 送電線の雷事故率（昭和41年2月～57年3月、全電力会社）

1・2回線の別	絶縁方式	調査亘長 ^{*1} (km・年)	雷事故件数(件)			雷事故率(件/100km・年)		
			1回線	2回線	計	1回線	2回線	計
2回線	平衡高絶縁方式 ^{*2} (日本海側を除く)	10,577.0	58	6	64	0.55 (90%)	0.06 (10%)	0.61 (100%)
	平衡高絶縁方式 ^{*2} (日本海側)	1,073.9	20	17	37	1.86 (54%)	1.58 (46%)	3.44 (100%)
	不平衡絶縁方式	2,945.9	65	3	68	2.21 (96%)	0.10 (4%)	2.31 (100%)
	小計	14,596.8	143	26	169	0.98 (84%)	0.18 (16%)	1.16 (100%)
1回線	—	3,006.7	35	—	35	1.16 (100%)	—	1.16 (100%)
合計		17,603.5	178	26	204	1.01 (87%)	0.15 (13%)	1.16 (100%)

注) *1：雷事故が発生した送電線の調査亘長

*2：全国の平衡高絶縁方式の総事故率は、調査亘長11,650.9km・年、事故総件数は101であるので、0.87件/100km・年。

3 冬季雷の集中する地域

図2-2-4に示すように海岸から約30kmの地域で、かつ、標高が約1,000m以下の地域で事故が集中しており、これは、年間雷雨日数(IKL)が30以上の地域と一致して

いる。

以上の調査結果より、冬季雷を発生させる雷雲のイメージとして、日本海から内陸へ移動しつつ雷事故を発生させ、その活動

は海岸から30~35km以内の範囲に集中し、標高1,000mの山でブロックされることがわかる。これは、冬季雷の雲底が夏季雷に比べて低いことに起因していると考えられる。

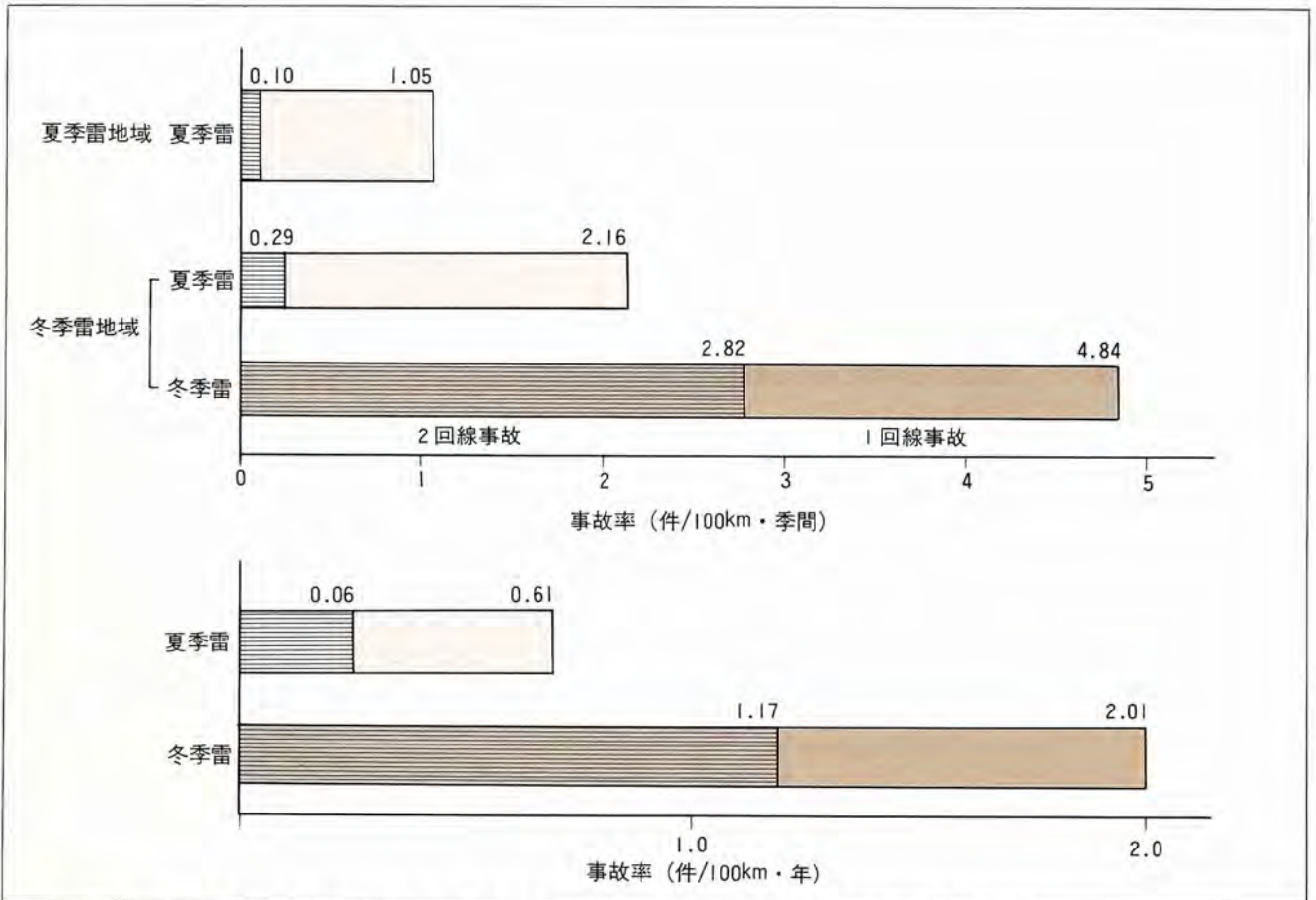


図2-2-1 500kV平衡高絶縁送電線の冬季雷、夏季雷事故率(昭和41年2月~昭和57年3月、全電力会社)

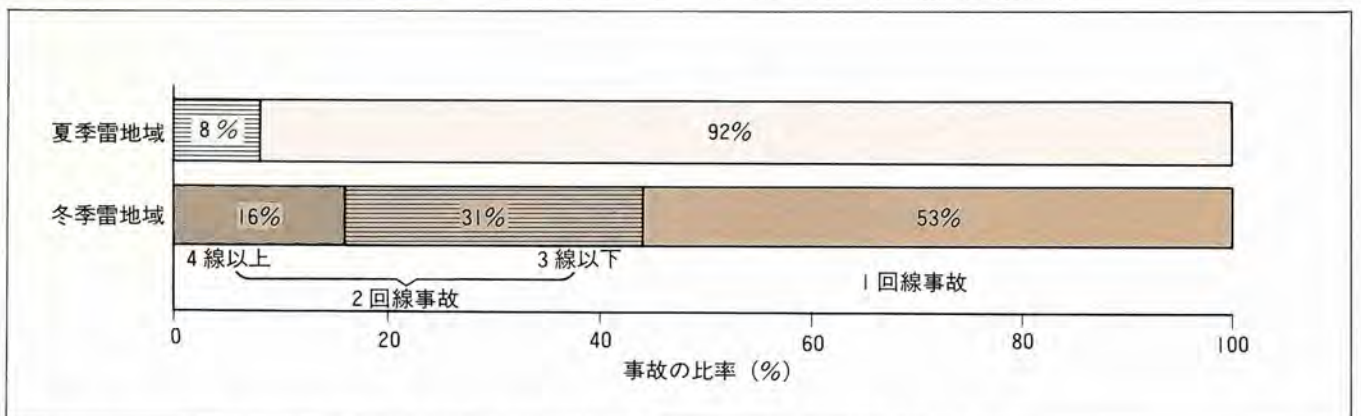


図2-2-2 500kV平衡高絶縁送電線の雷事故様相(昭和41年2月~昭和57年3月、全電力会社)

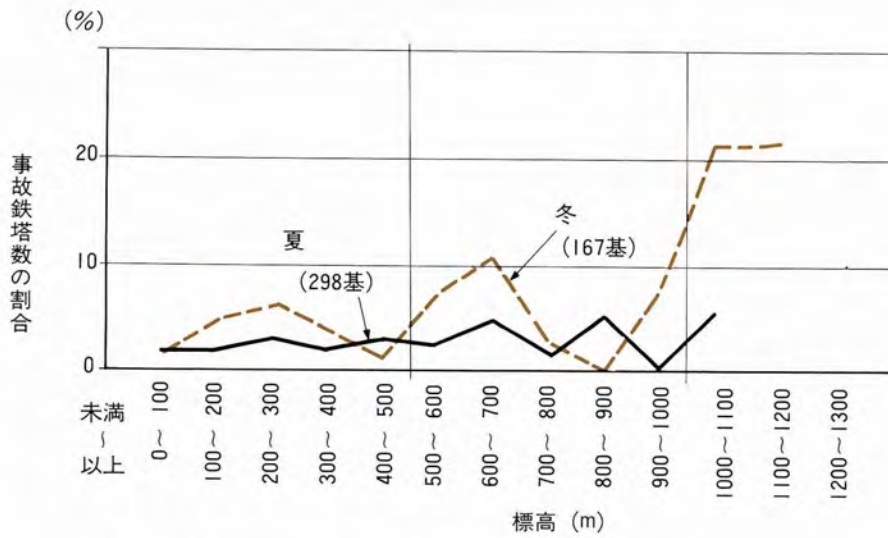


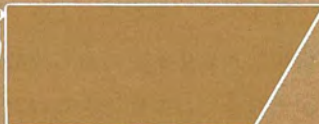
図2-2-3 標高別の鉄塔数に対する事故鉄塔数の割合の夏冬の比較

- : 冬季雷事故発生境界
- ▨ : 雷事故の集中範囲
- - - : 海岸から30kmの線



図2-2-4 雷事故の集中が見られる地域



第  章

冬季雷の性状



第3章 冬季雷の性状 ● 目次

柏江研究所 送変電部 絶縁研究室 主任研究員 横山 茂
 UHV塩原実験場副場長 主査研究員 三宅久仁彦
 電力システム部 情報制御研究室 主査研究員 富田 誠悦

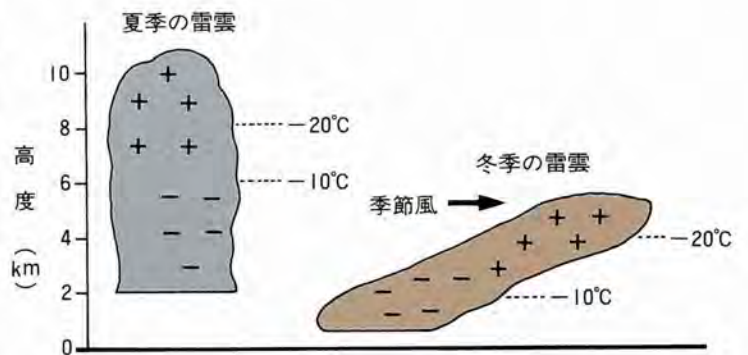
3-1 観測方法	19
3-2 高構造物への雷撃特性	22
3-3 冬季雷放電現象	25
3-4 冬季雷予知技術	28

昭和40年代後半から、日本海沿岸において基幹送電線が建設されたことによって、冬季雷による2回線同時事故や架空地線の溶損事故が発生し、これら事故様相は従来の夏季雷に対する耐雷技術では説明できないため、冬季雷に対する関心が高まった。

このため、当所では冬季雷性状を把握し耐雷設計へ反映させることを目的として、昭和53年度より冬季雷観測を開始した。これまでに、種々の雷観測装置を開発するとともに、当該地域の電力会社と共同・協力して、気象観測塔などの独立高構造物や送電線への雷撃様相の観測を実施してきた。

現在、冬季雷の観測は、電力会社、大学などでも精力的に実施されている。また、世界的にも正極雷の比率が高いことで注目されている状況にある。

以下に、当所のこれまで9年間の冬季雷観測結果を紹介する。



夏季雷と冬季雷の構造は一般に上記のようだとされている。すなわち、冬季雷は雲底が低くなっている。また、雷雲の形状が季節風の影響を受けるため、+の電荷と地上との距離が近くなっている。

3-1 観測方法

冬季雷の観測を始めるに際し、まず雷観測装置の開発から着手した。当時、ようやくフィールドでの実用が可能となった光フ

ァイバケーブルやオプトエレクトロニクス技術など最新の光技術や電子技術を導入して雷撃現象自動撮影装置、自動イメージ

コンバータカメラ(ICC)及び雷放電進展様相自動観測装置(ALVS)、雷撃電流波形測定装置、がいし間電圧波形測定装置

表3-1-1 開発した雷観測装置

観測装置名	観測対象	特徴	観測開始時期	
雷撃現象自動撮影装置	テレビ残像方式カメラ	雷放電路	・昼間でも撮影可能 ・解像力はあまりよくない	昭和53年6月
	多重雷用カメラ	雷放電路	・動作が40msecほど遅れる ・構成が簡単	昭和54年12月
	簡易型ストリーク・カメラ	多重雷、長波尾雷の発光様相	・雷放電路の時間分解可能 ・駒撮り、流し撮りの両方式あり	昭和55年12月
	光量積分方式カメラ	雷放電路	夜間は第一雷撃から撮影可能	昭和55年12月
自動イメージ・コンバータ・カメラ	雷放電の進展様相	夜間のみ観測できる	昭和54年12月	
雷放電進展様相自動観測装置(ALVS)	雷放電の進展様相同時落雷の時間差	・データの計算機処理が可能 ・昼間、夜間を問わず観測可能	昭和60年11月	
雷撃電流波形測定装置	独立高構造物や送電線各部を流れる雷撃電流波形(各部分流波形)	・光ファイバケーブルの使用により、高所での雷撃電流波形がノイズを含まずに観測できる。 ・トランジェント・レコーダ(ディジタイザ)と、パーソナルコンピュータの組み合わせで自動観測を可能にした。	昭和53年12月	
がいし間電圧波形測定装置	送電線がいし間雷過電圧	・がいしの静電容量を利用したがいし分圧法 ・光ファイバケーブルの使用	昭和57年12月	
配電線誘導雷現象観測システム	(1) 雷撃電流波形と誘導雷電圧波形の同時観測 (2) 誘導雷電圧の線路方向分布 (3) 架空地線と避雷器の誘導雷電圧抑制効果	・雷撃電流波形と配電線誘導雷電圧の同時観測 ・配電線両端を整合抵抗で終端	昭和55年12月	

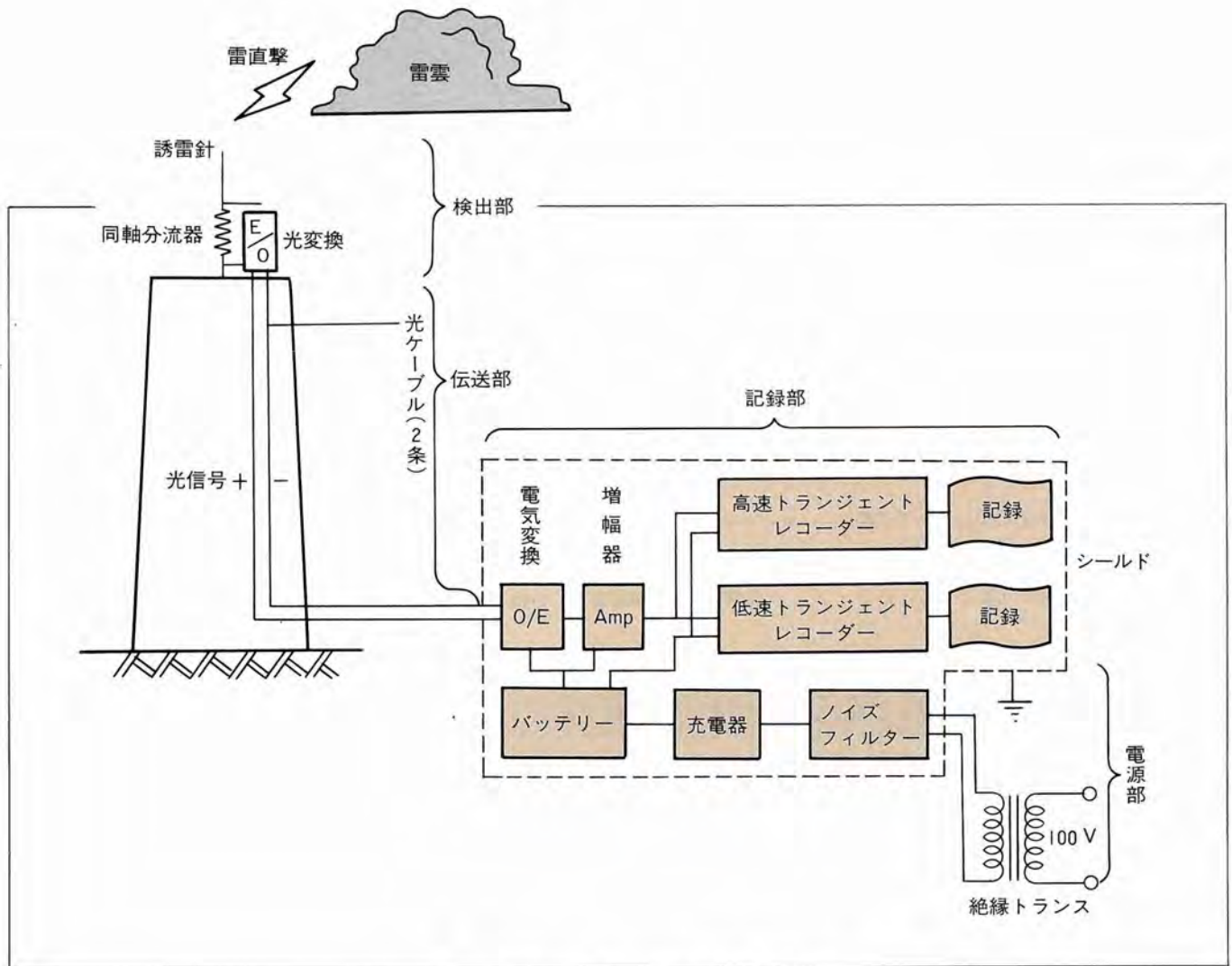


図3-1-1 雷撃電流波形測定装置の構成図

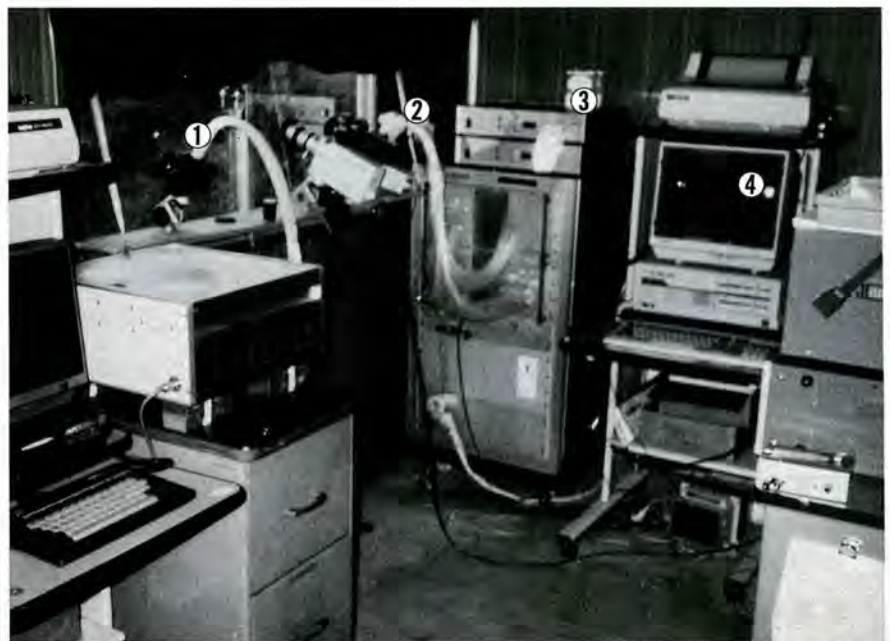
および配電線誘導雷現象観測システムを新しく開発した。

これら装置の観測対象と特徴を表3-1-1に、また代表例として雷撃電流波形測定装置と雷放電進展様相自動観測装置を図3-1-1、図3-1-2に示す。

これら装置は従来の装置よりも高性能で、かつ無人観測できる点に特徴があり、現在、他所の雷観測にも使用されている。

上記の新しい雷観測装置を開発しつつ、日本海岸の柏崎地点、福井地点、中能登地点において高構造物への雷撃、敦賀線において送電線への雷撃、福井地区において配電線誘導雷、福井地区近傍において、落雷位置標定の観測を実施した。

観測地点と観測項目および観測装置は図3-1-3の通りである。



①：受光部 ②：光ファイバ ③：計測部 ④：パーソナルコンピュータ

図3-1-2 雷放電進展様相自動観測装置(ALVS)

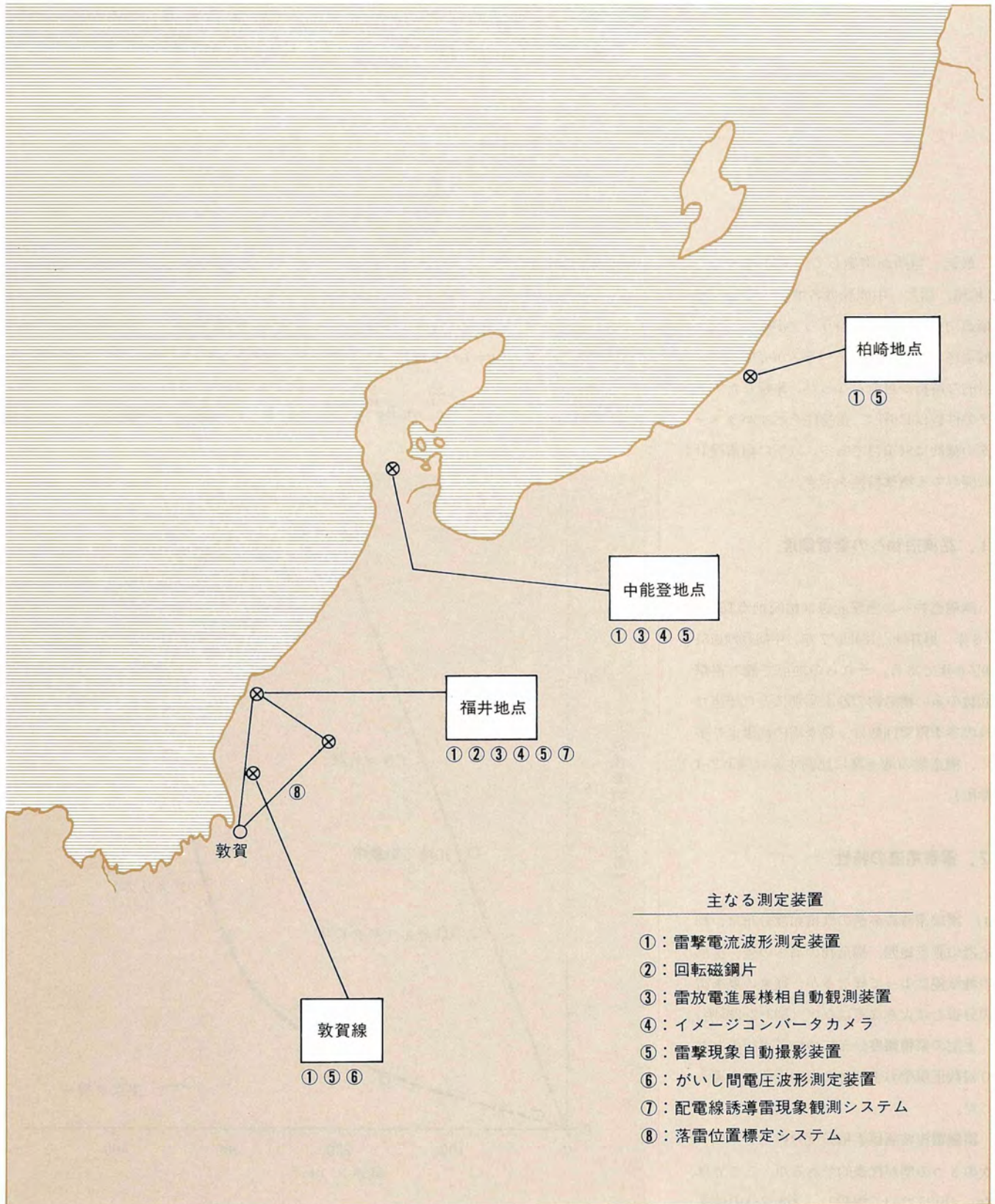


図3-1-3 冬季雷の観測地点と観測装置

3-2 高構造物への雷撃特性

最近、当所が実施している観測3地点（柏崎、福井、中能登の各地点）の独立高構造物への雷撃記録のうち、雷撃電流、雷放電路分布等のデータベースが完成し、統計的な解析が可能となった。集録したデータの件数は416件で、雷特性を示すパラメータの総数は84項目である。以下に耐雷設計に関与する雷撃特性を示す。

1. 高構造物への雷撃頻度

高構造物への雷撃記録は柏崎地点181回/8年、福井地点184回/7年、中能登地点51回/6年である。それらの地点で最も雷撃回数の多い構造物の地上高別にみた年当たりの冬季雷撃回数は、夏季雷の結果より多く、構造物の地上高に比例する（図3-2-1参照）。

2. 雷撃電流の特性

(1) 雷撃電流波高値の累積頻度分布は、測定器の測定範囲、構造物の高さの差、雷雲の地域差によって異なるが、従来の夏季雷の分布とは大きな差はない（図3-2-2参照）。

上記の累積頻度分布について下記のとおり対数正規型および分布型の近似式を導入した。

雷撃電流波高値累積頻度分布としては、次の3つの型が代表的であるが、ここでは、(a)、(b)について解析し、表3-2-1の値を得た。

(a) 対数正規型：電流波高値を I とすると

$X = \log I$ が正規分布 $N(m, \sigma^2)$ に従う。ただし、 m ：平均値、 σ ：標準偏差

(b) 分数型： $P(I) = 1 / \{1 + (I/I_{50})^a\}$

$$\frac{1}{I^{11}} - \frac{1}{I^{12}}$$

(c) 指数関数型： $P(I) = Ae^{-I^{11}} + Be^{-I^{12}}$

(2) 正極性雷撃数と負極性雷撃数の比は1：2であり、夏季雷の1：19と比較して、冬季雷は正極性の比率が高いのが特徴である。

(3) 雷撃電流の波頭長は数マイクロ秒から数ミリ秒と広い範囲に分布しており（図3-2-3参照）、波高値との相関は認められない。

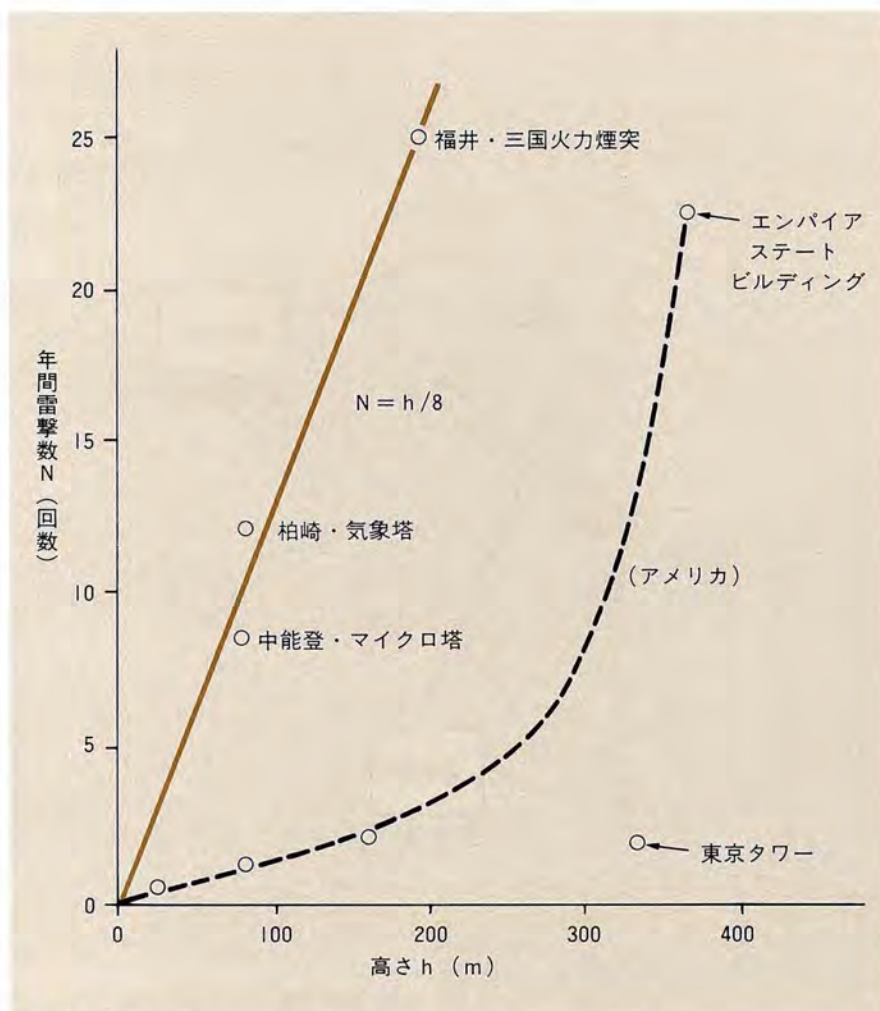


図3-2-1 高構造物への雷撃回数

(4) 雷撃電流波形を積分して求めた電荷量は0.1クーロン以下から数1,000クーロン以上まで分布している(このうち、100クーロンを超えるもの13%) 夏季雷は通常数クーロンから数100クーロンであり、これと比較して冬季雷の電荷量は極めて大きい(図3-2-4参照)。

3. 放電路の特性

雷しゃへいを検討する場合、高構造物へ雷撃する場合の垂直進入角や雷放電のリーダのステップ長を把握する必要がある。垂直侵入角 ϕ の分布は $(\cos \phi)^n$ で代表でき、冬季雷の場合、 $n = 3$ である。最も発生頻度の高いのは35度程度であるが、値の大きいものでは85度に達する横なぐりの雷もある(図3-2-5参照)。

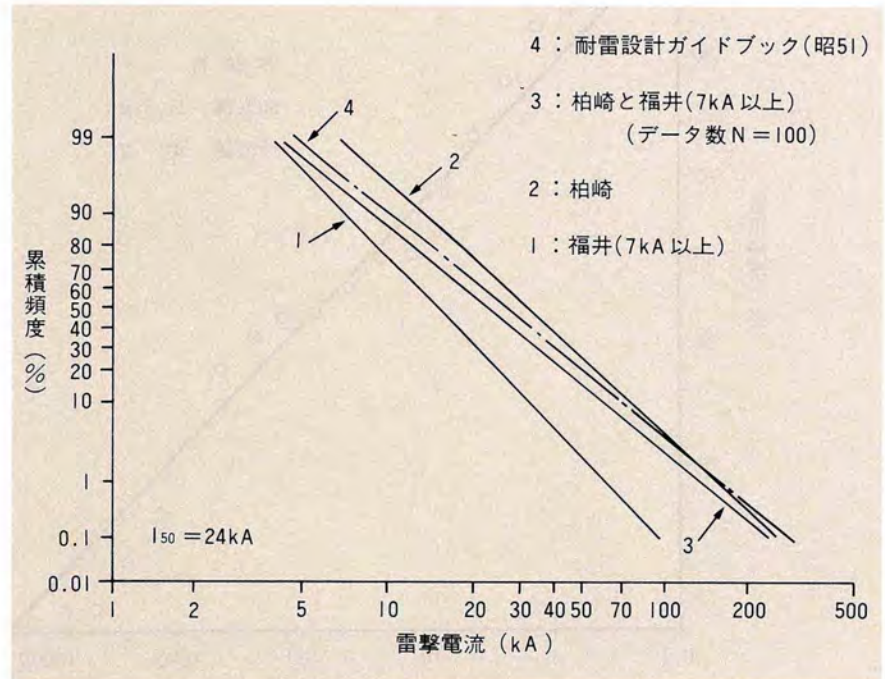


図3-2-2 雷撃電流波高値累積頻度分布曲線(昭和54年1月~61年7月)

表3-2-1 雷撃電流波高値累積頻度分布の定数

補正の有無	観測地点	対数正規型		分数型	
		I_{50} (kA)	I_{16} (kA)	I_{50} (kA)	n
生データ	柏崎	33	72	33	2.6
	福井	10	24	10	2.2
	全体	16	42	16	1.8
測定感度を補正 (7kA以上のもののみ採用)	柏崎	33	72	33	2.6
	福井	15	27	15	3.3
	全体	24	51	24	2.3
耐雷設計ガイドブックの曲線		26	55	24	2.4

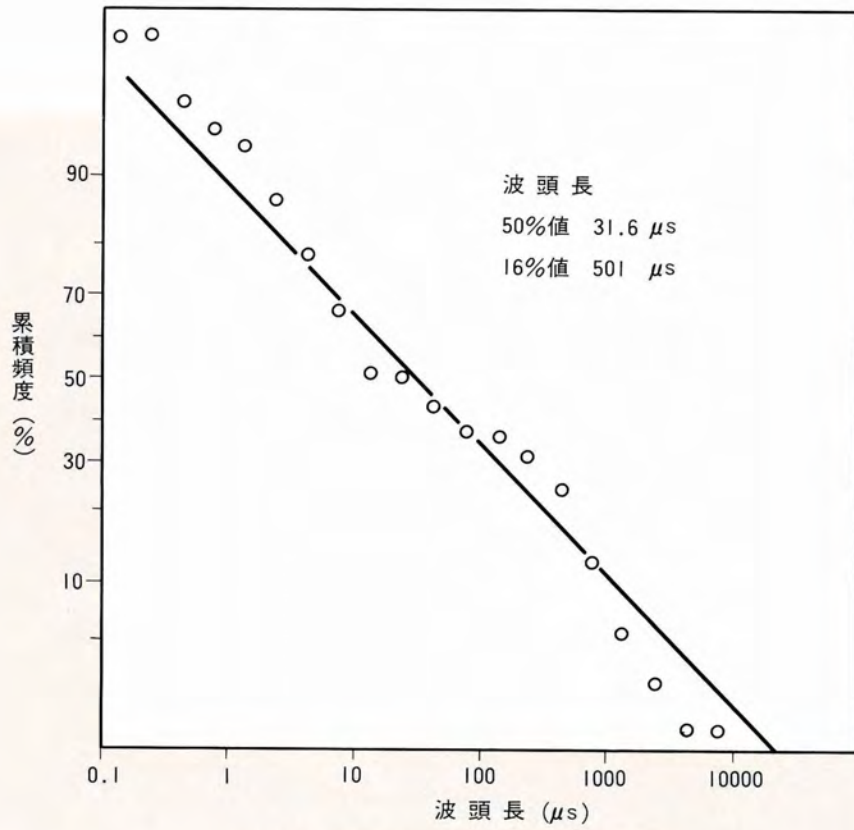


図3-2-3 雷撃電流の波頭長の累積頻度分布

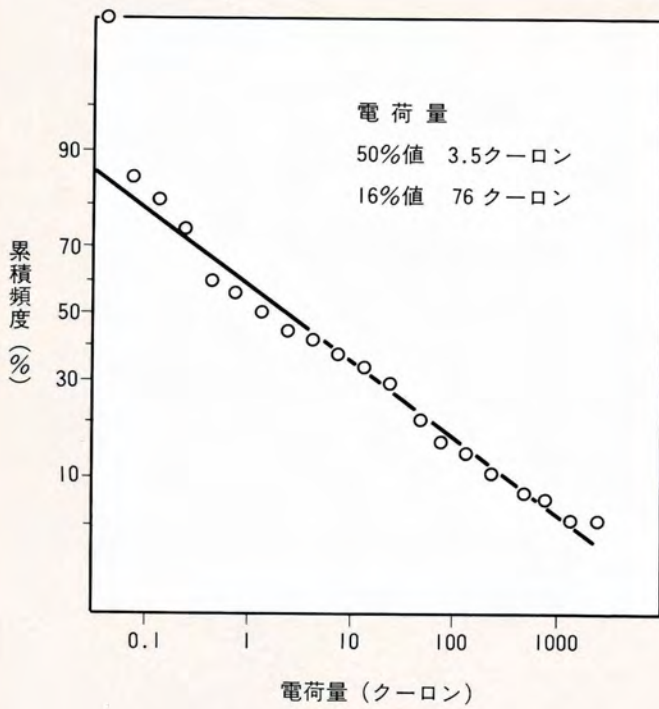


図3-2-4 電荷量の累積頻度分布

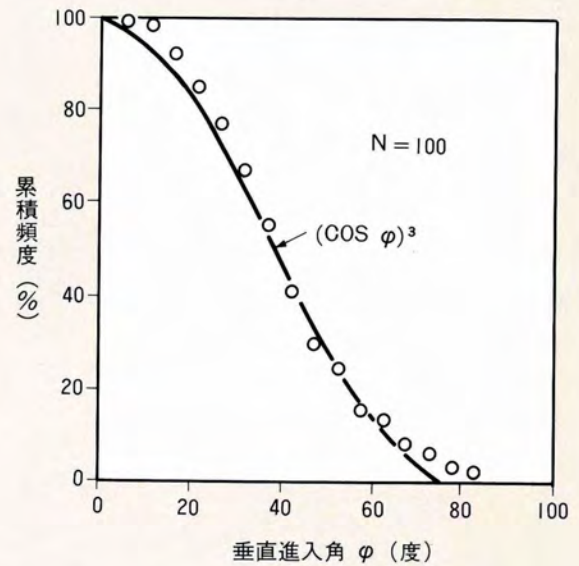


図3-2-5 垂直進入角の累積頻度分布

3-3 冬季雷放電現象

冬季雷には、夏季雷のように雲からの下降雷もあるが、極くわずかであり（1～4%）、ほとんどが下から上へ向かって伸びる上向き雷である。この様相は、静止カメラによる雷放電写真の枝分れに明瞭に現れる（図3-3-1参照）。

雷放電の進展状況は、イメージコンバータカメラ（ICC）や前述のALVSによって観測できる。図3-3-2はALVSによる雷の進展状況であり、雷放電（リーダ）が段階状に進展して結合する様相がわかる。今までの観測例では、放電の長さは数10～数

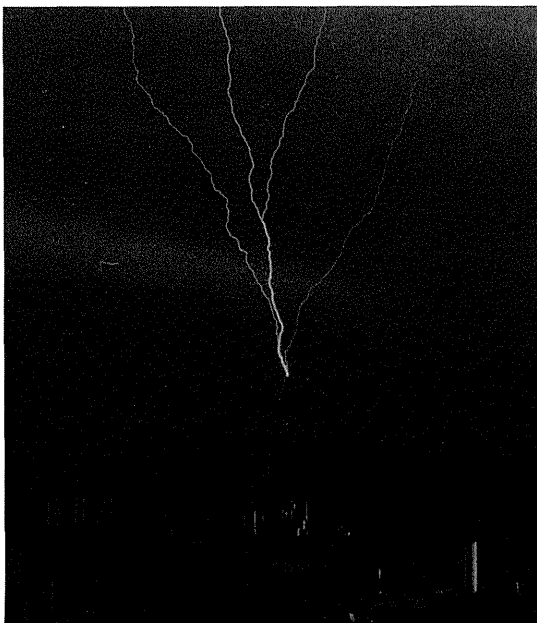
100メートル、リーダは段階的に進展し（ステップリーダ）、電荷密度はメータ当たり数10分の1から数分の1クーロン、その速度は毎秒数10⁶メータであり、進展特性に関しては、夏季雷と同程度との結果が得られている。

また、複数個所に同時に発生する多点同時雷撃も観測され（全雷撃の3～9%）、発生条件として高構造物の水平距離が2km、高さの差が50m以内との結果を得ている。多点同時雷撃は、2回線にまたがる多相事故の原因の一つと考えられていたが、それ

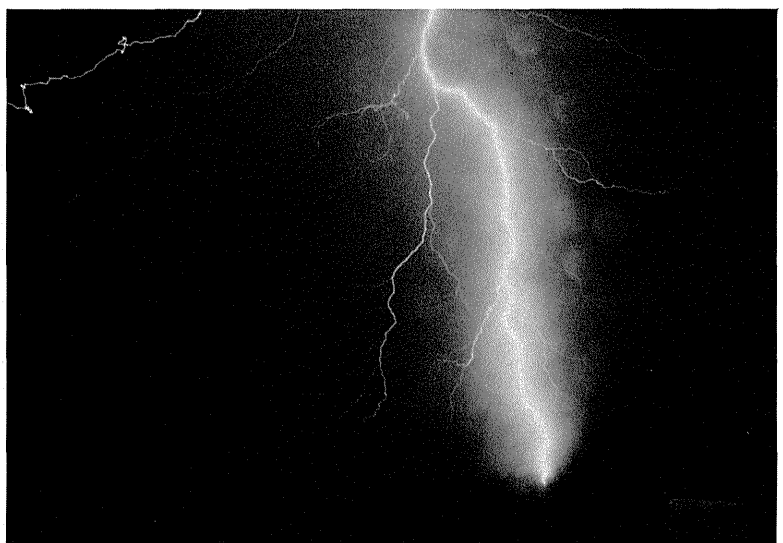
が裏付けできたといえる。

これまでの冬季雷観測に基づく雷放電特性を夏季雷と比較することにより、以下のことがわかる（表3-3-1参照）。

- (1) リーダやリターンストロークなど雷放電の基本過程の物理量に関しては、夏季雷と大きな差はない。
- (2) 冬季雷の特徴は、正極性雷撃が多いこと、上向き雷が多いこと、放電電荷量が極めて大きなものがあることであり、これらは、冬季雷雲中の電荷配置と雲底が低いことに起因する。

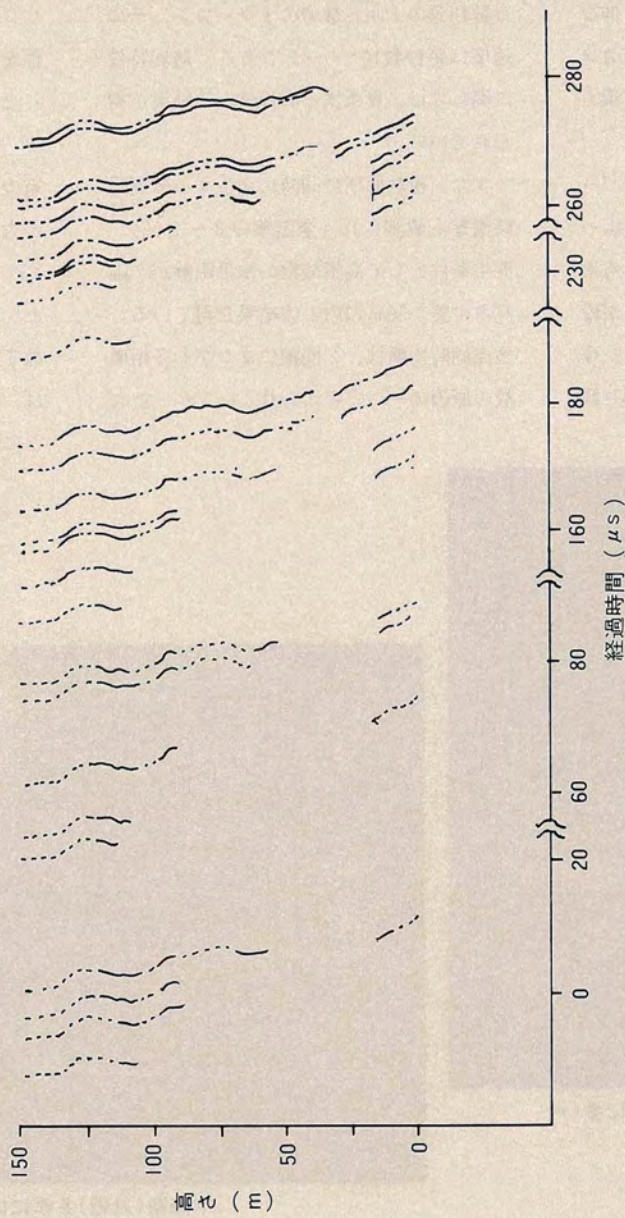


上向き雷(送電線)冬季に多い

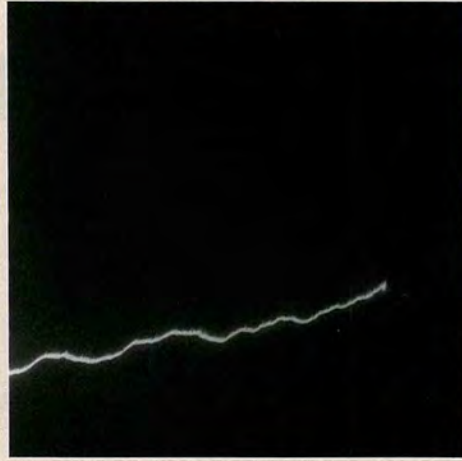


下降雷(対地)冬季には極めて少ない

図3-3-1 冬季雷撃の写真



(a) ALVSで測定した放電進展経路



(b) 静止カメラで撮影した放電路

図3-3-2 冬季雷放電進展様相

表3-3-1 冬季雷と夏季雷の特性比較表

分類	過程	項目	単位	夏季雷	冬季雷
雷雲の特性		雲底(ギャップ長)	m	$(1.2 \sim 2) \times 10^3$	(300 ~)
		電荷	C	$0.2 \sim [2.5] \sim 2.0^*$	$0.1 \sim [3.5] \sim 3 \times 10^3$
		電圧	MV	約 10^2	約 $10 \sim 10^2$
		静電エネルギー	kJ	約 10^6	約 $10^2 \sim 10^8$
放電	ストリーマ	速度 電荷密度	m/sec c/m	————— —————	$3 \times 10^5 \sim 2 \times 10^7$ —————
	リーダ	速度 電荷密度 電流 ステップの時間間隔	m/sec c/m A μsec	$(1 \sim 26) \times 10^5$ $10^{-3} \sim 10^{-1}$ $10^2 \sim 10^5$ 30 ~ [50] ~ 125	$((1 \sim 5) \times 10^5)$ $10^{-2} \sim 10^{-1}$ ————— 27 ~ 300
電特性	リターンストローク	速度	10^7 m/sec	2 ~ [5.0] ~ 14	(12 ~ 23)
		電流波高値	kA	~ [24] ~	< 2 ~ [24] ~ 150 <
		電流峻度	kA/μsec	< 1 ~ [10] ~ 80	0.01 ~ [0.63] ~ 100
		電流波頭長	μsec	< 1 ~ [2] ~ 30	0.1 ~ [32] ~ 10^4
		電流波尾長	μsec	~ [40] ~ 250 *	1 ~ [50] ~ 10^4
		雷撃時の地上電界	kV/m		35 ~ 170
		極性		殆ど負極性(95%)	正極性1/3
		放電の進展方向		殆ど下向き	殆ど上向き(96% ~ 99%)
		放電時間	sec	$10^{-2} \sim [0.2] \sim 2$	$10^{-5} \sim 0.5$

- 注 1) *連続電流含まず
 2) a ~ [b] ~ c とは、a ~ c の範囲で [b] が代表値
 3) 電荷は雷撃電流(リターンストロークが主)からの値
 夏季雷に 3 ~ [25] ~ 数100 のデータあり
 4) 雷雲の電圧、静電エネルギーは推定値
 5) 冬季雷の()内の数値は他所の観測値

3-4 冬季雷予知技術

雷放電時に放射される電磁波を検出する試みは古くからなされてきた。また、最近では、雷放電時の電磁波を3地点で検出し、落雷の地点を定める落雷位置標定システムが米国で開発され、各所で試用中である(図3-4-1)。

当所では、まず、落雷時の地上電界を測定することにより、落雷時の地上電界値は、数10～数100kV/mと幅広く、冬季雷に多い突発雷(前ぶれなく突然落ちてくる雷)に対しては、単一地点に設置した地上電界計による落雷予測は極めて困難であることを明らかとした。

また、落雷位置標定システムの性能を自然雷によって検証し、夏季雷に対しては70%程度の確度で落雷を標定できる可能性があるが、冬季雷に対しては40%程度であることなどを明らかとし、冬季雷に対しては電磁界変化波形のデータ収集と解析が必要であることなど、今後の雷予知システムの研究の方向を提案した。

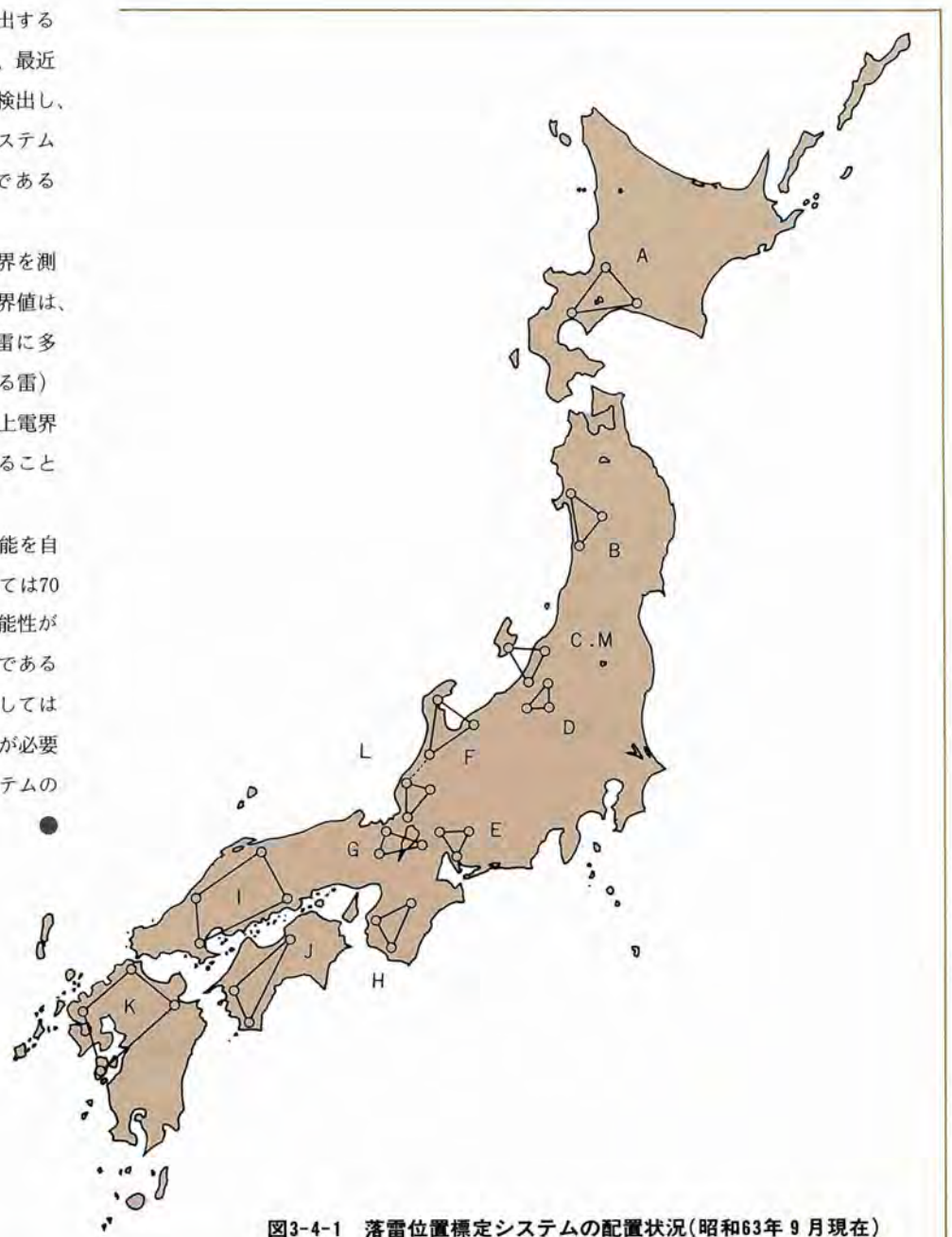
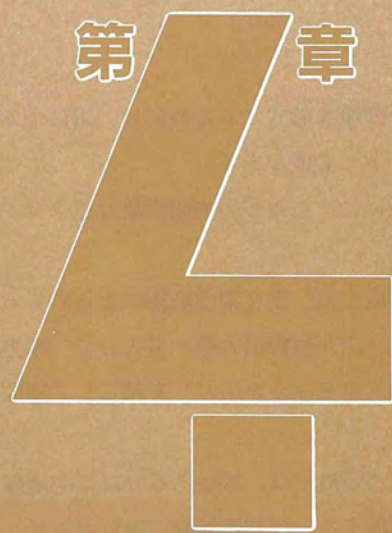


図3-4-1 落雷位置標定システムの配置状況(昭和63年9月現在)



第 4 章



冬季雷による

2回線同時事故の原因

第4章 冬季雷による2回線同時事故の原因 ● 目 次

狛江研究所	送変電部	絶縁研究室	主任研究員	青島	好英
狛江研究所	送変電部	絶縁研究室	主査研究員	相原	良典
狛江研究所	送変電部	絶縁研究室	主査研究員	新藤	孝敏
狛江研究所	送変電部	放電研究室	主査研究員	藤波	秀雄

4-1	雷しゃへい	31
4-2	雷サージの伝搬特性	37
4-3	がいし装置のフラッシュオーバ	41
4-4	2回線同時事故原因の検討	45

合理的雷害防止対策を確立するためには、雷による事故の原因を把握しておく必要がある。

送電線の雷事故には、しゃへい失敗事故と逆フラッシュオーバ事故とがある。

しゃへい失敗事故とは、雷を架空地線によってしゃへいすることができず、雷が直接電力線へ侵入して、電力線と鉄塔間に絶縁破壊（フラッシュオーバ）を起こして事故となるものである。

逆フラッシュオーバ事故とは、鉄塔あるいは架空地線への雷撃によって、鉄塔あるいは架空地線の電位が上昇し、電力線へフラッシュオーバするもので、通常では大地電位である鉄塔や架空地線の電位が電力線より高くなって発生するために逆フラッシュオーバと呼ばれる。

すなわち、送電線雷事故の様相を把握するためには、次

の現象や特性を解明する必要がある。

- (イ) 送電線へ雷撃があれば、雷が送電線のどこに侵入するか（雷しゃへい）
- (ロ) 侵入した雷サージがどのように進行するか（雷サージ伝搬）
- (ハ) 大地の接地抵抗がどう影響するか（塔脚接地抵抗）
- (ニ) 鉄塔の電位はどの程度上昇するか（鉄塔電位上昇）
- (ホ) がいし装置あるいは気中クリアランスがフラッシュオーバするかどうか（フラッシュオーバ特性）

これら諸現象、特性は、耐雷設計の基本であり、古くから研究が行われてきた。

本章では、現在の研究のレベルと当所での研究状況を紹介し、最後に冬季雷に対する事故原因を検討してみる。

4-1 雷しゃへい

1 夏季雷(下降雷)に対するしゃへい

雷しゃへいに関しては、種々の理論および設計手法がある。

我が国の送電線では、154 kV 級以下の送電線（高さ30m程度以下）では、吸引空間理論に基づいてしゃへいの設計がなされてきたが、275 kV 送電線で中相事故が多発したため、現在では、A - W 理論（Armstrong と Whitehead が提唱した理論）に基づいた設計が主流となっている。

吸引空間理論とは、図4-1-1 (a) に示すように、高さ h の鉄塔または導体の上方に半径 h の傘状の吸引空間を想定し、この空間表面へ到達した雷は、最短の導体へ雷撃するというものであり、例えば図の A 点へ到達した雷は、O へ、B 点への雷は O へ落雷するという、極めて幾何学的モデルである。

これに対し、A - W 理論とは図4-1-1 (b) に示すように、吸引空間（しゃへい空間）およびその空間内の雷撃路の想定は、吸引空間理論と類似であるが、しゃへい空間の半径を雷の最終雷撃距離（final striking distance） r_{ss} として、雷撃電流 I と関連づけたものである。導体への雷撃距離は、大地への雷撃距離と比例関係にある。

当初の A - W 理論では、しゃへい失敗と逆フラッシュオーバー事故を判別する雷電流経路判別器（パスファインダ）による事故実績を求め、関係式の係数を決定していた。この理論の提案後、係数に関して著者の一人である Whitehead を含め、種々の改定

値が提案されている。図4-1-2は、提案されている大地への雷撃距離と雷撃電流との関係式をまとめたものである。

A - W 理論は、雷撃電流と雷撃距離を関連づけた点で、極めて優れた理論であるが、雷の極性の影響が明確でない。これに対し、当所では、従来のしゃへい実験が雷雲から大地までの全雷放電を想定していることに誤りがあることを指摘し、モデル実験では最終雷撃段階の模擬のみが可能であるとして、しゃへいモデル実験を実施し、放電路モデルを提案した。

放電路モデルとは、図4-1-1 (c) に示すように、導体の上空に雷撃距離に対応する Z 平面を想定し、その平面上に吸引パラメータで定まる吸引領域があり、この領域に到達した雷は、導体に雷撃するとしたものである。吸引パラメータは、雷の最終雷撃位置と送電線の高さとの相対位置で定まり、雷の極性と地上電界の時間的変化を指定すれば、一義的に決定できる。

これらしゃへい理論を検証する例がたまたま得られた。図4-1-3は、昭和56年7月に、当所赤城 UHV 試験送電線への落雷を撮影したものの解析図である。偶然に、架空線と大地への同時雷撃（枝分れ）が発生している。同図に、A - W 理論と放電路モデルによるしゃへい範囲とを併示したが、後者のモデルが自然雷と一致しており、理論の妥当性を示す一例である。

最近では、上述の雷しゃへい理論のほか、下降雷がある程度、近づいたときに下

から上向きに伸びる雷を時間的に追跡する雷放電進展モデルなどが提案されている。これら雷しゃへい理論の妥当性は今後の実証研究を待っている状況である。

上述のしゃへい理論は、すべて夏季雷などの下降雷に対するものである。冬季雷に多い上向き雷に対して、これら理論が成立するのか、あるいは根本的に新しい理論が必要なのかは、現在不明であり、各所で研究されつつある。

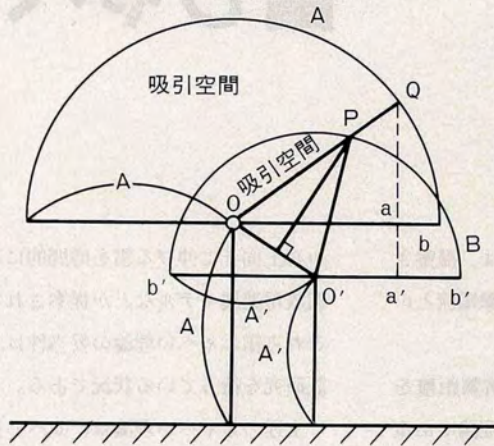
2 冬季雷(上向き雷)に対するしゃへい

当所では、上向き雷に対するしゃへいの重要性に鑑み、上向き雷しゃへいの実験およびシミュレーション研究を昭和61年度より開始した。

雷雲を金網電極（ $8 \times 8 \text{ m}^2$ ）で模擬し、大地側に高鉄塔および送電線を約1/200縮尺で配置した。金網電極に、雷インパルス、開閉インパルスあるいは直流電圧を印加することによって上向き放電や同時放電を発生させることができる（図4-1-4）。

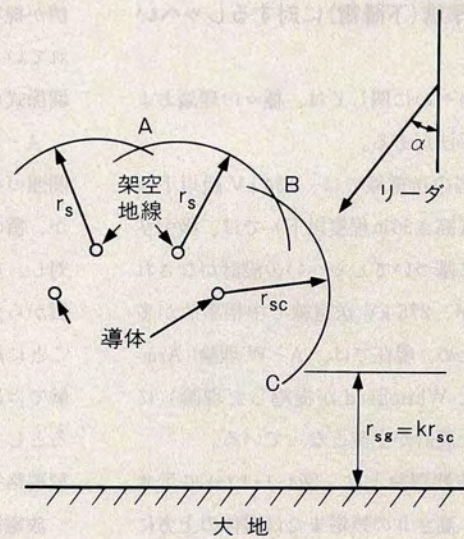
まず、独立高鉄塔による高構造物のしゃへい効果を検討することとし、雷雲が上空に一樣に広がった場合と雷雲が接近してくる場合とを想定して、モデル実験を実施した。

これまでに、二つの高鉄塔への雷撃率および高鉄塔と送電線への雷撃率を明らかにし（図4-1-5）、冬季雷実測結果と一致することを確認して（図4-1-6）、高鉄塔によるしゃへい方式を提案した（図4-1-7参照）。



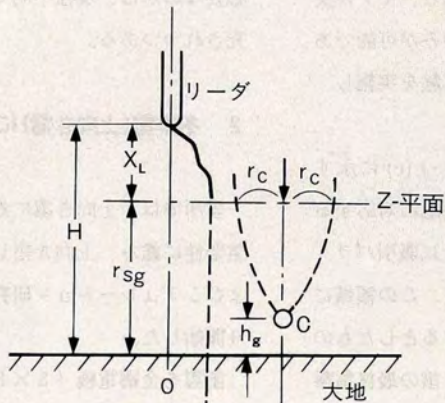
A点の雷撃はOへ侵入
 B点の雷撃はO'へ侵入
 Q点の雷撃はO、O'へ等確率で侵入

(a) 吸引空間理論

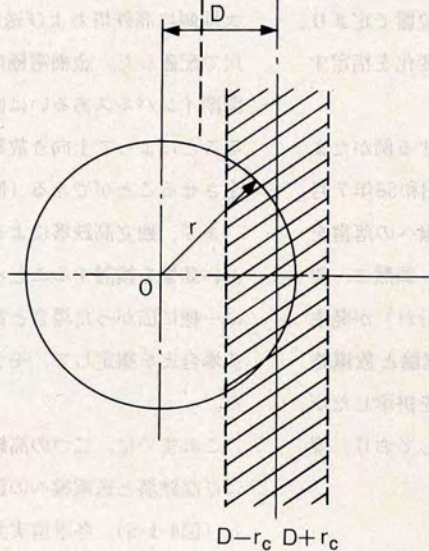


B Cに雷撃があるとしゃへい失敗

(b) A-W理論



(i) 立面図



(ii) 平面図

Z-平面上吸引領域(斜線の部分)
 への雷撃のみが導体Cへ侵入

(c) 放電路モデル

図4-1-1 雷しゃへい理論

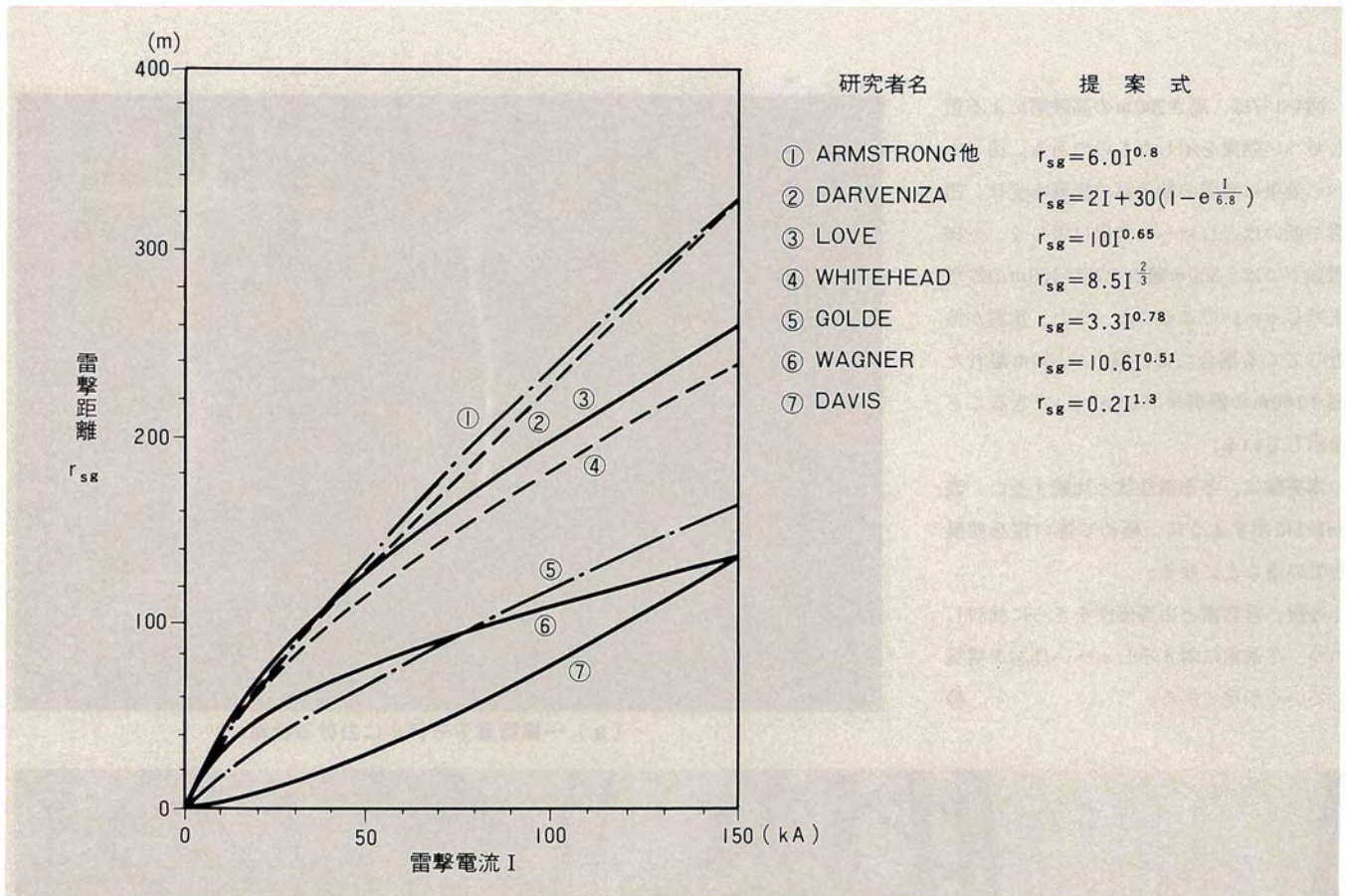


図4-1-2 雷撃距離と雷撃電流の関係

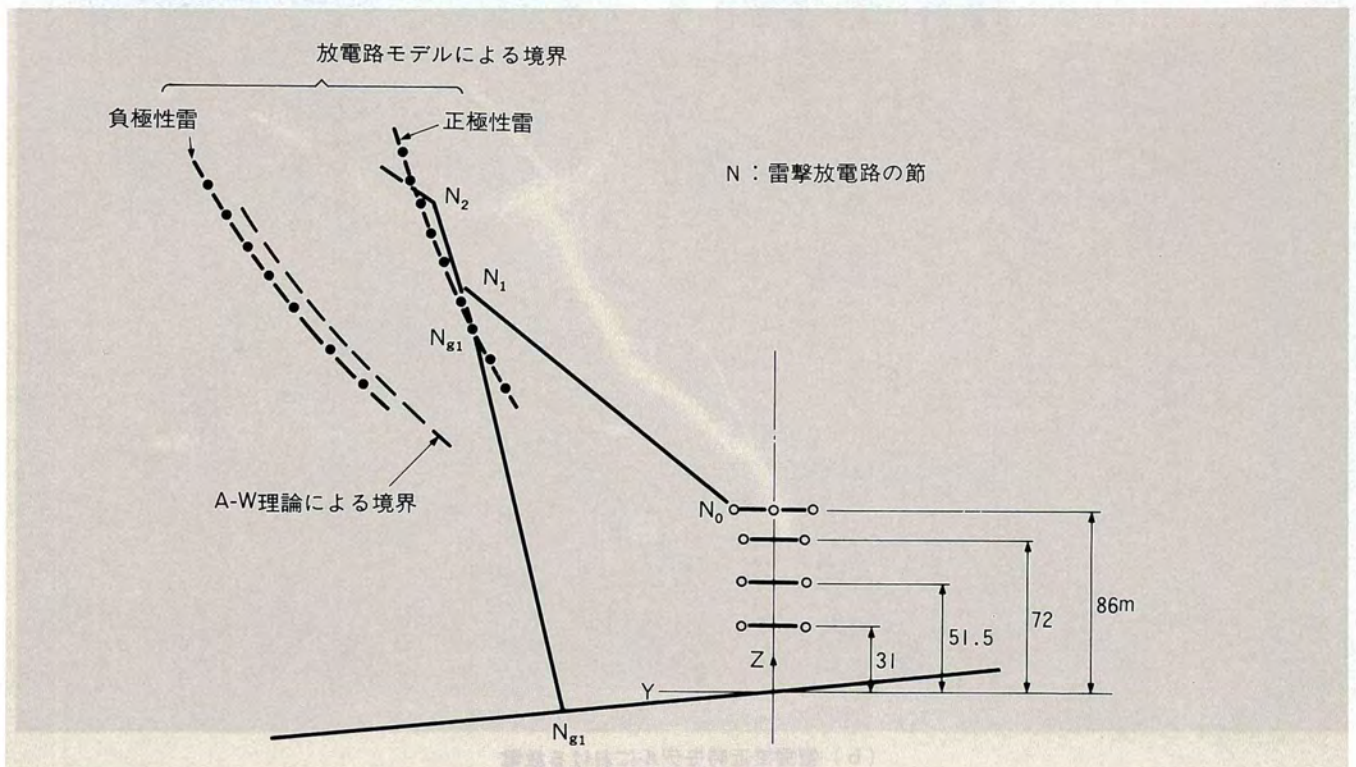
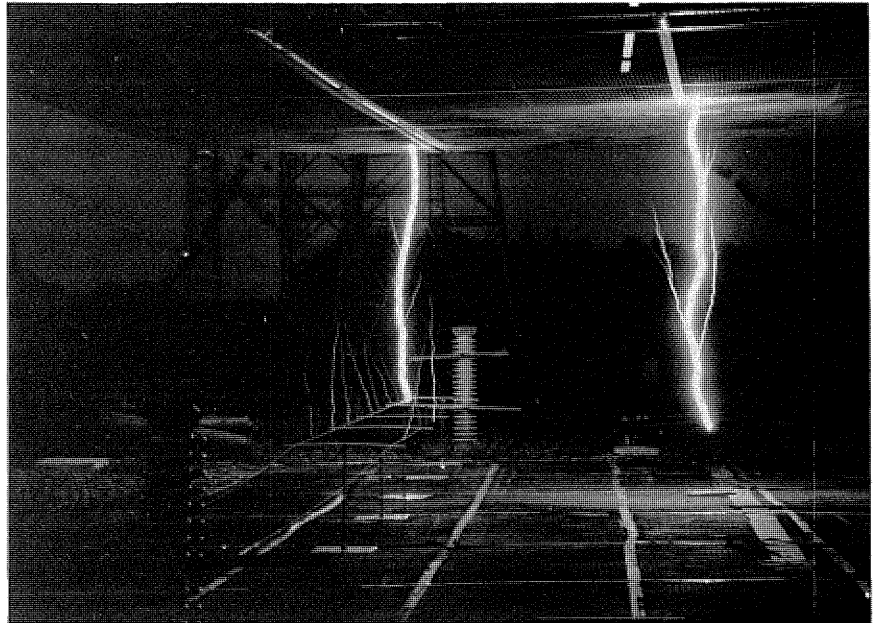


図4-1-3 雷しゃへい理論と自然雷撃との比較(赤城UHV試験線、昭和56年7月)

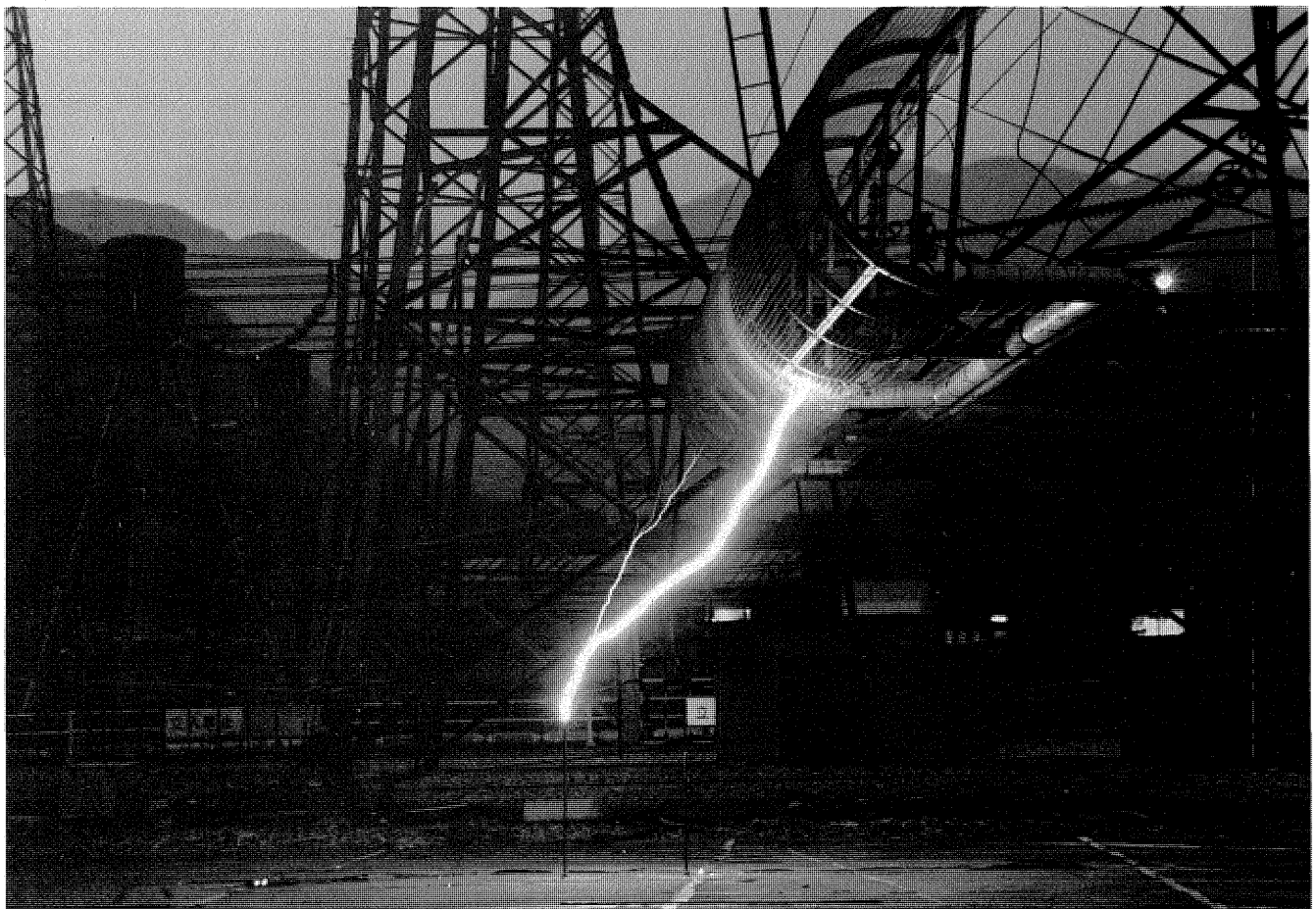
図4-1-7は、高さ200mの高鉄塔による雷しゃへい効果を示したものである。雷しゃへい効果は雷雲の地上高の影響を受け、雷雲が低いほどしゃへい効果は著しく、一様雷雲下では、500m離れた高さ150mの鉄塔までしゃへいできること、また、雷雲が接近してくる場合には、風上の100m離れた高さ100mの鉄塔までしゃへいできることを示している。

本実験は、冬季雷性状と比較すると、表4-1-1に示すように、極めて強い雷を模擬していることになる。

今後、自然雷との等価性をさらに検討しつつ、冬季雷に対するしゃへい理論を構築していく予定である。



(a) 一様雷雲下モデルにおける放電



(b) 雷雲接近時モデルにおける放電

図4-1-4 雷しゃへいモデル実験状況

鉄塔高さの差 / 高鉄塔と雲底間の距離 ($\Delta h / L$)

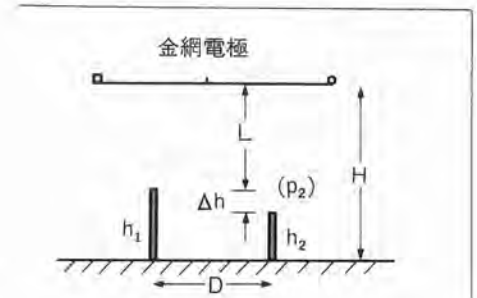
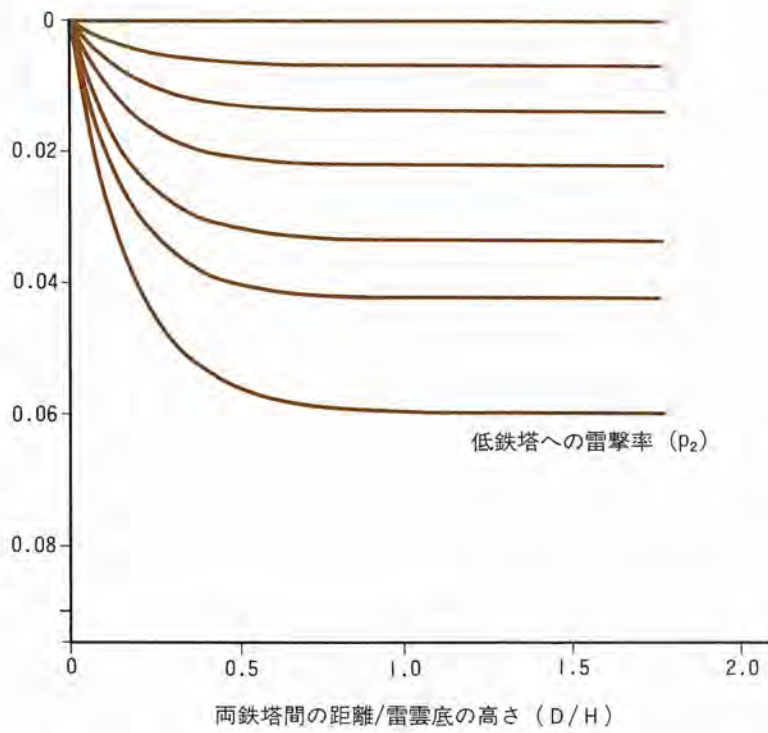


図4-1-5 二つの鉄塔(棒電極で模擬)への雷撃率の関係(一様雷雲下)

鉄塔の高さの差 / 高鉄塔と雲底間の距離 ($\Delta h / L$)

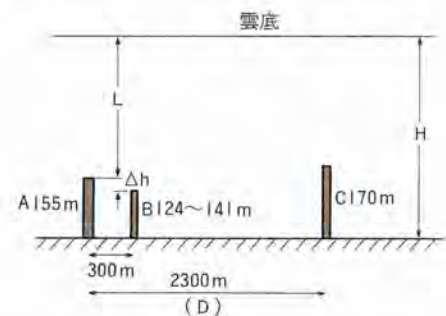
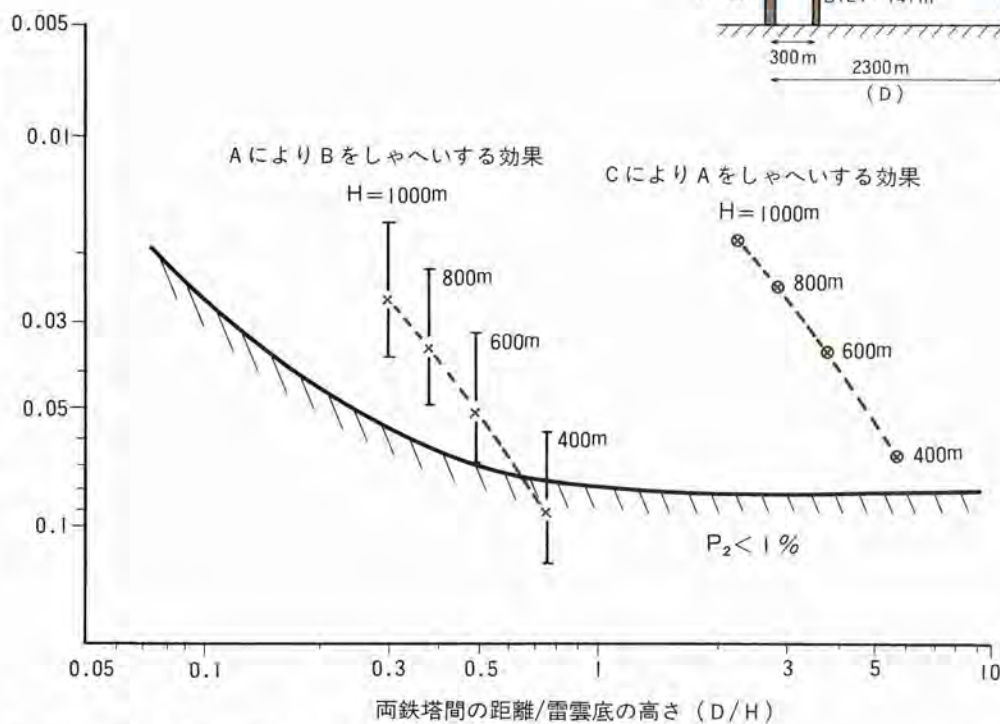


図4-1-6 高鉄塔のしゃへい範囲(冬季雷実績との比較)

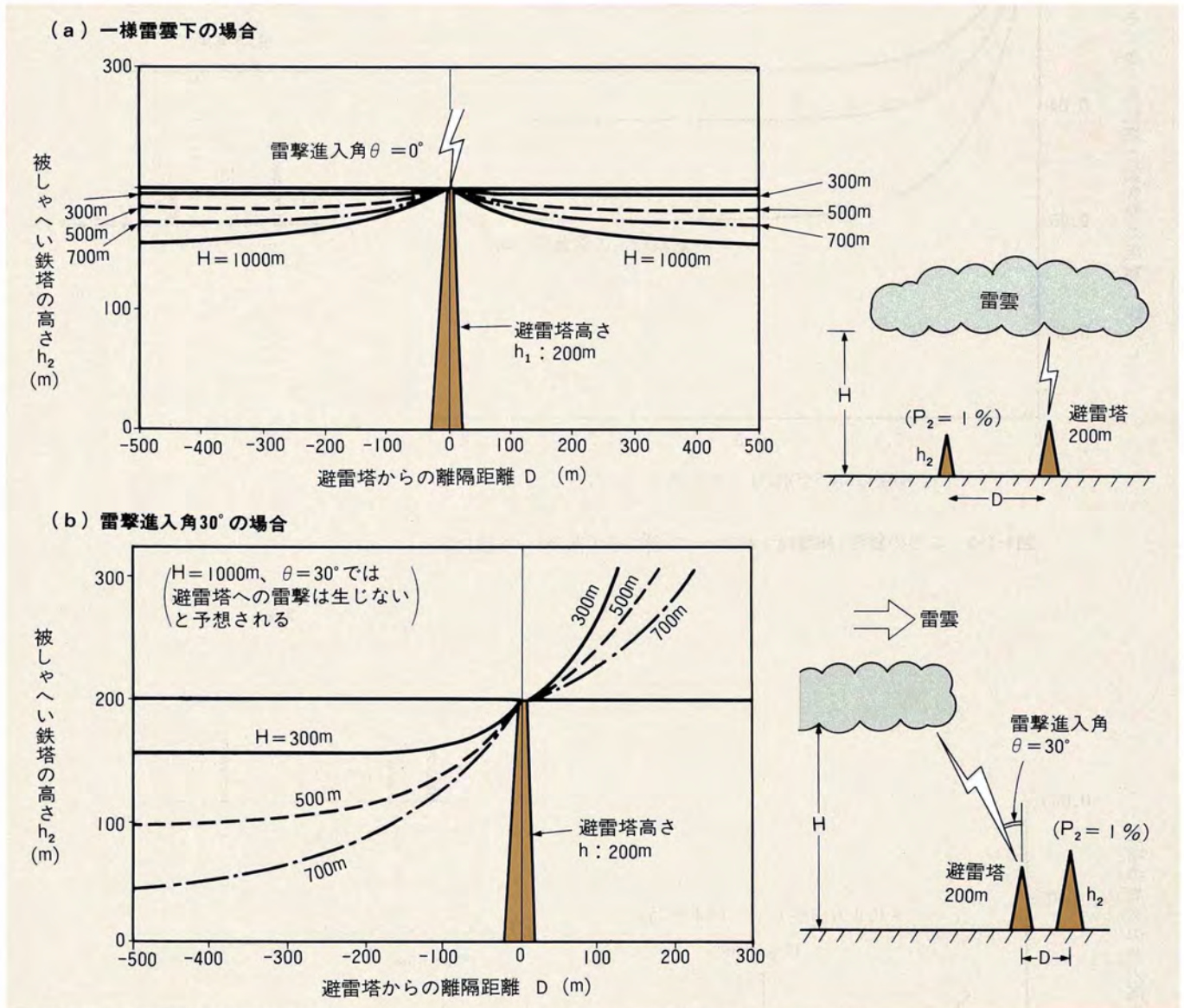


図4-1-7 200 m 避雷塔でしゃへいできる鉄塔高さの計算例(被しゃへい鉄塔の雷撃率 $P_2 \approx 1\%$)

表4-1-1 モデル実験と自然冬季雷との比較

項目	冬季雷	モデル実験	冬季雷/モデル実験
リーダの向き	上、下	上、下	—
リーダの進展状況	ステップ	連続	—
リーダの速度	$\sim 5 \times 10^5 \text{m/scc}$	$(5 \sim 10) \times 10^5 \text{m/scc}$	1
電流 (peak)	$\sim 20 \text{kA}$	$\sim \text{数kA}$	10
リーダの電荷密度	$\sim 10^{-1} \text{c/m}$	$\sim \text{数}10^{-3} \text{c/m}$	100
雲底	数100~数1000m	1 ~ 5 m	100 ~ 1000
雷撃時の地上電界	10~15kV/m 35~170kV/m	300~500kV/m	1/100, 1/10~1/2

4-2 雷サージの伝搬特性

架空地線の径間または鉄塔に落ちた雷は、雷サージとして径間あるいは鉄塔を伝搬し、その際、コロナ放電を伴って変歪・減衰しつつ、鉄塔の電位を上昇させ、逆フラッシュオーバを発生させる。

雷サージの伝搬特性は、線路のサージ特性、接地抵抗のサージ特性および鉄塔のサージ特性に大別される。

これら特性は逆フラッシュオーバ発生の可否を判定する際の基礎となるものである。当所では、機会あるごとに、実送電線のサージ特性試験を実施し、データを蓄積している。

1 線路のサージ特性

線路に発生する雷サージは、線路のサージ特性、すなわち、線路定数（サージインピーダンス、結合率）にしたがって線路上を伝搬する。電力線のサージインピーダンスは、導体数が多いほど低く、架空地線が存在した方が無い場合よりも低い。例えばUHV試験送電線の場合 $810\text{mm}^2 \times 6$ で $310 \sim 320$ オーム、 $810\text{mm}^2 \times 10$ で $295 \sim 300$ オーム程度である。

また、結合率は、上相で $0.32 \sim 0.30$ 、中相 $0.25 \sim 0.23$ 、下相 $0.20 \sim 0.18$ 程度である。雷サージが架空地線のコロナ開始電圧を越えた場合には、サージはコロナ放電を伴うこととなり、伝搬するにつれて波形の減衰と変歪を生じる。また電力線との間に結合率の増大をもたらす。

図4-2-1は当所塩原実験場において実測した単導体（ 330mm^2 ACSR）電力線のサージ伝搬特性で、コロナ開始電圧（ 303kV ）の最大5倍～5.5倍の波高値を有する電圧を印加した実験結果の一例である。図中①

→④とサージが進行するに従って波形が変歪し、大きさが小さくなるのがわかる。

コロナを伴う雷サージ伝搬は、非線形現象であるため、雷サージ波形や線路条件等が実験条件が異なると変化し、その一般化

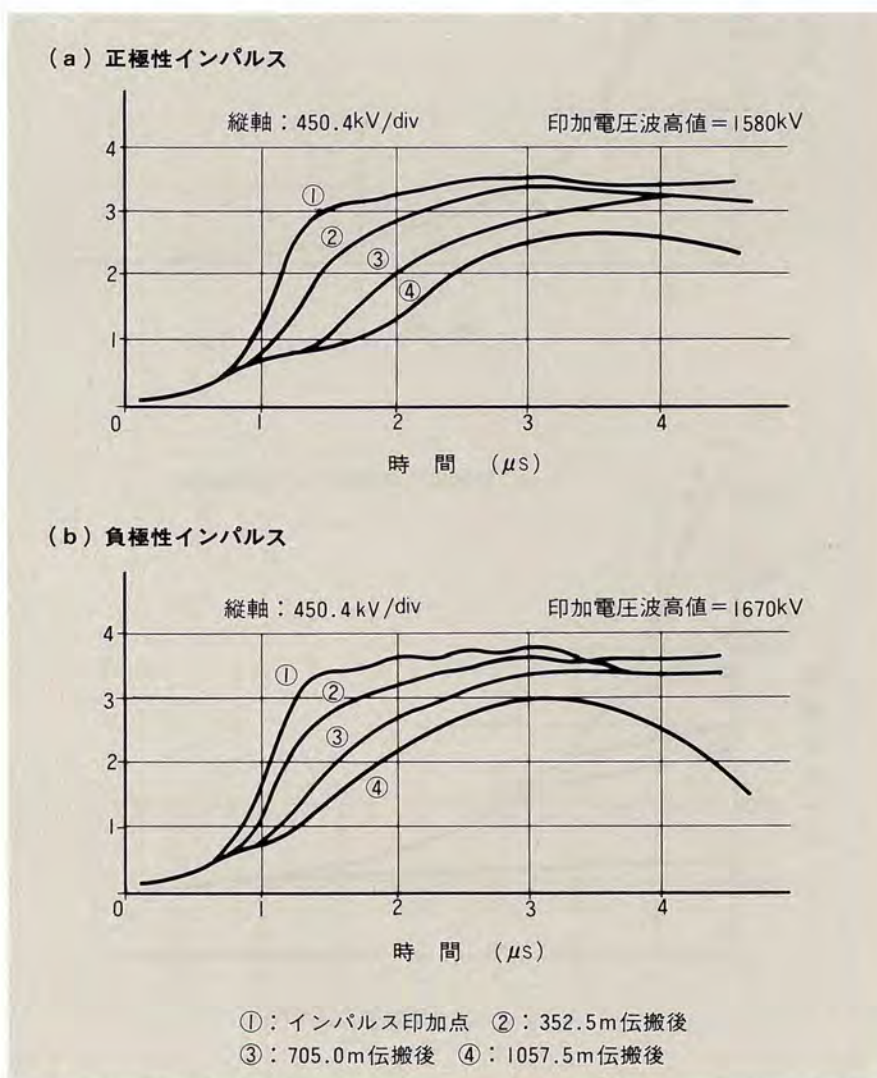


図4-2-1 雷インパルス進行波の伝搬距離による波形の変化(単導体)

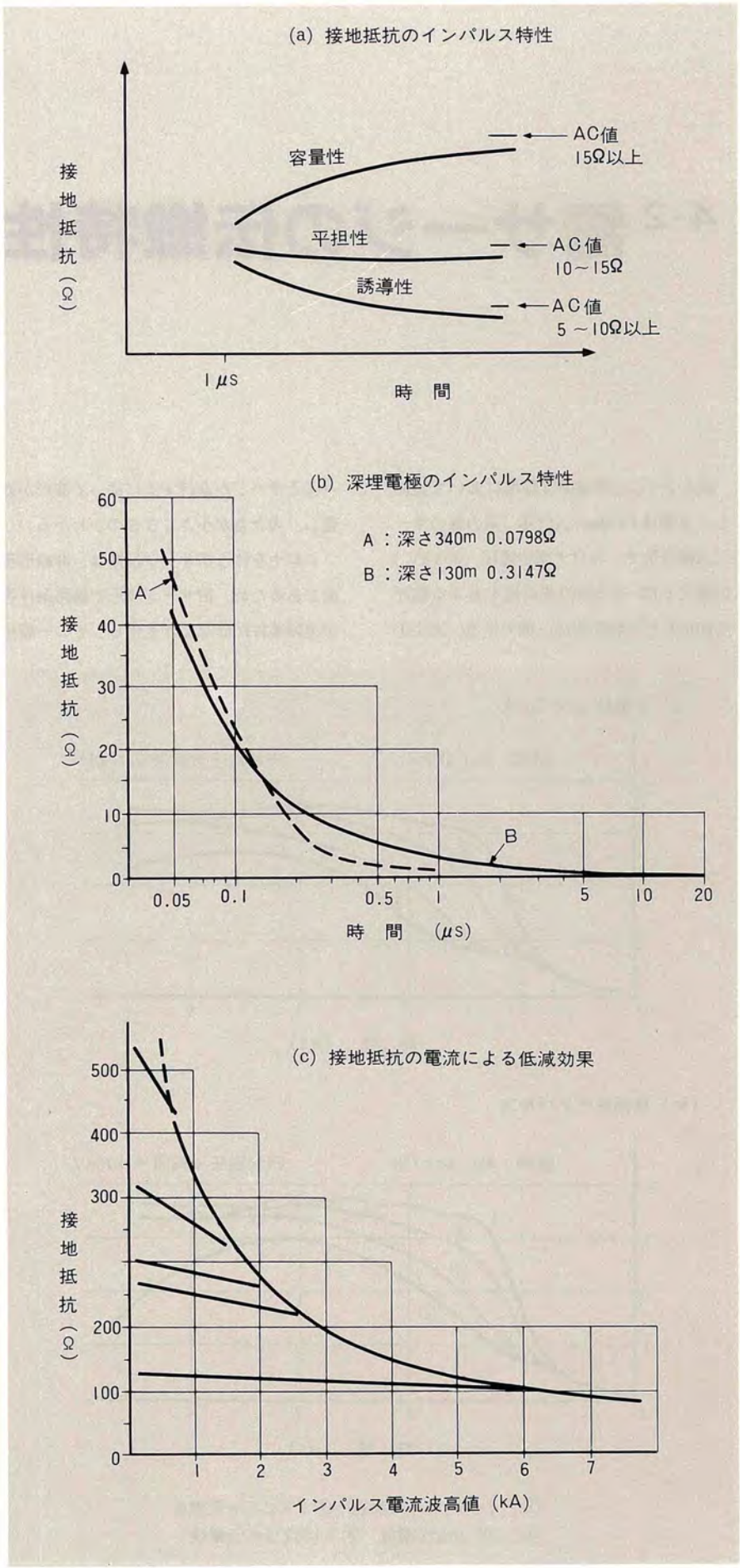


図4-2-2 接地抵抗のサージ特性

は極めて難しく、現在でも各所で研究が実施されている。当所では、電圧と、その電圧により発生するコロナ放電電荷量の関係を基本とする単導体系の伝搬方程式による数値解析で予測を行っている。しかし、使用するパラメータ値や架空地線と電力線間の結合の影響が考慮された多導体系のコロナを伴う雷サージの伝搬解析は今後の研究として残されている。

架空地線を伝搬する雷サージの減衰、変歪、結合率の増大等の現象は、いずれも逆フラッシュオーバを発生させにくくする方向に作用するため、これらの現象自体が、直接2回線同時事故発生の原因になるとは考えられない。しかし、間接的には、逆フラッシュオーバの発生に大いに関係があり、その現象を的確に把握することは、2回線事故の原因究明の上で重要である。

2 接地抵抗のサージ特性

塔脚接地抵抗値は、鉄塔あるいは架空地線径間雷撃時における鉄塔電位上昇に最も大きな影響を及ぼす要因である。

鉄塔塔脚の接地抵抗は、土壌の性質、接地電極・施工法などによって異なるが、そのサージの時間的特性は次の3つの型に大別できる(図4-2-2(a)参照)。

容量性：時間と共に徐々に上昇して定常値(AC値)に近づく。接地抵抗15オーム以上で現われる。

平坦性：時間的にはほぼ一定値となる。接地抵抗値10~15オームで現われる。

誘導性：時間と共に低下して定常値に近づく。接地抵抗5オーム以下でまれに現われる。

接地抵抗に関して解決すべき重要な課題は

(a) 短時間領域の時間特性

(b) 大電流による低減特性
 (c) 季節による変動
 である。

(a) 短時間領域の時間特性

図4-2-2 (b) は深埋電極の接地特性を示したものであるが、流入電流波頭長0.05マイクロ秒（1マイクロ秒は100分の1秒）に対し、抵抗値は数10オームの高い値から定常値1オーム以下の値に変化している。深埋接地の場合には、深埋電極のサージインピーダンスが初期にきくこととなり、このような傾向が現われたと考えられる。

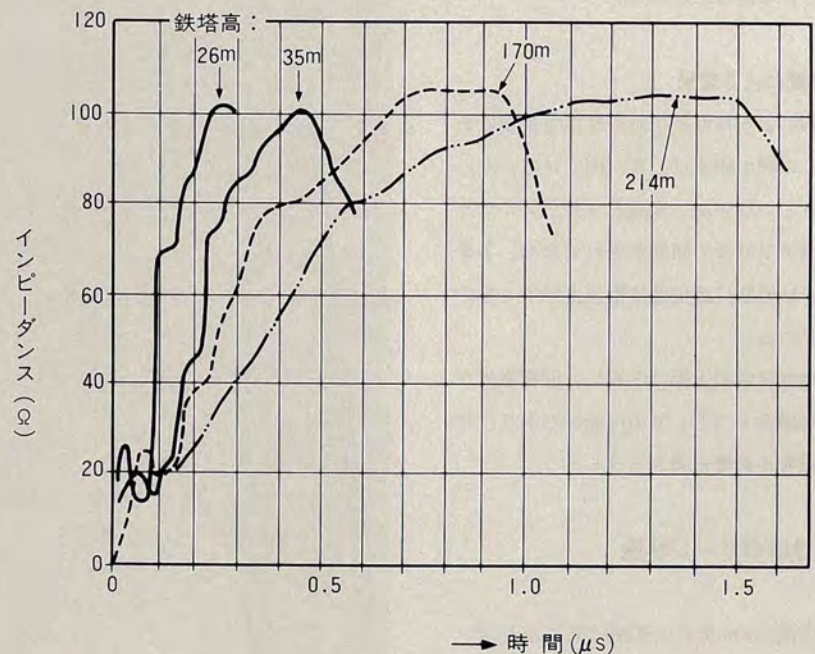
現在、鉄塔電位上昇計算には塔脚接地抵抗値として定常値が使われることが多い。比較的平坦な特性を有する場合は問題がないが、図4-2-2 (b) のように深埋電極やカウンターポイズ（埋設地線）によって定常値を下けている場合には、初期の過渡値が鉄塔電位上昇に大きな影響を与えるため、短時間領域の特性の解明が望まれている。

(b) 大電流による低減特性

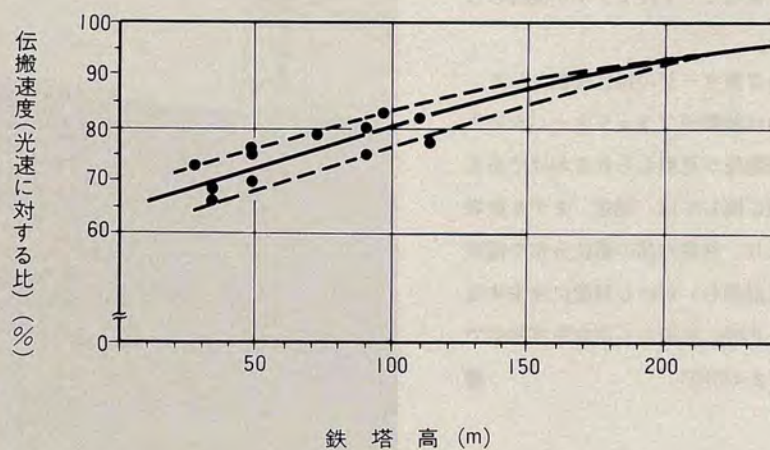
大電流を流入した場合、土中放電が発生し、接地抵抗は低減するため、その効果は、鉄塔電位上昇を抑制するように作用する。この特性を解明することは、精度の高い鉄塔電位上昇予測と2回線雷事故原因的な把握に必要なものである。

図4-2-2 (c) は、当所塩原実験場で求めた単独の模擬鉄塔塔脚に8,000 A までの電流を流入したときの接地抵抗の低減特性である（流入電流波頭長2マイクロ秒）。接地抵抗値の高いものほど比較的小さな電流で低減特性が現れるが、電流と接地抵抗の関係には、小電流すなわち土中放電の発生しない電流に対する接地抵抗とは無関係の一つの限界が存在することがわかる。

大電流特性についての研究も、世界的に関心のあるところで、放電を含む非線形現



(a) 鉄塔のインピーダンス特性



(b) 鉄塔のサージ伝搬速度

図4-2-3 鉄塔のサージ特性

象であることから、電流、電圧のヒステリシス曲線をもとに、接地特性を説明しようとしている例などがある。

(c) 季節による変動

季節による接地抵抗値の変化も重要である。この種の研究は、我が国ではほとんど行われていないが、未発表ながらノルウェー、南アフリカで研究がされており、冬季あるいは乾期に抵抗値は相当上昇しているといわれている。

接地抵抗値の上昇は冬季に2回線事故が多い原因の1つとしての可能性があり、今後の研究が必要と考えられる。

3 鉄塔のサージ特性

鉄塔高214mまでの実測結果によれば、鉄塔インピーダンスは、鉄塔高によって変化せず最大値は100オーム程度である。また、サージの伝搬速度は、鉄塔が高い程上昇し、高さ100mの鉄塔で光速の80%程度となる(図4-2-3参照)。

鉄塔のサージインピーダンスに関しては、最近電気学会などで4段モデルが検討されている。

このような雷サージの特性を統合して、径間あるいは鉄塔逆フラッシュオーバをひきおこす雷過電圧が見積もられるわけであるが、この点に関しては、現在、モデル鉄塔の実験により、鉄塔内部の電位分布や電流分布などを計測し、がいし装置に発生する雷過電圧を正確に見積もる研究を実施中である(図4-2-4参照)。

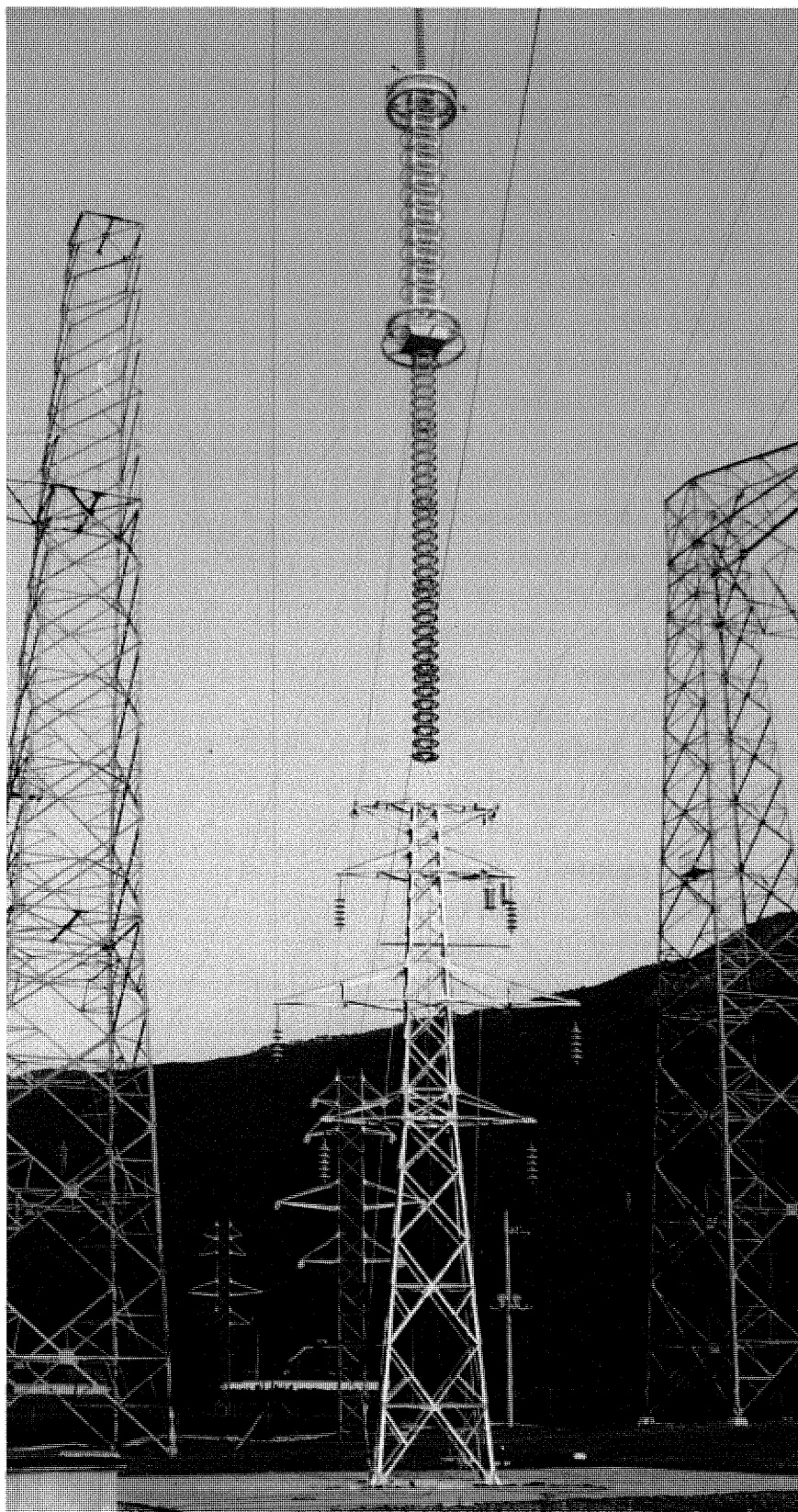


図4-2-4 モデル鉄塔(高さ15m)を用いた鉄塔サージ特性の実験(UHV塩原実験場)

4-3 がいし装置のフラッシオーバ

雷によって発生した過電圧は、架空地線と導体間、あるいはがいし装置の絶縁を破壊し事故となる。

1 アークホーンフラッシオーバ特性

アークホーンフラッシオーバ電圧は、棒-棒ギャップのフラッシオーバ特性で代表できる。

現行のフラッシオーバ特性は、標準雷インパルス（波頭が1マイクロ秒で波尾が50マイクロ秒）に対するものであり、波尾が10マイクロ秒程度の短波尾波など非標準波に対しては、波形係数 k を考慮して、フラッシオーバ電圧が見積られている。

しかし、実際にがいし装置に発生する雷過電圧は、実験で使用するインパルス波形とは違って複雑な波形をしている。

このため、当所では、急峻な立ち上がり立ち下がりを持つ電圧波形のフラッシオーバ特性を、実験によって明らかにするとともに気中ギャップの放電機構を基にしたリーダモデルを開発した。

この手法は、フラッシオーバ以前の放電前駆現象を時間を追ってシミュレートしていくものであり、電圧波形が与えられれば、フラッシオーバ時間のみならずギャップ中のリーダ進展状況、放電電流まで推定可能である(図4-3-1(a))。

図4-3-1(b)は、リーダモデルによる電圧の大きさとフラッシオーバ時間との関係($V-t$ 曲線)を示したものであり、実験

結果と極めてよく一致することがわかる。

2 多相フラッシオーバ

雷過電圧が大きい場合には、がいし装置が1相のみならず、複数相フラッシオーバし、多相事故となる。これに対する現在の解析手法は、がいし連を1相ずつ逐次フラッシオーバするか否かを判定していくものである。

しかし、鉄塔に設置された6相のがいし装置のホーンには、雷過電圧が印加されると同時に、ストリーマリーダが伸びるはずであり、1相のホーンがフラッシオーバしても、ある程度伸びたリーダは、停止しないでそのままギャップを橋絡し、フラッシオーバを発生する可能性がある。このような現象を考慮した場合に、多相フラッシオーバの発生頻度は、現行計算法による見積りよりも多くなるのではないか、という課題が提起される。

この問題に関し、当所では、前述のリーダモデルによる理論的検討と2組のギャップを対象とした実験を実施している。

図4-3-2は、電力線2相のアークホーンを模擬した2組の棒-棒ギャップ中の放電進展を示したものであり、一方のギャップがフラッシオーバすると、他方のギャップ中では放電が停止したり、或いは再び進展する状況がわかる。このような実験を繰返すことにより、2組のギャップが同時にフラッシオーバする50%フラッシオーバ電圧

の特性を示したものが図4-3-3である。2組のギャップのギャップ長の差(絶縁差)が大きくなると、同時フラッシオーバ電圧は単独ギャップのフラッシオーバ電圧より上昇する。この上昇の割合は電圧波形によって異なり、標準雷インパルスより短波尾波の方が小さい。すなわち、多相にわたる同時フラッシオーバは、雷によって鉄塔に発生する短波尾波に対して生じやすいことになる。

このことは、標準雷インパルス実験に基づいて設計された不平衡絶縁方式(回線間の絶縁強度に差を設けて事故を低絶縁側の回線だけに限定しようとする耐雷方式)では、予想以上に事故が発生しうることを意味しており、不平衡絶縁方式を見直す必要があることを示唆している。

3 特異条件下のフラッシオーバ特性

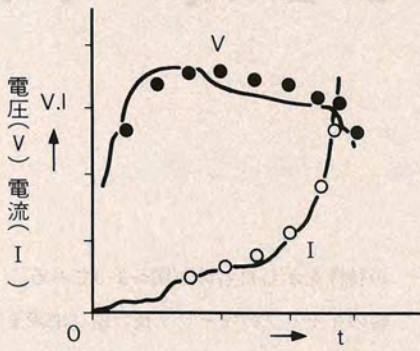
現行耐雷設計では、がいし装置のフラッシオーバに関与する気象条件として、気圧、温度、降雨を考慮している。

冬季雷のように雲底が低い雷雲の場合には、送電線が雷雲の中につつま込まれ、雷雲中の電界やイオンによってがいし装置の絶縁強度が下がる可能性がある。

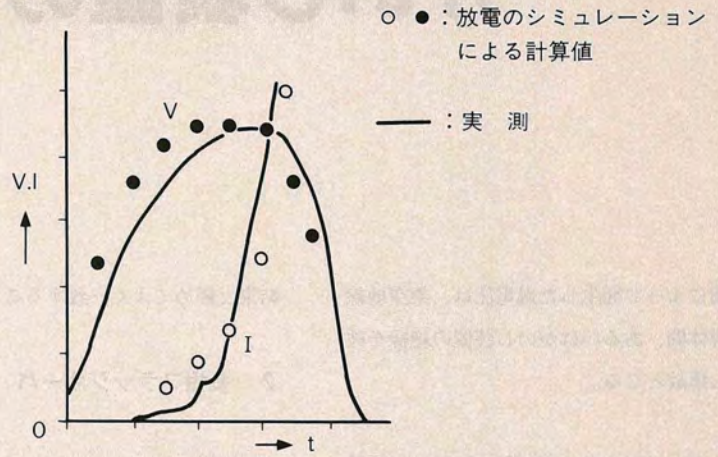
これを検証するために、当所 UHV 霧中実験棟で、イオン流場でのフラッシオーバ実験を実施した。

図4-3-4は地上1.5mにがいし装置を設置し、その上方に多数の針状電極を付けた

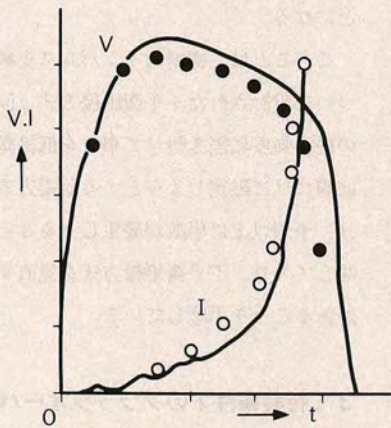
(a) 実測とシミュレーションによる電圧・電流波形の比較



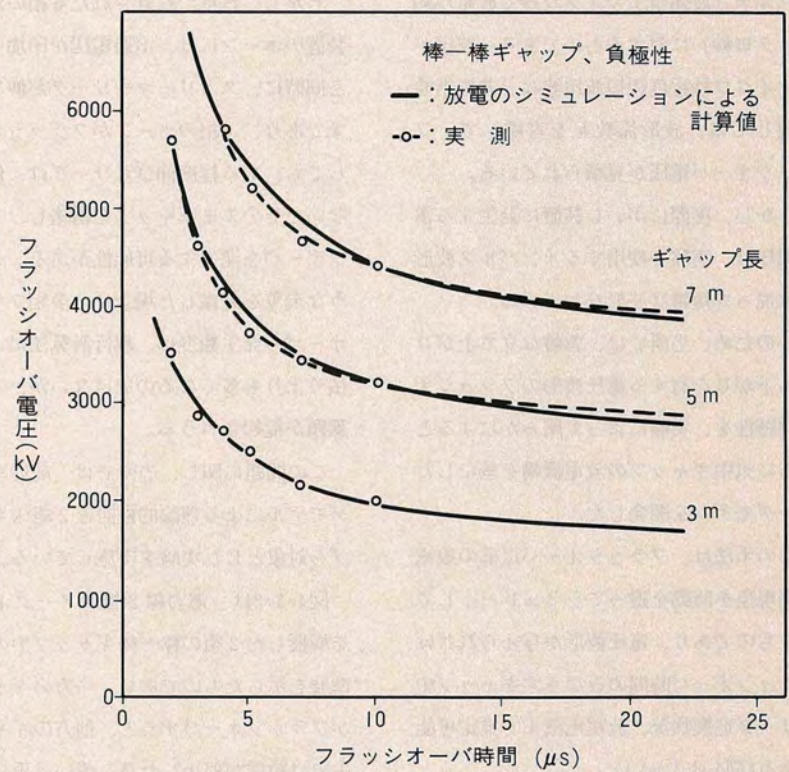
(a) ギャップ長 $d = 2\text{m}$ 、 1290kV
 $V : 348\text{kV/div}$
 $I : 50\text{A/div}$
 $t : 2\ \mu\text{s/div}$



(b) ギャップ長 $d = 4\text{m}$ 、 3086kV
 $V : 696\text{kV/div}$
 $I : 200\text{A/div}$
 $t : 1\ \mu\text{s/div}$



(c) ギャップ長 $d = 6\text{m}$ 、 3812kV
 $V : 696\text{kV/div}$
 $I : 200\text{A/div}$
 $t : 2\ \mu\text{s/div}$



(b) 棒-棒ギャップのフラッシュオーバー電圧-時間(V-t)特性(負極性)の計算値と実測値との比較

図4-3-1 リーダモデル法

(a) フラッシュオーバーせず(放電停止)

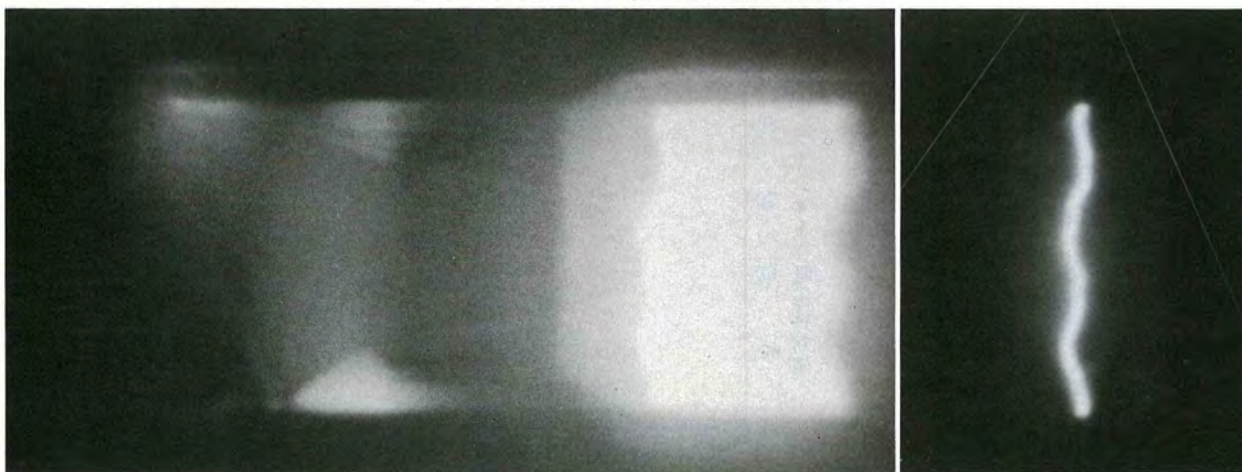


イメージコンバータカメラ

時間 →

静止カメラ

(b) フラッシュオーバ(放電停止後再び進展)



イメージコンバータカメラ

時間 →

静止カメラ

図4-3-2 2組の棒-棒ギャップ中の放電進展状況(2組のギャップのうちの一方向のギャップを示す)

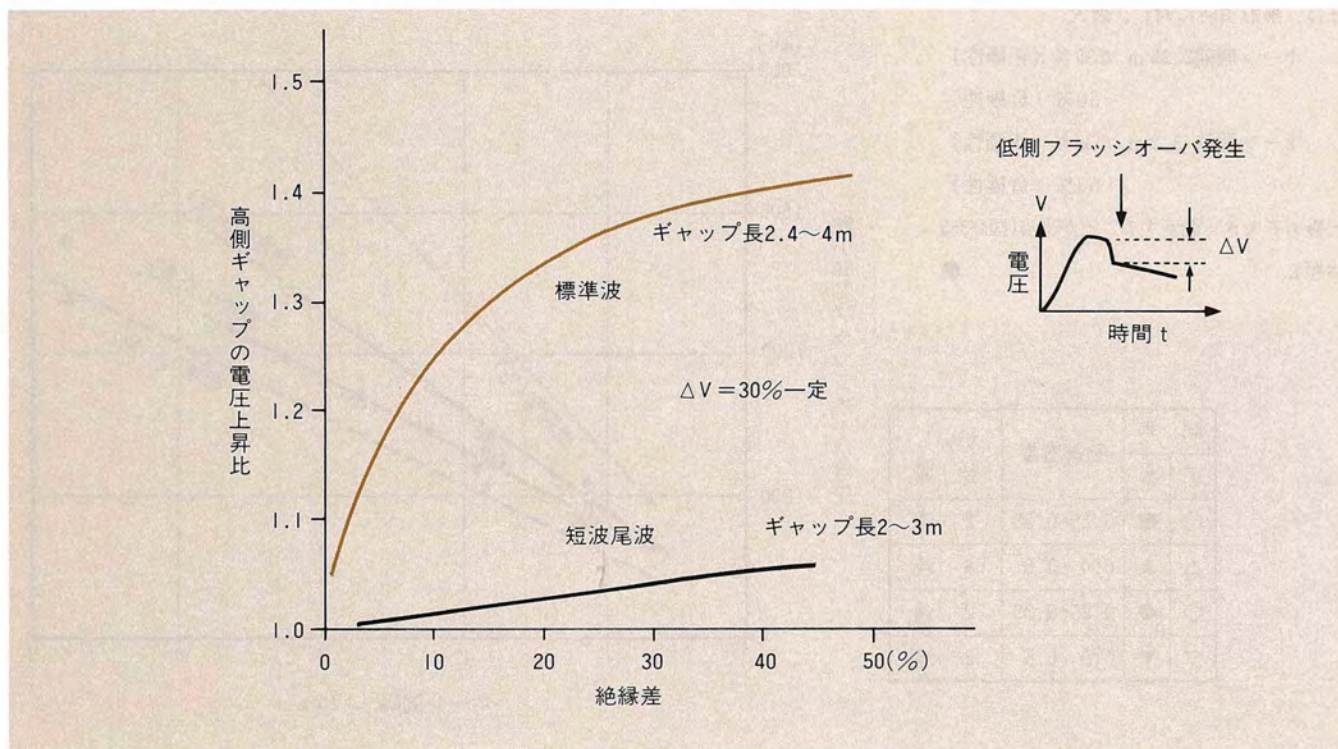


図4-3-3 2組のギャップの絶縁差と同時フラッシュオーバ電圧の上昇比の関係

平板電極を設け、直流電圧によって、電界とイオンシャワーを発生させ、がいし装置に雷インパルスを印加して、そのフラッシュオーバー特性を調べたものである。

このような条件下でのフラッシュオーバー電圧は、イオン密度が多くなるに従って低下する。冬季雷雲中のイオン密度を $10^{-5} \sim 10^{-3}$ クーロン/ m^3 と想定すると、20~50%程度の低下率となる。

また、がいし装置のフラッシュオーバー特性に大きな影響を与える要因として、雪がある。当所では、東北電力と共同で米沢実験場において、交流、直流、開閉インパルス、および雷インパルスに対する冠雪がいし連の耐電圧特性を検討してきた。

この結果、雷インパルスに対する、がいし連のフラッシュオーバー電圧は、雪質に左右され、雪の密度が高くなるほど低下し、ホーン間隙に比例して上昇することを明らかにした。

冠雪時の雷インパルスフラッシュオーバー電圧は、無冠雪時に対し、最大、

- ホーン間隙2.25 m で35% (正極性)
- 50% (負極性)
- ホーン間隙 3.2 m で34% (正極性)
- 53% (負極性)

と極めて大きく低下することがある(図4-3-5参照)。

記号		冠雪密度	がいし装置
○	●	0.25~0.35	2 連
△	▲	0.4 ~0.5	4 連
◇	◆	0.25~0.35	2 連
▽	▼	0.5 ~0.6	2 連

図4-3-5 冠雪がいし装置の雷インパルス特性

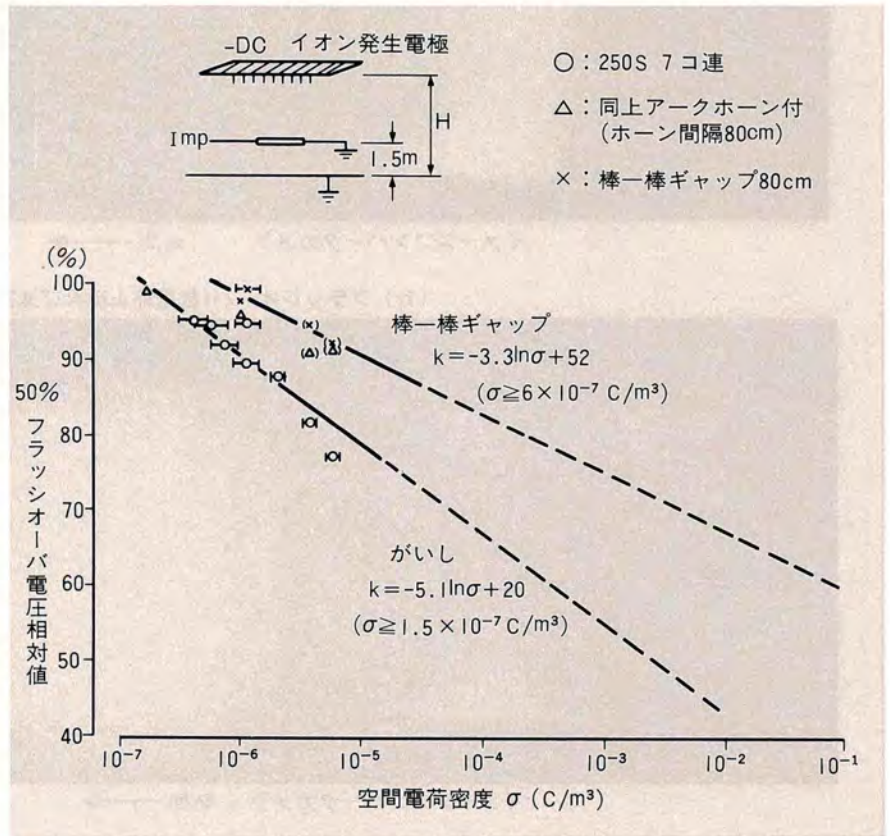
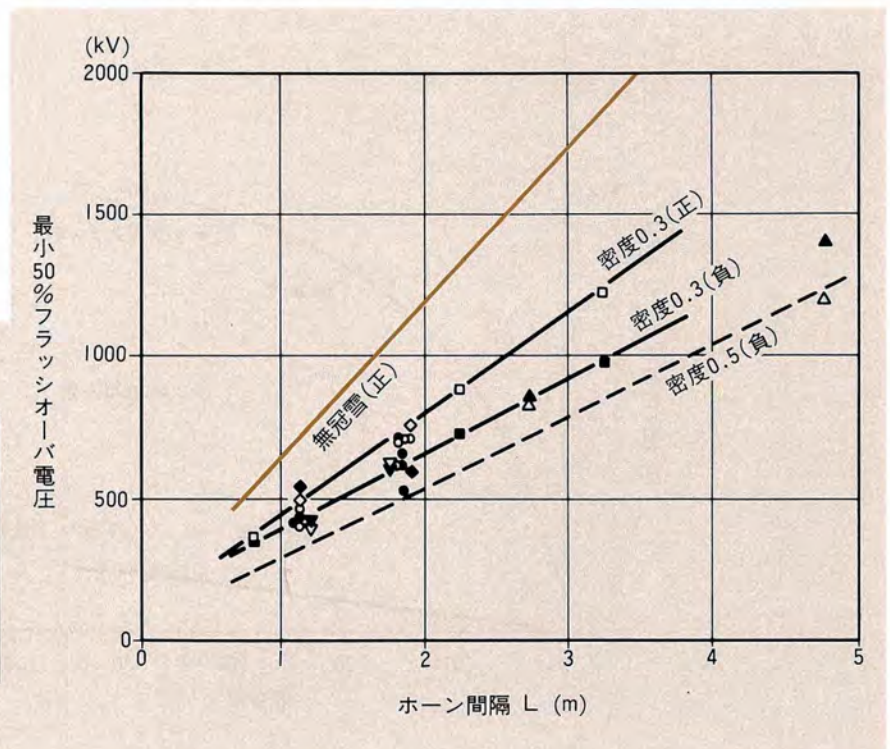


図4-3-4 がいしおよび空中ギャップの絶縁強度に及ぼす空間電荷の影響



4-4 2回線同時事故原因の検討

これまでの雷観測やモデル実験および理論研究によって冬季雷による2回線送電線事故の原因を検討した結果を紹介する。

冬季雷による2回線事故の原因として

- (1) 大きな雷撃電流
 - (2) 高い接地抵抗
 - (3) 同時逆フラッシオーバ
 - (4) 多地点同時雷撃
 - (5) 異常大気条件下の耐電圧低下
 - (6) 風によるアークの吹き流れ
- を想定し、これらについて検討する。

1 大きな雷撃電流

送電線に大きな雷撃電流が流れ込むと、がいし装置が、次々と逆フラッシオーバし、2回線事故になる可能性がある。

冬季雷の観測結果によれば、雷撃電流波高値の発生確率は、従来の夏季雷と大差ない(図3-2-2参照)。

現行の雷事故率予測手法による苛酷な条件下の500kV送電線での計算例によれば、2回線事故率、0.184件/100km年以下(実績1.58)、4線以上の事故率0.012件/100km・年以下(実績0.006)と推定される。

従って、たまたま、大きなかつ急峻な電流の雷撃があったと考えれば、事故原因として考えられる。

2 高い接地抵抗

接地抵抗が高いと、逆フラッシオーバが発生しやすい。

例えば、冬季の雷撃時に接地抵抗値が100オーム程度になっていたとすると、10オームの場合に比べ、総事故率は6倍、2回線事故率は12倍、4線以上の事故率は25倍となる(図4-4-1参照)。

冬季の接地抵抗が高くなるか、あるいは4-2で述べたように短時間の過渡的接地抵抗が逆フラッシオーバに関与するならば、冬季雷の原因として有力である。

現在、冬季における接地抵抗特性は不明である。

3 同時逆フラッシオーバ

鉄塔あるいは径間に雷撃があつて、鉄塔の電位が上昇した場合、アークホーンには、同時に放電(リーダ)が伸び出し、一線がフラッシオーバしても他の線では残留電圧によって、放電が停止せず、多相事故に波及する可能性がある(図4-3-2(b)参照)。

当所で開発したリーダ法および雷電圧を模擬した短波尾波の実験結果によれば、従来の設計予測値よりもフラッシオーバが発生しやすいとの結論を得ている(図4-3-3

参照)。しかし、4線以上の地絡事故に関しては更に検討を要する。

4 多地点同時雷撃

送電線の複数個所に、同時に雷撃があり、多線がフラッシオーバする現象で、冬季雷観測によって、全雷撃のうち9%が多地点同時雷撃で、水平距離2km、高さの差50m以内で発生することが検証されている(図4-4-2参照)。

雷撃電流の大きさにも依存するが、同時雷撃時には、雷エネルギーも分散することが予想され、たまたま、3線地絡程度までは発生しうるのであろうが、4線以上の事故は、この原因のみでは説明しがたい。

しかし、2回線事故原因としては有力である。

5 異常大気条件下の耐電圧低下

送電線がすっぽりと雷雲につつまれまると、雷雲中の電荷によりがいし装置の絶縁強度が低下する可能性がある。

また、がいしが冠雪した場合にも絶縁強度が低下する。

前者に関しては、4-3の1項で述べたように、雷雲中の電荷密度が 10^{-5} クーロン/m²、

10^{-3} クーロン/ m^3 でそれぞれ80%、50%程度にまで低下する可能性があることが明らかとなっている(図4-3-4参照)。冬季雷雲中の電荷密度は、正確な実測例はないが、 10^{-6} クーロン/ m^3 程度と推定されている。しかし、3-2の2項でも述べたように、冬季雷雲中に極めて大きな電荷が存在する場合には 10^{-6} クーロン/ m^3 よりも大きくなる可能性がある。

また、冠雪ががいしの耐電圧特性に関しても4-3の3項で述べたように、正極性雷で35%、負極性で50%程度低下する可能性があることが知られている(図4-3-5参照)。

現在の事故率予測計算においては、種々の検討の結果、冬季雷による2回線事故を説明するには、がいし装置の耐電圧を正常な場合の50%程度に見積らざるを得ないと

している(5章参照)。

上述のような異常大気条件下におけるがいし装置の耐電圧を考慮すれば、4線地絡も発生し得ることが説明でき、この現象は、事故原因として極めて有力である。

6 風によるアークの吹き流れ

電力線の下線あるいは地形によっては中線、上線に雷撃を受け、雷の放電路が風によって流され、多相が短絡される現象であり、吹き流れ現象は、自然雷では独立高構造物において観測されているが送電線での観測例はない。また、検討のベースとなる実験結果も無い。

アークの吹き流れにより、片線の3相が事故となることは考えられうるが、2回線

に波及することは、考えにくい。

7 まとめ

以上の検討結果をまとめたのが表4-4-1である。結論は次のようになる。

- (i) 上記(1)~(5)はいずれも事故原因として有力である。
- (ii) しかし、3相までの事故は、これら諸原因単独でも発生しうるが、4相以上のルート断につながる多相事故は、単独原因によって発生する可能性は少ない。
- (iii) したがって、4相以上の多相事故は、これら諸原因が重なって発生したか、あるいは現行耐雷設計で見落としている現象があると考えざるを得ない。

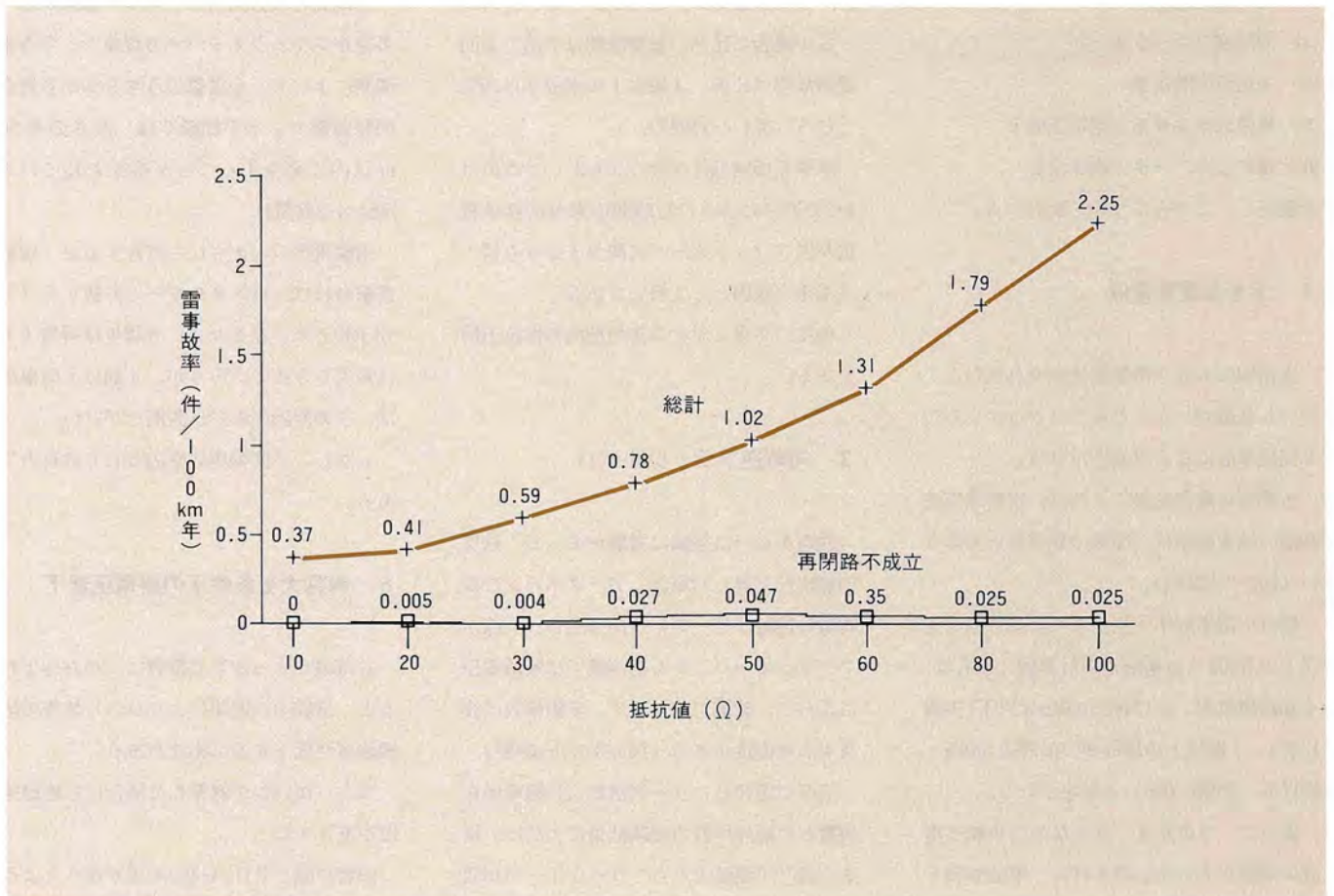
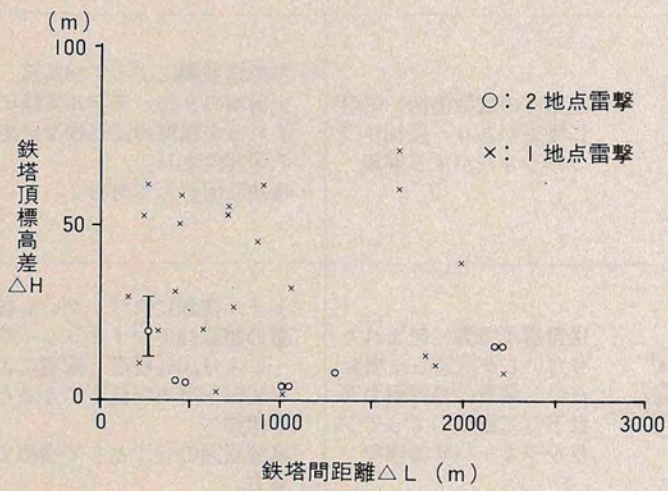


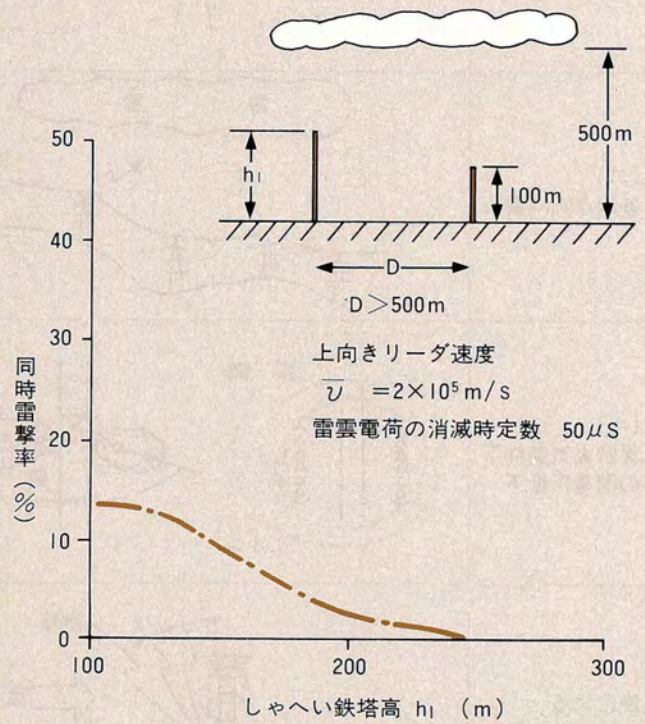
図4-4-1 雷事故率と接地抵抗との関係



(a) 送電鉄塔への同時雷撃



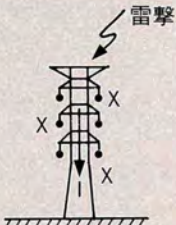
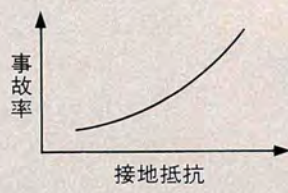
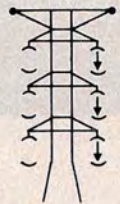
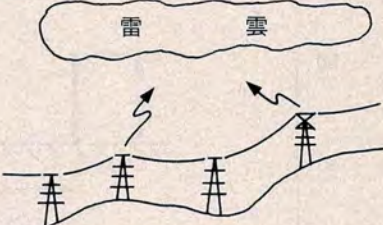
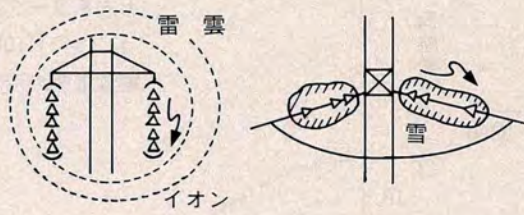
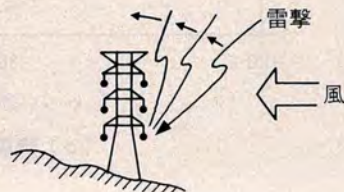
(b) 同時雷撃発生分布



(c) 理論計算例

図4-4-2 多地点同時雷撃

表4-4-1 冬季雷による2回線事故の原因

	事故原因	影響と評価
<p>(イ) 大きな雷撃電流</p>	 <p>雷撃</p>	<p>雷撃電流が大きいため、がいし装置が、次々と逆フラッシュオーバーする現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・冬季雷観測によれば、雷撃電流の大きさは従来と大差なし。 ・事故原因の一つと考えられる。
<p>(ロ) 高い接地抵抗</p>	 <p>事故率</p> <p>接地抵抗</p>	<p>冬季の接地抵抗或いは、短時間の過渡的接地抵抗が高いため、逆フラッシュオーバーが発生する現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実験および解析により、接地抵抗が100オーム程度で、10オームに比べ、総事故6倍、2回線事故12倍、4LG以上事故25倍となる。 ・事故原因としてかなり有力
<p>(ハ) 同時逆フラッシュオーバー</p>		<p>単一箇所の雷撃に対して同一鉄塔内のホーン間にストリーマが伸び出し、一相がフラッシュオーバーしても残留電圧により次々と多相がフラッシュオーバーする現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・リーダ法による理論解析および実験によれば現行設計予測値よりもフラッシュオーバーし易くなる可能性あり。 ・事故原因として評価するには更に検討を要す。
<p>(ニ) 多地点同時雷撃</p>	 <p>雷雲</p>	<p>送電線の複数箇所に同時に雷撃があり、多相がフラッシュオーバーする現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・冬季雷観測によって検証済。全雷撃の9%。モデル実験によれば全雷撃の20%程度発生の可能性あり。 ・事故原因として有力。
<p>(ホ) 異常大気条件下の耐電圧低下</p>	 <p>雷雲</p> <p>イオン</p> <p>雪</p>	<p>送電線が雷雲に包まれたりがいしが冠雪した場合、がいし装置の絶縁耐力が低下して雷撃によってフラッシュオーバーする現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・モデル実験により、がいし装置の絶縁強度がイオンシャワーにより20%程度、冠雪により50%程度まで低下することを確認 ・事故原因の一つとして極めて有力。
<p>(ヘ) 風によるアークの吹流れ</p>	 <p>雷撃</p> <p>風</p>	<p>下線（地形によっては上線）への雷撃路が風によって流され、多相が短路される現象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・送電線での実測値なし。 ・未検討。



第 章

雷事故率の予測手法

5

第5章 雷事故率の予測手法 ● 目次

柏江研究所 送変電部 絶縁研究室 専門役 井上 敦之

5-1 雷事故率の予測手法	51
---------------------	----

5-1 雷事故率の予測手法

送電線の耐雷性は、雷撃からフラッシュオーバーまでを模擬した雷事故率計算によって評価される。従来、雷事故率予測は、新設送電線を設計する際に、雷事故率が所定のレベル以内に収まるか否かの判定に使用されていたが、近年は、雷事故低減対策の評価にも使用されるようになった。

当所の送電線雷事故率予測計算プログラムのフローチャートを図5-1-1に示す。計

算法はしゃへい失敗については、Armstrong Whitehead 理論（A-W 理論と呼ばれる）、逆フラッシュオーバーについては鉄塔電位上昇法（Tower Potential Rise 法、略して TPR 法）を基にしており、送電線耐雷設計ガイドブックにおいて推奨されている手法と大綱では一致している。

本プログラムにより、従来の夏季雷に使用した各種パラメータで冬季雷の被害を受

けた送電線の事故と比較すると、

- ・全事故率が実績の約 1/10 と、小さな値である
 - ・2 回線事故の比率が 20% と極めて低い
 - ・5LG、6LG 事故が皆無である
- など、事故実態と相違する結果が得られる（図5-1-2参照）。

このため、暫定的に雷事故に関与する諸現象および理論は、夏季雷を踏襲することとし、各種パラメータを再編成しかつ特殊現象を導入して、冬季雷事故実績を説明できるプログラムを開発した。

具体的には、冬季雷に対して

- (a) 上向き雷撃
- (b) 同時フラッシュオーバー
- (c) 強雷地域と弱雷地域
- (d) アークホーンフラッシュオーバー電圧の低下
- (e) 大地落雷密度補正

の各項目を考慮している。

計算に使用されるパラメータを夏季雷に対するものとあわせて表5-1-1に示す。また、図5-1-2はこのような前提条件の下で計算した結果も示している。これは一例であるが設計電圧階級、絶縁方式の異なる他の送電線に対しても、事故実績にかなりよく一致する結果が得られる。

本手法に用いられた各仮定は、現在、実測や実験等により、その妥当性を検討しているところである。また、冬季雷性状の事故率予測法への組み込み方も改良する必要があり、さらに集大成する予定である。 ●



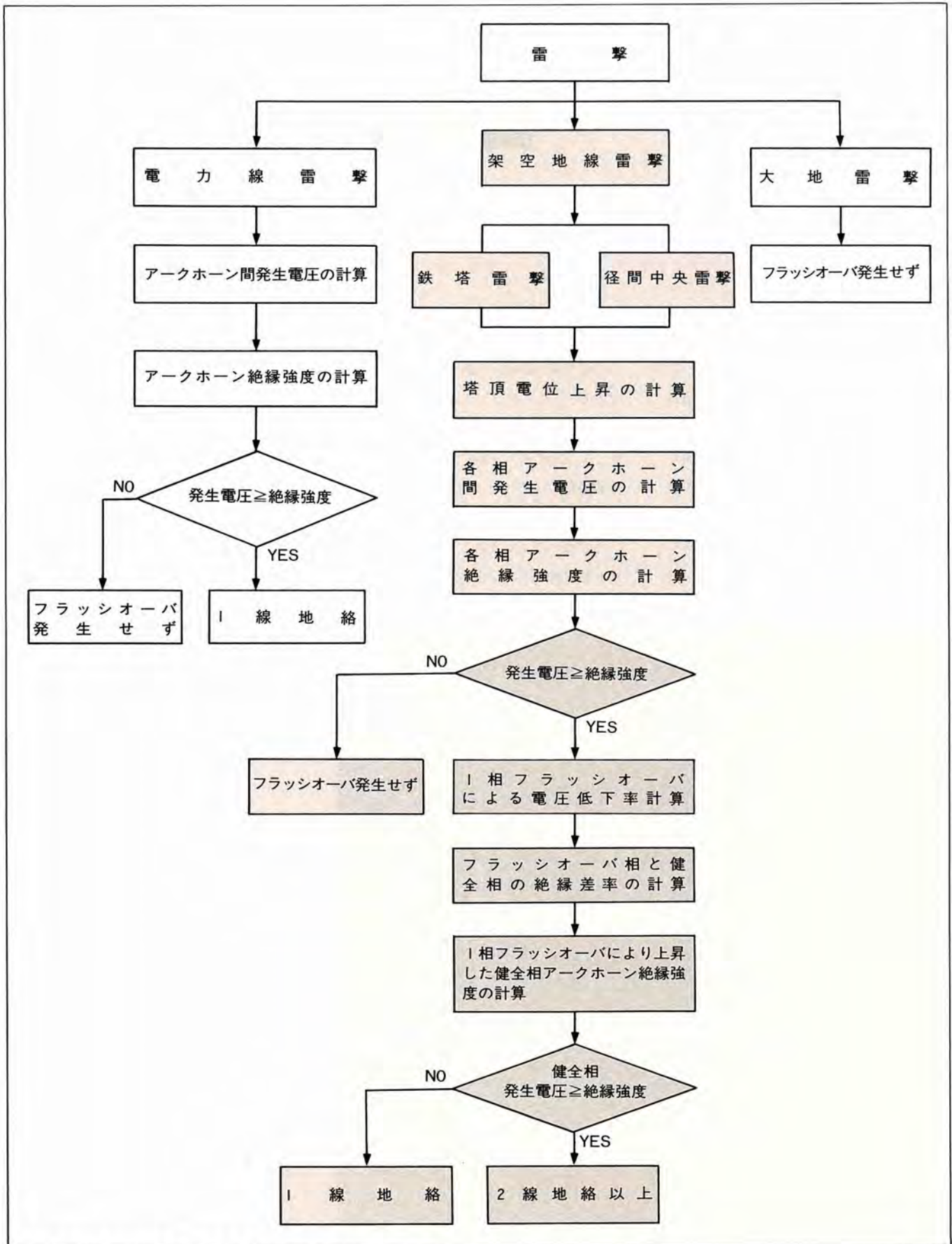


図5-1-1 送電線雷事故率予測計算プログラムのフローチャート

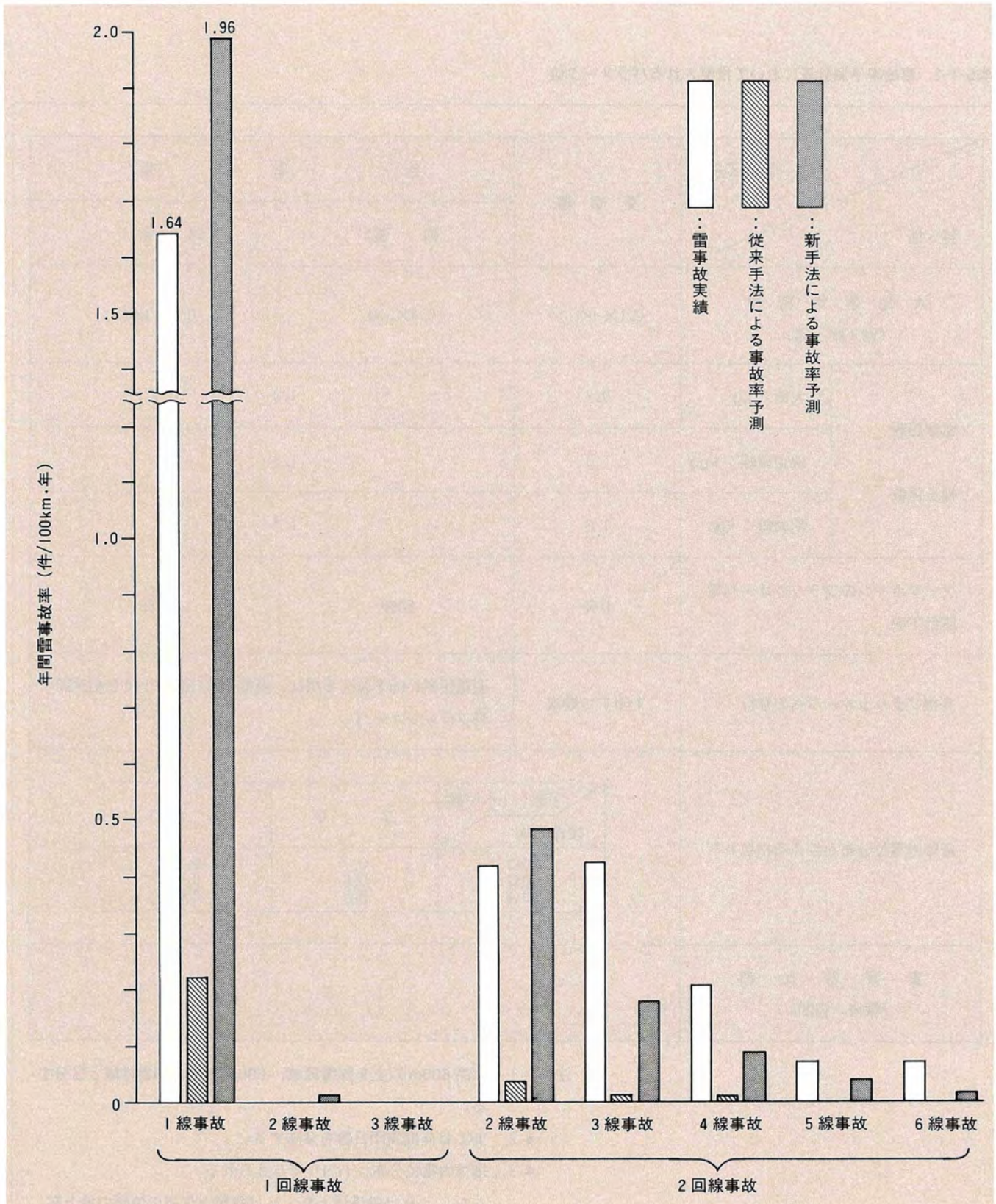


図5-1-2 雷事故率予測計算例(500k送電線)

表5-1-1 事故率予測計算において推奨されるパラメータ値

雷の区分		夏季雷	冬 季 雷													
			強 雷* ¹	弱 雷* ¹												
特 性																
大地落雷密度 (回/km ² ・年)		0.1×IKL* ²	0.4×IKL	0.1×IKL												
雷撃距離 補正係数	大地：kg	0.7	1.0													
	架空地線：kkg	1.0	1.3													
	電力線：kcg	1.0	1.3													
アークホーンのフラッシュオーバー電圧低下率		0%	50%	0%												
多相フラッシュオーバーへの移行		1相ずつ順次	過電圧率1.05を越える相は、過電圧率の高い上位2相が同時フラッシュオーバー													
塔体内電位分布を与える指数 n* ³		<table border="1"> <thead> <tr> <th>下部しゃへい線 接地抵抗</th> <th>な し</th> <th>あ り</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10Ω</td> <td>0.7</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>20Ω</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>30Ω</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> </tr> </tbody> </table>			下部しゃへい線 接地抵抗	な し	あ り	10Ω	0.7	0.8	20Ω	0.6	0.7	30Ω	0.5	0.6
下部しゃへい線 接地抵抗	な し	あ り														
10Ω	0.7	0.8														
20Ω	0.6	0.7														
30Ω	0.5	0.6														
雷 撃 数 比 較 (鉄塔：径間)		1 : 3														

注) *1：標高600m以上を強雷地域、600m未満を弱雷地域と区分する。

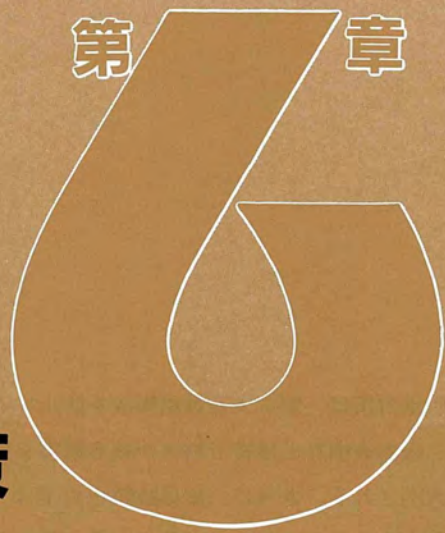
*2：IKLは年間雷雨日数を意味する。

*3：塔体内電位分布は $(Y/H)^n$ で与えられる。

ただし、Hは鉄塔地上高、Yは鉄塔上任意の位置の地上高。



第 章



雷事故防止対策

第6章 雷事故防止対策 ● 目次

狛江研究所 送変電部 絶縁研究室 専門役 井上 敦之
狛江研究所 送変電部 絶縁研究室 主査研究員 相原 良典
狛江研究所 送変電部 絶縁研究室 主査研究員 松原 広治

6-1	フラッシュオーバー防止策	57
2-2	雷事故防止対策の効果	59
6-3	冬季雷に対する対策	62

雷害防止対策は、雷による地絡事故を防止する雷事故防止対策と機器破損など後まで被害が残る雷害を防止する対策とに大別される。さらに、雷事故防止対策は、事故そのものを防止するフラッシュオーバー防止対策と長時間停電を防止する対策とに分類できよう。

雷害防止対策として、現在実施されているもの、開発中

のもの、および将来のものを分類した例が図6-1-1である。

現在、送電線の雷によるフラッシュオーバーは、高速度再閉路方式など系統運用面の技術によって、その90%以上が瞬時に回復され、長時間停電を防止している。

以下に、フラッシュオーバー防止対策の検討結果を示す。 ●

6-1 フラッシュオーバ防止策

送電線のフラッシュオーバ防止対策は、送電線への落雷を防止する対策と、送電線へ雷撃があった場合でもフラッシュオーバを発生させない対策とに大別され、後者はさらにしゃへい失敗防止対策と逆フラッシュオーバ防止対策とに分類される。また逆フラッシュオーバが発生しても2回線に波及させない独特の2回線事故防止策もある(図6-1-1)。

落雷防止対策には、(イ)消雷システム (ロ)レーザ誘雷 (ハ)ロケット誘雷 (ニ)高構造物によるしゃへい等があるが、(イ)は2、3の

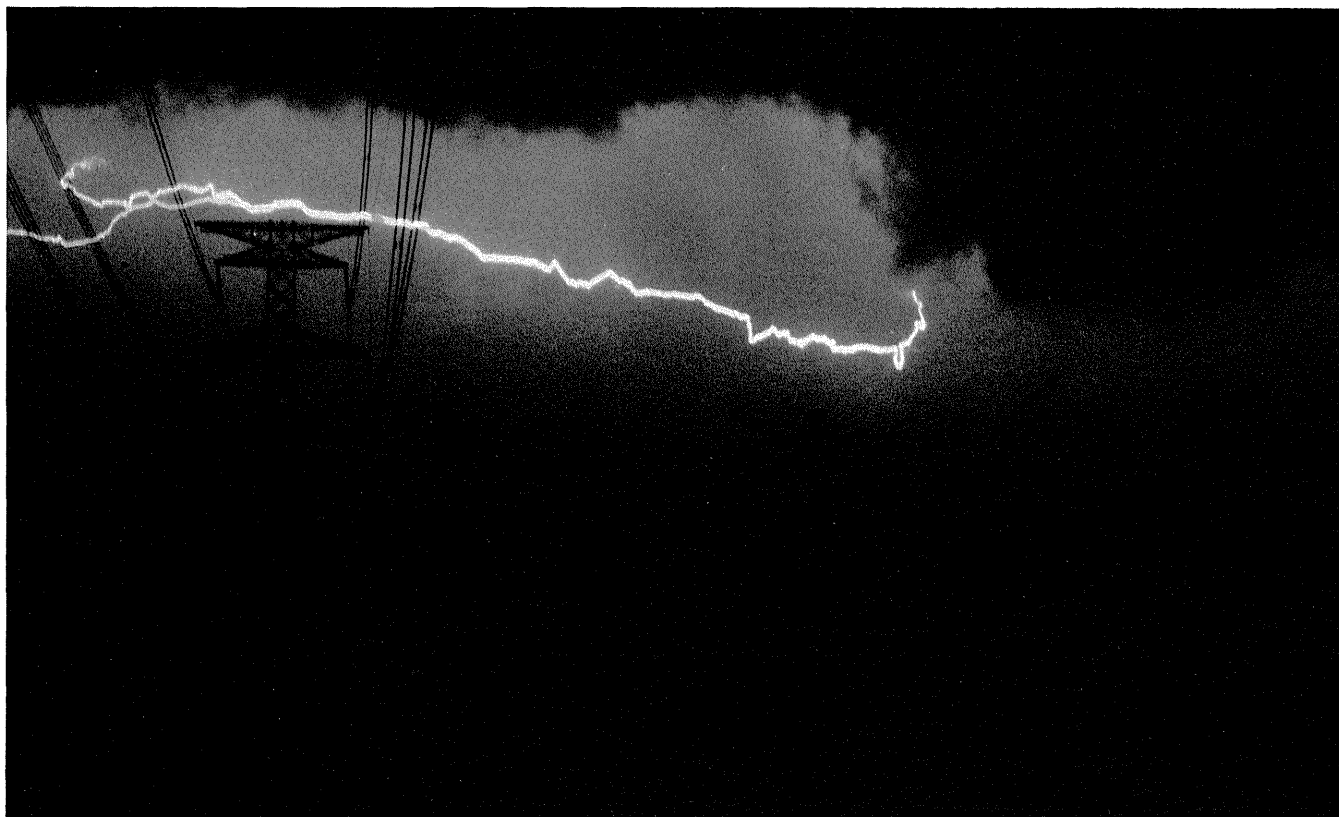
例はあるが現在あまり普及していない。(ハ)は雷放電現象の研究のため現在実験が行われているが、落雷防止を目的とした研究はまだ行われていない。(ロ)はまだ研究室レベルの段階である。(ニ)は6-2の1項で述べる。

しゃへい失敗防止策の主なものとしては (a)しゃへい角の減少、(b)電力線下部へのしゃへい線の設置、(c)架空地線の多条化があり、逆フラッシュオーバ防止策には、

(d)塔脚接地抵抗の低減、(c)架空地線の多条化、(b)電力線下部へのしゃへい線

の設置、(e)アークホーン間隔の拡大、(g)不平衡絶縁方式の採用、(f)線路用避雷器の設置がある。

上記諸対策のうち、(a)(d) はがいし装置の絶縁強度選定の前提条件として現行設計に組み込まれており、(e)(g) は雷の多い強雷地区の一部で採用されている。(c) は近年採用されつつある方式であり、(f) は現在66kV、110kV 送電線でその効果が検証されつつある対策である。 ●



横向きに走る冬季雷

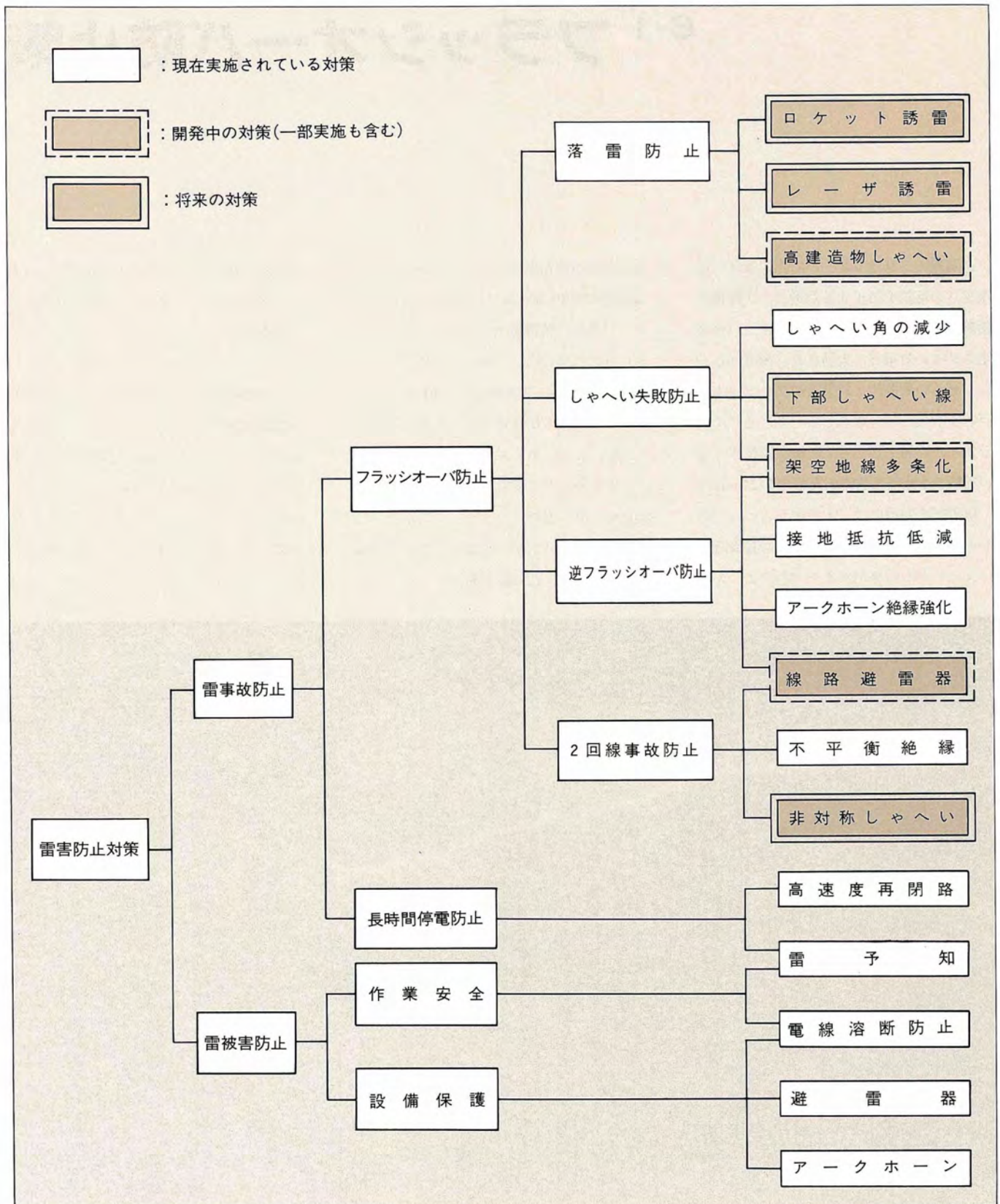


図6-1-1 雷害防止対策の分類

6-2 雷事故防止対策の効果

雷事故防止対策の効果、実際の送電線で検証することは、雷の襲雷頻度が一定でないこと、防止対策が無い場合との比較がむずかしいことなどのため、極めて困難である。

以下に、前述の雷事故率予測計算プログラム、EMTP（電力系統過渡現象解析プログラム、Electro - Magnetic Transients Program）およびモデル実験によって推定した結果を紹介する。

1 高鉄塔による送電線雷しゃへい

図6-2-1は、実規模送電線のおよそ1/100の縮小モデルの実験から外挿し、しゃへいする送電線の高さと、それを保護する高鉄塔の高さおよび離隔距離との関係を示したものである。

同図では、一様雷雲下における100 m 高送電線への雷撃を1%以下に抑制するために必要な避雷鉄塔の高さを、避雷鉄塔と送電線の離隔距離の関数として示している。たとえば、雷雲の高度1,000mに対し、100m 高の送電線を1%以下の雷撃確率に押え込むには、120 m 高の避雷鉄塔を約100 m 離隔して設置すればよいことになる。

実際に高鉄塔を設置する場合には、雷雲の進行方向を考慮することが効果的であり、襲雷方向側に避雷鉄塔を設置すれば、効果が著しい。

冬季雷は、上向き雷が多いため、高構造物からの放電の開始が落雷に大きく影響を

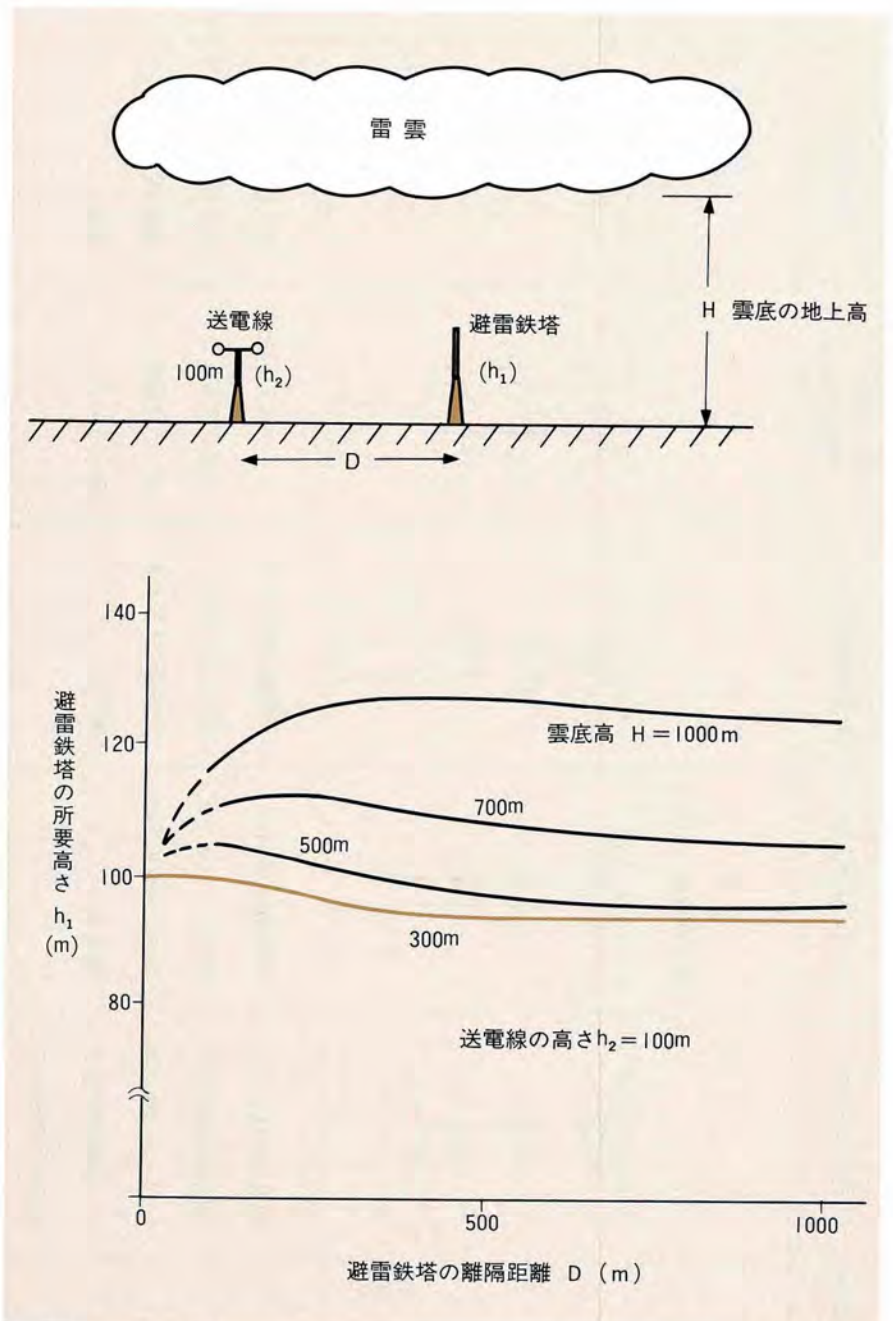
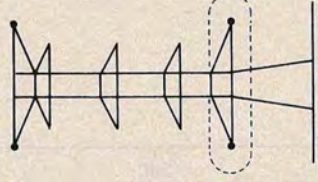
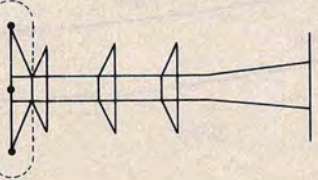
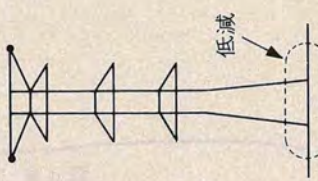
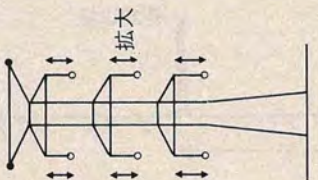
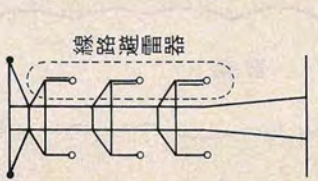
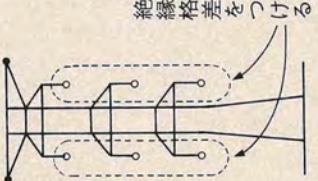

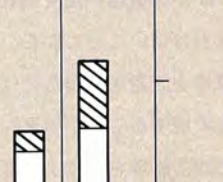
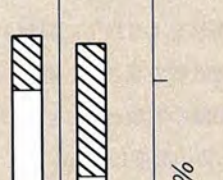
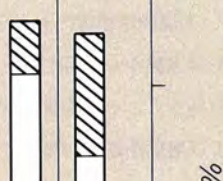
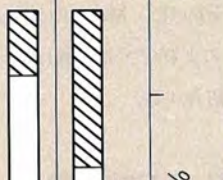
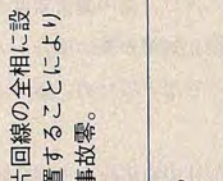
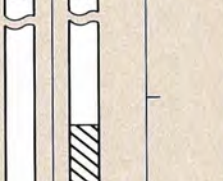
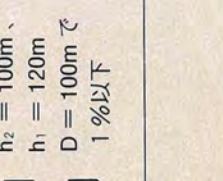


図6-2-1 送電線のしゃへいに必要な避雷鉄塔の高さ(送電線への雷撃率 $\leq 1\%$ 以下)

防止対策	下部しゃへい線	架空地線多条化	塔脚接地抵抗の低減	アークホーン間隔の拡大	線路避雷器	不平衡絶縁	高鉄塔しゃへい
概要	 <p>電力線下部または中間部に接地されたしゃへい線を張り、直撃雷防止と結合率を改善する。</p>	 <p>架空地線の本数を多くし、しゃへい効果、結合率を改善する。</p>	 <p>塔脚接地抵抗を下げることににより、鉄塔電位上昇を抑制する。</p>	 <p>アークホーン間隔を拡大することににより、絶縁耐力を向上させる。</p>	 <p>電力線と鉄塔間に避雷器を設置し、雷過電圧の抑制を図る。</p>	 <p>回線間または相間絶縁格差をつける</p>	 <p>発電所の出口や雷撃の多い個所に高鉄塔を建て、雷撃を防止する。</p>
適用例	なし	適用線路 2～3 例あり	実用線路あり	実用線路あり	66～110kV 送電線に試用	実用線路あり	なし
事故率	 <p>夏季雷事故率</p>	 <p>冬季雷事故率</p>				 <p>339%</p>	 <p>300%</p>

注) 事故率は、架空地線 2 条のものを 100% とする。 □ 1 回線事故 ▨ 2 回線事故

図6-2-2 雷事故防止対策の事故低減効果

与える。このため、高構造物による雷しゃへい効果は、夏季雷に対する以上に大きい。

2 各種フラッシュオーバー防止対策の効果

雷事故率予測計算プログラムによって、前述(b)(c)(d)(e)(g)の耐雷効果を、夏季雷および冬季雷に対してそれぞれ計算した結果の例を図6-2-2に示す。

これらフラッシュオーバー防止対策の効果に関し次の結論が得られた。

- (1) 下部しゃへい線設置の効果は著しく、2回線事故低減には極めて有効である。
- (2) 塔脚接地抵抗値の低減と架空地線の3条化の効果は同程度で相当の効果がある。

(3) 不平衡絶縁方式は、2回線事故防止には有効であるが、1回線事故の増大が著しい。

また近年、低い電圧階級の送電線で採用されつつあり、将来が期待されている線路避雷器の耐雷効果をEMTPによって検討した結果を図6-2-3に示す。

線路避雷器の採用について次の結果が得られた。

- (イ) 2回線全相全基に設置した場合は事故を皆無にしうる。
- (ロ) 片回線全基に設置した場合は2回線事故を皆無にしうるが、設置しない回線の上相および中相では逆フラッシュオーバーの発生する可能性がある。
- (ハ) 1基ごとに2回線全相に設置しても、

設置しない鉄塔へ雷撃した時にはフラッシュオーバーが発生し2回線事故に至る可能性がある。

(ニ) 両回線の上相全基に設置した場合には中相において、両回線の中相全基に設置した場合には上相において、2回線事故に至る可能性がある。

なお、線路避雷器設置相への直撃時には、しゃへい失敗事故を防止することが可能である。しかし、例えば500kV送電線のしゃへい失敗雷撃電流波高値を35kAと想定すると、処理エネルギーは約500キロジュールとなり、新しい形の避雷器の開発が必要になる。また、鉄塔雷撃時においても冬季の長波尾雷に対しては、避雷器の耐量に関する十分な検討が必要である。 ●

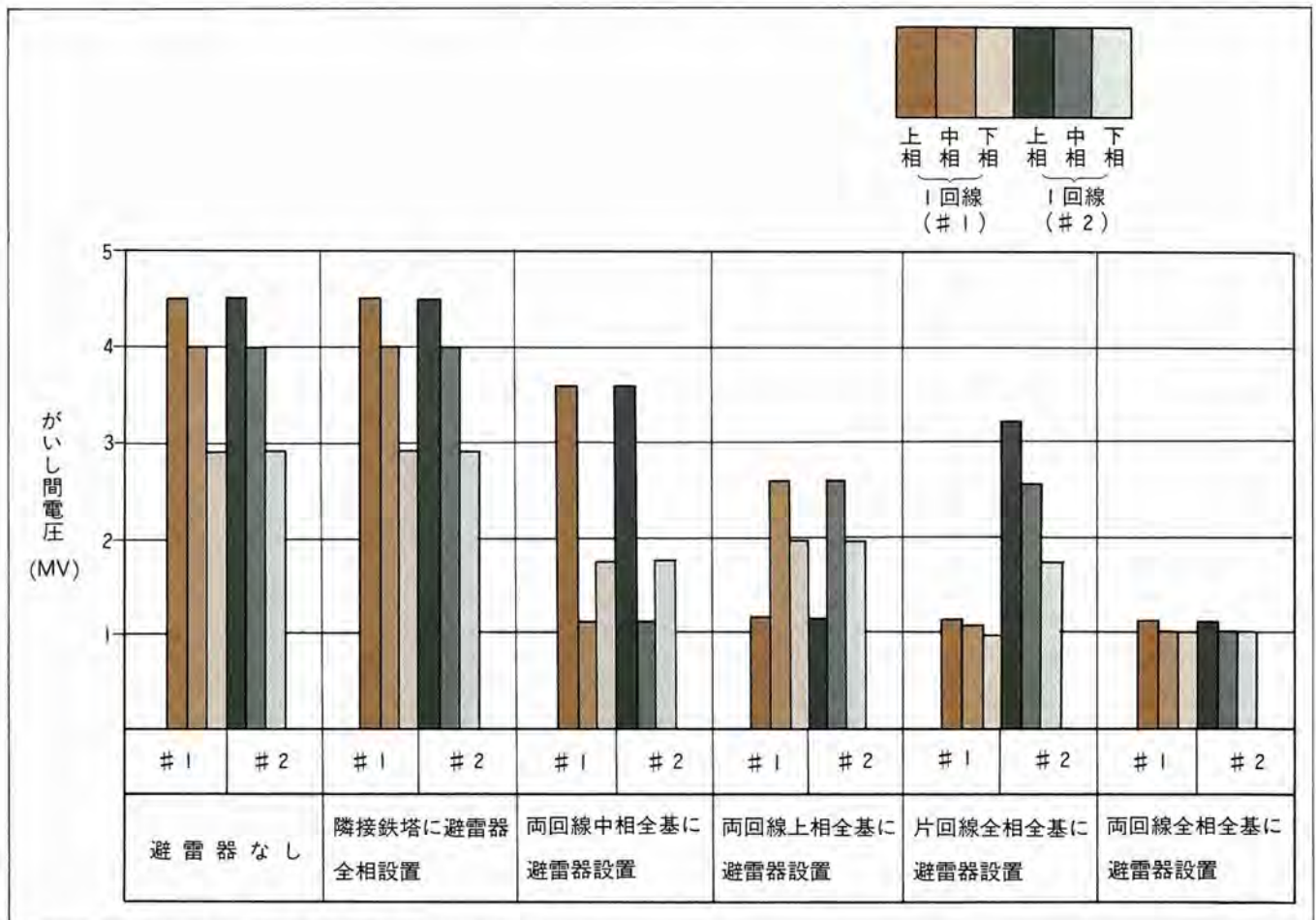


図6-2-3 線路避雷器の設置方法と各がいし間発生電圧

6-3 冬季雷に対する対策

上記した雷事故防止対策は、夏季雷、冬季雷にそれぞれに効果がある。以下に特に冬季雷に対する対策を列举してみる。

(1) 冬季雷は、襲雷頻度が高く、また局所的に集中する。襲雷地域を避ける、あるいは1回線2ルート化を図ることは夏季雷以上に有効である。

(2) 送電線設計においては、鉄塔をできるだけ低くし、接地抵抗を低減し、がいし装置の絶縁強度を高くする。しかしこれらは相矛盾することであり、適正な割り切りが必要となろう。

(3) 下部しゃへい線の設置と高鉄塔しゃへいは、局所的に採用されても有効であろう。特に、前者は、山岳地帯の横なぐりの雷に対するしゃへいおよび逆フラッシュオーバ防止に有効であり、後者は襲雷頻度の高い送電線引出し口に有効である。

(4) まだ十分解明されたわけではないが、冬季における接地抵抗が高いこと、冬季雷時の異常条件下のがいし装置の耐電圧低下は、冬季雷独特の事故原因である可能性がある。

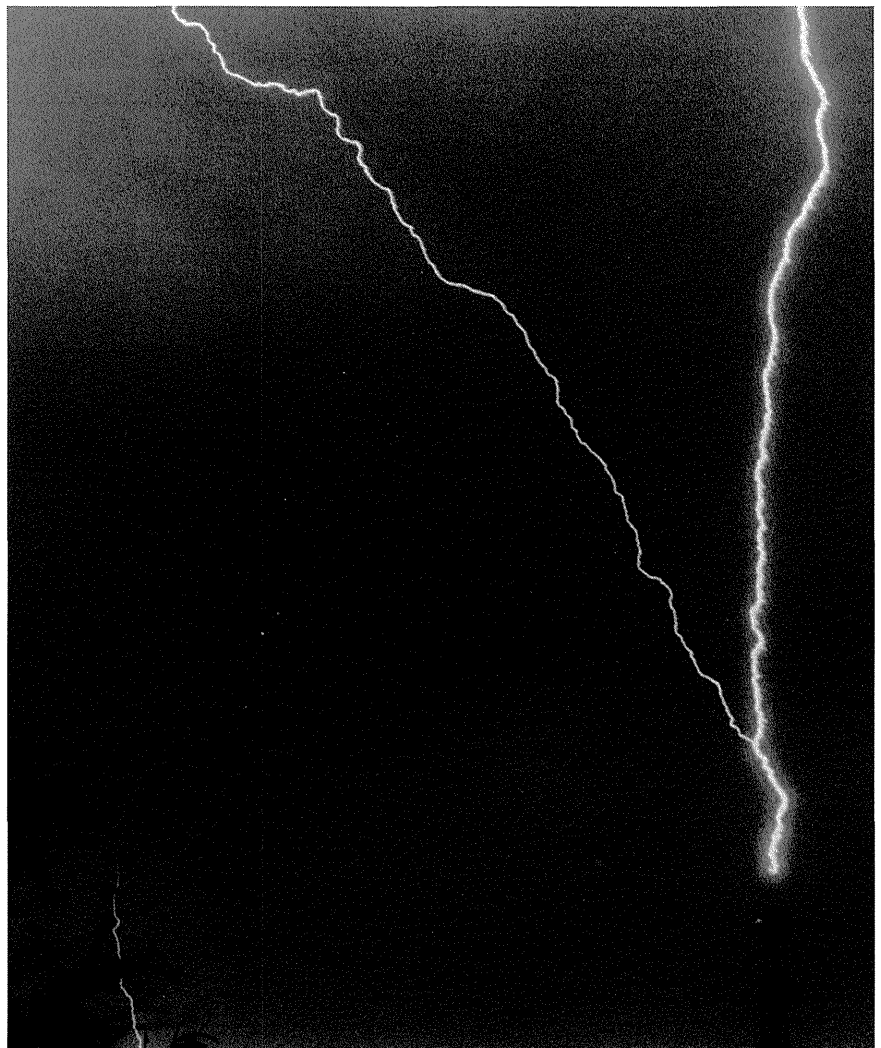
冬季における接地抵抗の低減方法、がいし装置の耐電圧低下防止方法（例えば懸垂型装柱の採用など）は有効となるかも知れない。

(5) 線路避雷器は耐雷性という技術面からみるとかなり有効であり、今後の発展が期待される。

以上のほかに、今後、冬季雷の研究がさ

らに進展すれば、新しい耐雷技術が登場する可能性は十分ある。

例えば、レーザ誘雷やロケット誘雷は雲底の低い冬季雷には威力を発揮するであろう。





第  章

将来の課題 

第7章 将来の課題 ● 目次

粕江研究所 送変電部 絶縁研究室長 佐々木三郎

7-1 将来の課題	65
-----------	----

7-1 将来の課題

1 雷観測の課題

冬季雷の性状に関し、これまでに9年間の観測を行って、これらのデータをデータベース化した。これにより、冬季雷は、高構造物への雷撃頻度が高いこと、雷撃電流波高値の累積頻度分布は夏季雷と大差ないこと、冬季雷は正極性雷の雷撃頻度が高いこと、冬季雷はとくに正極性雷の場合雷撃電流の継続時間が長いこと、冬季雷は斜めから進入する確率が高いこと等、の特徴を明らかにすることができた。

しかしながら、冬季雷による2回線同時事故の防止という観点から見ると、まだまだ自然現象は奥深く、これらのデータによりその原因を特定できるまでには到っていないのが現状である。

今後、2回線同時事故の原因を特定していくためには、また、冬季雷に対するしゃへい理論を構築していくためには、下記のように、雷観測を質、量ともに高度化させる必要がある。

まず、量的には、下記に示す観測の充実があげられる。

(1) 雷撃電流の統計量把握の充実

- ・小電流から大電流(数100Aから300kA程度まで)にわたる観測
- ・継続時間の長い雷観測(1秒程度までの長波尾雷や正負極に変化する雷)
- ・複数地点での統一基準での観測および全国大のデータベースの構築

(2) 送電線への雷撃の観測の充実

- ・送電線への雷撃経路の観測
- ・送電線への雷撃電流の観測

(3) 放電路の高精度観測

- ・雷放電進展様相自動観測装置の高度化によるストリーマ、リーダ、リターンストロークの分離判定観測

一方、雷観測の質的高度化としては、下記があげられる。

(1) 電界計測を含む総合的計測

- ・雷放電時の電磁界、雷撃電流、雷撃経路等の同時観測

(2) 雲内における放電現象の把握

- ・ドップラーレーダー等による雷雲内の気象状況の観測
- ・雷雲内の放電により発生する電磁波(VHF波)の多地点同時観測による、雷雲内放電の時々刻々の変化の把握

2 雷事故防止対策に関する課題

送電線への雷撃時のフラッシュオーバー機構については、上記のように、主としてモデル実験および雷事故率予測計算プログラムにより検討しているが、2回線同時事故の原因を特定するためには、下記の各項目について、さらに詳細な検討が必要である。

(1) 鉄塔雷撃時の鉄塔内サージ伝搬現象および2回線逆フラッシュオーバー事故発生機構の早期解明

(2) 非標準波のフラッシュオーバー特性の解明

- ・しゃへい失敗時に侵入する長波尾波に対

するフラッシュオーバー特性の解明

- ・鉄塔雷撃時に発生する短波尾波による健全相フラッシュオーバー特性の解明

(3) 冬季雷に対するしゃへい対策

- ・上向放電を発生させる冬季雷に対するしゃへい理論の開発

(4) 塔脚接地抵抗の過渡特性の解明

- ・大電流に対する過渡接地抵抗の解明
- ・冬季の接地抵抗の変化
- ・土中放電機構の解明

(5) 雷事故率予測計算手法の高度化

上記の各課題をとりまとめ、雷事故原因の解明に関する基礎現象の現状と課題を表7-1-1に示す。これらの各項目の詳細な検討に関しては、従来からのモデル実験による検討に加え、耐雷対策の効果を実証する必要もあり、このためには、大型人工雷実験設備による研究が有効である。

3 先端技術の適用による雷害防止新技術の開発

今後の方向としては、現在検討されている種々の雷事故防止対策に加え、より前向きに、雷そのものを撃退させる対策の開発が考えられる。

このための方策としては、ロケット誘雷や雷消滅技術の開発に加え、レーザー技術の適用により、雷を自由に制御する技術が期待できる。

これらの技術は高度な雷予知技術と密接に連係して適用していくものであり、今後、取組む価値のある課題と考えられるので、

表7-1-1 送電線フラッシュオーバーに関する基礎現象研究の現状と問題点

現象・特性	現 状	問 題 点	課 題
雷しゃへい	A-W 理論が主流。 雷撃経路観測中。	冬季雷に対する妥当性が不明	・ A-W 理論の適用範囲の明確化 ・ 上向き雷に対するしゃへい理論の確立
雷サージ伝搬	最大 1900kV 迄(雷電流 6kA 相当)の コロナを伴う雷サージ伝搬特性を明 確とした。	任意の導体配置、サージ波形に対す るコロナ減衰・変歪の予測	・ 雷サージのコロナ減衰・変歪の予 測手法の一般化 ・ 雷電流(40kA 相当)時の特性の把握
鉄塔電位上昇	約100Ω一定で計算することが多い。 L と R の直並列模擬も検討されて いる。 鉄塔流入電流 500A 迄の実測値あり。	実測とモデルの時間特性が整合とれ ない	大電流に適用可能な時間特性を考慮 した計算法の確立
塔脚接地抵抗	定常値が使用される。 大電流流入時のコロナによる低下特 性を明らかにしつつある。	大電流領域の特性。 1 ~ 2 μs の短時間領域では接地抵 抗が低下しない可能性あり。	大電流、短時間領域の特性の解明
がいし装置の フラッシュオーバー	判定法として、電圧補正法、V-t 交 叉法、積分法、リーダモデル法など がある。	急峻波、短波尾波のフラッシュオーバ 特性、多相で放電が同時進行する時 のフラッシュオーバー特性が不明	・ 急峻波頭、短波尾波によるフラッ シオーバー特性の解明 ・ 多相の同時放電を考慮したフラッ シオーバー特性の把握

当所としても挑戦していく予定である。

4 系統安定化技術との関係

高速度再閉路や雷予知技術など電力系統運用技術と雷事故防止とは密接な連関があるので、今後、一層関係を深め、全体として、高信頼度かつ経済的な電力系統の構築を図る技術を開発する必要がある。

5 大型人工雷による実証

自然雷に近い高電圧・大電流を発生しう

る大型の人工雷実験設備によって、自然雷が送電線に落ちたときの現象を再現することは、冬季雷による2回線事故原因を解明するとともに、架空地線の多条化、下部しゃへい線の設置、高鉄塔しゃへいなど最近開発されつつある雷事故防止対策の効果を実証する上で、極めて効果的と考えられる。さらに、レーザー誘雷など新しい雷害防止対策の開発にも有効である。

大型人工雷実験設備により解明が可能な研究項目としては、下記があげられる。

- ① 冬季雷による2回線事故原因の解明
 - (i) しゃへい失敗事故原因の解明

- (ii) 逆フラッシュオーバー事故原因の解明
- ② 雷事故防止対策の開発
 - (i) 各種2回線雷事故防止対策の有効性の検証
 - (ii) 雷事故防止対策の総合評価
- ③ 冬季雷および夏季雷に適用可能な耐雷設計指針の確立

これらの課題については、電力各社と協力して、今後、適宜推進する予定である。 ●

お わ り に

参事 狛江研究所副所長 瀬田 泰助

雷による送電線の事故は、昔から関係者を悩ませ、その対策について研究が進められてきた。そして、それなりの成果は得られているが、しかし今なお、事故は無くなっておらず、わからない所も多い。いや、研究が進むと、わからない所がはっきりしてくるといった方がよいのかも知れない。

今回紹介した冬季雷は、10年程前から問題になっている比較的新しい課題であり、夏の雷と違って雷雲の高度が低いとか、放電の経路が横向きに発生することがあるとか、またさらに、複数の場所に同時に雷撃しやすいとか、雷雲に包みこまれて送電線の絶縁耐力が低下する可能性があるとか、いろいろな特徴のあることが、これまでの実測や実験で、明らかになってきている。

しかし、このような特徴をもつ冬季雷に対して、送電線をいかに守るかという事故防止対策については、まだまだといえるのが現状である。

幸い、当所が日本海沿岸で電力会社と共同して開始した雷観測は、現在では、多くの会社で実施されており、質、量ともに大きな発展を遂げて進められている。これらの成果は当所で主催している耐雷技術委員会をはじめ学会などで全国大で検討されており、近い将来、必ず大きな実を結ぶものと確信している。

耐雷技術は、将来の高度情報化社会や新電気文明社会においてますます、その重要性を増すものと考えられる。雷による事故のない、あるいは実質的な被害のない将来の社会、そのような社会を目指して、当所では今後とも努力を傾注する所存であるが、何分にも昔から問題になっている難物の雷のことであるので、各方面の御協力、御援助を今後とも是非お願いする次第である。

関連する主な研究報告書等

● 2 ●

1. 「送電線耐雷設計基準要綱」電中研 研究報告：71037 (1971)
2. 「送電線耐雷設計ガイドブック」電中研 研究報告：175031 (1976)

● 3 ●

1. 「日本海沿岸の雷性状の検討事項と実測装置」電中研 調査報告：178075 (1979)
2. 「雷撃現象自動撮影装置の開発」電中研 研究報告：177046 (1978)
3. 「雷撃現象自動撮影装置による冬季雷観測 (その1)」電中研 研究報告：179048 (1980)
4. 「雷撃現象自動撮影装置による自然雷の撮影」電中研 研究報告：178021 (1978)
5. 「雷撃現象自動撮影装置による冬季雷観測 (その2) —簡易型ストリークカメラならびに光量積分方式撮影装置の開発と観測結果—」電中研 研究報告：180071 (1981)
6. 「雷撃現象自動撮影装置による冬季雷観測 (その3) —同時雷撃現象について—」電中研 研究報告：184028 (1985)
7. 「雷撃現象自動撮影装置による冬季雷観測 (その4) —冬季雷の特異性の観測ならびに新形雷観測機器の開発—」電中研 研究報告：T 87023 (1987)
8. 「柏崎、刈羽地点の冬季雷撃電流の測定結果 (その1) —昭和53~55年度の結果—」電中研 研究報告：180070 (1981)
9. 「冬季雷における電界と高建造物への落雷—昭和53年度および昭和54年度雷観測結果—」電中研 研究報告：181001 (1981)
10. 「冬季雷の雷撃進展ならびに静止写真観測結果 (その1) —昭和54~55年度の観測結果—」電中研 研究報告：181008 (1981)
11. 「UHV 実規模試験送電線における雷観測—昭和56年度の雷撃路観測結果—」電中研 研究報告：181025 (1981)
12. 「配電線耐雷性の自然雷による実証—北陸電力(株)福井火力発電所における誘導雷サージ観測結果(その1)—」電中研 研究報告：180046 (1981)
13. 「配電線耐雷性の自然雷による実証—北陸電力(株)福井火力発電所における誘導雷サージ観測結果 (その4) —」電中研 研究報告：T 86118 (1987)
14. 「全自動型雷放電進展観測装置の開発」電中研 研究報告：T 86042 (1987)
15. 「独立高構造物への冬季雷の特性—昭和53年度から昭和61年度までの観測結果—」電中研 研究報告：T 87040 (1988)
16. 「落雷位置標定装置の性能に関する検討」電中研 研究報告：T 86074 (1987)
17. 「冬季雷の電磁波の性状」電中研 研究報告：T 87097 (1988)

● 4 ●

1. 「雷撃現象自動撮影装置の開発」電中研 研究報告：177046 (1978)
2. 「コロナ放電を伴う高電圧進行波伝搬特性に関する研究」電中研 総合報告：114 (1983)
3. 「短波尾雷インパルス電圧による気中ギャップのフラッシュオーバー特性」電中研 研究報告：T 87041 (1988)
4. 「高電界・イオン流場中のがいし装置フラッシュオーバー電圧低下現象の検討」電中研 研究報告：185023 (1986)
5. 「冬季雷の雷しゃへいに対する実験的検討 (その4) —雷雲の移動を考慮したしゃへい特性—」電中研 研究報告：T 87083(1988)
6. 「送電線鉄塔における雷サージ特性—15mモデル鉄塔の雷サージ特性—」電中研 研究報告：T 87088 (1988)
7. 「送変電設備への雷撃現象 (その2) —送電線への雷撃現象に関する検討—」電中研 研究報告：178011 (1978)
8. 「送変電設備への雷撃現象 (その3) —高鉄塔への雷撃現象に関する検討—」電中研 研究報告：179010 (1979)
9. 「放電のシミュレーション (その2) —気中長ギャップV-t特性の新計算法—」電中研 研究報告：182048 (1983)

● 5 ●

1. 「送電線雷事故率予測計算法」電中研 研究報告：T 87089 (1988)

● 6 ●

1. 「送電線耐雷設計ガイドブック」電中研 研究報告：175031 (1976)
2. 「発電所耐雷設計ガイドブック」電中研 研究報告：175034 (1976)
3. 「冬季雷の雷しゃへいに対する実験的検討 (その4) —雷雲の移動を考慮したしゃへい特性—」電中研 研究報告：T 87083(1988)
4. 「送電線雷事故率予測計算法」電中研 研究報告：T 87089 (1988)
5. 「雷サージ抑制による絶縁レベル低減の検討」電中研 研究報告：T 86031 (1985)

電中研レビュー NO.19

●平成元年1月31日発行

●編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
東京都千代田区大手町1-6-1[大手町ビル7階]☎100
☎03 (201) 6601(代表)
●印刷・株式会社 電友社 ●Layout・ONOB

本部／経済研究所

東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)201-6601 ☎100

我孫子研究所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-11

赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(0272)83-2721 ☎371-02

狛江研究所／原子力情報センター／ヒューマンファクター研究センター

東京都狛江市岩戸北2-11-1 ☎(03)480-2111 ☎201

横須賀研究所 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-01

UHV塩原実験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-28

編集後記

電中研レビュー第19号「電力施設の雷害防止のために——冬季雷の研究成果と将来の課題——」をお届けいたします。

本号では「巻頭言」を北陸電力株式会社取締役副社長 高橋 宏様にお願いました。ご多忙中にもかかわらず快くご寄稿いただき、心からお礼を申し上げます。

かみなりは古くから「地震、かみなり、火事、おやじ」といって、恐ろしいものの一つに数えられてきました。闇に閃く稲妻、はらわたをひっくり返すような雷鳴は確かに恐ろしいものです。

電力会社でも電力システムの運用に当たって雷は古くから気がかりな問題の一つになっています。幸い、先人のたゆまぬ努力によって雷害防止技術も大きく進んでおります。

しかしながら、なにせ自然現象のことであり、加えて夏と冬の雷はその性質は異にしています。このため万全の対策はなかなか難しいようです。

本号では、雷による停電事故を防止するため電力会社と共同で当所が行っている研究の現状をご紹介します。

当所の雷害防止対策の技術が100万ボルトの送電線から配電線にいたるまで幅広く役立つことを念じ本レビューをお届けします。

IR