

# DENIKEN REVIEW

電研レビュー

電力輸送—信頼性と効率の向上をめざして

NO.7 1983.4

巻頭言	2
第1章 緒言	7
第2章 電力システム	
2-1 ● 要旨	11
2-2 ● 系統計画	13
2-3 ● 系統運用	15
2-4 ● 系統安定度	18
2-5 ● 原子力・火力プラント ・シュミレーション	23
2-6 ● 系統解析手法	27
2-7 ● 保護方式	29
2-8 ● 情報伝送システム	31
2-9 ● 高調波	35
第3章 架空送電	
3-1 ● 要旨	39
3-2 ● 雷観測	40
3-3 ● 避雷器	45
3-4 ● 冠着雪がいしの耐電圧特性	47
3-5 ● 雪害防止	50
第4章 地中送電	
4-1 ● 要旨	55
4-2 ● XLPEケーブルの 劣化とその判定法	56
4-3 ● ラミネート紙絶縁 OFケーブルの絶縁性能	61
4-4 ● 電力ケーブルの送電容量向上	65
4-5 ● SF <sub>6</sub> ガス絶縁	71
第5章 配電系統	
5-1 ● 要旨	75
5-2 ● 絶縁設計と保護保安対策	76
5-3 ● 配電自動化	80
5-4 ● 配電計画管理	83
5-5 ● 実証試験	85
関連報告書等	86

ボウタイ・トリー

◆  
ポリエチレンに咲く悪の花——夜の蝶のように美しく、魅せられるとこわいこわい。身の破滅である。時には紳士の蝶ネクタイの姿で現われる。

地中配電線のほとんどがポリエチレンを電気絶縁とする電力ケーブルであるが、そのポリエチレンの中に樹木の形をした破れ目ができて、絶縁をだめにしてしまう。いろいろな形があるが、写真はボウタイ状のトリーである。長さは約0.15mm。当所はその発生のメカニズムと防止の研究に取り組んできた。





## 創造豊かな研究開発を求めて

このほど、「57年度の科学技術

白書」が発表された。副題が日本がさらに新しい時代に対応して行くための方向づけとして、「創造性豊かな科学技術を求めて」となっている。しかし、この事はいまや日本だけの問題でなく世界的な底流でもあるが、無資源国の日本にとり、今後創造的な開発力に富んだ研究体制から、生まれ出る技術開発の成果こそ、これからの日本の最も有力な資源と言えよう。

戦後の日本経済が世界史上極めてまれな高度発展をなし遂げた基本要因の大きなものに「科学技術

と企業の役割（研究開発費の負担額が、政府のそれよりも民間産業の割合が非常に高いという中で）」という形で、企業の果たした役割が大きかった事があげられる。

戦後日本経済の発展のために、科学技術（当初は主として導入されたものであったが）を有効に活用して役立ててきた歴史を我々は持っている。日本の科学技術に創造性がないと今、大変非難されているが、科学技術を社会に役立てるという面では、非常に貢献して来たと考えられる。

現在の日本経済の沈滞は、昭和48年の石油ショックに因を発していると言われており、それを否定はしないが、我が国の経済発展に占める科学技術の役割を歴史的によく見直すと、戦後の世界的技術革新の摂取と、それに伴う近代産業設備の整備が、大体45年頃には、一巡吸収し尽くされている。つまり我が国の科学技術体制は、

---

一種の成熟段階を過ぎ、最早、外からの科学技術の摂取による技術革新によって、これまでの様に日本経済を大きく加速出来るという段階ではなく、日本経済発展のための科学技術の役割としては、外からの摂取による段階から、内なる自己創造による科学技術の発達いかんにか、大きくかわる段階にあった時、石油ショックがさらに拍車をかける事になったと言えよう。とは言うものの、これまでの経済高度成長期において、日本経済は、科学技術の輸入依存段階から、漸次、自己創造開発期に進展し、それに伴い新たに築き上げ蓄積した日本独自の新要因もある。

日本の研究開発に創造性があるかないか、日本の研究者に独創性があるかないかの議論は多くある。しかし、その一面には、あるかなしかの問題でなく創造的研究開発が大きく開花しない所に問題があるとも考えられる。その原因としては、日本経済の要請がまだそこまで行ってなかったか、或いは開花するためには、全般のレベルが低いためそれを活用するに至らなかった事が考えられる。だが先に述べた様に我が国の現状は、すでに45年以降から、社会的要請としても、またレベル的にも創造的、独創的なものを活用せねばならぬ時代に突入している。

この事は電力事業にとっても然りと考えられる所であり、電研はすでに、重要な研究成果をあげるための、大型でしかも充実した研究機関であると同時に、この目的のために合意と協力を得る基本条件において、電気事業者サイドと最も密接な基盤事情にあると考える。

電研がその持つ総合力を発揮し、創造豊かな研究開発の成果をあげられ、日本の電力技術のパイオニアとして飛躍することを期待する。

北海道電力株式会社 常務取締役

**舛田 正章**

〔電力中央研究所 参与〕

電研・電力輸送研究の歩み(昭和27年～57年12月)

昭和	月	電力中央研究所	月	所 外
27	11	新北陸幹線の竣工試験に参加	7	新北陸幹線連開(275kV、関西電力)
28	9	電力技術研究所設置		
29	1	電力研究室、高圧実験室竣工	3	東京・仙台間マイクロウェブ回線完成(東北電力)
30	2	電力設備近代化調査委員会設置(後に電気事業近代化計画委員会と改称、34年終了)		
31	1	直流模擬送電装置設置		
32	9	交流計算盤装置設置	11	日本原子力発電(株)設立
	11	アナログコンピュータ設置		
33	3	交流模擬送電線設備設置 — 電力システムの安定度などの解析手法の研究開始	4	電気事業広域運営方式発足
35	11	枝折峠氷雪害実験場設置(38年7月閉鎖)	12	中地域における275kV 超高压連系実現
36	4	両サイクル連系問題委員会設置(37年6月終了)	6	鳴門海峡横断送電線完成(関西電力、四国電力)
	6	600kV 塩原実験場設置		
37	5	送電機能研究委員会設置	2	姫路岡山線(中・西地域超高压連系220kV)竣工
39	5	アナログコンピュータ更新	7	電気事業法公布
40	—	電子計算機による電圧と無効電力の制御基礎理論を開発(オンライン制御の基礎)	10	佐久間周波数変換所連開(電源開発)
42	2	275kV ケーブル試験場設置(武山試験研究センター)		
43	1	動的交流計算盤設置	7	中央電力協議会広域運営の新展開発表
	4	開閉サージシミュレータ装置設置		
	7	基礎研究用電力システムシミュレータ装置開発設置		
	8	基礎研究用サイリスター交直変換装置開発設置		
	10	赤城山南麓の実験場用地に技術研究所配電近代化赤城実験場設置(56年6月に赤城試験センターと改称)		
44	9	実規模の実験用配電線を設置(赤城試験センター)	3	SF <sub>6</sub> ガス絶縁開閉装置使用の超小型変電所連開(東京電力)
			8	初の11万ボルト OF 海底線布設(中国電力)
45	—	架空送電線氷雪害事故調査委員会設置		
46	4	直流ケーブルについて研究開始		
	10	直流送電計算盤1号機を開発設置(49年8月2号機設置)		
47	6	火力発電所全自動化シミュレータ開発設置	11	東北電力がリップルコントロールによる自動検針の実用化実験に成功(世界初)
	11	直流送電システム異常電圧シミュレータ開発設置		
48			5	初の50万ボルト送電開始(東京電力、房総線)
50	4	電力系統解析用データファイルシステムについて研究開始	6	9電力社長および電源開発総裁の会議において「広域運営の拡大」新方針を決定
	10	直流多端子集中制御装置開発設置		
52	7	(財)超高压電力研究所の事業を継承、研究機関の一組織として超高压電力研究所を設置(54年7月に武山試験研究センターと改称)	12	新信濃周波数変換所連開(東京電力)
53	4	冬季雷性状の観測調査を開始(電力各社と共同)		
55			12	東北電力、北陸電力管内において豪雪により送電線鉄塔、配電線支柱が多数倒壊(~56・1)
56	—	低損失275kV OF ケーブルの長期絶縁性能試験開始(終了57年11月)	1	超高压無人変電所連開(中部電力)
	—	衛生通信実験用地上局を設置(赤城試験センター)		
57	5	デジタルリレー総合解析装置設置		
	8	雪害対策プロジェクトチーム設置		
	9	架空電線路雪害対策研究推進委員会設置		
	10	500kV 大容量地中ケーブル長期信頼性実証試験開始		
	12	最適電源構成問題研究会設置		
	12	開閉インパルス実験設備設置(東北電力米沢変電所構内)		

備考：UHV送電関係については省略(レビューNo5を参照下さい)

第 4 章

緒 言



# 緒 言

電力技術研究所 副所長 上之菌 博

日本経済は低成長時代に入ったとはいえ、今後の健全かつ安定的な発展、国民生活および福祉の向上を図るためにはエネルギー、とくに電力の安定供給を確保することが最も重要である。(将来需要をまかなう供給力の確保)

このような電力需要の増大に対処するための電力系統は電源立地点が偏在化、遠隔化し、かつ1地点の発電量が大幅に出力化していること。基幹送電線ルートも制約され、地勢、気象などを勘案し選択する余地が少なく、苛酷な条件を甘受せざるを得ず、しかも大容量送電線となること。また、都市部における需要過密地区においても用地事情や周囲環境の制約を受け大容量電力輸送設備となること、さらに、

経済電力融通など広域的な系統運用が積極的に進められるなど、供給信頼度の向上に格段の配慮が必要である。(社会の理解と信頼感の向上)

電源の建設と同様、電力輸送設備の建設も用地問題その他の制約条件のため長期化する傾向にあり、かつ電源計画の流動性、電力需要見通しの不測性などの要因のため既設設備の効率的活用が要請されている。(供給コストの抑制)

当所では従来より、UHV送電をはじめとして電力輸送設備の送電容量の増大方法について研究を進めるとともに、信頼度向上を目的とした

1. 絶縁設計の高信頼度化
2. 電力システムの大規模擾乱防止

などに関する研究を重点的に実施してきている。

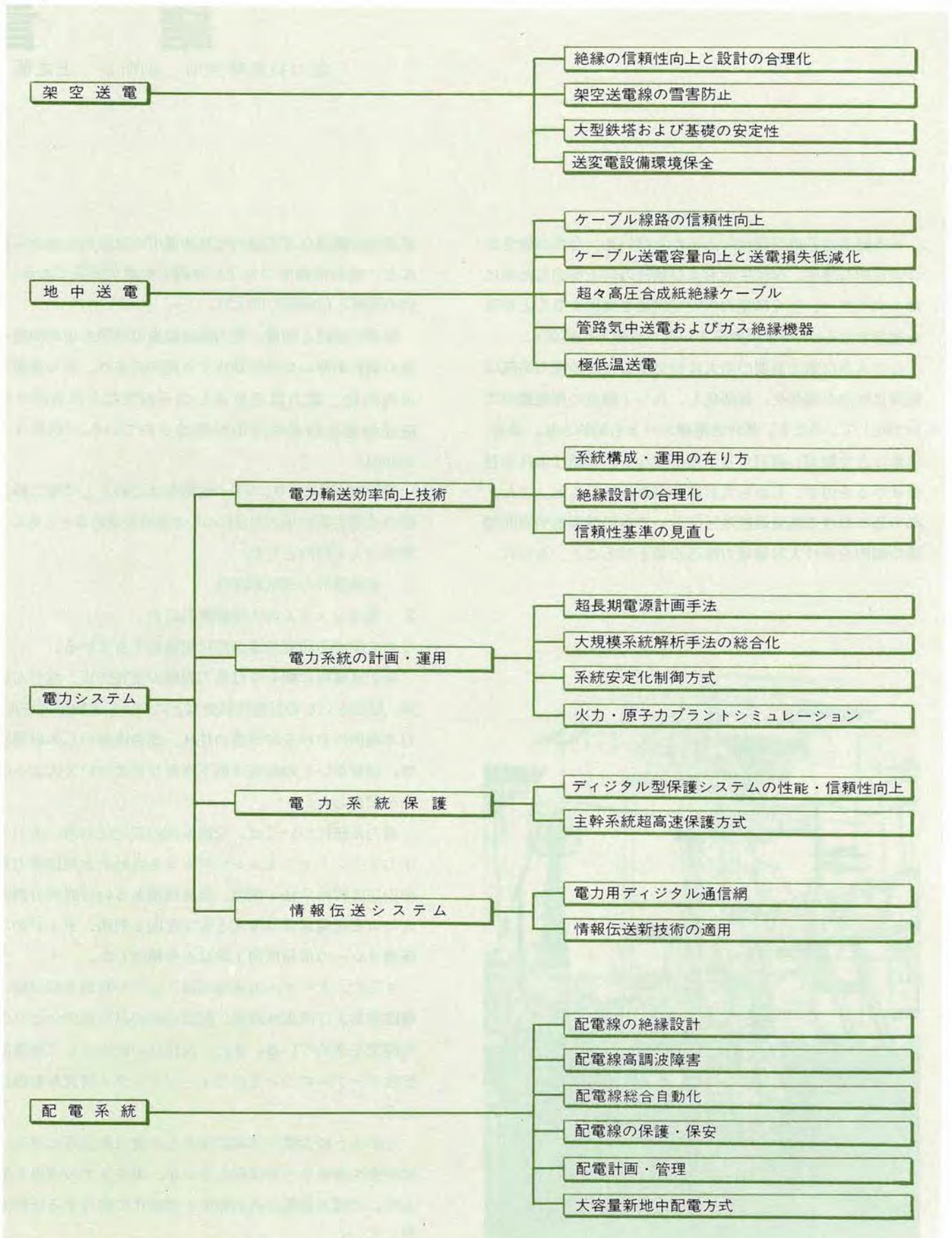
架空送電線に関しては電力設備の雷害防止、塩じん害対策、冠雪がいしの対電圧特性などについて実験研究を進め、日本海側における冬季雷の性状、高強度がいしの耐電圧特性、冠雪がいしの耐電圧低下程度などについて大よその傾向を把握した。

電力系統については、交換系統の安定化対策、火力・原子力プラント・シミュレーションを含めた大規模電力系統の安定度解析手法の開発、直流送電あるいは直流分割の導入による送電容量の増大と安定度向上対策、デジタル型保護リレーの信頼性向上策などを検討した。

さらに、ケーブルの送電容量アップや長期実証試験、誘導障害および高調波障害、配電系統の高信頼度化などの研究開発を進めている。また、次世代の技術として極低温抵抗性ケーブルについてのフィージビリティ研究も実施している。

このように大電力送電に関する研究は多分野に亘り、更に研究を進めるべき課題も多いが、現在までの成果を基にして、大電力送電の高信頼度と効率化に寄与する研究を展開していく。





第 5 章



電力システム

## 第2章 電力システム ● 目 次

執筆者紹介●( )内は担当箇所、順不同

2-1 要 旨	11
2-2 系統計画	13
2-2-1 電源計画シミュレーション	
2-2-2 系統計画検討システム	
2-2-3 調相設備計画	
2-2-4 系統信頼度評価	
2-3 系統運用	15
2-3-1 運用計画(週間運用手法の開発)	
2-3-2 需給制御(負荷急変時の対策)	
2-3-3 系統操作	
2-3-4 作業計画	
2-3-5 補修計画	
2-3-6 電圧制御	
2-3-7 状態推定(誤り情報の修正)	
2-4 系統安定度	18
2-4-1 系統安定度の分類と解析目的	
2-4-2 安定度解析のための系統モデリング	
2-4-3 動態安定度	
2-4-4 定態安定度	
2-4-5 電圧安定度	
2-5 原子力・火力プラント・シミュレーション	23
2-5-1 シミュレーションの必要性	
2-5-2 原子力プラント・シミュレーション	
2-5-3 火力プラント・シミュレーション	
2-5-4 タービン発電機の軸振れトルク	
2-6 系統解析手法	27
2-6-1 はじめに	
2-6-2 大規模行列演算	
2-6-3 系統縮的手法	
2-6-4 最適制御理論	
2-6-5 潮流計算手法	
2-7 保護方式	29
2-7-1 はじめに	
2-7-2 保護方式の性能・信頼性評価	
2-7-3 保護方式検討のための系統解析手法	
2-8 情報伝送システム	31
2-8-1 電力用デジタル通信網	
2-8-2 新情報伝送技術	
2-9 高調波	35
2-9-1 はじめに	
2-9-2 高調波障害	
2-9-3 高調波分布の予測手法	
2-9-4 今後の課題	

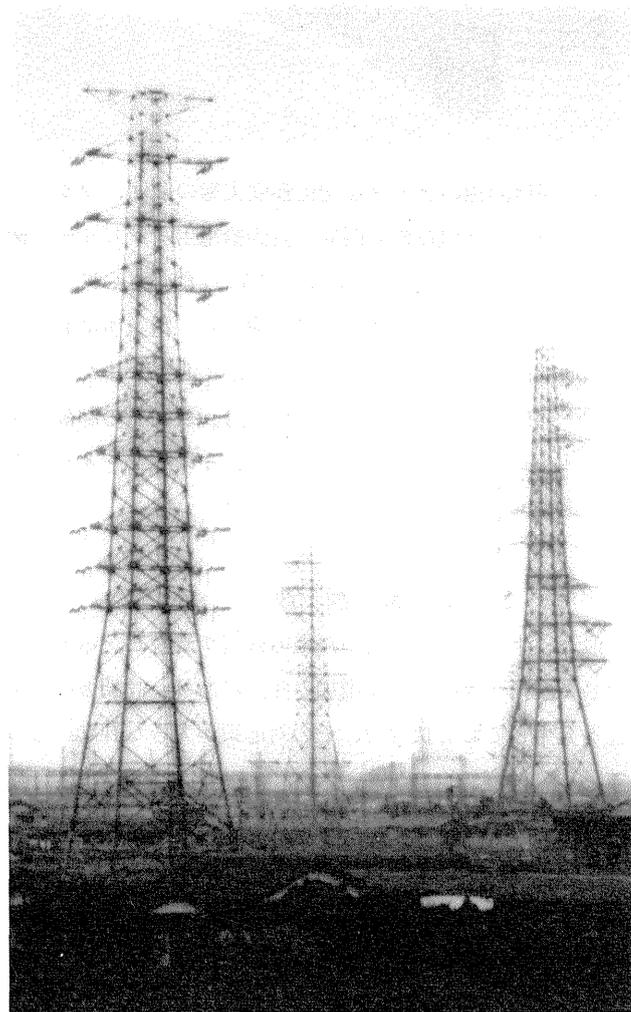
町田 武彦	電力技術研究所	電力システム部	部長(2-1)
高橋 一弘	電力技術研究所	電力システム部	次長(2-2、2-3、2-6編集担当、2-2-1～2、2-6-1～2)
小川 哲次	電力技術研究所	電力システム部	電力系統研究室(2-2-3、2-3-6～7)
田中 和幸	電力技術研究所	電力システム部	電力系統研究室(2-2-4)
大庭 靖男	電力技術研究所	電力システム部	電力系統研究室(2-3-1、2-3-4、2-6-5)
磯田 八郎	電力技術研究所	電力システム部	電力系統研究室(2-3-2)
児玉 博明	電力技術研究所	電力システム部	電力系統研究室(2-3-3)
七原 俊也	電力技術研究所	電力システム部	電力系統研究室(2-3-5)
植田 清隆	電力技術研究所	電力システム部	電力回路研究室 室長 (2-4、2-5編集担当、2-4-1～3、2-5-1、2-5-4)
長尾 待士	電力技術研究所	電力システム部	電力回路研究室(2-4-4～5)
市川 建美	電力技術研究所	電力システム部	電力回路研究室(2-5-2)
谷口 治人	電力技術研究所	電力システム部	電力回路研究室(2-5-3)
江口 正義	電力技術研究所	電力システム部	電力系統研究室(2-6-3～4)
坪井 昭	電力技術研究所	送配電部	系統保護研究室 室長(2-7全部)
竹下 信也	電力技術研究所	電子応用部	部長(2-8編集担当)
河合 洋一	電力技術研究所	電子応用部	電力通信研究室 室長(2-8-1～2)
宮崎 好一	電力技術研究所	送配電部	電力品質研究室 室長(2-9全部)

# 2-1 要 旨

担当●電力技術研究所 電力システム部 部長 町田 武彦

電力需要の増大に対応して、電力系統は拡大化されていく一方、電源もますます遠隔化し、大規模化してきている。このため短絡容量の増大対策、系統の安定運転など複雑化の問題が生じ、如何なる系統構成や系統運用が望ましいかが重要な問題となる。

電力システム全体としての、総合的な信頼性向上と効率化を図るためには、電源・系統の計画と運用、系統安定度解析手法、保護方式、情報伝送システム、系統の高調波などの分野において、開発、改良すべき課題が多く残されている。



本章では、これらの諸課題につき、当所で研究してきた成果の概要を述べるが、その要旨は次の通りである。

## I. 系 統 計 画・運 用

年々増大する需要に対処するため、電源や送変電設備をいかに合理的に拡大するかは重要な課題である。当所では、そのための技術面での分析評価の手法として、電源計画および系統計画、とくに調相設備計画、信頼度計算などの解析手法を開発してきた。計画手法として当所では、設備の拡充プロセスをモデル化し、将来、想定される種々の事象に対し電力系統が受ける影響を予測、評価する、いわゆる、シミュレーション手法をとっている。

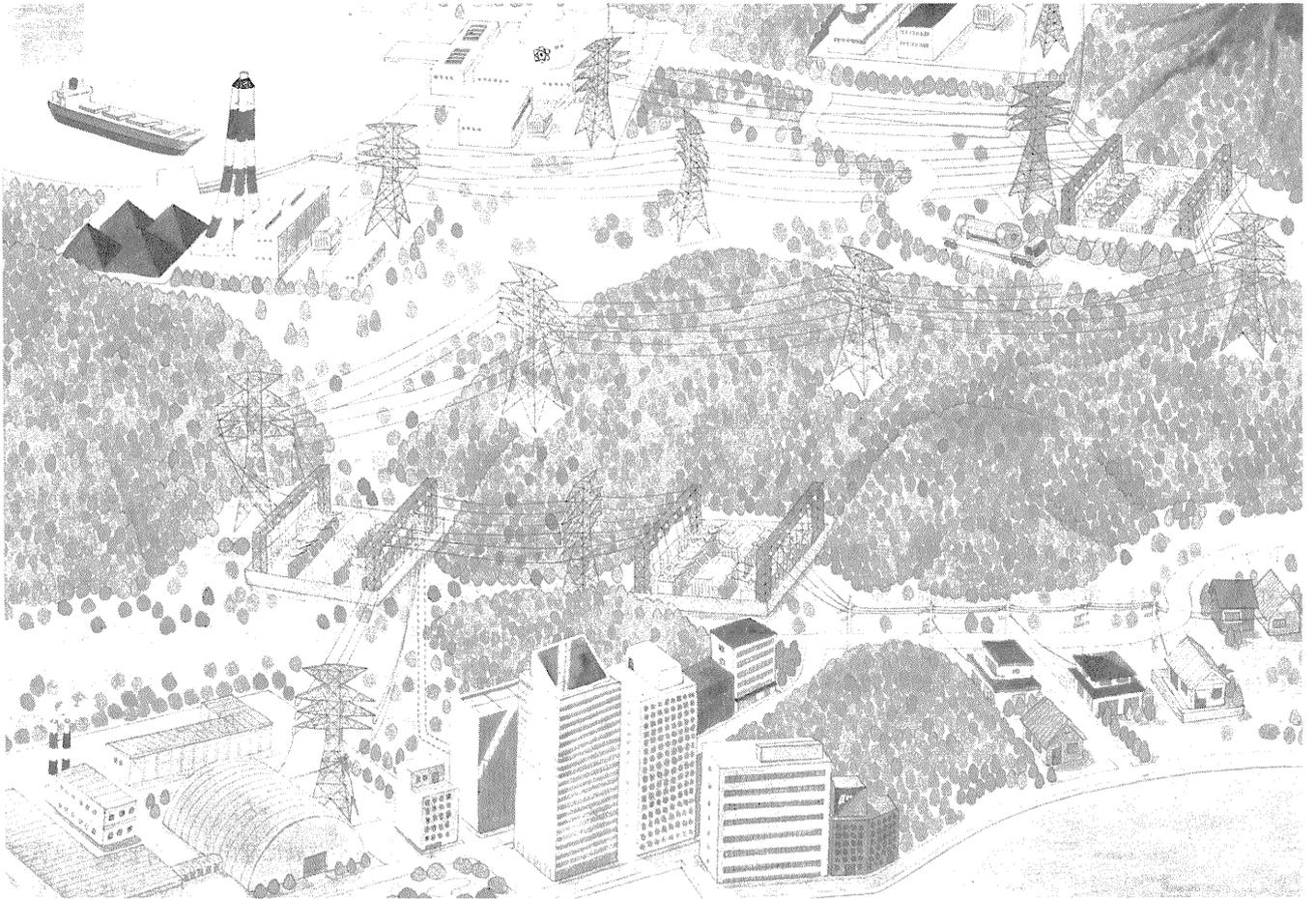
また、与えられた設備を有効に活用し、需要家に良質で低コストの電力をいかに供給するかも重要な課題である。このため、分析手法として、常時の需給バランスを経済性と信頼性の面から調整する方法、送変電系統を効率的に切り替える操作論理、定期補修計画用の停電作業や電源補修計画手法、操作や制御に必要な、系統の状態推定法などを開発してきた。

## II. 系 統 安 定 度 ・ 解 析 手 法

電力系統の計画拡充ならびに運用制御で、基本的に重要な課題の一つに系統安定度があり、電源からの送電電力、系統内の常時ならびに事故時の融通電力などを決める際の大切な要素となる。このため電力系統の状態に応じた定態や動態安定度、電圧安定度についてのシミュレーション手法と解析法の開発を行ってきた。

さらに、電力系統の一つの事故外乱が重大事故に発展しないようにするために、大容量の火力、原子力発電所の停止を極力防止しなければならないが、この検討解析に必要な大容量発電プラントの簡易モデルや軸トルク現象を解明してきた。

電力系統は発電機、送電線、負荷など数多くの要素で構



成された大規模・複雑なシステムとなっている。そのためシステムのふるまいを正確に効率的に解析する基礎手法が必要であり、この目的のために大規模行列の高速演算法、系統縮約手法、システム設計を合理化する最適制御手法の研究を続けている。

### Ⅲ. 保護方式、情報伝送システム

保護分野においては、系統からの要求にこたえて一層の高信頼度、高性能を達成するよう、多重化、自動監視の適用など信頼度向上策を実施すると共に、マイクロ・プロセッサ、光ファイバー等新技术の導入がはかられつつある。

当所ではこれに対し、静止形リレーの耐ノイズ性能など各種保護方式の性能評価や、電力系統の故障計算法、零相循環電流など不平衡電力回路網の常時および故障時現象計算法、故障時過渡現象成分の解析、保護装置の応答動作と信頼度解析手法など、保護方式適用検討の基礎となる解析手法を開発してきた。

電力用情報伝送システム分野では、系統保護・制御・監視に必要なデータを高信頼度かつ効率的に伝送するため、

電力用通信回線のデータ伝送信頼度実態の解明、マイクロ・プロセッサ利用技術の開発、自動給電用コンピュータ網に適したプロトコルの開発などを行った。さらに、送電線による衛星電波のしやへい等を検討し、電気所における衛星通信用地上局の設定方式を明らかにした。また光ファイバー通信など光応用計測制御技術は、変電所の制御・保護一体化システムに適用を図るため、その光ファイバー電圧・電流センサの特性を明らかにした。

### Ⅳ. 系統の高調波

最近、半導体素子を用いた電力機器が普及し、電力系統の高調波レベルは、年々増加の傾向にあり、高調波障害も種々発生しておる状況で、その対応策が大きな課題になっている。

当所では実系統における高調波の実態ならびに調相設備、通信設備などの高調波障害の様相を明らかにし、高調波分布の予測計算法を開発している。さらに、今後の高調波問題を解決するための課題と方向性を示した。

## 2-2 系統計画

担当●電力技術研究所 電力システム部 次長 高橋 一弘

### 2-2-1 電源計画シミュレーション

今後の電源計画の策定に当たっては、柔軟な電源の運用を確保しつつ、各種の外的要因の変化に対して多面的な対応ができる手法を開発する必要がある。

当所では、そのため、電源計画を運用面

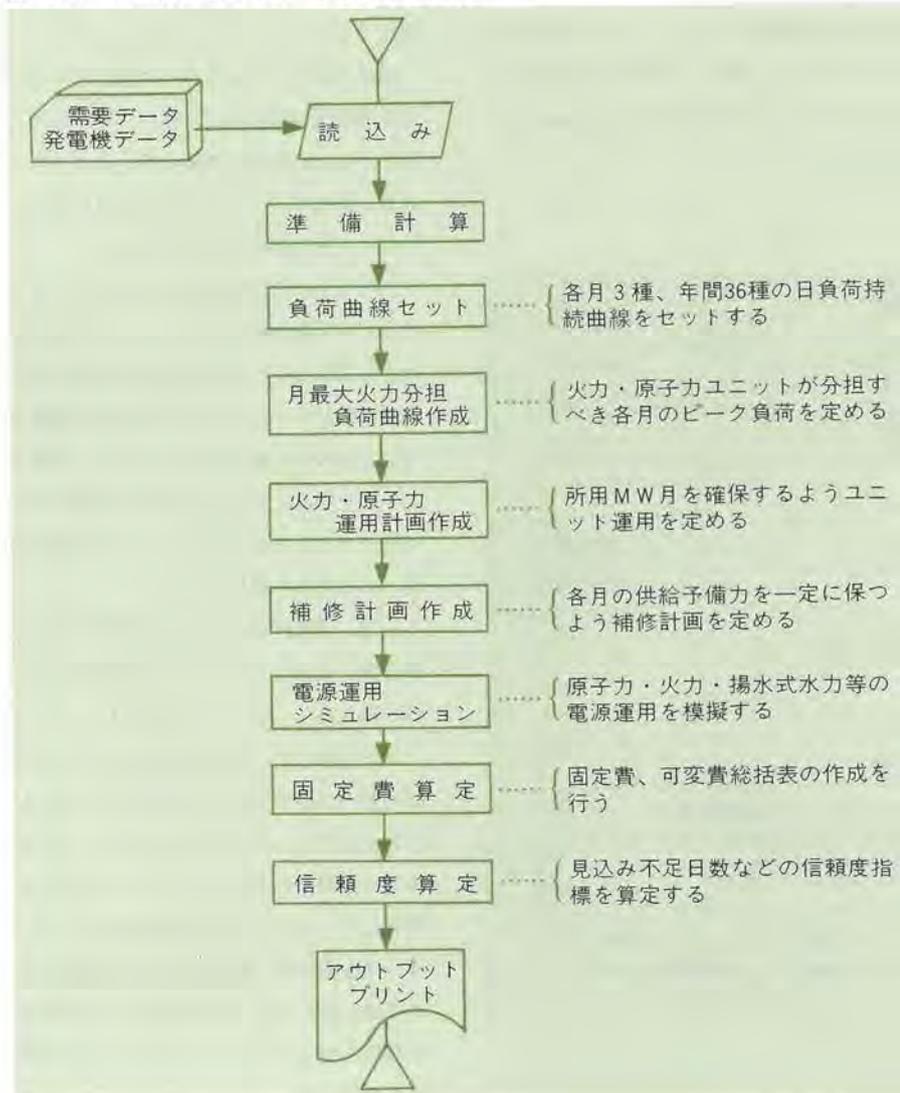
や経済性等の側面から、総合的に分析・評価する解析手法の開発を主としてシミュレーション手法を用いて、行ってきた。

図2-2-1に開発した電源計画シミュレーションのプログラムの概要を示す、このプログラムは長期にわたる電源の運転開始、および需給の状況を模擬し、所要経費およ

び供給信頼度等に係わる諸量を算定する機能を有している。本プログラムの主なる内容は下記の通りである。

1. 10年程度の長期電源計画を対象として、電源運転開始時期および定期補修計画を内生的に扱っている。
2. 電源運用の模擬はシミュレーションの精度を大きく左右するため、たとえば火力の日間起動停止可能性、原子力の負荷追従運転等の要素を考慮している。
3. 所要経費を固定費、可変費に分けユニット別に算定している。

図2-2-1 電源計画シミュレーションプログラム



### 2-2-2 系統計画検討システム

電力システムの拡充を図っていくうえで、常に系統が適切なバランスを伴って発展していくかどうかの分析が必要である。

具体的には、将来年度に亘って想定される様々な需給条件と系統状態の組み合わせに対して、いくつかの技術的チェックがなされなければならない。当所では、そのチェックすべき項目を

1. 送変電設備の過負荷
2. 系統の安定度
3. 電圧・無効電力の分布
4. 各母線の短絡容量

の4つに体系づけ、それらを統合した「系統計画検討システム」を開発した。本システムの構成は、概略、図2-2-2のとおりであり、特長は次のようになる。

1. 長期計画原案に合わせ「基本データ」を設け、計画の部分的修正の都度、「変更データ」によって基本データに変更を加え「検討データ」を設定する。

2. データは各種設備、想定需要、系統構成などの種別に分類して格納する。  
それぞれのデータは、固有の特性定数などの「固定データ」の部分と、しばしば変わり得る想定需要値や設備の接続台数などの「可変データ」の部分とに分けて格納する。
3. 設定するデータのエラーを検出する機能を設けている。
4. 計算プログラムには高効率計算技法をとり入れ、計算の高速化と計算機メモリの節減をはかっている。
5. 人間と機械との対話をねらって、計算結果は可能な限り図表やマップの形状で印字している。

### 2-2-3 調相設備計画

発電機の無効電力出力を許容値の範囲内に維持しつつ、系統の運転電圧を適正レベルに保つことは、電力系統の安定運用に不

可欠である。

調相設備計画とは、これを容易にするため、無効電力の発生、吸収を行う調相設備（電力用コンデンサ、分路リアクトル、同期調相機、中間調相設備など）をあらかじめ系統内に必要な量だけ配置しておくことである。

当所では、そのため調相設備計画計算プログラムを開発し、電力会社の実務に供した。

このプログラムは、負荷端母線の電圧の上下限制約および発電機の無効電力出力の上下限制約を考慮しながら、新增設調相設備の年経費と、年間の有効電力損失経費との和を最小とするように、新增設調相設備の量と配置を決定するものである。

またこれらの手法を発展させ、系統の運用状態が正常時以外の、たとえば基幹系統の発送変電機器の停止などのような変則状態のもとでも、電圧・無効電力を規定値に維持するのに必要な調相設備の計画手法も開発した。

### 2-2-4 系統信頼度評価

電力系統の信頼度とは、需要家に支障なく電力を供給できるか否かを量的に表すもので、その尺度としては、一般に需要家における供給支障が発生する回数・大きさ・持続時間がある。

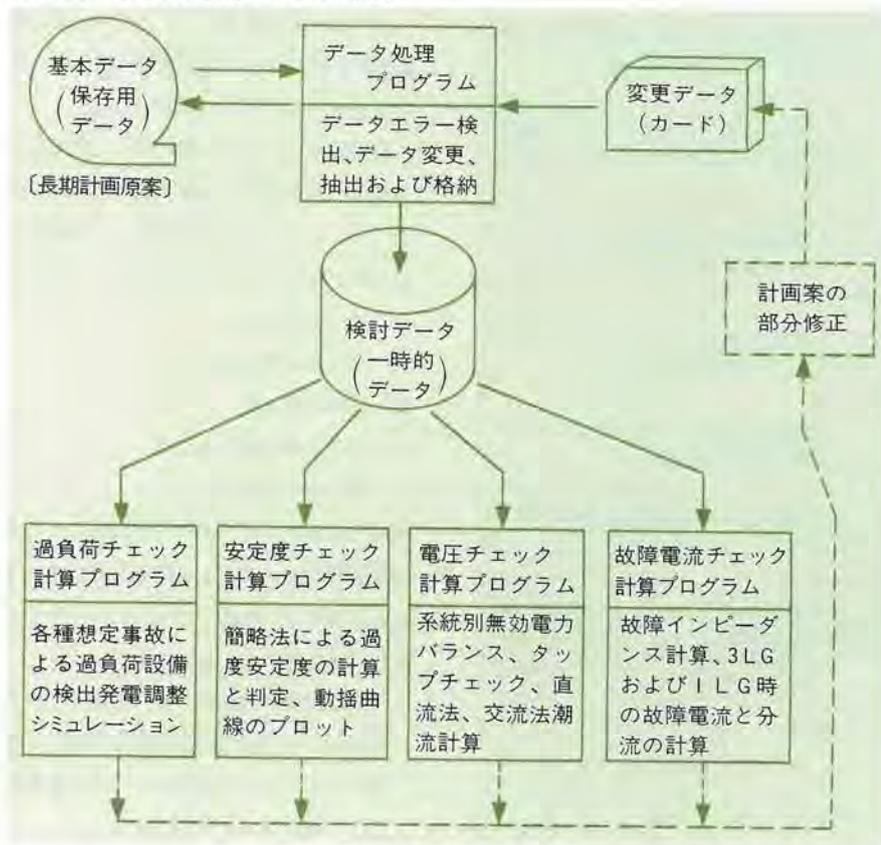
系統計画では、このうち回数と大きさを対象とする場合が多い。また、供給者側からみて、それぞれの設備が供給支障のネックとなる回数と、容量不足の大きさについても関心事となる。系統信頼度の算定手法としては、電源設備と輸送設備について、様々な故障停止を想定し、それぞれに対してそれぞれの需要家に生じる供給支障とそれぞれの設備が供給ネックとなる様子をシミュレートし、これに発生確率を加味して算定する。

具体的には、モンテカルロ法、あるいは確率的潮流計算法などに基づく確率論的方法といわゆる直流法潮流計算、最大フロー計算、場合によっては過渡安定度計算などに基づく決定論的方法とがある。

当所では、確率的潮流計算に基づく方法として、系統設備の事故や、負荷予測誤差などの原因で生じる潮流過負荷や母線電圧異常（供給ネック）を、電力系統の危険度という指標を定義することにより、評価する手法を開発した。この方法は高速演算が可能であることからオンラインの給電運用面への応用にも適している。

一方、潮流計算、あるいは過渡安定度計算を用いる方法としては、想定事故の数だけの繰り返し、積み上げ計算を行うプログラムを作成した。この方法は、想定する事故の組み合わせのケースが膨大になるという欠点がある。そのため、計算ケースを効果的に軽減する手法（フェンシング法）を開発した。また、二次送電系統のように、ループを含まない樹枝状の形態で運用される系統に対しては、末端系統へと設備の停止頻度を積み上げてゆく方法による算定手法を開発した。

図2-2-2 系統計画検討システムの構成



## 2-3 系統運用

担当●電力技術研究所 電力システム部 次長 高橋 一弘

### 2-3-1 運用計画 (週間運用手法の開発)

運用計画は日間、週間、月間などのベースで策定されるが、当所ではこのうち機械化が遅れていた週間の運用計画について、

解列、揚水発電所運転計画、火力発電機負荷配分を効率よく、自動的に作成する計算システムを開発した(図2-3-1)。

また、日間計画については運用に必要な制約条件を考慮した有効・無効電力の最適配分プログラムを開発し、翌日の発電計画

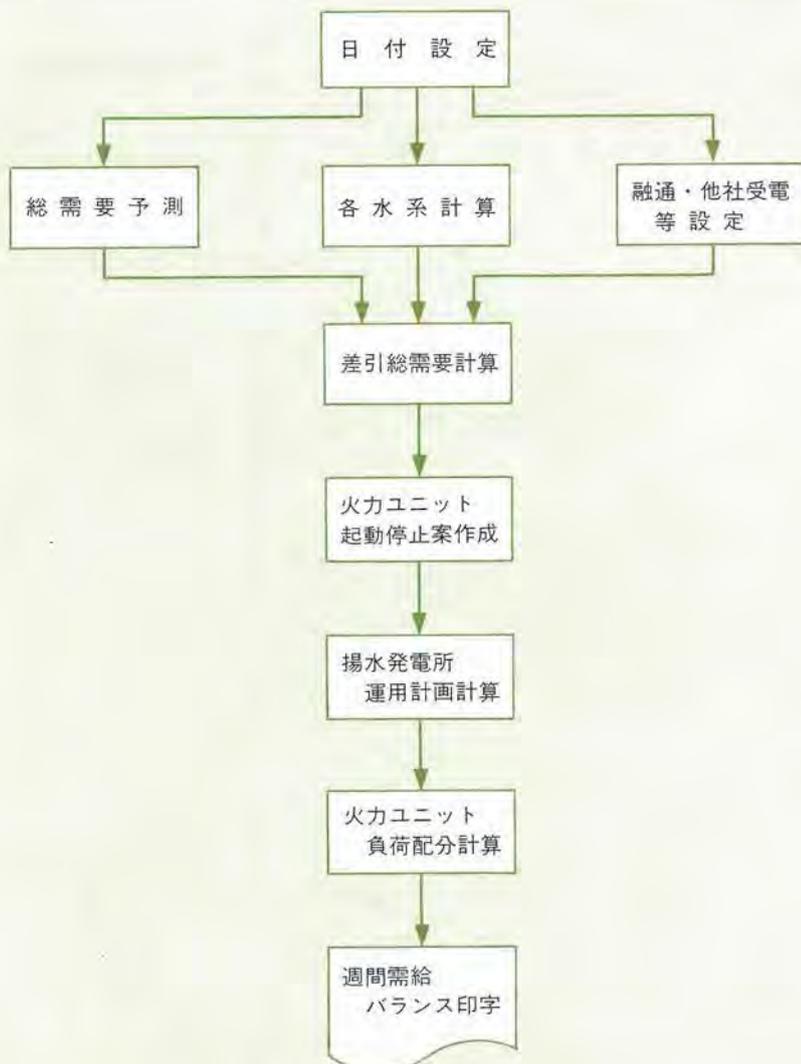
の検討に適用した。

### 2-3-2 需給制御 (負荷急変時の対策)

電力系統の有効電力と周波数の制御は経済負荷配分制御(ELD)と自動周波数制御(AFC)によって対処されている。当所では従来のELDに新しく負荷の変動特性と発電機の応答性を考慮した制御ロジックを開発し、これにより、負荷変化の著しい朝の立上りや昼休み等に従来必要であった運用者の判断による手動調整を不要とした。

さらに、ELDとAFCとの協調問題などを検討するために、平常時、朝、夕、昼休みの負荷急変時、ならびに電源脱落時の発電機の応動、系統周波数や連系線潮流の変動などを総合的に模擬する需給制御シミュレータを開発している。

図2-3-1 週間需給計画計算システム



### 2-3-3 系統操作

平常時の系統操作として、系統が分離された時でも単独運転が可能にすることが必要であるが、当所では、そのために、分離点潮流を制約条件とし、送電損失の軽減を図りかつ火力機の経済負荷配分を達成する系統構成決定論理を開発した。

事故時操作については、とくに復旧操作が給電自動化の中で最後に残された重要課題のひとつとなっている。このため、当所では大容量電源を有する一次系統の復旧を対象としては、系統が放射状の場合、

1. 単独系統維持のための負荷制限
2. 系統並列のための周波数調整
3. 分離系の並列順序と並列点の決定

4. 負荷復旧操作

5. 過負荷解消操作を自動的にを行う論理をそれぞれ開発した。

また、多重異電圧ループを含む場合には、対象システムを予めブロック化しておき、復旧上の重要度の高いブロックから順に復旧して行く操作論理を提案した。

一方、小水力のみを含む負荷系である二次系統の復旧操作論理としては、復旧手順を予めパターン化しておく方式、および系統を放射状系に簡略表現しておき、定められた優先順位に従って順次負荷を復旧する方式、さらに事故系の過負荷・供給支障を

最小操作回数で解消する論理を開発した。

2-3-4 作業計画

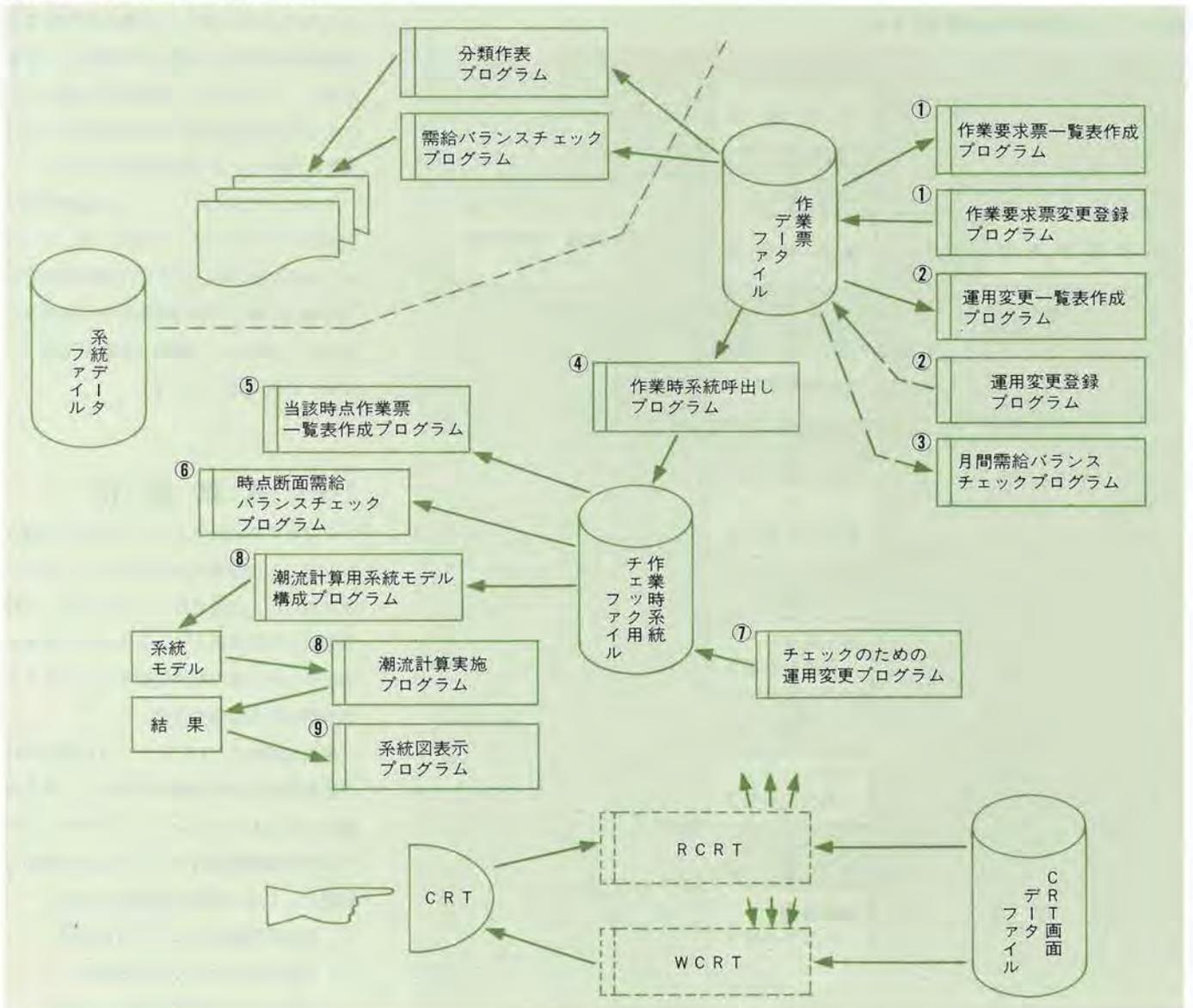
補修や工事などにより送電線などの設備を停止しようとする場合、その設備を停止したときいかなる影響が系統に生じるかを予め十分に予測し、必要に応じて適切な対応処置を考えておくことが必要である。ここでいう「影響」とは電力潮流の変化、系統電圧の変化、系統安定性の劣化、需給分布の偏り、などである。また「対応処置」とは送電線の接続の変更、負荷の切替、発

電出力の振替調整、電圧調整などである。

当所は上述の作業計画に関する業務の効率化と質の向上を目的として、停電作業計画検討システム(図2-3-2)を開発した。これは CRT ディスプレイを介して、担当者と電算機が対話をしながら各種の系統解析をすすめ、合理的な作業計画を立案するシステムである。具体的には

1. 解析の基礎となる系統諸定数のファイル
2. 作業要求票のファイル
3. マン・マシンの対話をサポートする画像ファイル

図2-3-2 停電作業計画検討システム



をベースとし、それに各種の系統解析ソフトウェアを組合せたものである。

### 2-3-5 補修計画

火力・原子力発電機は法規上、年に一回の点検・補修作業を行うことが義務づけられているが、その停止期間は1～4ヶ月にもおよびかつユニット容量も大きいため、需給運用は、定期補修計画によって大きな影響を受ける。

当所では、合理的な補修計画手法を確立するため定期補修計画問題(図2-3-3参照)を組み合わせ問題として定式化し、その求解のために分枝限定法を用いた手法を開発した。本手法は、定期補修に関わる下記のような制約を考慮している。

1. ボイラ・タービンの補修間隔に関する法規上の制約
2. 各発電所での同時補修台数の上限
3. 潮流ネックに起因する制約条件
4. そのほかの先験的な制約条件(所要供給予備力など)

本手法によれば、たとえば年間の供給予備率をできるだけ高く保つこと等を目的とし、効率的に定期補修計画を決定することなどに役立てることができる。

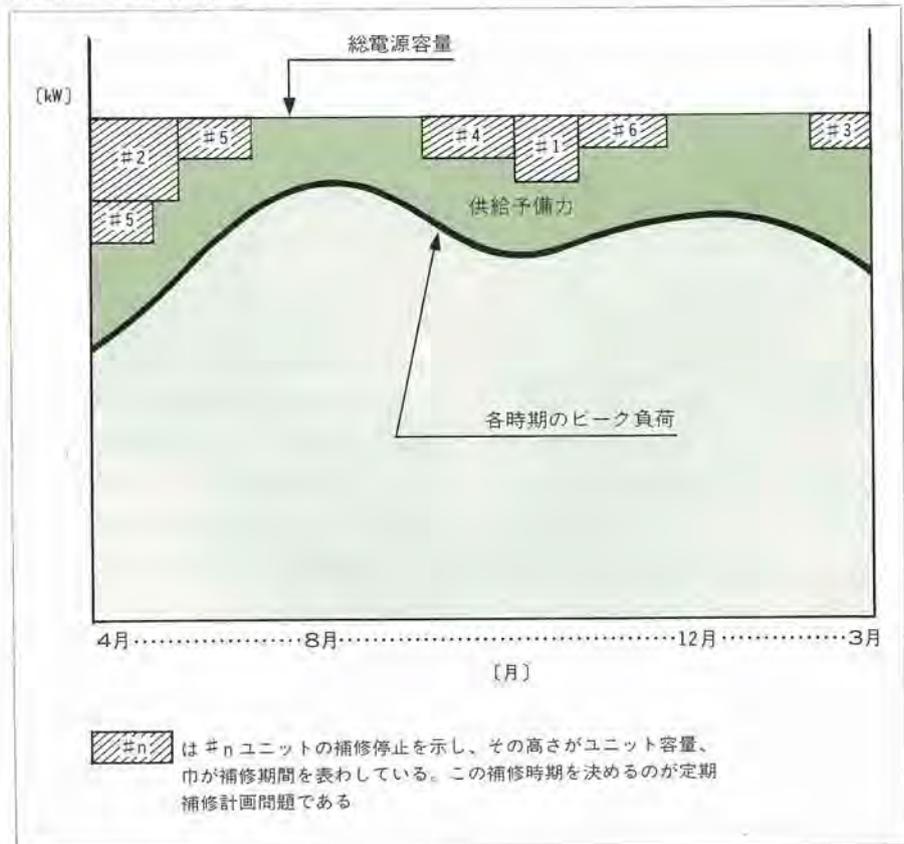
### 2-3-6 電圧制御

電圧制御の目的は周波数制御と同様に、需要家に対するサービスクォリティーの確保と系統運用の合理化にある。具体的には、適正な運転電圧の維持、送電損失の軽減、連系送電線の無効電力潮流の適正化などである。

そのため、発電機励磁系、変圧器 LRC タップ、電力用コンデンサや分路リアクトルなどの調相設備を地域大、全系大で自動的に制御することが必要となる。

当所ではこの目的のために、電子計算機による電圧と無効電力の制御の基礎論理を既に昭和40年に世界に先がけて開発したが、

図2-3-3 定期補修計画問題



これは、電力会社の現在のオンライン制御の基礎となっている。

電圧制御の実施に当っては系統の電圧無効電力特性を的確に把握することも重要である。当所ではこの特性を計算機で求める論理を開発するとともに、電力会社の協力を得て実系統で現場試験による検証を行い、実系統の特性を十分近似し得ることを実証した。

なお、最近、中長距離送電線が重負荷となる場合に受電端電圧が異常低下する現象(電圧不安定現象)がみつかり、当所はその解明に努めている。

### 2-3-7 状態推定 (誤り情報の修正)

電力系統全体を監視する電子計算機は、発電所、変電所などから情報伝送系を介して送られてくる系統情報(発電機出力、電圧、送電線潮流など)を入力データとして用い、論理演算を行ってその結果をCRT

に表示したり、直接制御指令を出す役目をしている。

ところが上記の系統情報が誤っていたり、欠損している場合にはその機能の信頼性は著しく低下する。この対策として、系統情報を論理的なフィルターにかけて入力データの欠損や誤りを正そうとするソフト的な方法が有効であるが、これが電力系統の状態推定法である。

これは電力潮流計算法と推計の手法とを結合した方法であり、1960年代に米国に始まり、その後、内外で鋭意研究が進められてきた。

当所では1970年から研究に着手し、送電線の一区間単位に計算を進める手法、潮流感度指数を用いて有効電力および電圧・無効電力を推定する手法、さらに系統情報の誤りを検出して正しい値を推定する手法や、最適な情報、収集地点の決定法等を開発し実用化した。

## 2-4 系統安定度

担当●電力技術研究所 電力システム部 電力回路研究室 室長 植田 清隆

### 2-4-1 はじめに

電力を安定に輸送する技術の確率のためには、まず、系統のもつ同期化力に対する安定度の維持能力を検討しなければならない。また特異なケースとして、系統電圧が急激に低下し停電支障に至る、電圧安定度についても検討しておく必要がある。

本節では主としてこのような安定度の解析手法を中心に説明を行う。

### 2-4-2 系統安定度の分類と解析目的

電力系統の同期化力に関する安定度は、

従来、定態と過渡に大別されてきたが、近年、とくに発電機やその制御系の安定度を与える影響が大きくなり、過渡安定度については、故障発生直後から1～2秒程度の過渡安定度と、10秒程度までの時間帯における系統動揺に対する安定性を判定する中間領域安定度が重要になっており、これを一般に動態安定度とよんでいる。

また定態安定度も単に同期機だけを考慮したものに加えて、発電機の制御系を考慮した安定性を検討することが必要となっている。それらの分類と解析目的を表2-4-1に示す。

### 2-4-3 安定度解析のための系統モデリング

電力系統の安定度を解析するためには、各系統構成要素をどのように表現するかが重要であるが、ここ数年、詳細なモデリングが行われるようになってきた。

とくにニューヨーク大停電事故やフランス全停電事故などの教訓をもとに超高压送電系統などの検討のためには、安定度解析精度の向上の研究は、非常に重要になっている。

これら系統動特性のモデリングは、発電機と制御系、負荷の三分野に分類され、現

表2-4-1 安定度解析目的と検討する解析方法

	目的	過渡	中間領域	定態	備考(検討の概要)
系統計画	基幹送電系統の構成	●		●	将来の外輪系統やそれ以下の電圧階級の系統構成
	次期上位電圧の選定	●		●	将来の主幹系統の最高電圧階級
	大電源地点からの送電方法	●	◎	◎	将来建設予定となる大容量発電所から外輪系統までの送電方法
系統運用	基幹送電系統の運用目標	●	◎	●	至近年の外輪系統や下位電圧系統の電力送電分布
	会社間連系方式と運用方法	●	◎		ほかの電力会社との間の連系方法とその運用基準、保護方式
	変則系統の運用方法	●	◎	◎	送電線補修や一部変更増設時の運用方法、保護方式
	各種安定度向上対策	◎	●	◎	中間開閉所、直コン、制動抵抗、中間調相などの安定化対策と保護方式
	事故波及防止対策 系統異常現象・事故の解明		●	◎	主保護以後の各種後備保護方式や、電制、負制、系統分離方式 系統で生じる異常な電力動揺現象や重大事故の記録との対比
発電所運用	発電所の運転限界	◎		●	有効・無効電力の運転許容範囲
	系統事故時の発電所に与える影響	◎	●		電力変動やその後の動揺とプラントトリップ条件との関係
	発電所の制御系最適値の選定	◎	●		励磁系の最適値や補助信号回路のあり方、ファーストバンプ方式等

注：●印は主として検討すると考えられる項目、◎印は一部検討すると考えられる項目

在当所ではつぎのような方法をとっている。

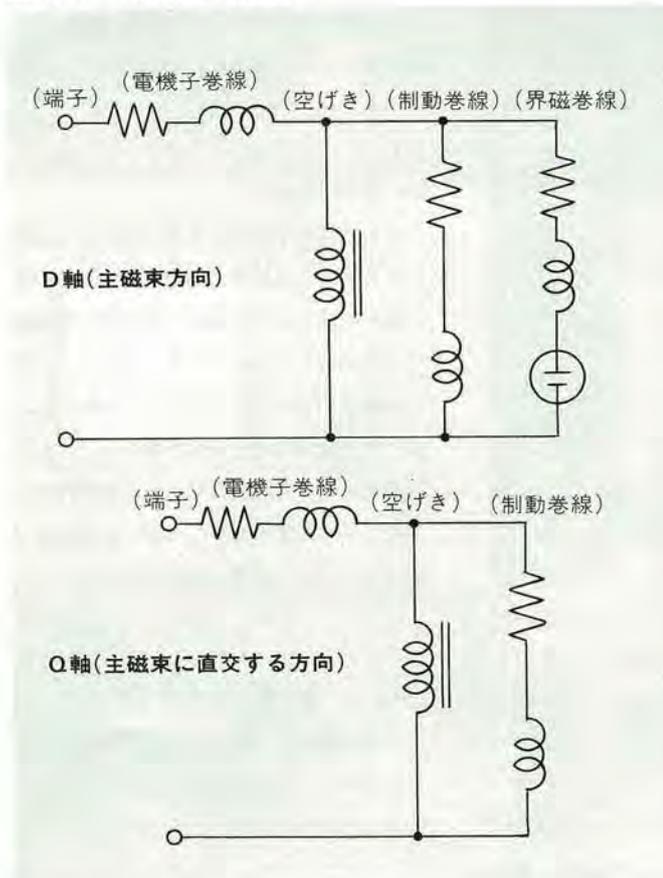
## I. 発電機

発電機は回路的には固定した電機子巻線、回転する界磁巻線と制動巻線の回路からなっている。その等価回路を図2-4-1に示す。

現在の電気回路モデルでは、これらの巻線に鎖交する磁束と流れる電流の変化を求めて、発電機のもつ同期化力と制動力を忠実に表現する方法をとっている。磁束の飽和現象としては、とくに回転部分と固定部分の間の空隙に生じる磁束の飽和特性を考慮している。

一方発電機の機械的特性は、回転体の慣性を考慮し、タービンからの軸トルクと発電機で発生する電磁トルクの平衡についての回転運動を対象として、発電機の回転速度と回転子位置相対角度(相差角)の刻々の変動を計算している。

図2-4-1 同期機の等価回路



## II. 発電機制御系モデル

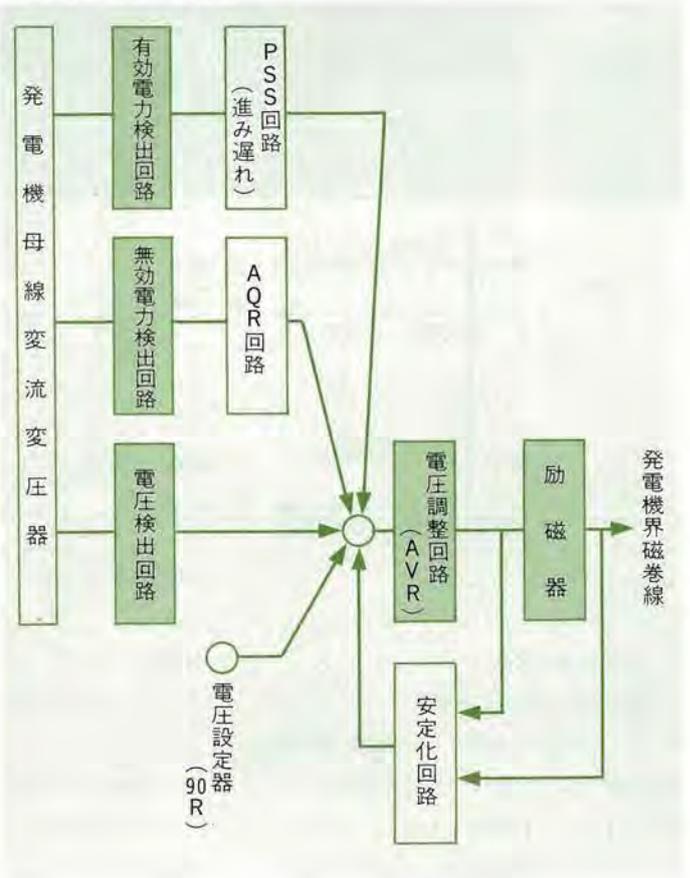
発電機の制御系は、発電機の電圧を制御する励磁系と発電機を速度を制御する調速系からなっている。従来これらの制御系は、発電機の過速度と電圧上昇を保護する目的で設置されていたが、最近は発電機の安定度を向上するための制御機能を付加するようになっているので特性を十分モデル化した検討を行うことが必要である。ここでは各種の発電機に共通に用いられている制御系の概要をのべる。

### 1. 励磁系

励磁系の基本構成を図2-4-2に示す。入力信号は、発電機端子電圧、有効・無効電力が基本であり、これらの状態量がある目標値以内に制御するため界磁巻線の励磁電圧を制御する。

この電圧発生のための励磁機としては、

図2-4-2 励磁系の構成



直流発電機、交流発電機と整流器、サイリスタなどがあるが、最近応答性の速いサイリスタ励磁方式により、系統の安定度を向上させる方法が採用される傾向にある。このような励磁系は、各部の利得と時定数ならびに補助信号回路の各特性を十分精度よくモデル化することが必要である。

### 2. 調速系

最近の大容量発電機は、系統から切りはなされた時の回転速度の上昇に対して、安全面から厳しい制限が設けられており、高速応性のある調速制御系が設置されている。

図2-4-3は、この調速系の代表的な例である。入力信号は、発電機回転速度、出力、再熱器圧力などで、主蒸気加減弁(CV)やインタセプト弁(ICV)を開閉させて、回転速度を一定に保持する。これらの制御弁の動作は、直接、発電につながるため系統の安定度にも影響を与える。

図2-4-3 調速系の構成

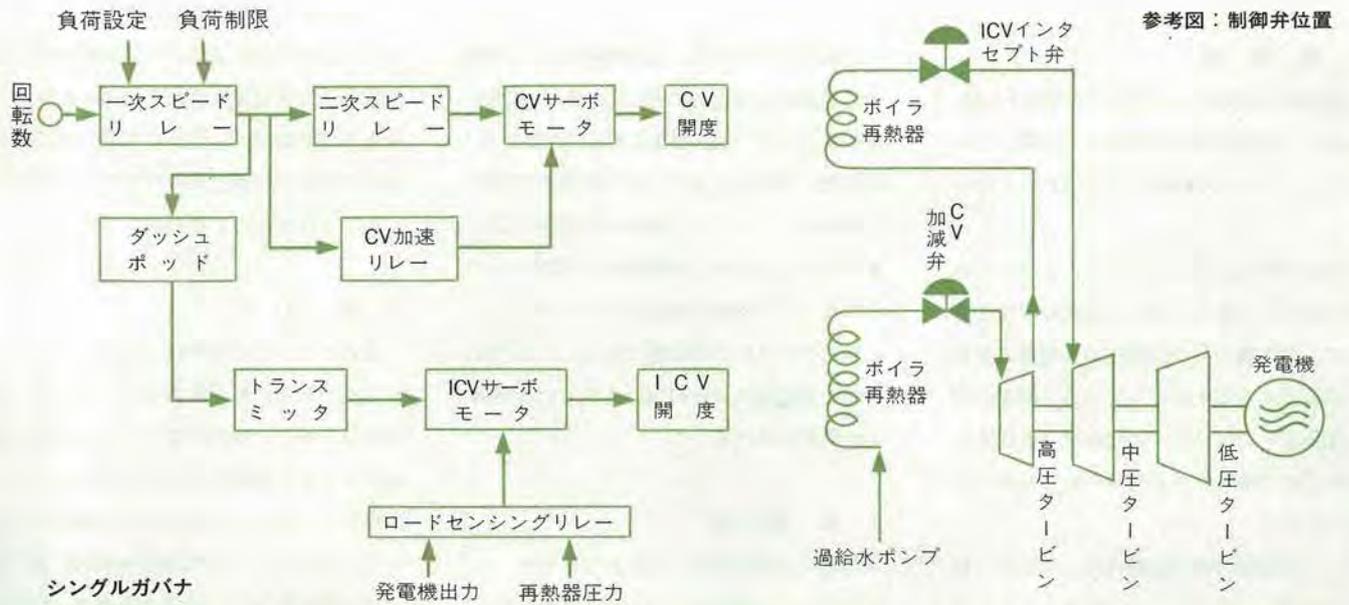
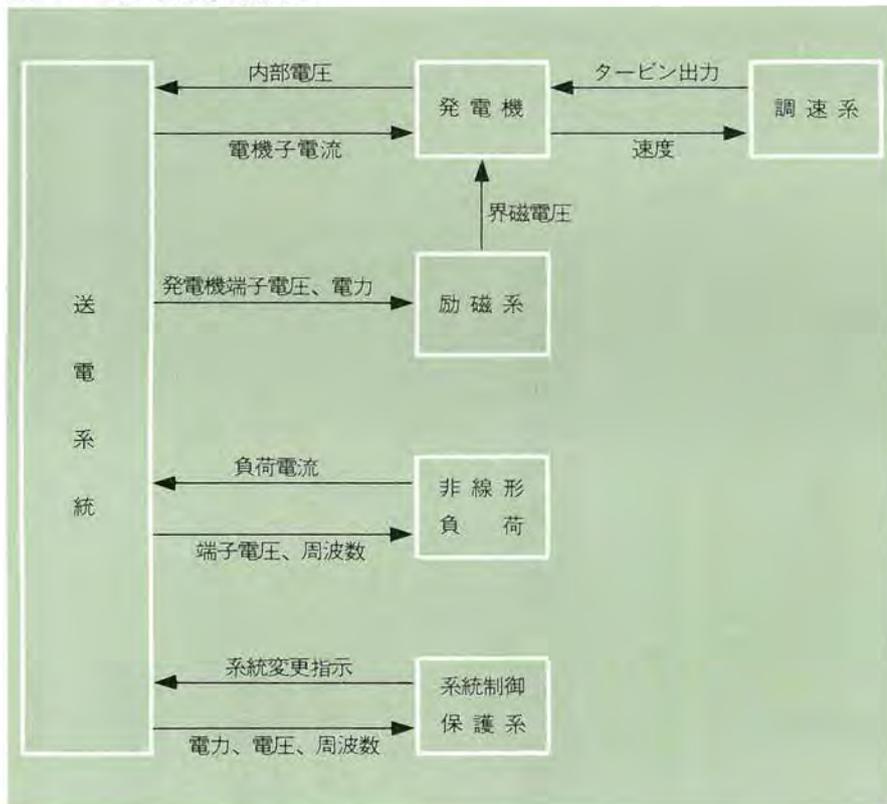


図2-4-4 安定度解析の概念図



で近似することができる。この関数は、負荷の構成要素によって異なるが、それを求めるため現在各電力会社で偶発系統事故記録などによりデータ収集が行われている。

安定度解析手法では、これらの関数を自由に表現できるが、とくに電圧・周波数が大幅に変化したときの負荷脱落特性などが充分モデル化されている。

(ii) 誘導機負荷

系統負荷の半分は、工場などの大口負荷で、この多くは誘導電動機である。このため解析手法は誘導電動機の動特性を発電機と同様に扱うことができる。現在は、これらの特性がどのように安定度に影響するか、また系統全体のモデル化にあたって、どのような構成を考慮したらよいかの検討が行われている段階にあり、今後も実態調査や実測データの積み重ねが必要である。

3. 系統負荷モデル

系統負荷は工場や家庭の電灯、クーラー、モータなど非常に多様化しており、発電機や送電線のように個々の特性を考慮してモデル化することは困難である。このため、安定度解析では送電系統(110kV~500kV)

の変電所単位で1括して表現し、つぎのような2つの方法を用いている。

(i) 関数表現負荷

変電所から配電系統を一括してみた場合、系統負荷はその母線の電圧と周波数の関係

2-4-4 動態安定度

系統の動態安定度は、送電線網に雷撃や塩害などによる短絡事故が発生した場合や大容量電源が脱落したときの系統の安定性を判定するもので、これまでのべてきた電

力系統の構成要素を図2-4-4のようにすべて結合したシミュレーション手法によって解析している。

この方法で例えば400機の発電所からなる系統について安定度を計算するには、現在の大形計算機を用いても数分～数十分必要となる。しかしこの手法では、発電機や負荷のすべての状態量や送電系統のすべての潮流、電圧、周波数など系統の安定性を判断するのに必要な情報の動きを詳細に検討することができるので、現在電力各社で広く用いられている。

表2-4-2は、当所が関西電力㈱と共同で開発した安定度解析プログラムの機能と解析可能系統規模の概要を示したものである。これによりわが国の110kV以上の送電網と発電所(50Hzまたは60Hz系すべて)を模擬することができる。

また、図2-4-5は、東北電力と共同で実施した秋田火力4号機負荷遮断時の系統動揺実測試験と幹線潮流変動に関するシミュレーション解析の対比の例を示したもので、実用的に十分な解析精度を有しているといえる。

## 2-4-5 定態安定度

安定度の検討は、系統に生じ得る種々の潮流ショックに対して行われるが、このうち比較的ショックの小さい場合、換言すれば解析モデルの線形化が有効と考えられる場合の安定度を定態安定度と言う。

当所では、交流計算盤や模擬送電線設備、さらには実系統における試験などによる検証をベースに、多機系統の複雑な不安定現象の解明に早くから着目し、時代の要請に速応した種々の定態安定度解析手法を提案してきた。デジタル計算機が一般化する以前に、既にこれを想定した行列式法( $\rho$ 法)を提案し、一時代を画するに至った。その後、系統構成の複雑化に伴い、単調な脱調現象のみでなく、全系に亘る加速減速が共振し合って増幅する現象を発見し、これをチェックするものとしてスツルム法や

表2-4-2 動態安定度解析プログラムの機能と解析系統規模

	要素	内容	最大模擬規模
系統構成要素の模擬範囲	同期機	制動巻線：D軸0、~1個 Q軸0、1、2個 空隙飽和：関数表現	400台
	励磁系	標準タイプ：9種+PSS	同上
	调速系	標準タイプ：水力-2種 火力-9種 原子力-1種	同上
全体機能	安定化装置	励磁系PSS：3種 ファーストバルブ：2種 直接コンデンサ：1種 中間調相：1種 制動抵抗：1種	同上 同上 20点 同上 同上
	誘導機負荷	回転子巻線磁束変化考慮	250台
全体機能	系統規模	母線数 送電線数	1,000地点 1,500ルート
	系統縮約	短絡電流法	100地点
	プログラムサイズ	拡張、縮小が容易に可能	980Kbit

推移行列法を開発、提供してきた。

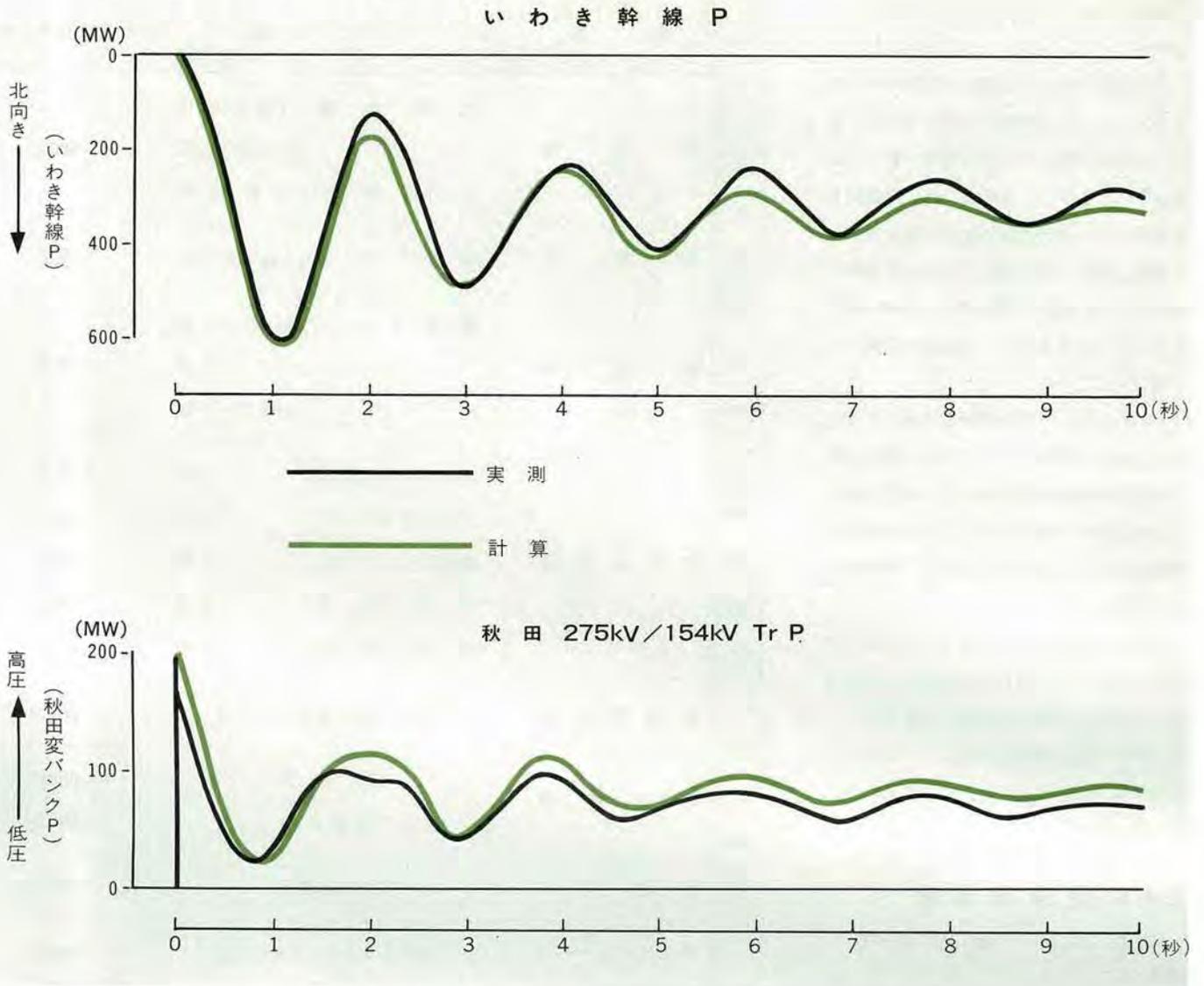
一方、最近のデジタル計算機の長足の機能向上は、従来では考えられなかった高度の数学的処理を可能としてきている。これに伴い当所は、発電機の磁束や制御系の詳細なモデルを用いた固有値解析プログラムを試作し、数百機からなる系統を対象に実用性の検証と改良を重ねてきた。その結果、固有値解析の最大の欠点と言われる膨大な所要メモリの問題を解決し、かつ十分な精度と効率を有する新しい手法(S法)を開発した。

本手法は、種々の実験や現場試験に裏打ちされた現象の物理的解釈、巨大行列を対

象とした高度の数学的処理、メモリ配分や計算精度、効率に対する細心のプログラミング技法など、当所の有するノウハウを結集したもので極めて高い評価を受けている。

その基本的機能は、系統内に発生する電力動揺を周期や減衰率毎(固有値)に分解し、安定運用に悪影響を与え得る成分を必要個数だけ拾い出し、これらと各発電機の運転状態との相関(固有ベクトル)を定量的に評価するものである。これによれば、電力動揺の因果関係が明らかになり、系統構成や運用状態、各種制御機能の改善策がきめ細かく示されるのみでなく、遠方系統の等価縮約などの幅広い応用が考えられる。

図2-4-5 秋田火力負荷遮断時の主要幹線潮流実測—解析対比例



## 2-4-6 電圧安定度

いわゆる定態安定度や動態安定度が多数の発電機の並列同期運転上の安定性に着目するのに対し、電圧安定性とは需要地の受電電圧の大きさの安定性を論ずるものである。

需要の変動に対する電圧の変動を補償する最も基本的な方法は、需要地に設けるコンデンサの投入容量の調整である。コンデンサは極く短周期で電気を蓄めたり出したりするタンクのようなもので、1秒間に50回も60回も向きを変える交流電流の流れを円滑にし、受電端電圧を基準値に保持する

する機能を有する。

しかしながら、需要の増大に対して受電電圧を維持するためにコンデンサ補償容量を次々と増していくと、ついには系統の電圧変動特性が逆転し、種々の制御機能が正常に働かないこととなる。この限界を数学的にチェックするものとしていくつかの判定法が提案されているが、最近内外で報告されている電圧異常低下の事例は、必ずしもこの条件に合致しているとは考えられなくなってきた。

当所では、この問題を総合的な見地から見直し、従来の数学的判定法による不安定領域外であっても、電圧の異常低下現象の

生じ得ることを例証した。これは需要の急増や送電系のトラブルに対する変圧器タップの追従特性やコンデンサ補償遅れ時間など種々の要素の複合現象として説明される。またこのような複合現象を未然に防止する方法として、需要地におけるコンデンサ補償容量と短絡容量の比をチェックし、これを一定値以下に抑えることを推奨している。

更に、やむを得ず限界付近で運用しなければならない場合は、かなりきめ細かい運用制御が要求されるため、シミュレーションによる制御協調の検証プログラムを開発し、安定した電力供給の維持に努めている。 ●

# 2-5 原子力・火力プラントシミュレーション

担当●電力技術研究所 電力システム部 電力回路研究室 室長 植田 清隆

## 2-5-1 シミュレーションの必要性

電力システムのシミュレーション・モデルの中で発電所は、従来、水車発電機系(水力)、タービン発電機系(火力、原子力)のみが考慮されていた。

しかし電力システムの大規模化にともなって、電力システム故障時の電力システムの挙動を一層正確に把握する必要がでてきたのでそのためには大容量発電所、とくに火力・原子力発電所について、タービン発電機系だけでなく原子炉系(原子炉、蒸気発生器、主蒸気管など)およびボイラー系も含めたプラント全体の応動特性をシミュレーションする発電所モデルが必要とされるようになってきた。

本節では、系統外乱に対する原子力・火

力プラントの出力応動特性と系統事故時のタービン発電機軸系に生ずる過大軸振れトルクについてのべる。

## 2-5-2 原子力プラントシミュレーション

### I. 原子力プラントシミュレーション・モデルの開発

モデル開発にあたっては沸騰水型軽水炉(BWR)プラントと加圧水型軽水炉(PWR)プラントをとりあげ、公表資料ばかりでなく原子力発電所の起動試験の経験や運転訓練センターにおける研修などを通して、実機に即した原子力プラントの構成、動特性の把握に努めた。

電力システムからの外乱に対する原子力プラントの応動を模擬するためには、タービン

発電機速度制御系(ガバナ系)の応動、原子炉冷却材の圧力、温度および原子炉中性子束の変化をとくに精度良く模擬する必要がある。しかし、モデルが複雑になると、電力システムモデルが大型になり解析効率が低下するので、解析目的との整合をとりながら可能な限り簡略にするよう考慮を払った。

### II. BWRプラント・モデルの特徴

開発したモデル(図2-5-1)の特徴はつぎの通りである。

#### 1. 原子炉系モデル

- (i) 中性子束および燃料は、炉心の高さ方向、半径方向に集中定数化して動特性をとり扱う
- (ii) 原子炉圧力は、圧力容器内の冷却材のエネルギー、質量および体積の平衡を考

図2-5-1 BWRユニット出力応動解析モデル

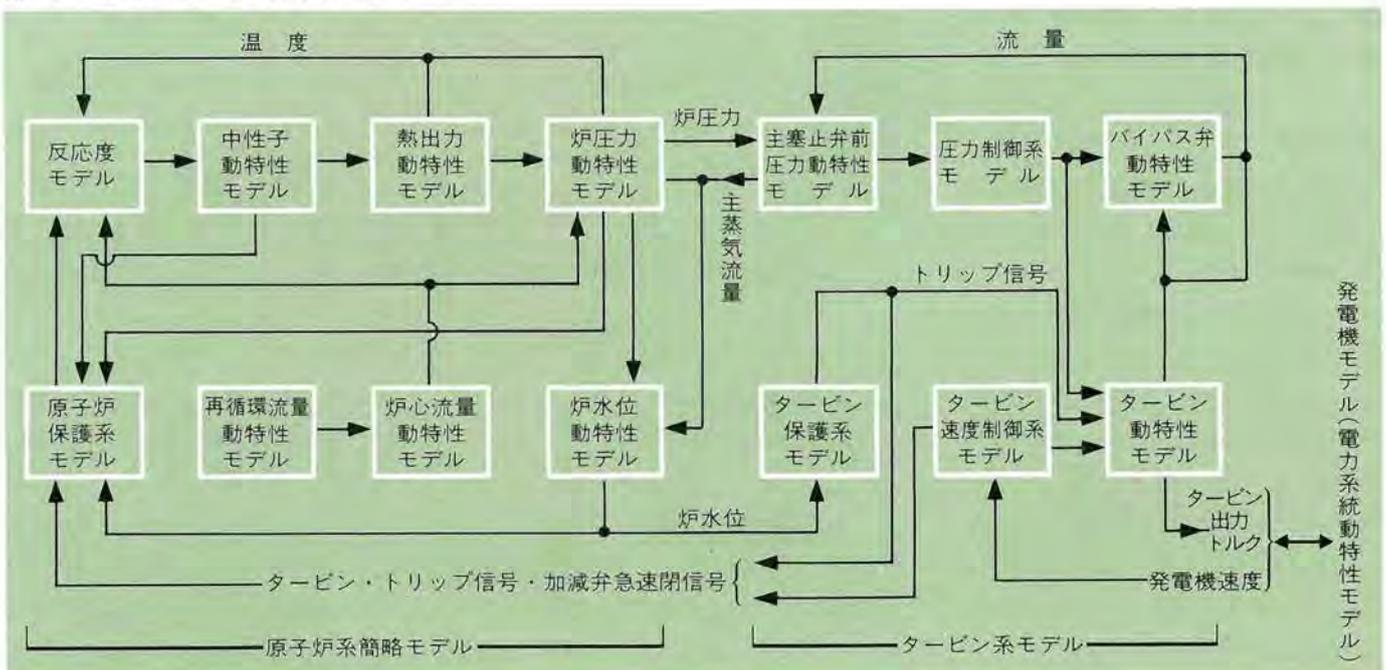


図2-5-2 PWR ユニット出力応動解析モデル

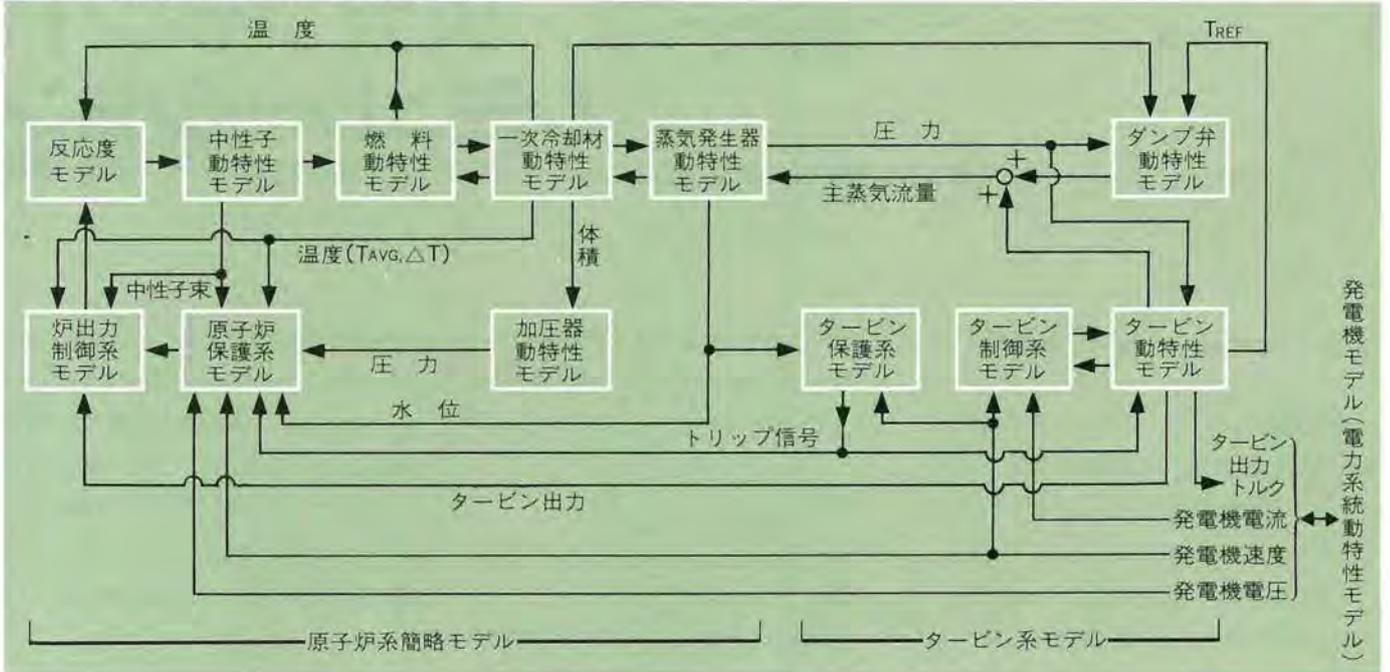


表2-5-1 火力プラントモデル概要

モデル	擾乱の大きさ	解析対象時間*	変動の持続性**	モデル概要	解析目的例
I	小	短	無	CV動作のみ	安定度
II	大	短	無	I + 弁急速閉	安定度
III	小	中~(大)	—	I + プラント概略	AFC
IV	大	中	—	II + プラント簡略	緊急制御
V	小~大	長	—	プラント詳細	

注： \* 短：5～10秒まで 中：数分まで 長：数分以上 CV：主蒸気加減弁  
 \*\* 周波数変動が短時間で復帰すれば持続性無とする。 AFC：自動周波数制御

慮して求める  
 (iii) 炉心入口の冷却材温度は、給水入口から炉心までの冷却材流動遅れを考慮して求める  
 (iv) 再循環流量制御系、原子炉保護系もモデルに入れる

2. タービン系モデル  
 圧力制御系、タービン速度制御系、加減弁およびインタセプト弁の制御系を非線形特性も考慮して詳細に模擬する。

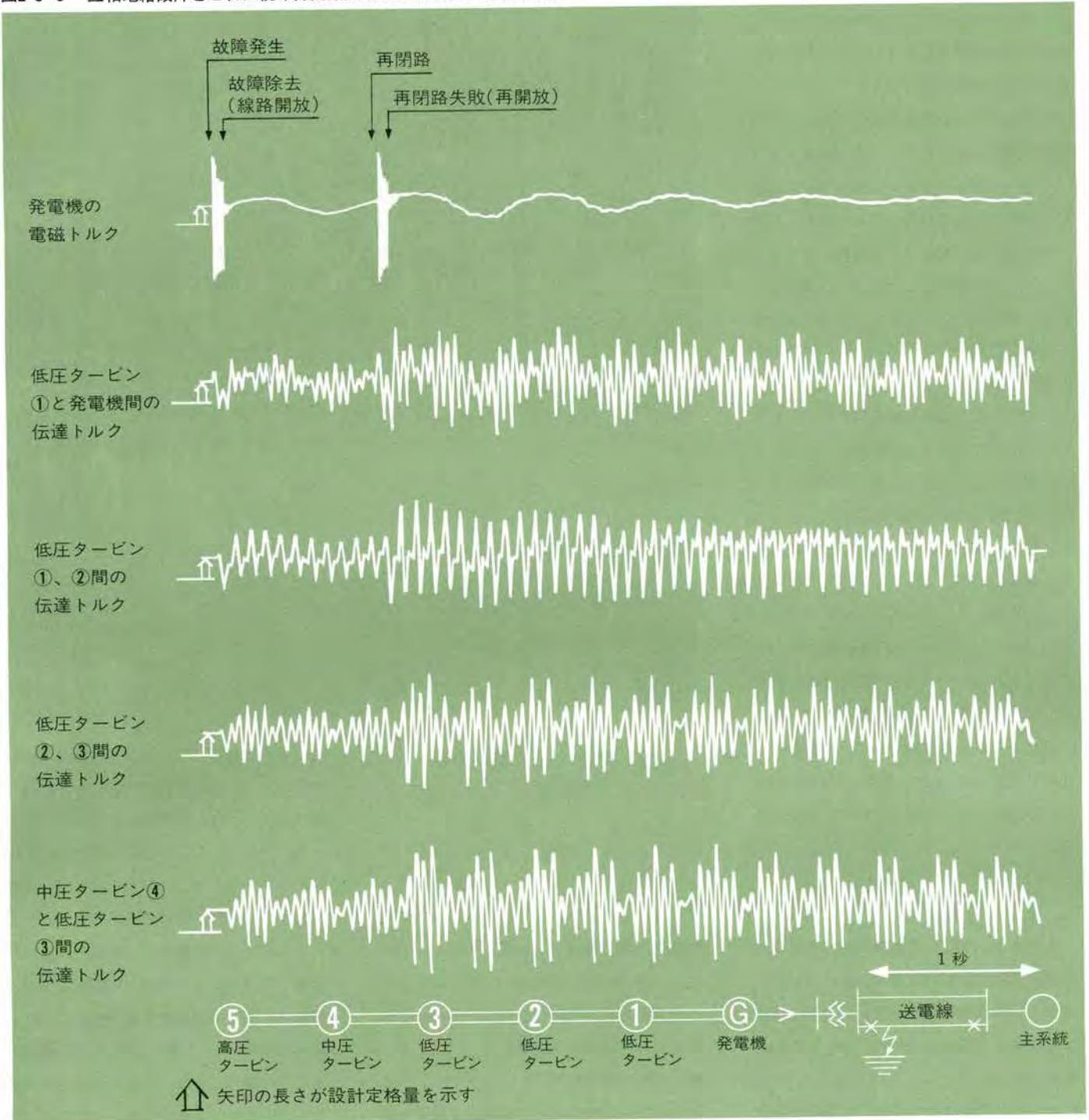
III. PWR プラント・モデルの特徴  
 開発したモデル(図2-5-2)の特徴は下記の通りである。

1. 原子炉系モデル
  - (i) 中性子束および燃料のモデルは BWR と同じである
  - (ii) 一次冷却材系統、蒸気発生器の圧力は BWR の原子炉圧力と同じ手法により求める
  - (iii) 一次冷却材系統各部の温度は流動遅れを考慮し一次遅れモデルにより求める。
  - (iv) 炉出力制御系、加圧器制御系、原子炉保護系もモデルに入れる

2. タービン系モデル  
 BWR と同様に詳細に模擬する。
- IV. 電力系統動特性解析への適用  
 開発した原子力プラント・モデルを従来の電力系統モデルに組み込むことにより、原子力プラント応動を考慮した電力系統動

特性解析が可能となった。その結果、系統故障の発生地点、種別、系統の構成、原子力プラントの種別によりプラント応動は大きく異なることが明らかになり、原子力プラント応動を考慮した系統動特性解析の重要性が認識されつつあり、すでに電力会社においても実運用への適用を検討している。

図2-5-3 三相地絡故障とこれに続く再閉路失敗時の軸振れトルク解析例



### 2-5-3 火力プラントシミュレーション

#### I. シミュレーション・モデル

電力システムの解析を目的とした火力プラントモデルには、その解析目的、即ち、擾乱の大きさ、変動の持続性、解析対象時間によって表2-5-1に示されるようなモデルが

使用される。

モデルⅠは、従来から安定度解析のために使用されてきたモデルであり、CV(主蒸気加減弁)動作のみを考慮したガバナとタービン(通常一次遅れの結合)から構成される(図2-4-3参照)。

モデルⅡは、モデルⅠにガバナの弁急速閉動作機構を含めてCV、ICV(インター

セプト弁)動作を考慮したモデルである。弁急速閉動作機構は、単機容量の増大に伴う単位容量当りの慣性の低下による加速抑制のために付加された機構であり、ロード・センシング・リレーや、パワー・ロード・アンバランス・リレーとよばれる。

これらの動作はCVやICVに大きな変動を与えるので、大擾乱時の解析には重要

である。

モデルⅢは、AFC等の検討に用いられ、モデルⅠを簡略化した上、かなり簡略化したプラント側モデルを追加した。

モデルⅣは、いわゆる中・長時間安定度解析に用いられるもので、モデルⅡにプラント圧力モデル、プラント出力や圧力制御モデルを追加している。これにより、系統分離などによって生じる周波数、プラント出力や圧力の変動、さらに圧力が高くなることなどによるプラント・トリップが把握できる。これは主に、電力系統の緊急制御方式の検討に用いられる。

モデルⅤは、長時間解析用であり、プラントの温度などまでも解析する。このモデルも目的に応じて種々のものが使用されているが、電力系統と結合する場合には、モデルⅣのプラントモデルを更に詳細にした形となる。

これらのモデルを使用するにあたっては、その運転モード(ガバナ・フリー、ロード・リミット)、ガバナ形式の差異、弁急速閉動作、プラント制御方式(協調モード、ボイラ追従モード、周波数バイアスの有無等)、非線形特性(ガバナ内不感帯、傾斜調定率)などを目的に応じて充分考慮する必要がある。

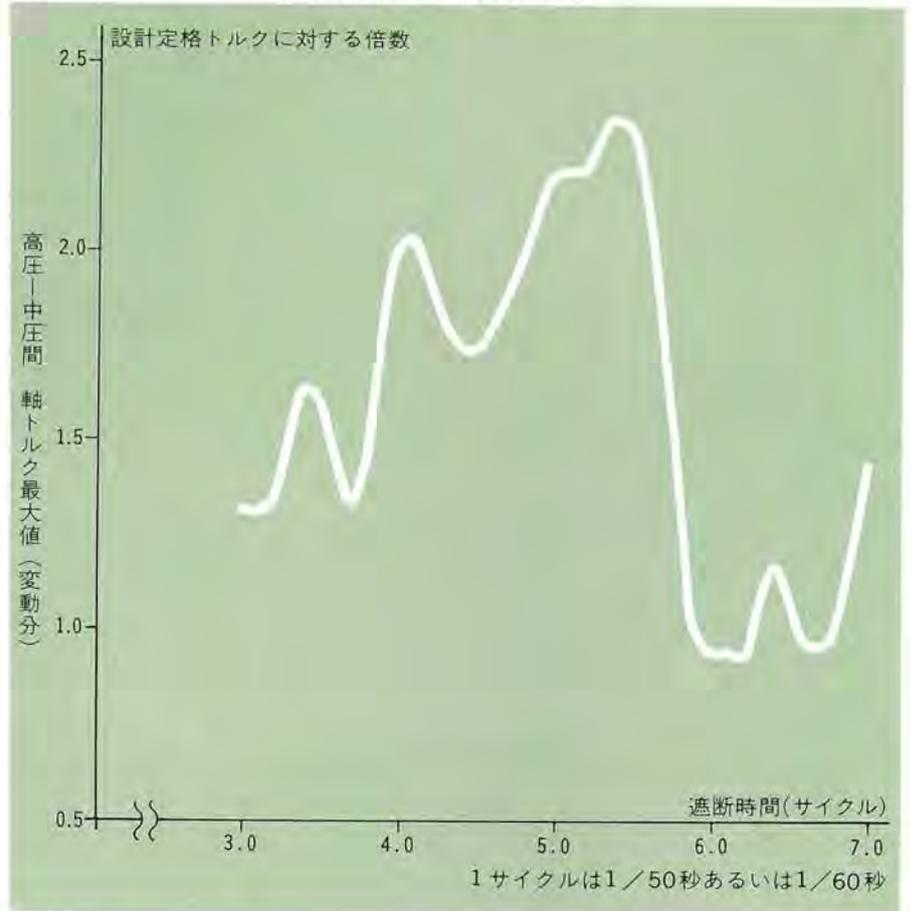
## II. モデルの実証

モデルⅠ、Ⅲは、発電機負荷遮断試験時の主系統側の周波数変動や、CVやガバナモーターの実測結果、あるいはAFC試験などによって実証が行われ、かなりの有効性が認められている。

モデルⅡ、Ⅳについては、発電機負荷遮断試験、中擾乱程度の電力系統試験、系統事故時の自動記録等による検証が行われている。

モデルⅤは、プラントのみの特性は種々のプラント動特性試験での検証が行われているが、電力系統と結合した状態での大擾乱に対する検証は困難であり、これからの課題である。

図2-5-4 故障線路の遮断時間による軸トルク最大値の変化



### 2-5-4 タービン発電機の軸振れトルク

近年タービン発電ユニットの容量が一段と増加するにしたがって、発電機部に比しタービンの慣性の占める割合が大きくなり、軸強度の面で機械設計が厳しくなっている。他方、電力系統の信頼度向上のため、各種の再閉路方式が実用化されているが、その際生じる発電機の電磁過渡トルクにより、軸材各部に過大な振れトルクが生じ、その材料の弾性限界を越え発電機械の寿命を著しく短縮するおそれがある。

このため当所では、これまでに約60台の250~600MW容量のタービン発電ユニットについて、再閉路失敗時の軸振れトルクの解析を行い、軸強度面からみた再閉路方式適用の可否を検討してきた。

図2-5-3は、代表的な発電ユニットの再閉路失敗時の軸振れトルクの解析例を示

したものである。タービン発電機は軸振れに対する共振周波数特性をもっており、通常10Hz~50Hzの中にいくつかの共振点をもっている。このため発電機から軸系に振れトルク外乱が加わることにより、過大なトルクに成長することもありうる。

一度発生した軸振れトルク振動は、軸系のもつ制動力によって徐々に減衰するが、これには通常10秒程度もかかる。このため高速再閉路(1~3秒)に対しては、軸振れ振動が減衰していない状態で再度外乱が加わり、過大振動が発生する。

図2-5-4は、遮断器の操作時間でどのように振れトルクの最大値が変化するかを示したもので、わずかな差により、軸振れトルクは大きく変化する。当所ではこれ等の各種の影響要因を考慮した多機系統での再閉路に対する軸トルク評価手法を作成し、個別の系の解析を行っている。

# 2-6 系統解析手法

担当●電力技術研究所 電力システム部 次長 高橋 一弘

## 2-6-1 はじめに

電力系統の計画、運用、制御に必要な系統解析には、デジタル計算機を用いて行うが、これには、大規模なシステムを効率的に計算するための基礎となる、演算手法やモデリングが必要である。

本項では、当所で開発したいくつかの研究を以下に記述する。

## 2-6-2 大規模行列演算

行列演算は、電力系統の解析に最も基礎的な演算であり、潮流計算、安定度計算、故障計算などに共通して用いられる。一般に電力系統の解析に用いられる行列には、共通する特性として次の事項が挙げられる。

1. 大形で非ゼロ要素が疎らである。
2. 必ずしも対称行列とは限らないが、非ゼロ要素が対称の位置にある。

一方、電力系統の解析に係わる演算内容に関しては、主として次の事項が考えられる。

1. 連立一次方程式の求解
2. 逆行列要素の計算
3. 行列式の計算

これらの計算は、たとえば電力潮流、各種系統制御のための感度係数、あるいは短絡電流分布などの計算に利用される。このような場合、取り扱う行列の次数が数百以上と大きいことに加え、計算過程において演算回数が数千回にも及ぶ。そのため、演算時間および計算機の記憶容量の面で効率的な演算方法が不可欠となる。

このような背景に立ち、当所では、上記

の行列演算に関して、行列の特性(疎性、対称性)に着目した演算手法とプログラミング技法を駆使し高効率演算プログラムを開発した。開発した手法は、大形疎行列の三角化分解とこれに基づく連立一次方程式の解法、逆行列特定要素の計算、ならびに行列式の計算である。

また、これらの計算に先立って行われる行列要素の順序づけに関して、一連の行列演算をネットワーク状グラフにより表現することにより、グラフ上での演算処理手順を体系づける研究を行った。

このようなグラフによる処理手順は、表示されるグラフが多くの場合系統の形態と同一となり視覚的に扱え、しかも、行列の非ゼロ要素のみの取り扱う手順であるため、演算処理および、プログラミングへの移行が容易という利点を有している。

開発したプログラムは、現在電力各社における各種の系統解析プログラムの中核に利用されている。

## 2-6-3 系統縮約手法

電力系統は発電機数の増加などにより、その系統安定度など系統動特性の解析の計算時間も莫大なものとなってきているので、必要な精度を維持しつつ、効率的な解析手法の開発が不可欠となってきた。

そのためには発電機、電圧調整器、調速器などの動的効果を与える系のモデルの簡略化すなわち系統縮約を行う必要がある。

当所では原大規模システムの周波数応答に注目する縮約手法と動揺モードに注目して縮約する手法について研究開発を行って

きた。

前者は、まず簡略化した系の構造を指定し、つぎに、原系の周波数応答と簡略化した系のそれとが指定された周波数範囲で一致するように、簡略化した系の定数を決定するものである。この手法は線形表示したAVR系や連系系統周波数制御における他社系統の簡略化問題に適用された。

一方、動揺モードに注目した手法は、簡略系の構造が事前に指定しにくい大規模系の縮約に有力である。しかし、どのモードを簡略系に保存するかを決定することが難しく、解決が期待されていた。当所では、この問題に対する2つの解法を提案し、実用的な手法に近づけた。

## 2-6-4 最適制御理論

系統の複雑化、運用の高度化に伴い、複数個所の制御系を系統全体で協調をとりながら設計したり、配置を決定したりすることが必要となってきている。

当所においては、そのため、複数制御系に最適な最適制御理論を適用して多機のAVR(自動電圧調整装置)やPSS(系統安定化装置)の協調設計、負荷周波数制御へ適用することを、具体的目標のひとつとして、必要な理論の開発を行ってきた。

これらの制御問題では制御に使用できる情報量が少ないので観測できる諸量の位相を補償して、制御の効果を高める必要があり、最適な補償器の設計法について開発を行った。

また、電力系統は時々刻々潮流状態が変化するため、動特性も絶えず変化する。そ

のため動特性の変化に対しても劣化の少ない制御系の設計が必要となる。

このように動特性の変動に強い制御系をロバスト制御系と呼ぶが、当所では最適な補償器設計法にロバスト性を加味する手法の検討を行っている。

### 2-6-5 潮流計算手法

電力系統において、それぞれの発電機で

発生した電力が、それぞれの需要点まで、送電線、変圧器などから成る送変電系統を、どのように流れていくかを解析するのが潮流計算である。

系統計画では、設備拡充策の各案について、需給条件や想定事故条件を様々に変えて潮流状況を予測する必要があり系統運用では、時々刻々変化する状態に対して、事故が起こらないよう最適な状態を維持する方法を決定する必要がある。そのため、潮

流計算には高速性と簡便性が要求されることが多いが、当所ではこの目的のためにフロー法に基づく方法など各種プログラムを開発し、また、会話型潮流計算や階層計算機システム用潮流計算として、電力会社の利用に供している。



## 2-7 保護方式

担当●電力技術研究所 送配電部 系統保護研究室 室長 坪井 昭

### 2-7-1 はじめに

保護装置は電力系統からの要求にこたえて、電磁形から静止形、さらにはマイクロプロセッサを適用したデジタル形へと変遷し、また保護のための情報伝送手段も電力線搬送からマイクロ回線、光ファイバへと変遷しており、より高い信頼性を得るために、装置構成要素の高信頼度化、設備の2重化、自動監視の適用等が実施されている。

当所では、保護方式の開発・適用に関して各種保護方式の性能・信頼性評価と適用検討、ならびにそれらの基礎となる諸解析手法の開発・実用化を行っている。

### 2-7-2 保護方式の性能・信頼性評価

#### I. デジタル・リレーの性能評価

デジタル・リレーの特徴は、情報をマイクロプロセッサのソフトで処理できることであり、そのため、より複雑な動作や、常時監視・自動点検が容易に行える。

保護機能の内、最も基本的な距離リレーの諸アルゴリズムについて、比較検討したが、それによれば距離測定精度、動作速度の点からは

1. 三角関数の性質を利用する方式の内、2 サンプル値間の積演算法
2. 三角関数の導関数を利用する方式の内、瞬時値計算に2次差分を利用する方法が優れている事がわかった。

又、再帰形と、非再帰形のデジタル・フィルタの性能を比較したところ、非再帰形の方が動作速度が2倍であり、位相特性が

線形であるのでより望ましい方式であると結論した。

デジタル・リレーの自動監視は、附加回路による監視方式と、時分割処理により監視、点検を行う方式とが組み合されている。そのため自動監視方式はいろいろ考案されているので、標準化の観点から思い切った整理統合が必要である。その際、多重監視の単純化、附加回路の削減、高速故障検出のためのパリティ・チェックの機能附加などが重要と考えられる。

現用デジタル・リレーの具体的性能評価には、ノイズ印加、過渡入力波形など諸条件下における、リレー・ソフトの内部応動を含めた詳細検討が必要であり、そのためデジタル・リレー総合解析装置を設置して鋭意検討を進めている。(図2-7-1)

#### II. 静止形リレーの耐ノイズ性能

静止形リレーは高速度、高感度であること、高度の機能が実現できることなど、多くの長所を有しているが、一般には電磁形にくらべて耐ノイズ性能に弱点を有している。

リレーの耐ノイズ性能を確認する試験方法としては、通常 ANSI(American National Standards Institute)の方法(1 MHz、3 kVの減衰波形)が準用されているが、この試験に合格した静止形リレーが、電力系統に設置後ノイズに起因して不良応動となった事例があったので、試験方法を含めて、いくつかの静止形リレーについて耐ノイズ性能の検討を行った。

そのため耐ノイズ試験装置を開発・試作したが、それでは1 kHz~2 MHz、200 V

~3,000 Vの広帯域のノイズが発生でき波高値、基本波成分に対する重畳位相、ならびにくり返し周期と回数を任意に変化できるようにになっている。

これを用いて試験を行ったところ、入力電圧回路に特定の条件で1~20kHzの比較的低周波帯域のノイズを、印加した時に、不良動作が発生しやすく、又その要因はノイズ周波数と波高値だけでなく、ノイズの重畳位相、くり返し周期、回数などに依存することが明らかになった。したがって、MHzオーダだけではなく、kHzオーダの比較的低周波帯域のノイズについても規準を決めて性能確認をする必要があるといえる。

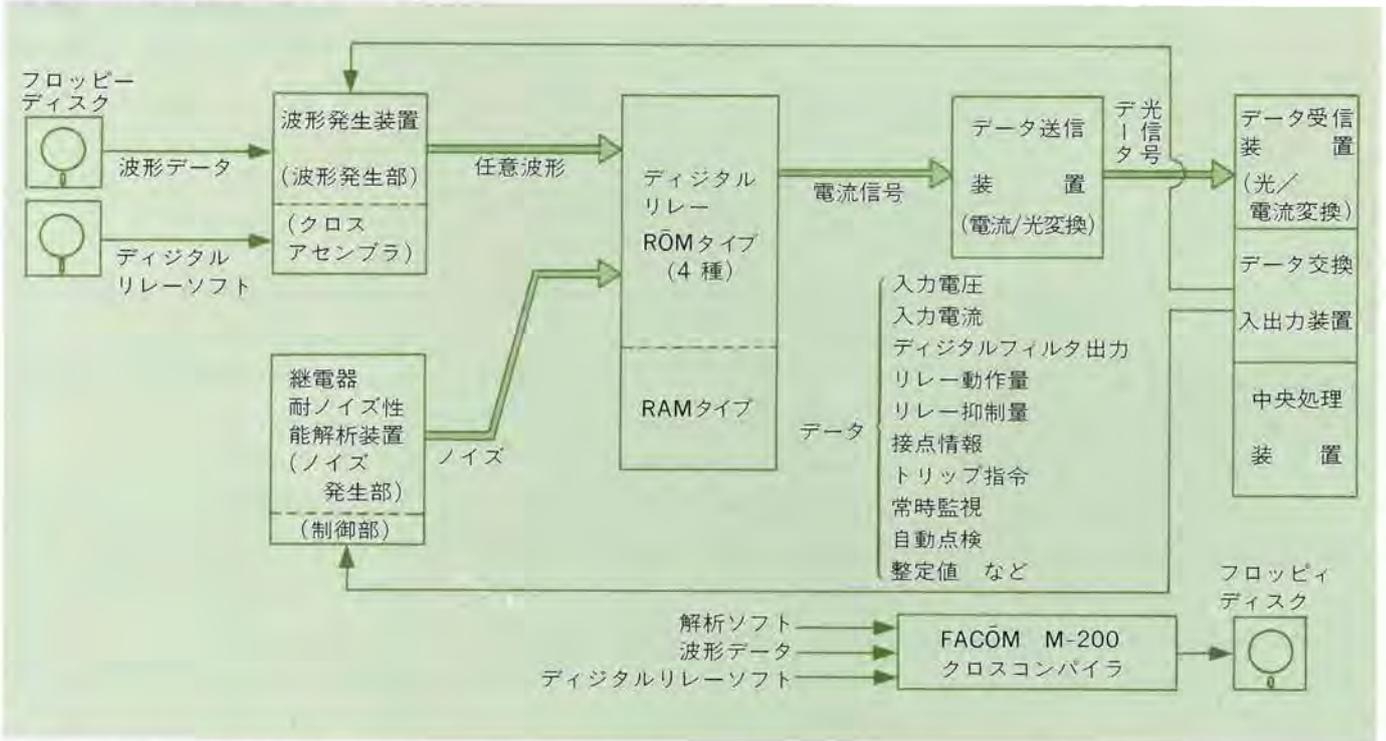
#### III. リレー装置の信頼度分析

保護リレーが1つの系統故障を正しく処理するために、系統内各所のリレー装置がそれぞれ与えられた機能を遂行している。それらの信頼度を明らかにするためには全体としてばかりでなく機能別にも動作を検討しなければならない。

そこで、機能別動作信頼度解析には、保護リレー信頼度分析プログラムを開発し、地絡、短絡など、各系統事故種類毎の内部事故時正動作、外部事故時正不動作の信頼度チェックを行っている。それによって、自動監視の有無、装置構成要素の故障率、自動点検周期、定期点検周期などをパラメータとして、機能別信頼度、年間不良動作件数、自動監視および2系列化の効果などが分析できる。

全体解析としては、状態遷移図をもとに、装置全体が良好な動作状態にある率、すな

図2-7-1 デジタル・リレー総合解析装置



わち、装置稼働信頼度を分析、検討する手法を開発した。

この手法により、極めて簡明に装置信頼度の分析ができると共に、前述の各種パラメータに加えて、単体定期点検、総合定期点検、修理、同形対策等の保守に関する所要時間が信頼度に及ぼす影響を検討することができる。

### 2-7-3 保護方式検討のための系統解析手法

#### I. 平衡および不平衡回路網の故障計算

故障計算は、保護リレーの適用検討、動作分析、整定運用など、種々の検討に当って最も基本的なものであり、当所では、対称座標法による極めて一般的な故障計算プログラムを開発したが、現在各電力会社で実用されている。

これでは、潮流を考慮し、全ての地絡、短絡、断線、直列コンデンサの放電などの故障を対象に、母線および線路上の任意地点の単純、多重故障を計算することができる。

しかし最近の送電線では多回線併架送電線が増加し、併架区間巨長は長距離化する

傾向にあるので、高抵抗接地系統側の回線に誘導される零相循環電流は保護リレーの動作を著しく阻害することがあり対策が必要になってきた。

このため、併架に伴う電氣的諸現象が取扱えるように、多導体解析手法によるプログラムを開発した。本手法の特徴は、電力線はもとより架空地線、しゃへい線の各径間毎の電流分布をも含めて、定常時および各種地絡故障時の電圧・電流分布解析を行っていることであり、電圧階級および中性点接地方式に関係なく、任意の架空系統に適用することができる。

さらに電力回路網の不平衡性に関連する保護リレーの動作を検討する必要があるが、そのため3相不平衡回路網の電圧・電流分布解析プログラムを開発した。不平衡回路網としては、多回線併架、ループ系統など全く任意の系統構成が対象となりうる。

#### II. 過渡現象解析手法の精度検証

ケーブル送電線の増大や、重負荷に対する調相用コンデンサの大容量化により、系統故障時に発生する高調波電圧や、電流が

増大するので、故障時の電圧、電流が、大きく歪むことになる。

このような高調波を含む歪波形により、特に静止形リレーは保護性能が著しい影響をうけるおそれがあるので系統故障時における高調波発生機構や、発生量の解析が重要となってきている。各種解析手法の内、最も良く使用されるのは、

1. 過渡振動波形の予測に使用されるEMTP (Electro Magnetic Transient Program)
2. 過渡振動の周波数、減衰時定数の予測に使用される線路の等価π又はT回路を使用した簡略予測手法

であり、これらについて実験用配電線による実験とシミュレーションの結果の比較を行った。

それによると、EMTPでは調相用コンデンサが接続する架空系、あるいはケーブルと架空線が混在する系統での故障について、地絡、短絡とも保護方式の設計、性能検討に十分な精度があるが、簡略手法では、地絡故障については精度がおちることが分った。

# 2-8 情報伝送システム

担当●電力技術研究所 電子応用部 部長 竹下 信也

## 2-8-1 電力用デジタル通信網

電力系統運用自動化の拡大、高度化およびオフィスオートメーション(OA)の推進によって今後ますます多様化し増加するデジタル情報を、マイクロ波を効率的に使用して高信頼度伝送するため、電話・模写電送などのアナログ情報をすべてデジタル化し、電力系統保護・制御・監視用デジタル情報とともにPCM(パルス・コード・モジュレーション)方式マイクロ波回線で伝送・交換するデジタル総合通信網が構成される趨勢にある。

当所は総合通信網の構成に先立ちデジタル情報伝送の高信頼度化と効率化を図るため、通信回線のデータ伝送信頼度の実態の解明、給電用サイクリック・デジタル

情報伝送装置など電力用情報伝送装置へのマイクロプロセッサの応用データ伝送回線のプロトコル(通信規約)などについての研究成果を報告している。

デジタル総合通信網を構成するためには、デジタルマイクロ波システムの信頼性向上対策、データ伝送・交換方式など多くの課題があり、現在研究を進めている、これらに関連した最近の成果は以下の通りである。

### I. 通信回線のデータ伝送信頼度

データ伝送回線の伝送品質や誤り特性などを測定するためのミニコンピュータを主体にした、データ伝送試験装置を開発した。この装置を用いて数多くの電力用通信回線のデータ伝送品質と誤り特性の実態を把握

するための試験を行ってきたが、この結果、電力用通信回線は音声帯域を使用する伝送速度2.4、4.2および9.6kビット/秒ならびに基礎群帯域を使用する42および48kビット/秒のデータ伝送に対して誤り率が小さく、系統保護・制御用データ伝送における目標値を満足し、かつ長期にわたって安定であることを明らかにした。

また、誤り制御方式やパケット交換網における伝送フォーマット等の検討には、誤りの発生を統計的に表現する通信回線モデルが必要であるが、これについて検討を行い、多くの電力用通信回線に比較的簡単なギルバート・モデルが適用できることを示した。

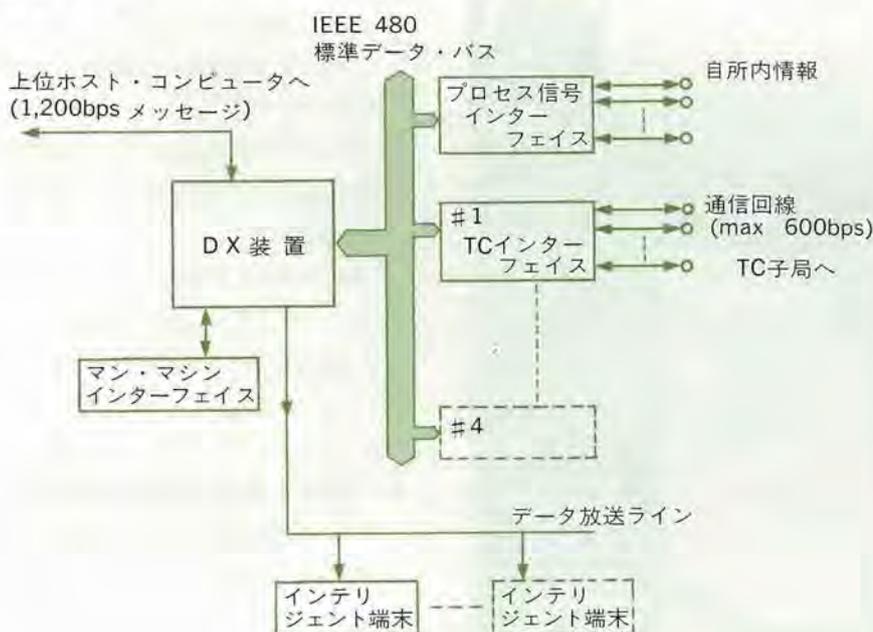
### II. 情報伝送装置へのマイクロプロセッサ応用

現在、電力用情報伝送装置における主なマイクロプロセッサ応用装置は給電用CDT(サイクリック・デジタル情報伝送装置)、遠方監視制御装置、通信回線自動監視装置となっている。今後、この傾向が一層広範囲におよぶとソフトウェアの作成の効率化、保守性に対する配慮が重要な問題となる。

このような事態に対処するために、マイクロプロセッサを用いた通信制御装置の開発あるいは機能の変更・拡張が容易にできるマクロ命令を用いた汎用クロスアセンブラシステムを開発した。

本方式の特長は上位コンピュータをホストとして、その強力なソフトウェア開発用プログラムを活用して、通信制御プログラムを構成出来ること、作成したプログラ

図2-8-1 全ソフトウェア化多重化テレメータ/テレコン装置



ムをもとに異機種マイクロプロセッサ用の機械語プログラムを自動的に生成出来ること、および問題向き言語体系の設定に際して膨大なコンパイラを記述する必要がなく適切なマクロ定義ファイルを作成すれば良いことなどである。

本システムを実際に、電気所集中制御システムの中間ノードに配置できる簡素なハードウェア構成の多重化テレメータ/テレコン装置に適用した。この装置は従来方式のテレメータ/テレコン情報伝送ラインに対しては、DMA(ダイレクト・メモリ・ア

クセス)/10チャンネルによって通信回線をコンピュータのメモリに直結し、必要なソフトウェアによって実行する。また、HDLC、IEEE(米国電気電子学会)-488など一般的な通信方式に対しては規格化されたハードウェア・インタフェースを用い、ハードウェア構成を大きく変えることなく、集中制御システムの下位から上位にまで適用可能としている。本装置の構成は図2-8-1に示す通りで、電力会社により具体化されその有効性が確認された。

表2-8-1 各プロトコル・レベルの機能の概要

プロトコル・レベル	機能の概要
ユーザ・レベル (レベル5)	各種アプリケーション(ユーザ・プロセス)の実行
ファンクション・レベル (レベル4)	各種の通信処理機能の実行
トランスファー・レベル (レベル3)	エンド・ノード間のトランスペアレントなデータ転送機能の実行
データリンク・レベル (レベル2)	隣接ネットワーク・ノード間のトランスペアレントなデータ転送機能の実行
フィジカル・レベル (レベル1)	通信媒体の電氣的、物理的な制御機能の実行

図2-8-2 衛星通信実験用地上局



### Ⅲ. データ伝送回線のプロトコル(通信規約)

電力系統運用情報(系統保護用を除く)、業務用処理情報、技術計算用情報などの各種の情報を共通のプロトコル(通信規約)のもとに伝送するパケットを基本としたデータ通信網の構成について検討し、プロトコルの基本設計を行った。

電力用通信網では多種多様の情報を伝送することが特徴なので、特に計測・制御情報は高い伝送信頼度が要求され、伝送遅延時間を極力抑制しなければならない。このため電力用通信網のプロトコルとしては次の点を考慮した。

1. 伝送情報の緊急度に応じ優先順位をつけることが出来る
2. 中継による時間遅れを抑制するため無蓄積中継とする
3. 通信網の部分的故障に対して重要な情報の伝送機能を確保するための迂回ルートを指定出来る

これらのプロトコルは表2-8-1のように機能的に大きく5レベルの階層構造となっているが主としてレベル2と3について前述の1~3が実現できるようにした。

### Ⅳ. PCM多重化・交換制御方式

電力系統運用の高度化に伴う監視・制御用情報の高速、大量伝送のため、電力用デジタル通信網に必要な基本条件を検討した結果PCM(パルス・コード・モジュレー

ジョン)回線交換方式が有利であることを示すとともに、これを実証するためのPCM多重化・交換制御実験装置を開発した。

デジタル総合一元化の手段としては非同期パケット方式と同期PCM方式が考えられ、技術の普及度と容易性の面から当面は前者が先行して行くが、制御用通信網として用いるためには、

1. 監視・制御・保護用情報に対しては伝送時間遅れを最小にし、その信頼性を確立する
2. アナログ型を含む多種多様の情報に対処するため、通信網の利用手続きを簡単にする
3. 利用目的別に通信網を論理分割することが容易であり、しかも互いに干渉し合わない

などの条件を満足する必要があるため、最終的には同期PCM方式で回線交換方式とすることが最も有利であると考えられる。

このことを検証するために、新たにPCM

多重化・交換実験装置を開発した。この装置の特長は次の通りである。

1. 多重化機能と交換機能をまとめてユニット化し、需要規模に応じてこれらを積み上げることが出来る
2. 伝送装置は伝送速度2.4kビット/秒を基本とし、64kビット/秒中継線もしくは1.544Mビット/秒光ファイバ・ハイウェイにより、最小20チャンネル、最大480チャンネルの多重化・交換を行うことが出来る
3. 高速ミニコンピュータを主体に数多くの信号処理用マイクロプロセッサを用いて、誤り制御方式、緊急情報伝送方式、非同期高速アナログ波形伝送の効率化、電話信号の帯域圧縮等について検討を行うことが出来る

## 2-8-2 新情報伝送技術

### I. 衛星通信方式

電気事業は、郵政省が昭和58年2月打ち上げた実用通信衛星(CS-2号)を利用す

る計画である。

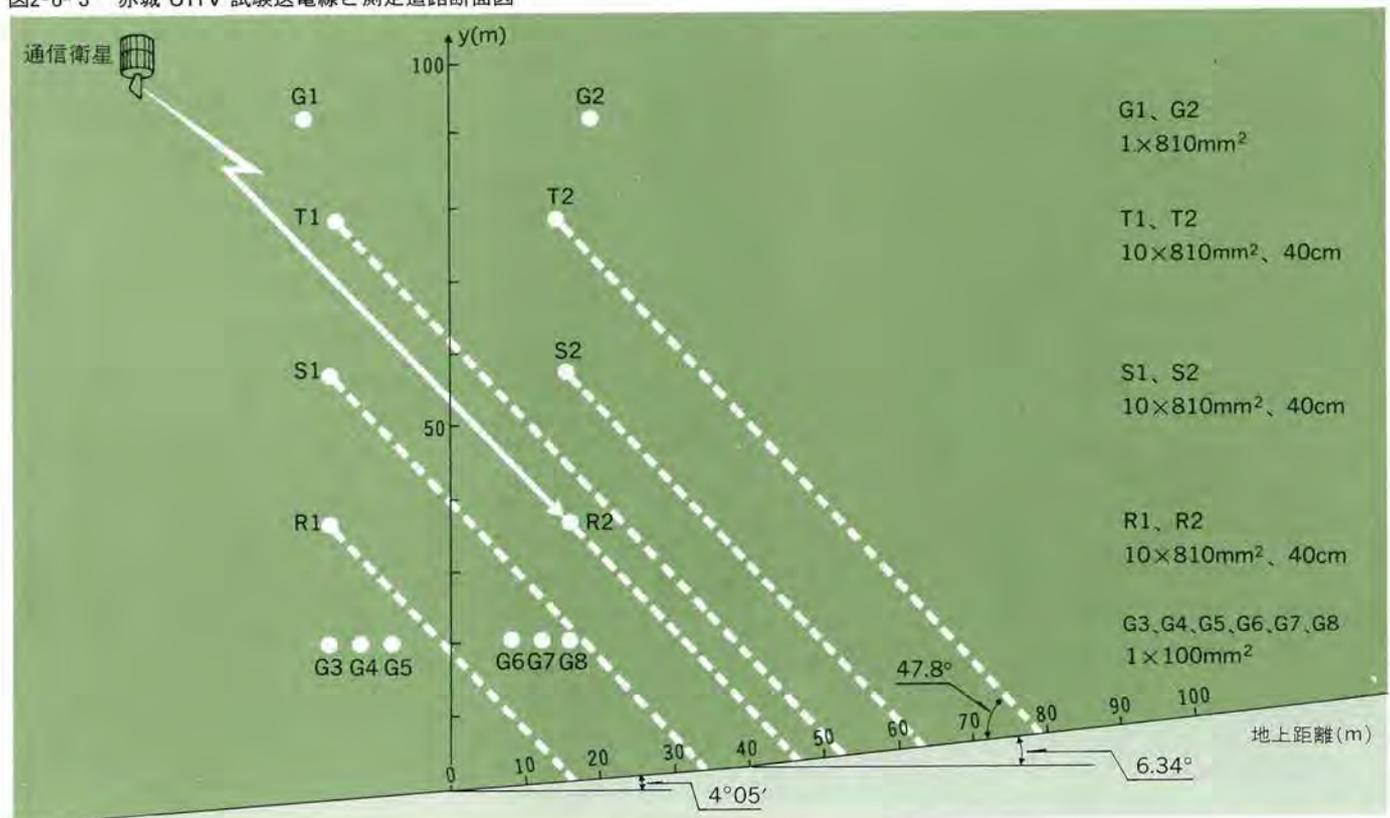
電気事業としては設備の無人・自動化などで大量の通信回線が必要になっており、技術進歩による大容量通信衛星の打ち上げや地上局の小型化・低廉化が達成されれば、将来は衛星通信回線の利用率も高まるものと考えられる。

このため、当所では電気所単位などに簡易な地球局が設置される場合を想定して、準ミリ波衛星電波は波長が短いため、多導体電線による影響が重要だと考え、それによる交叉偏波識別度の劣化特性、遮蔽損失特性、円偏波散乱特性について理論的および実験的に検討を行った。

昭和56年に赤城試験センターに衛星通信実験用の地上局(図2-8-2)を設置して、実験用通信衛星(CS-1)のビーコン波を受信して、衛星電波の赤城UHV試験送電線による遮蔽特性の実測を行って、送電線の遮蔽を無視できる離隔距離を求めた(図2-8-3参照)。

その結果、電気所内に衛星通信地上局

図2-8-3 赤城UHV試験送電線と測定道路断面図



を設置するに際し、鉄構、電線からアンテナ直径の3倍の距離以上離せば安定・良質な通信を行うことができることが分った。

## II. 光ファイバ電流・電圧センサ

系統保護・制御システムの高度化および高信頼度化のため系統制御・保護システムにマイクロプロセッサを使用するデジタル方式が採用されつつある。しかし送電電圧の超高压化によって電気所構内ではサージ・雑音レベルが益々増大する傾向にあり、マイクロプロセッサを使用したデジタル方式の系統制御・保護装置にとって重大な脅威になることが予測される。その対策として、耐サージ特性が良好な光ファイバな

ど、光応用技術を導入する気運にある。

当所は早くから光応用技術の電気所における計測・制御への適用について注目し、レーザ CT/PT の基礎特性を解明してきた。

光ファイバ電流測定法はファラデー効果を利用するため電流磁界による偏光特性など電流測定感度が重要であるが実用化のためには、そのほかに光ファイバ自身のもつ偏光特性が温度や振動等の影響を受けないように偏光状態の保持安定化対策が重要となる。

偏光特性の変動要因は光ファイバの複屈折の変動であるが、これに対する一つの方策である光ファイバ振り方式について、電

流測定性能と安定性改善効果の検討を行った。その結果60kATまでの磁界に相当する電流に対して安定で直線性の良い測定が可能であることがわかった。

光ファイバをセンサとする電圧測定法の検出感度を向上させるためにニトロベンゼンをコア材とする液体コア光ファイバを提案した。この電圧検出感度は石英コアの光ファイバに比べると約20倍高い検出感度を持つことを理論的に示し、実験的に確めた(図2-8-4参照)。

## III. 光ファイバの耐放射線特性

原子力発電所の安全性、信頼性を一層確保するためには大規模な計測制御が必要で、このため計測および制御ケーブルは条数が多大となり、従来の金属導体ケーブルでは、スペースや信頼性の確保が困難になってきている。このため、光ファイバケーブルは原子力分野への応用も試みられるようになってきた。

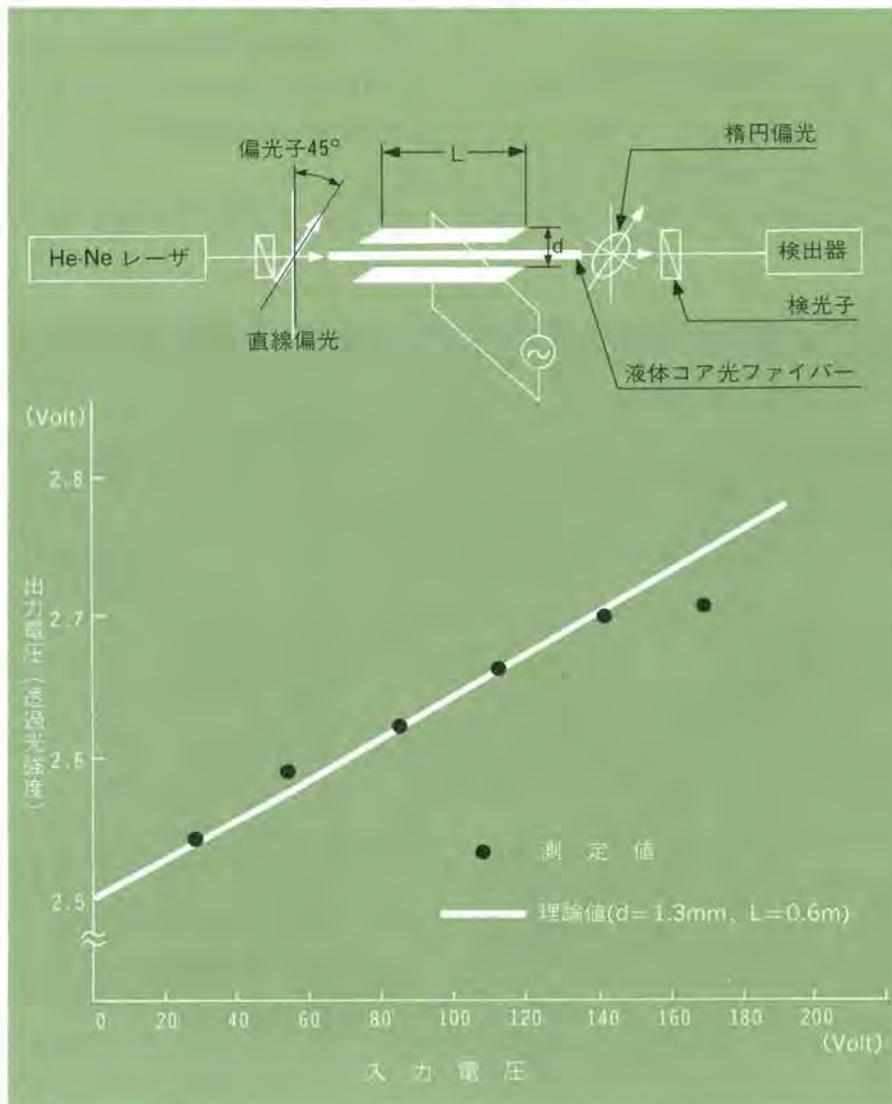
光ファイバケーブルを原子力分野へ適用する場合の最大の問題点は、光ファイバの伝送性能や機械力性能が放射線環境下でどのような特性劣化を生じるかである。このため、光ファイバケーブルの耐放射線特性に関する最近の研究成果を系統的に調査した。

調査結果は次のようにまとめることができる。

1.  $\gamma$ 線照射時の伝送損失増加量は純粋石英コア光ファイバが最も少なく、かつ損失増加量は高線量域で飽和する傾向がある。また、照射停止後における損失の回復が速い
2. 石英コア光ファイバの中では、OH基の含有率が高いものほど損失増加量が少なく、耐放射線性が優れている
3. 伝送帯域特性や機械力特性は $\gamma$ 線照射により殆ど影響を受けない

従って、OH基の含有率の高い石英コア光ファイバは原子力プラント内での計測・制御用データ伝送路に適していると考えられる。

図2-8-4 入力電圧に対する出力電圧(透過光強度)



## 2-9 高調波

担当●電力技術研究所 送配電部 電力品質研究室 室長 宮崎 好一

### 2-9-1 はじめに

サイリスタやダイオードを応用した電力機器や各種負荷機器の広範な普及に伴い、電力系統の高調波レベルは年々増加する傾向にあり、その対応策が大きな課題となっている。

従来、電力系統における高調波の発生源は変圧器、回転機、水銀整流器などが主なものとされていたが、昭和40年代に入ってからサイリスタ応用機器が化学、鉄鋼をはじめ各種産業分野に普及し、さらに家電機器にも広く使用されるようになり、最近では、電力系統に存在している高調波分の多くは、これらの機器がその主な発生源と考えられている。

サイリスタ応用機器はサイリスタ素子の優れた制御機能や低損失のスイッチング機能を活用していることから、省力化、省エネルギー化に寄与するところ大であるが、その非線形性に起因して大きな高調波電流を発生するためこれが電力系統に流入し、系統内の電力機器や他の負荷機器を加熱させたり、計装設備や制御機器を誤動作させるなどの障害要因となっており、また、系統外への影響として通信線の誘導障害の原因となっている。

配電系統においては、既に大容量機器の発生する高調波電流による障害が顕在化しており、障害事例毎に対策が講じられてきているが、最近では一般の低压需用家から発生する高調波量も電力系統において無視し得ないレベルに達していること、さらに、上位の系統においても障害事例が散見されることなどから高調波問題は電力系統全体

の問題としてとらえ、その抜本的な対応策の検討をすべき段階にきている。

### 2-9-2 高調波障害

当初、高調波による障害が懸念されたのは通信線への誘導障害であった。当所においては、昭和45年頃より実用段階に入った22kVおよび33kV配電線における共架通信線への誘導障害を対象として、数多くの実測を行い、高調波ならびに通信線への影響量としての等価妨害電流が許容し得るレベルにあることを明らかにした。

その後の高調波レベルの増大に伴い、電力系統内にも障害事例がみられるようになった。特に配電系統においては、大口需要家に新設された大容量の整流器負荷から発生する高調波電流が、同一需要家または隣接需要家に設置されている電力用コンデンサに流入し、加熱させたり異常音を発生するなどの障害例が多く報告されるようになった。

電力用コンデンサの障害は、現在では配電系統に生ずる障害の70%以上を占めており、その多くは高調波の共振現象を伴って、発生している。

これは、配電線路および配電用変圧器のリアクタンスと電力コンデンサとの間で直列または並列の共振回路が構成されることにより、コンデンサには高調波発生機器から発生する高調波電流の数倍にも拡大された電流が流れ込むことになり、コンデンサが過負荷状態となるものである。

当所においてはこの詳細解析を行い、障害発生の予測方法を明らかにし、その防止

方策を示した。

このように障害に直結する高調波発生源の多くは容量の大きな機器であり、現象的にも比較的局所的な問題としてとらえられてきた。

しかし、障害発生の背景には電力系統に潜在的に存在している高調波成分の影響も無視し得ない状況にある。特に、一般需要家の家電機器から発生する高調波は、機器単体の高調波量は少なくとも機数が極めて多いことから、その総量は、大容量機器から発生する高調波の総量に匹敵するとの見方もある。

当所における検討でも夜間においては電力系統に存在する高調波の大半は、これらの家電機器が発生源であり、配電系統のみならず超高圧系統にまで少なからず影響を及ぼしていることが想定された。

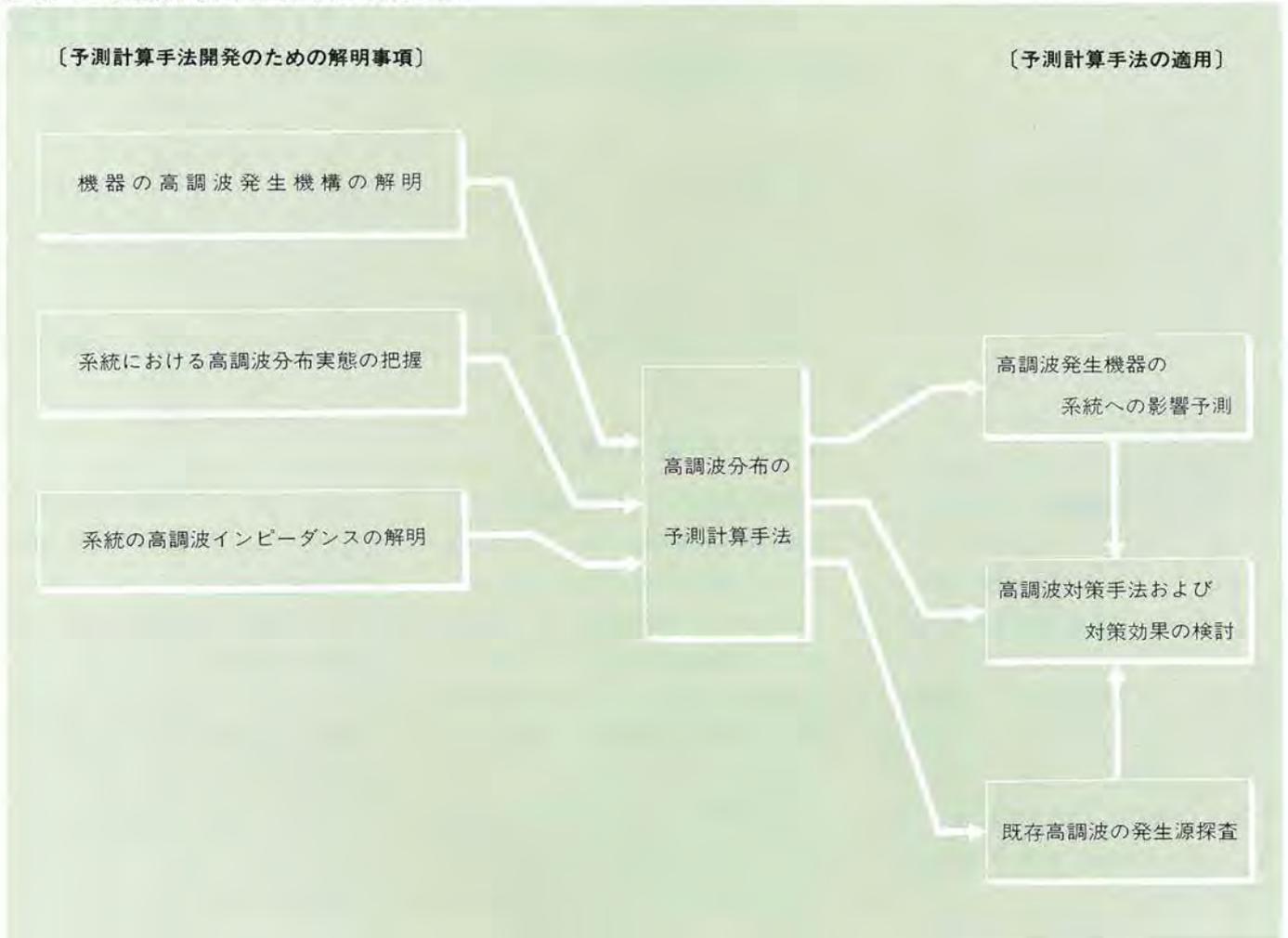
電力系統に存在している高調波は第3、第5、第7調波など比較的低次の調波が大きく、系統全体にみられるが、高次高調波は小さく、局所的にしかみられない。

また、低次高調波の中では第5調波が極めて大きく、第3、第7の数倍に及んでおり、高調波問題イコール第5調波問題との見方もある。これは、発生量自体が大きいことに加えて、最近の電力系統の高調波インピーダンスが第5調波を拡大し易い条件になっているためと考えられている。

### 2-9-3 高調波分布の予測法

各種の機器から発生した高調波電流は系統内の高調波インピーダンスに応じて、系統各部に分流し、電圧をひずませ、高調波

図2-9-1 高調波分布の予測計算手法の開発と適用



電圧を発生させるが、このような系統内の高調波電圧、電流の伝ばん、分布の状況を的確に把握するための計算手法の確率は高調波対策の策定に当って、不可欠であり、具体的には

1. 高調波発生機器の系統に及ぼす影響の予測
2. 高調波対策手法およびその効果の検討
3. 既存高調波の発生源の探査

などの目的に用いられる(図2-9-1参照)。当所においては、1.および2.の目的に適用し得る計算プログラムとして、系統の運用実態に即した配電系統用、ならびに送電系統用のプログラムの開発を行い、一部の電力会社では実用に供されている。

また、3.については、系統の限られた部分の一定量の高調波実測データから、高調波の発生源を探査する手法の検討を進めて

いる。さらに、今後の必要性に対応すべく配電系統から超高圧に至るまで電力系統全体を一括して高調波の分布を計算し得るプログラムの開発を進めている。

これらの計算プログラムは、高調波発生機器の特性、系統の高調波特性などに関し、現在までに得られた知見を基盤として開発したものであるが、負荷の高調波インピーダンスなど未だ十分に解明されていない事項もあり、今後さらに、これらの解明を進めることにより、予測計算精度の向上をはかっていく予定である。

#### 2-9-4 今後の課題

高調波の発生源は低圧配電線から超高圧まで、電力系統のあらゆる部分に設置されており、高調波電流の伝ばん状況、高調波

電圧の分布様相は極めて複雑になっている。したがって、今後は高調波問題を系統全体の問題としてとらえて、その対応策を検討していく必要がある。具体的には、

1. 実用的な高調波予測手法の開発
  2. 系統の電圧階級毎の適正な高調波分担値の明確化
  3. 合理的な高調波対策手法の確立
- などの検討を進めなければならないが、この他に純技術的検討のみでは対応し得ない問題として、高調波の規制値の設定、高調波対策の責任分担および対策経費の分担方法などの検討も必要となろう。

第  章

第  章

架空送電

地中送電



### 第3章 架空送電/第4章 地中送電 ● 目次

執筆者紹介●( )内は担当箇所、順不同

3-1 要旨.....39

3-2 雷観測.....40

    3-2-1 はじめに

    3-2-2 観測方法

    3-2-3 観測結果

3-3 避雷器.....45

    3-3-1 はじめに

    3-3-2 動作責務

    3-3-3 雷サージの抑制(BILの低減)

    3-3-4 寿命特性

3-4 冠着雪がいしの耐電圧特性.....47

    3-4-1 はじめに

    3-4-2 現在までの研究成果

3-5 雪害防止.....50

    3-5-1 はじめに

    3-5-2 電線着雪量の推定

    3-5-3 雪害防止

4-1 要旨.....55

4-2 XLPEケーブルの劣化とその判定法.....56

    4-2-1 はじめに

    4-2-2 XLPEケーブルの水トリー劣化

    4-2-3 XLPEケーブルの電気トリー劣化

4-3 ラミネート紙絶縁OFケーブルの絶縁性能.....61

    4-3-1 はじめに

    4-3-2 ラミネート紙の膨潤

    4-3-3 ラミネート紙絶縁OFケーブルの性能

4-4 電力ケーブルの送電容量向上.....65

    4-4-1 はじめに

    4-4-2 電力ケーブル発生熱低減法

    4-4-3 熱放散特性の改善

    4-4-4 熱供給導管による熱影響の防止対策

4-5 SF<sub>6</sub>ガス絶縁.....71

    4-5-1 はじめに

    4-5-2 新ガス・混合ガスの絶縁特性

    4-5-3 SF<sub>6</sub>ガスの放電電圧と放電時間の特性

    4-5-4 局所放電の絶縁に及ぼす影響

宅間 董：電力技術研究所 系統絶縁部 次長(3-1)

三谷 弘：電力技術研究所 系統絶縁部 系統絶縁研究室 室長(3-2全部)

尾野 孝夫：電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室 室長(3-3編集担当、3-3-1~3)

横倉 富夫：電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室(3-3-4)

新井 昇：電力技術研究所 系統絶縁部 放電研究室 室長(3-4編集担当、3-4-1)

高須 和彦：電力技術研究所 系統絶縁部 放電研究室 室長(3-4-2)

坂本 雄吉：電力技術研究所 雪害プロジェクトチーム主査 特任研究員(3-5全部)

深川 裕正：電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室 室長  
(4-1、4-2、4-3、4-4編集担当、4-2-1~2、4-3-1~3、4-4-1~2)

岡本 達希：電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室(4-2-3)

新田 義孝：本部 企画部(4-3-2)

今城 尚久：電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室(4-4-3~4)

宅間 董：電力技術研究所 系統絶縁部 次長(4-5全部)

# 3-1 要 旨

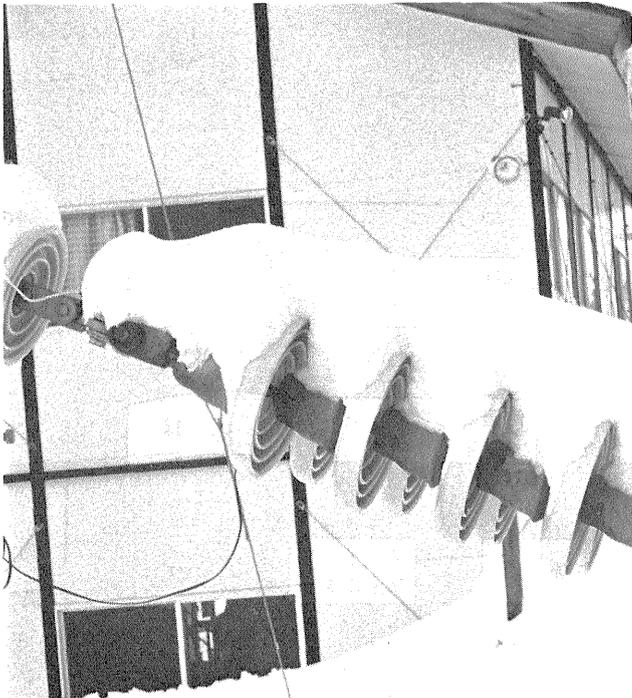
電力技術研究所 系統絶縁部 次長 宅間 董

架空送電の絶縁、機械力に関する諸問題は、当所が古くから従事してきた重要研究課題であるが、新しい技術分野、事故要因に対処するため、さらには、より一層の設計の合理化を目指して、なお多数の研究課題がある。

このうち、送電電圧1,000kV級のUHV送電に関する研究結果の概要は、既刊の電研レビューNo.5「UHV送電——将来の送電幹線への展望」(1982年10月)にとりまとめられている。

UHV級の実験や解析の多くは、現行の500kV以下の送電系統にも適用できるか、少なくとも参考になる共通の内容であるが、以上の点から、上記電研レビューを補完する意味で次の項目を述べる。

1. 雷観測
2. 避雷器
3. 冠着雪がいしの耐電圧
4. 雪害防止



氷雪害試験

「雷観測」は、日本海沿岸に建設された500kV送電線が、冬季の雷によって2回線事故の多発や、架空地線の素線溶断など、これまでの太平洋沿岸の夏季雷からは説明できない現象を生じているのに対処するためである。

雷のような自然現象の観測に、当所は完全に自動化された無人の「雷撃電流自動観測装置」、「雷撃現象自動撮影装置」などを開発し、雷性状解明のためのデータ収集を行っている。現在まで2回線事故原因の解明には至っていないが、素線溶断を説明できるような継続時間のきわめて大きい(数10～数100ミリ秒に及ぶ)雷撃現象が得られている。

「避雷器」は、最近急速に利用の進んでいる、保護特性の優れた酸化亜鉛形避雷器の諸特性を検討したものである。酸化亜鉛形避雷器が過電圧によって流れる電流のエネルギーを処理できるか、避雷器の適切配置によって変電所の絶縁レベルを下げ得るか、交流・直流の長時間の印加により、どのように劣化するか、が検討項目である。

その結果、500kVガス絶縁変電所では、従来使用されている絶縁レベル1,800kV(母線および開閉機器)を1,550kVあるいは1,425kVまで低下でき、大幅に小型化できることを示した。

「冠着雪がいしの耐電圧」は、通常がいし連は塩分が付着したときの耐電圧から個数が決定されるが、塩分付着のほとんどない内陸の多雪地帯で耐電圧が十分かどうかの検討である。

そのため、交流および直流電圧に対する500kV級がいし装置の冠雪時の耐電圧特性を検討し、新たに1,500kV開閉インパルス発生設備による実験を開始した。

これまでの結果では、冠雪がいし連の交流耐電圧は、がいし連結長が1～4mの範囲では連結長にほぼ比例すること、がいし連が完全に雪を冠っているとき最も低くなること、などの結果が得られている。冠雪の比重が0.2および0.5と大きいときは、交流耐電圧はそれぞれ95kV/mおよび70kV/mである。

## 3-2 雷 観 測

担当●電力技術研究所 系統絶縁部 系統絶縁研究室 室長 三谷 弘

### 3-2-1 はじめに

日本海沿岸に大規模電源や基幹送電線が建設されるようになって、にわかには冬季雷性状の問題がクローズアップされてきた。

このように冬季雷が脚光を浴びようになった理由の一つは、日本海沿岸に建設された500kV送電線が冬季雷により2回線事故を頻繁に発生しているためである。すなわち、これまでの我が国の500kV送電線の雷事故実態を調査した結果、日本海側を除

く地域での全事故に対する2回線事故の割合は約5%であるのに対して、日本海側の冬季雷による事故では、2回線事故の割合は全事故の50%にも達している。

この様な2回線にまたがる多線事故はこれまでの夏季雷の知識では十分説明しきれないものである。また日本海側の基幹送電線の架空地線が冬季雷により、素線溶断する事故が多発しているが、これも夏季雷の知識からは説明できない問題である。

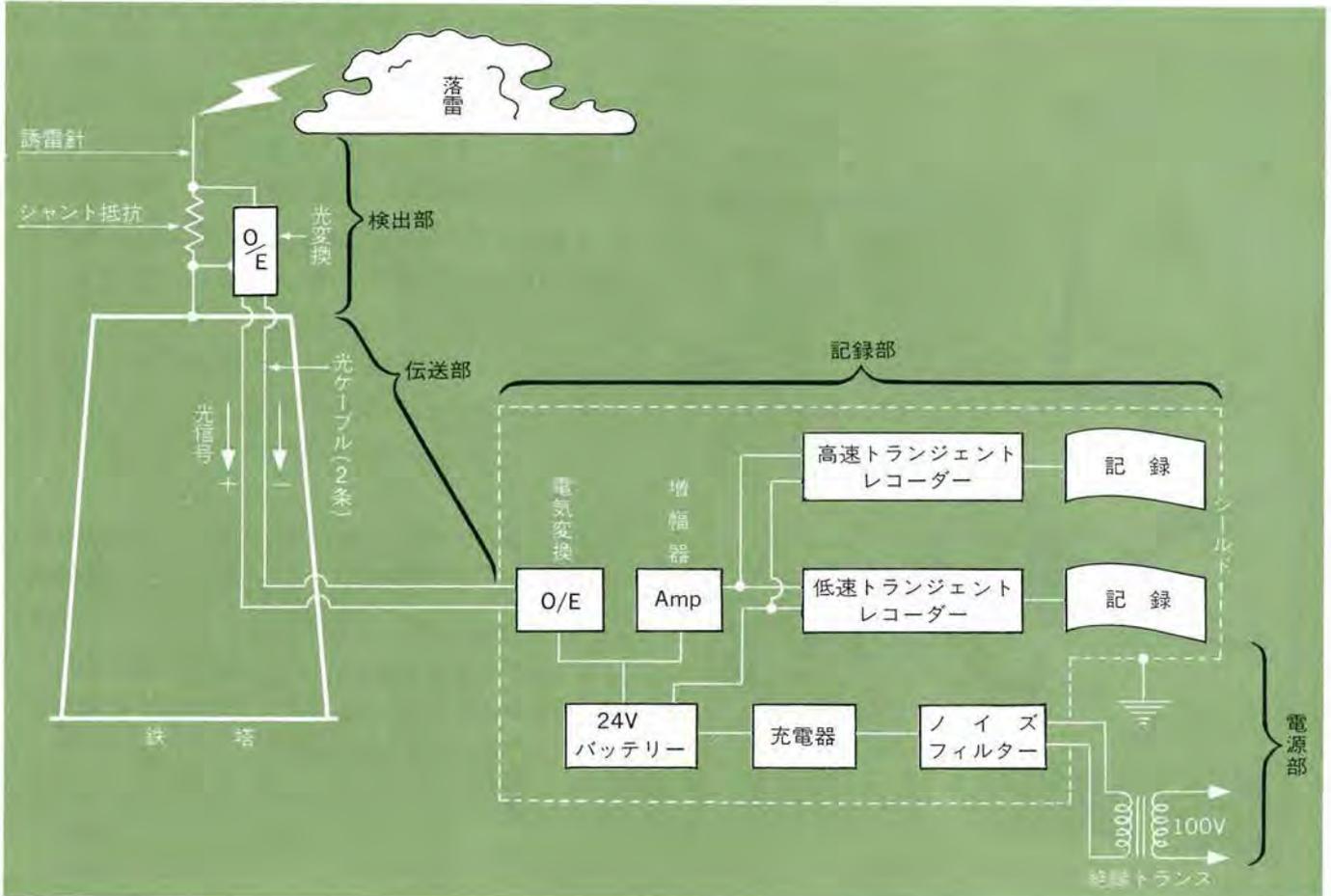
したがって、日本海沿岸における冬季雷

性状は、上述の事故解析はもとより、今後新設する電力設備の雷害防止設計を行うためにも早期に解明しなければならない問題である。

当所では、昭和53年度から日本海側に電力設備をもつ電力会社と共同し、次のような項目について冬季雷性状の観測調査を実施している。

1. 雷撃電流波形・継続時間
2. 雷撃進展状況・進入角
3. 発雷様相・襲雷頻度

図3-2-1 雷電流自動測定装置の構成図



以下に観測方法と結果の概略を述べる。

### 3-2-2 観測方法

雷撃電流波形や継続時間の観測は、送電線の雷害防止設計のための最も重要な項目の一つで、2回線事故や、架空地線の素線溶断事故の原因説明と防止対策確立に寄与出来る。このため当所では光ファイバーと高速大容量記憶素子と組合せた完全無人自動化の雷撃電流自動観測装置を開発して、日本海側の原子力(発電所)建設所や火力発電所の気象観測塔、煙突、それに実送電線などに設置して観測調査を実施している。

雷放電の進展や落雷の状況については、やはり、完全自動化された雷撃現象自動撮影装置を開発し、雷撃の進入角の分布や、高建造物に進展する状況、発光継続時間、多重雷(落雷のくり返し)の状況、などの観測を行なっている。

さらに、雷雲の発生、移動および落雷による地上電界の変動状況を、回転型地上電界測定装置や雷放電カウンターを設置して、自動測定を行っている。この測定により固定地点の襲雷ひん度や雷予知に関する情報を収集できる。

雷撃電流、自動観測装置の概略構成を、図3-2-1に示す。冬季雷については、さらに高建造物に集中して落雷する性質を利用して、北陸電力(株)福井火力発電所構内に試験用の模擬配電線を設備し、主として近傍雷撃時に配電線に発生する誘導雷サージの抑制効果について実証検討を実施している。この観測結果は、5-2で述べる。

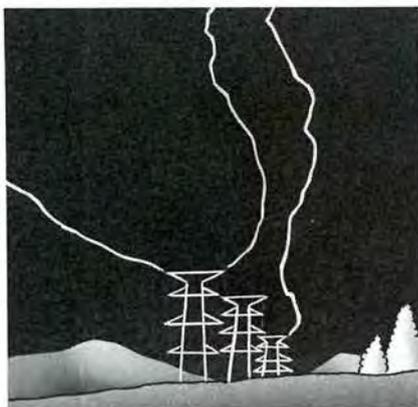


図3-2-2 雷撃電流頻度分布特性

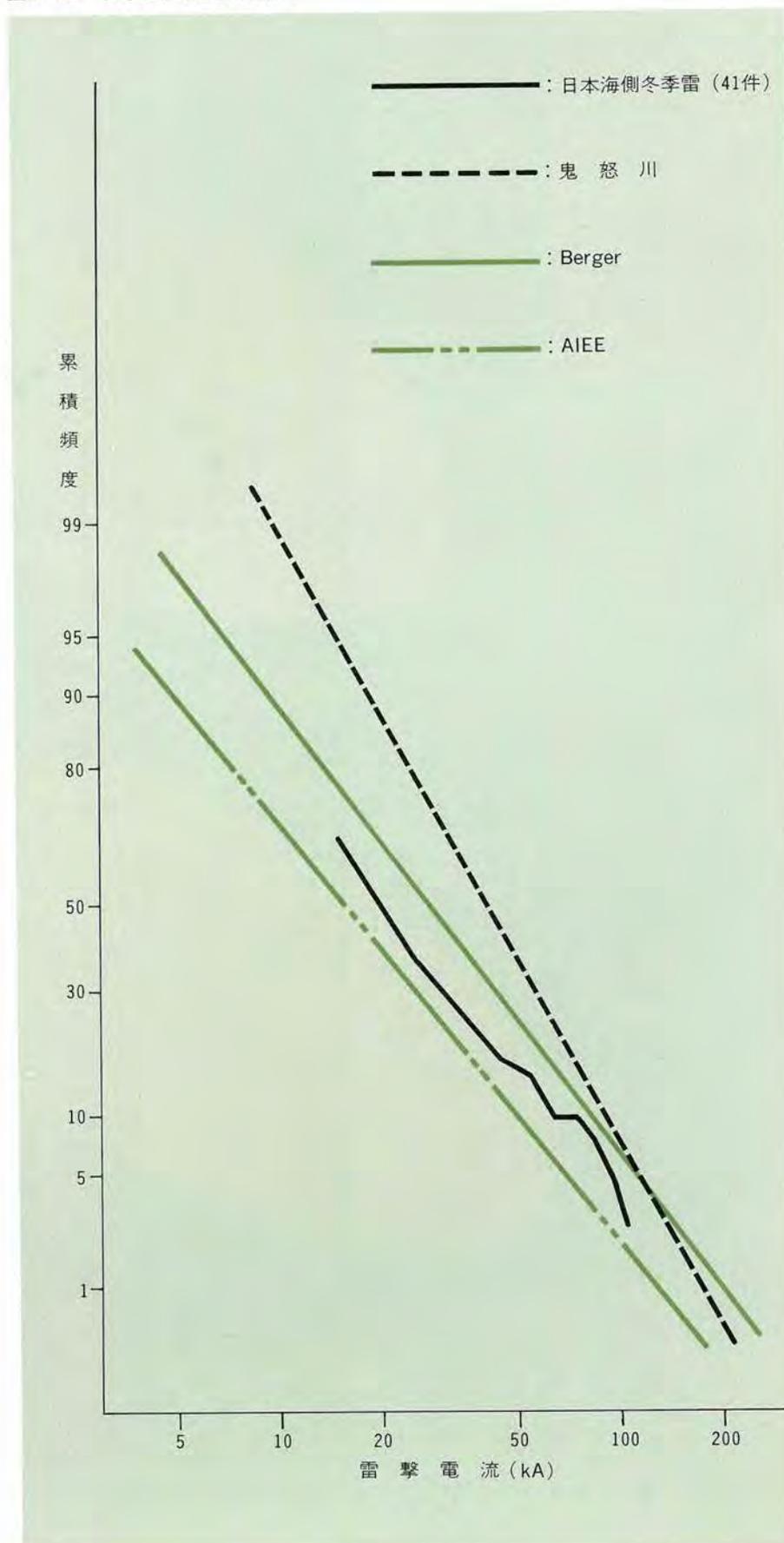


図3-2-3 雷撃による電荷と電流の関係

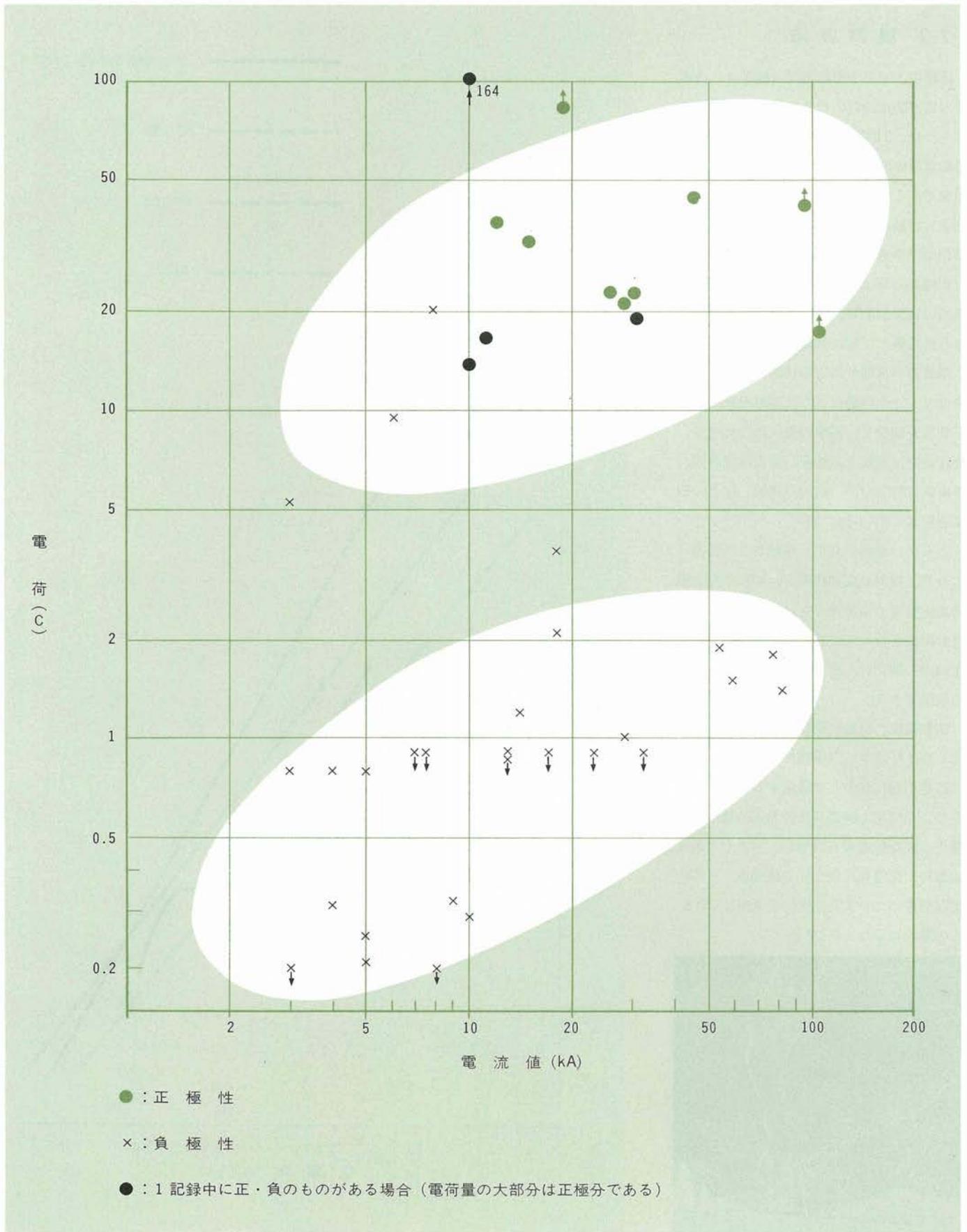
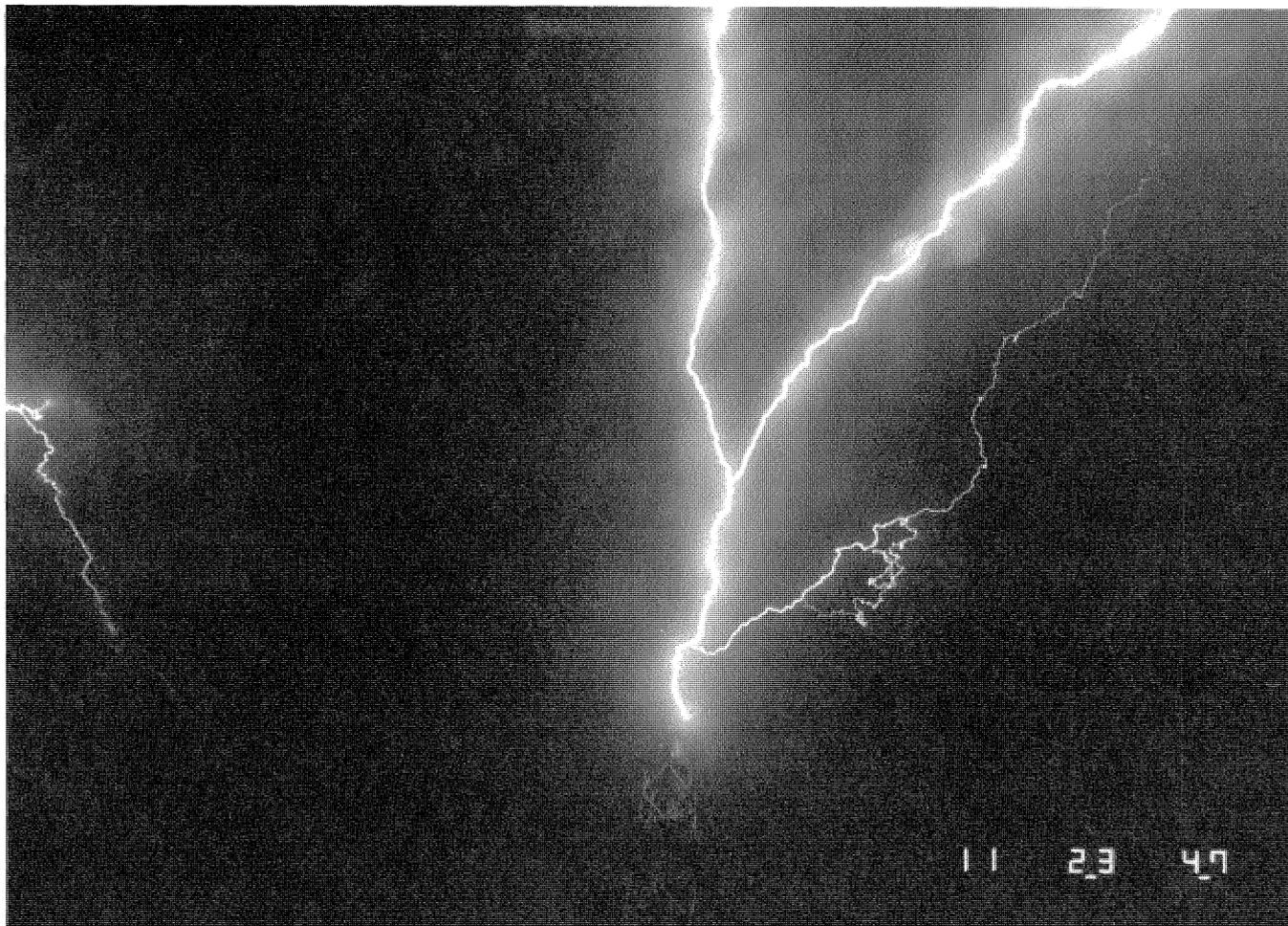


図3-2-4 冬季雷の無人撮影例(福井火力三国共同火力煙突、昭和56年12月11日)



### 3-2-3 観測結果

まず冬季雷の特徴として、正極性の落雷の多いことがあげられる。夏季の雷電流の90%以上が負極性であるのに対して、これまで得られた冬季雷の電流記録では、正負の割合は50%、すなわち約半数が正極性電流である。これは夏季雷と大きく異なるところである。

送電線の耐雷設計では、雷撃電流値の頻度分布が重要な情報であるが、これまでに当所が新潟県柏崎の気象観測鉄塔や福井県の三国共同火力煙突など、高建造物の電流測定で得た結果をまとめると、図3-2-2のようになる。

我が国の雷撃電流頻度分布曲線の代表値は、同図に示した鬼怒川線のデータであるが、平均的にみると(50%値で)冬季雷のデ

ータが20kAであるのに対して、鬼怒川線による夏季雷では、約40kAと2倍の値を示している。冬季雷の電流値は、アメリカ電気学会(AIEE)およびスイス Bergen 氏の測定値の中間にある。

一方、雷撃によって流れる電荷は、図3-2-3に冬季雷の雷荷と雷撃電流の関係で示すが、2クーロン以下の小電荷のもと、10クーロン以上の大電荷のものに大別されるようである。正極性の方が雷撃電流の波高値、継続時間も大きいために、電荷も大きいものが多い。

冬季雷電流の記録の中で電荷の最も大きいのは164クーロンである。この雷は正極性で、波高値は10kAと低いが継続時間は30ms以上であった。この継続時間のような長い雷撃電流が存在すれば、架空地線の素線溶断の可能性のあることも、電線の損傷

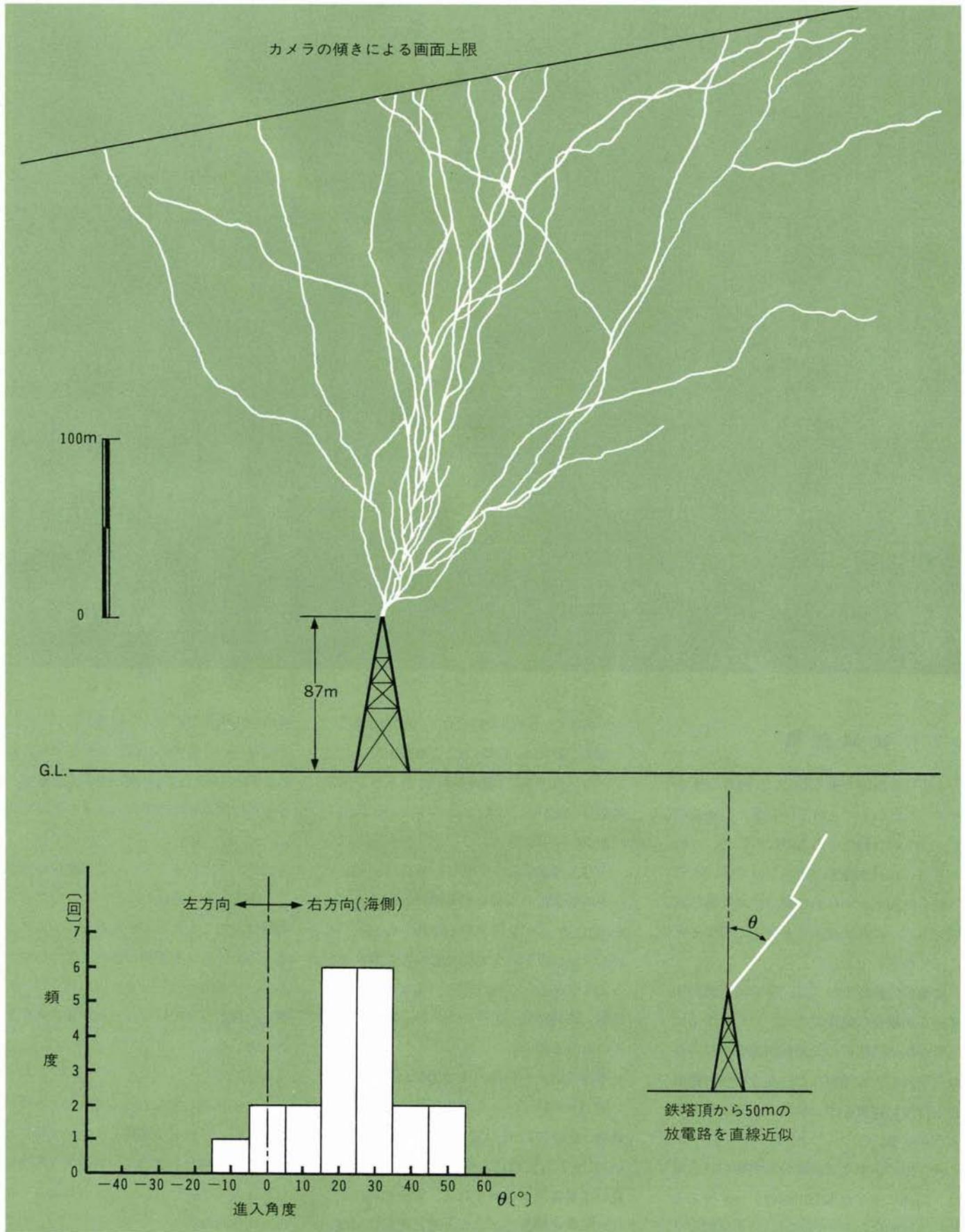
特性から明らかになっている。

雷撃路の写真撮影では、これまでにきわめて多数の静止写真、時間分解写真を得て、冬季雷性状の解明に多大の成果をあげている。

図3-2-4は高建造物への落雷状況の一例で、図3-2-5は高建造物への1シーズンの雷撃進入角をまとめて示したものである。進入角の分布は季節風の方向と強い相関があり、たとえば図3-2-6では海側すなわち風上の襲雷方向に偏って分布することが示されている。

また冬季雷の雷撃路が、数100ミリ秒におよぶ長時間放電が継続し、発光すること、当所の開発した時間分解のできる特殊なストリーク(流し撮り)カメラによって明らかにされた。 ●

図3-2-5 鉄塔への雷撃進入角度分布(柏崎気象観測鉄塔、昭和54年度冬季、一方向からの分布)



## 3-3 避雷器

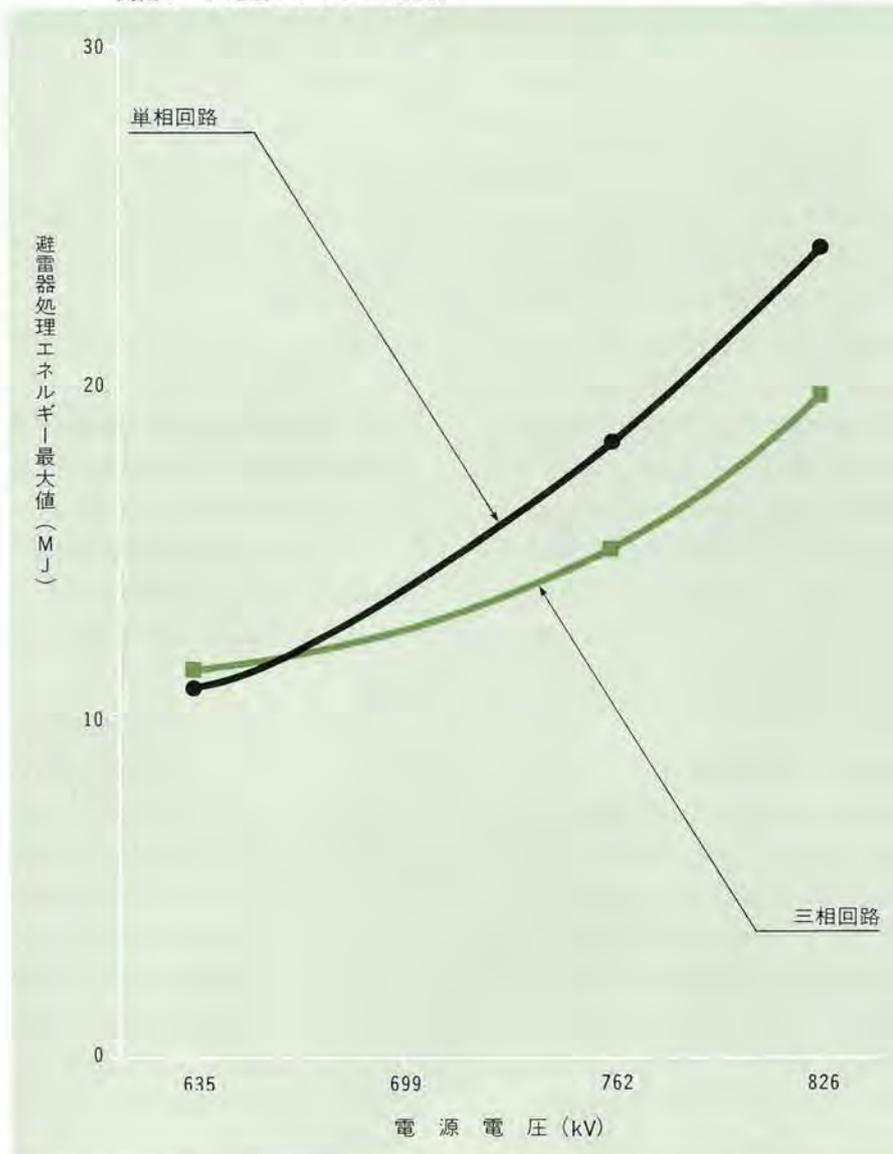
担当●電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室 室長 尾野 孝夫

### 3-3-1 はじめに

避雷器は変電所、あるいは送電線に設置され、過電圧(異常電圧、サージ電圧とも呼ばれる)から機器を保護する重要な役割

をもっている。約10年前に開発された酸化亜鉛形避雷器は、保護特性が優れていること、従来の避雷器に較べて小型化できることなどの利点により、近年急速に広く使用されるようになった。

図3-3-1 単相回路による避雷器の開閉サージ処理エネルギーと、三相回路による避雷器の開閉サージ処理エネルギーの比較



避雷器の使用に当たっては、過電圧によって避雷器に流れる電流のエネルギーを処理できるかどうか(動作責務)を十分に知っておく必要がある。また、避雷器をどのように設置、使用すれば過電圧を有効に抑制出来るかを調べる必要がある。さらに、長年月にわたって使用される避雷器が、印加される各種の過電圧や定常電圧によってどのように変化していくかを推定しておく事も重要である。

当所においても、これらの検討を進めているが、以下にいくつかの検討例を述べる。

### 3-3-2 動作責務

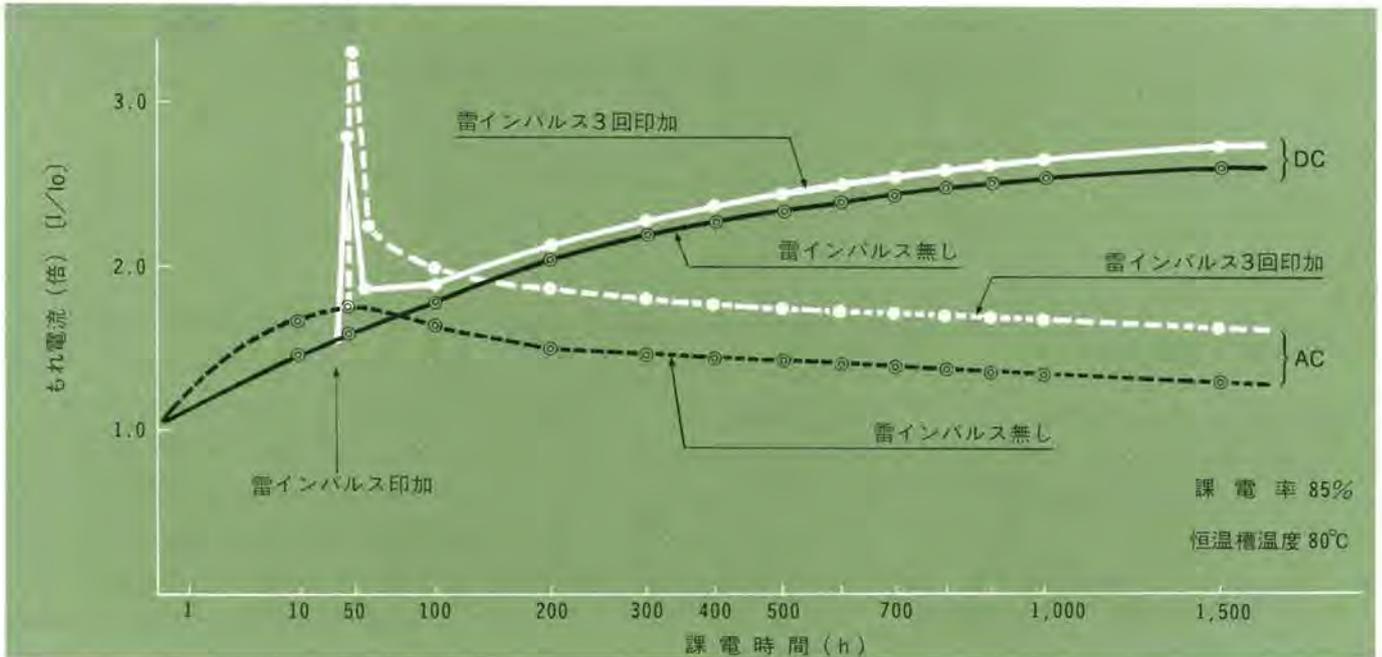
#### 1. 短時間交流過電圧に対する動作責務

従来形の直列ギャップ付の避雷器は、ギャップ間隔を適切に設定することにより、線路事故あるいは系統操作時などに発生する短時間交流過電圧に対しては動作しないようになっている。

一方、直列ギャップのない酸化亜鉛形避雷器ではこの短時間交流過電圧に対しても動作してそのエネルギーを吸収するため、その処理限界などを知っておく必要がある。

そこで、酸化亜鉛形避雷器の交流過電圧に対する処理限界量を実験と計算により求めた。すなわち、交流過電圧としては1線地絡と負荷シャ断の重畳事故を考え、154kV系統以下では2.34倍、187~500kV系統では1.69倍という非常に荷酷な交流過電圧を対象として検討した結果、このように大きな交流過電圧の更に1~2割以上大きな過電圧に対してもエネルギー処理能力に裕度のあることがわかった。

図3-3-2 交流と直流の連続課電特性比較



## II. 開閉サージ動作責務

避雷器が処理すべきエネルギーのうちでは、通常、開閉サージのエネルギーが最も大きい。避雷器規格では、単相回路により、避雷器がこの開閉サージのエネルギーを処理できるかどうかの性能検証を行うことを規定している。

しかし、実際には三相回路である現実の系統を単相回路で模擬したことによってどのような差が生じるかを調べた例はない。

図3-3-1は、UHV用避雷器を例にとり、サージシミュレータにより両者の比較を行った結果である。処理エネルギーはしゃ断器の投入位相により変化するので、多数回の計算を行って結果を得ている。この図から試験時の電源電圧が大きくなると、単相回路で生じた開閉サージを処理するためのエネルギーの方が三相回路より大きくなることすなわち、避雷器規格の試験法は安全側の試験法であることが判明した。

### 3-3-3 電サージの抑制 (BILの低減)

現在、通常の500kV変電所の絶縁レベルとしては、変圧器は1,550kV、母線および開閉機器には1,800kVが採用されている。し

かしサージ抑制効果の優れた酸化亜鉛形避雷器を適切に使用すれば絶縁レベルを下げ得る可能性がある。そこで、モデルガス絶縁変電所を対象として検討を行った。

その結果、避雷器の適切な設置により、母線および開閉機器の絶縁レベルも1,550kVに低減できる事が判明した。さらに、開発が進められているUHV用避雷器のうちの最も性能の優秀なC特性避雷器を500kV用に換算して適用すれば、1,550kVよりも1ランクの下の絶縁レベルである1,425kV(注：現行のJECにはない値であるが、国際規格であるIECには規定されている)が適用できることがわかった。このように、酸化亜鉛形避雷器の発展と適切な設置により、絶縁の低減が可能である。

### 3-3-4 寿命特性

酸化亜鉛形避雷器は、その優れた非直線特性と大きなサージ吸収能力によって直列ギャップを省略することが可能である。

反面、常時も素子に印加される交流や直流の電圧により、僅かではあるがもれ電流が流れる。このもれ電流は素子の劣化により次第に増加し、ついには熱暴走となることもあり得る。劣化の原因は主に電気的ストレスであり、常時の交流および直流、ある

いは短時間のサージ電圧などが考えられる。

当所では、雷サージや開閉サージ吸収時の交流および直流課電劣化特性について、加速劣化実験により検討を進めている。

これまでに得られた主な結果は次のとおりである。

1. 開閉サージに比べ、雷サージの方が劣化に与える影響が大きい
2. 同一の加速劣化条件では直流課電のもれ電流は課電時間とともに徐々に増加し交流よりも課電劣化が進みやすい(図3-3-2)
3. 直流系統に酸化亜鉛形避雷器を適用した場合には電圧極性の反転や、転流によるリップル電圧の影響を考慮する必要がある

一定時間(24~48時間)間隔で極性反転を行った試料は、極性反転時に一時的にもれ電流が増加するものの、同一極性を連続課電した試料に比べれば、定常時のもれ電流の増加割合は小さい。そのため、極性反転を繰り返す方が寿命の延長を期待できる。

今後、引続き、交直変換所に発生する複雑な定常電圧波形における避雷器の寿命特性について交流と比較しながら定量的な検討を行い、直流送電の経済的な絶縁設計に資する予定である。

## 3-4 冠着雪がいしの耐電圧特性

担当●電力技術研究所 系統絶縁部 放電研究室 室長 新井 昇

### 3-4-1 はじめに

がいし類の絶縁設計では、通常送電線経過地の汚損程度(がいし表面に付着する塩分量)と耐電圧の関係とから、がいし個数を決定する。

そのため、塩分汚損のほとんどない内陸地帯においては、がいし連結長が短くなる

ので、送電線が多雪地帯を通過する場合には、運転電圧およびサージ電圧に対する冠着雪時のがいし連の耐電圧特性を考慮する必要がある。

当所では、東北電力㈱米沢変電所構内に、交流および直流の300kV冠雪耐電圧実験設備(図3-4-1 参照)を設置し、東北電力㈱と共同して、交流電圧および直流電圧に対する500kV級がいし装置の冠雪時の耐電圧特

性、雪質と耐電圧との関係などについて検討を行っている。

また新たに上記構内に、1,500kV開閉インパルス発生設備およびUHV級耐張がいし装置などを設置し、開閉サージ電圧に対する冠雪がいし連の耐電圧特性についての検討も開始している。

現在までに得られている主な結果は次のようにまとめられる。

図3-4-1 交流・直流冠雪耐電圧実験設備(冠雪時)

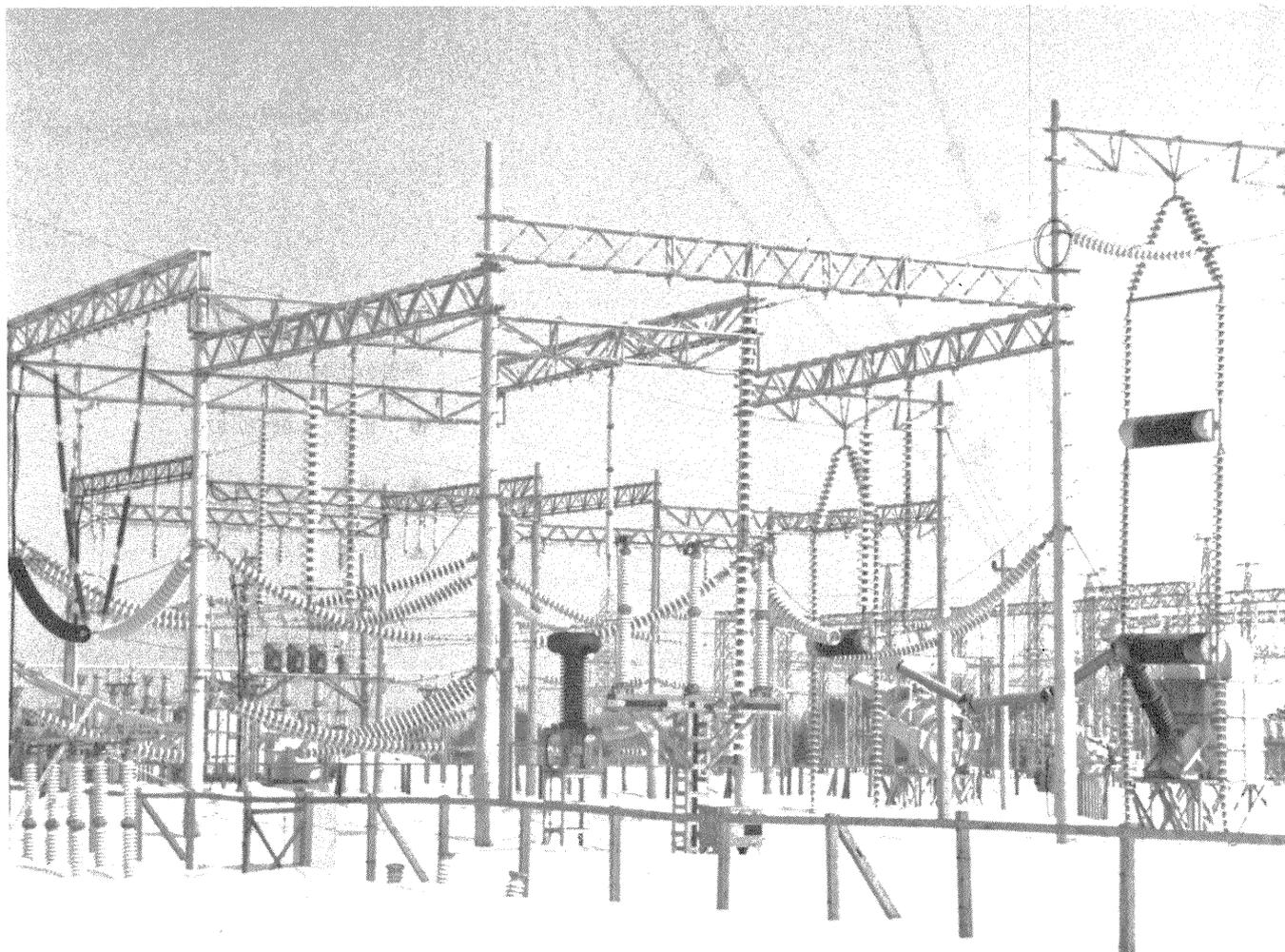


図3-4-2 がいしの冠雪時交流耐電圧

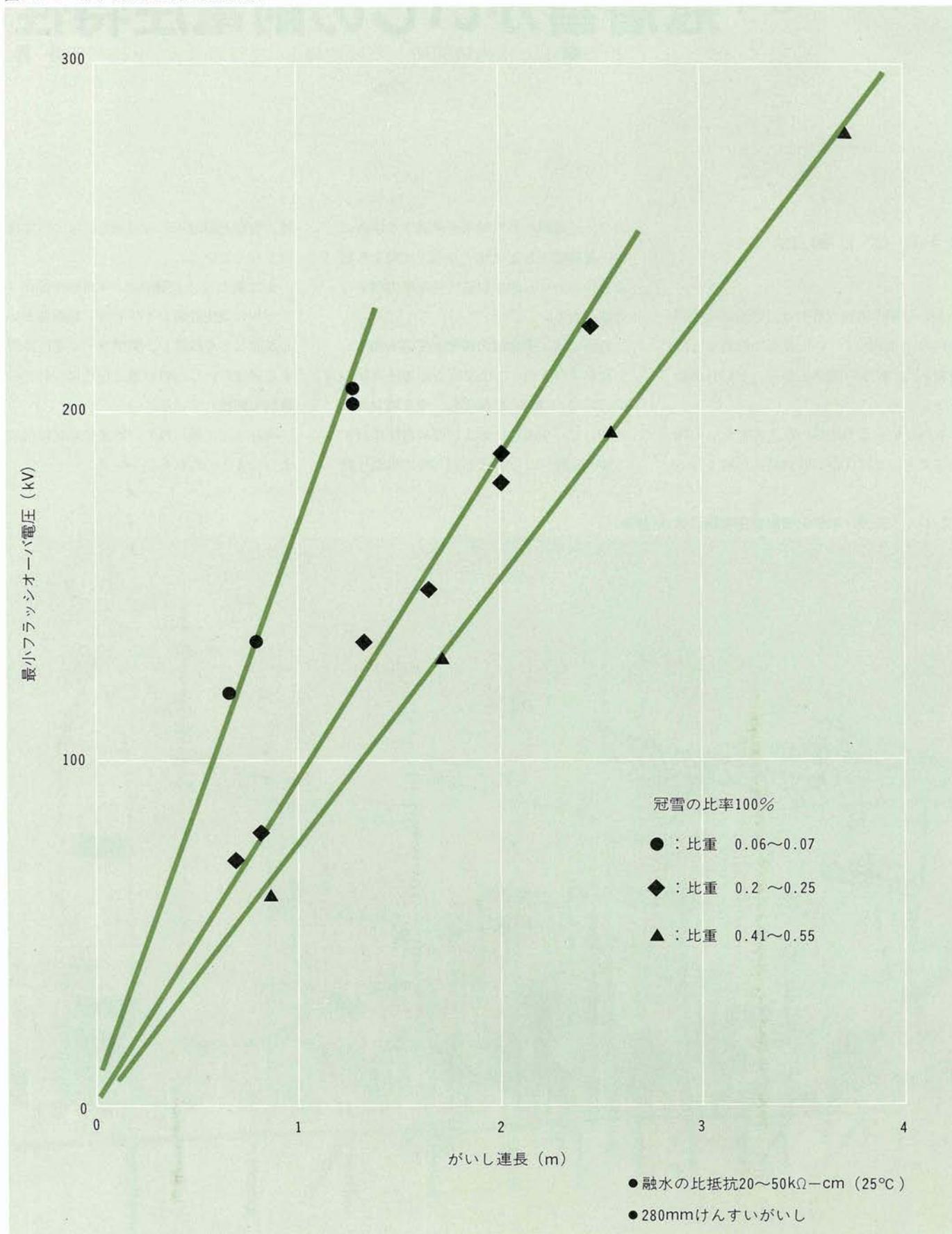


図3-4-3 冠雪の比重と連結長1m当りの耐電圧との関係

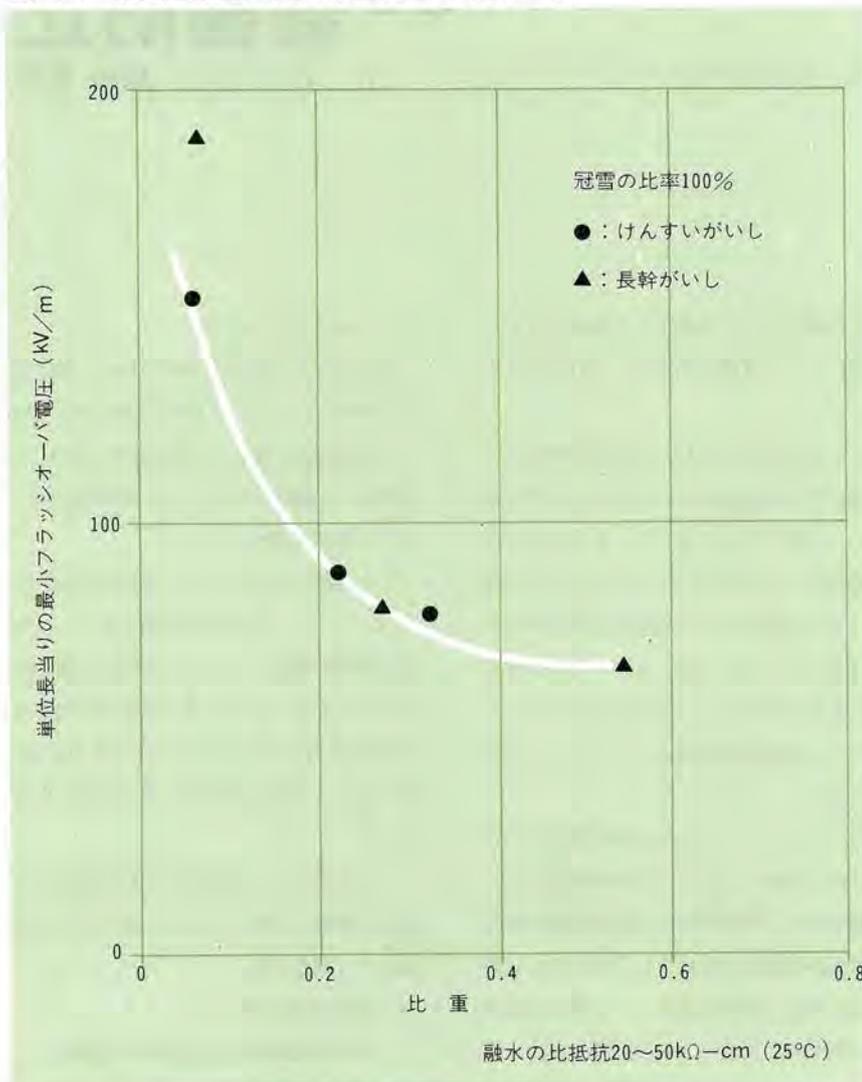


図3-4-4 開閉インパルス実験設備全景



### 3-4-2 現在までの研究成果

- 冠雪がいしの交流耐電圧は雪質(比重、融雪の比抵抗など)が同じ条件では、がいし連が完全に冠雪している場合が最も低くなる。
- 冠雪がいし連の交流耐電圧は、がいし連結長が1~4m程度の範囲では、がいし連結長にほぼ比例する(図3-4-2参照)。
- 冠雪がいし連の交流耐電圧は、雪の比重に大きく影響される(図3-4-3参照)。雪の比重が0.1程度の場合の、がいし連結長1m当りの交流耐電圧は140kVであるが、0.2および0.5と大きくなると、耐電圧はそれぞれ95kV/mおよび70kV/mと大幅に低下する。
- 塩分付着密度が0.01mg/cm<sup>2</sup>程度の内陸地域における送電用がいしの設計耐電圧は、100kV/m程度である。このことは、送電線が多雪地帯を通過する場合には、降雪状況、雪質、気象条件などを考慮し、雪に対して適切な絶縁設計を行う必要があることを示唆している。
- 冠雪がいしの直流耐電圧については、冠雪比重が大きい場合には直流耐電圧は交流耐電圧とほぼ一致し、がいし連結長が1~3mの範囲では、直流電圧はがいし連結長にほぼ正比例するなどの結果が得られている。
- またこれら耐電圧実験と並行して、雪質、がいし冠雪の成長過程などについても調査し、絶縁設計に反映させる予定である。

#### 開閉インパルス耐電圧実験設備の概要

##### ① 衝撃電圧発生装置

本体容量	0.0577μF
波頭コンデンサ容量	0.01μF
開閉インパルス発生電圧	1,500KV
雷インパルス発生電圧	2,000KV

##### ② 供試品

UHF級耐張装置	(2連1組、4連1組)
275KV耐張装置	(2連1組)
154KV耐張装置	(2連1組)

##### ③ 特徴

- 発生装置および波頭コンデンサはともに密閉型で降雪中の運転が可能である
- 交流180KVを重畳とした試験が出来る

## 3-5 雪害防止

担当●電力技術研究所 雪害対策プロジェクトチーム 主査 特任研究員 坂本 雄吉

### 3-5-1 はじめに

架空送配電線路の電線に、着雪が発生すると、各種の事故が発生することがある。送電線路への着雷による現象と、それによって起る事故の諸相を図3-5-1に示した。

これらの事故は、古くから着目され、各電力会社や国鉄で多くの研究がなされてきた。古くは送電線の規模が小さく、電線のサイズが小さかったので、頻度多く発生する北陸地方で着雪機構や着雪量の推定の研究がなされてきた。

他方、スリット・ジャンプについては、着雪により電線に蓄えられたエネルギーが、脱落により開放されるとの考え方で、ジャンプ量の予側研究がなされ、また、模擬実験も各所でおこなわれて、電線の運動範囲を求めることが可能となっている。当所でも、赤城試験センターの機械力試験線を用いて、模擬実験をおこない、配電線の着雪脱落時の挙動を観測した結果を報告してきた。

また、雪害防止対策についても、対策設計法や、着雪防止のための方策が研究され、当所でも、高木等が防雪電線や融雪電流について、理論・実験の両面から研究した結果を報告してきた。

これらの研究によって北陸地方のような多雪地で比較的頻度多く発生する着雪(比較的乾いた湿雪によって弱風下に発達するので乾型と呼ばれる)については、発生機構、着雪量推定法も解明され、対策設計もほぼ確立されるに至った。

しかし約20年前頃から、北海道を中心としてこの北陸地方や上越地方での研究成果

では理解できない強風下にも発達残存する着雪による、事故が発生し、注目されるようになった。

この着雪に関しては、北海道電力欄によって主に研究が進められ、北陸などで多く見られる前記の乾型に比べて、水分量の大きい湿雪が、風で電線に吹きつけられて発達し、主に温帯低気圧の北側域で発生することなどが明らかにされ、また、この着雪を防止する方策として、着雪防止リングのとりつけ、電線の振れ防止用ダンパなどが開発された。

当所では、このような着雪の実態をさらに詳細に把握するため、電気事業連合会の依頼を受け、昭和45年に架空送電線水雪害事故調査委員会を発足させ、統一様式の調査表を全電力会社に配布し、水雪害事故発生の都度に記入願い、その結果を集計・解析して、着雪発生の気象条件、事故の様相、線路パラメータの影響などをまとめ、報告してきた。

さらに、これらの調査を通して乾型、湿型の着雪の発生する気象状況が次第に明らかとなってきたことから、この成果にもとづいて、任意の地点のある再現期間を有する、着雪量を予測する方法を開発する研究に着手し、昭和52年度から上記事故調査委員会を電線着雪量推定法研究委員会に切りかえ、自然環境科学研究所と共同して研究を進めてきた。

また、同時に各種難着雪対策の効果の検証、難着雪機構の解明などを目的として、小型人工着雪装置を東京電力欄石打発電所構内に設置しての研究をおこなってきた。これらの成果は、当所の報告書として、そ

れぞれ発表されている。

昭和55年12月東北電力欄の仙台・郡山周辺、昭和56年1月に北陸電力欄の富山市周辺で送配電線の電線に多量の着雪が発生し、送電鉄塔の倒壊を含む大きな被害が発生し、大巾な供給支障をみた。

この事故の重大性から、電気事業連合会では、官・学・民共同の体制のもとに、事故の機構を解明し、また雪害防止対策を総合的に検討するため、電力流通設備雪害対策特別委員会(委員長山田直平理事)を組織したが、当所は積極的にその検討に協力した。

この委員会は、昭和56年7月報告書を作成して終結したが、下記の5項目が研究課題として残された。

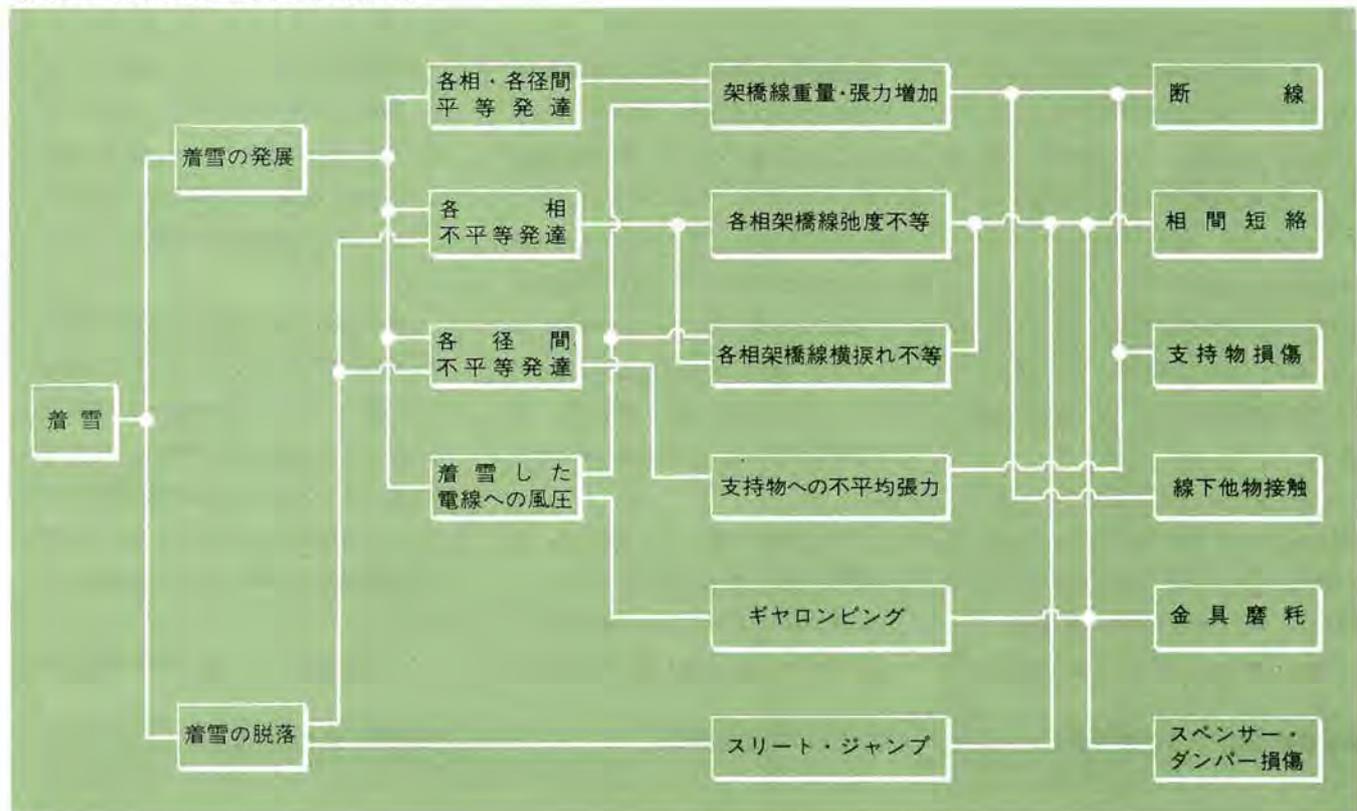
1. 電線着雪量の推定
2. 送・配電線難着雪対策の研究開発
3. 鉄塔の連鎖倒壊防止対策の検討
4. 着雪時のアンバランス荷重の検討
5. 着雪脱落などの動的荷重に対する鉄塔の応答

電気事業連合会では、この研究の実施方針について検討し、当所にこの研究の実施について依頼があった。

当所では、これにもとづいて、電力技術研究所に雪害対策プロジェクト・チームを発足させ、特に東北・東京電力からの出向応援を得て、研究を促進することとし、また関係官庁、学識経験者、電力会社および関係メーカの協力を得るため、架空電線路雪害対策研究推進委員会を発足させ研究を進めつつある。

本稿ではこれまでに、研究を進めてきた

図3-5-1 電線への着雪による送電線事故



電線着雪推定法の概要、ならびに現在進めつつある研究の概要について、述べることにする。

### 3-5-2 電線着雪量の推定

#### I. 目的と構成

本研究の目的は任意の地点の、かなり長期の再現期間を有する電線着雪量を推定する手法を開発することにある。その着雪量再現期間値推定法のフロー・チャートを図3-5-2に示す。

対象とする地点の20～30年以上にわたる電線着雪量の毎年の最大値の記録が得られていれば、図3-5-2左端に示すように、これから着雪量の再現期間値を求めることができる。

しかし、わが国では着雪量のデータは極めて少く、その地点も限られている。したがって図3-5-2左端の方法を用いることはできないので、僅かな信頼できる着雪量のデータをもととして入手し得る気象データ

を処理し、任意の地点の着雪量の再現期間値を求めなければならない。

そこで「気象観測データのある地点」の着雪量再現期間値推定法を図3-5-2の中央に示す。電線への着雪量は、電線のところを通り過ぎる降雪量の電線軸に直角な成分の関数で表わされると考え、その量を「着雪有効衝突降水量」と名づけている。

気象官署のある地点では一般に降水量、地上気温、風向、風速およびその時の降水が雨であるか雪であるかのデータは、毎時または3時間おきに観測・記録されているので、このデータを原データとして、着雪有効衝突降水量を求めてゆけばよい。

しかし、ここで問題となるのは降雪片の含水量である。よく知られているように、着雪は降雪片中の含水量が適度でないと発生しない。降雪片中の液体の水の量が少ないと雪片は電線に衝突しても付着せず飛散してしまし、また、含水量が大き過ぎると融解して着雪は発達しないからである。

着雪がどの程度の含水量で発達しやすい

かはまだよく知られていないし、また降雪片中の含水量がどの程度であるか(すなわち降雪片の質)の記録もとられていない。そこで、今回開発した方法では、地上気温と天気図パターンから、降雪片が着雪しやすいものかどうかを判断する方法を用いることを提案している。

つぎに問題になるのは、着雪有効衝突降水量と電線着雪量の関係である。

これについては、これまでに得られている信頼性の高い着雪量および着雪密度のデータをもととして、着雪有効衝突降水量との比(着雪率と呼ぶ)と相対気温(気温と後述の $T_{50}$ との比)、風速、電線直径などとの関係の相関解析をおこない、適合性の高い関数形(着雪モデル)を導くことで解決しようと試みている。

着雪量の再現期間値を求めるためには、その発生確率に関する極値分布を知ることが必要である。これについては各種の分布への適合度を調べ、二重指数分布を用いることを提案している。

一方、皮肉ではあるが我々が着雪量の再現期間値を求めたい地点の大部分は、気象データの無いところである。このような場合の推定法のための流れ図を図3-5-2の右端に示した。すなわち、この地点では、降水量、その降水が着雪しやすい含水量での降雪であるか否か、風速、風向のデータを何らかの方法で推定することが必要となる。

本研究では近傍気象官署のデータをもととして、任意の地点の降水量、地上気温、風向および風速を推定する方法の開発を試みている。

このベースとなったのは気象庁の AMeDAS(Automatic Meteorological Data Acquisition System) のここ数年のデータである。しかしこのデータでは降水量は、雨と雪の区別がないのでこれを別の情報か

ら判断することが必要となる。

## II. 電線着雪の発生する地上気温条件

着雪量を推定する場合、降雪片の含水率を知ることが必要となるが、過去の気象記録では分らないので、気温に頼るしかない。

降水は気温が高いときは雨、気温が0℃以下のときは雪であろうが、地上の気温が同じでも雨であったり雪であったりする。これは、雪片の融解の程度は地上の気温のみでなく、上層の気温、湿度、風速あるいは雪片自体の形態や大きさにも依存するからである。

そこで、高層の気象データを用いて、雪片の融解の程度を知ることが望まれる。

現在のところ雪片の含水率が着雪に適したものであるか否は、地上気温と天気図パ

ターンによって、判別する方法を用いている。

着雪適温の下限は、いろいろ考えられるが、簡単のために0℃とする。上限は、降雪を発生させる気象パターン、降雪の種類などの特性が地域により異なることが知られているので、地域特性を考慮することとした。

一般に低気圧に伴う降水では上層に比較的暖い空気の層があるので、雪である気温は比較的低い。他方、季節風型の気圧配置では、かなり高い気温でも雪が降る。そこで、天気図パターン毎に雪と雨の発生割合が同じである気温( $T_{50}$ と呼ぶ)を求め、これを着雪適温帯の上限とすることを提案している。

そして観測値のない地点の着雪帯の上限

〔着雪量の長期データがある地点〕

〔観測データのある地点〕

〔観測データのない地点〕

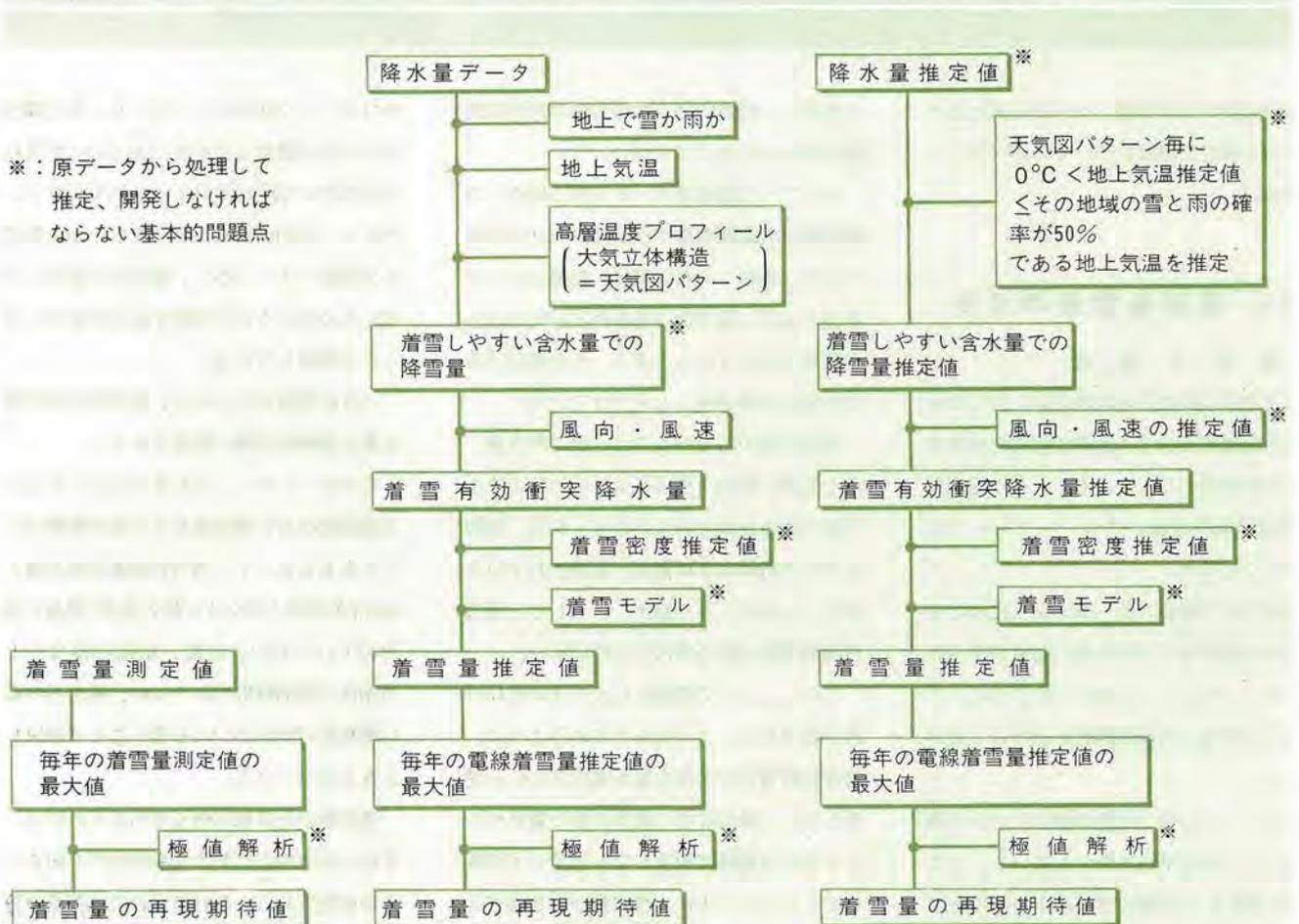


図3-5-2 着雪量の再現期待値推定法フローチャート

気温を求めため、各地方の主要気象官署について調べた $T_{50}$ と標高の関係を明らかにしようとしている。

### Ⅲ. 着雪に寄与する量(着雪有効降水量、着雪有効衝突降水量)

弱風下では、着雪の大きさは、着雪適温帯の条件での降水量が大きく寄与するが、これを着雪有効降水量と呼ぶ。

強風下では、着雪の発達の様子は、風の効果を加味する必要があり、地上降水強度が $P$ ( $g/cm^2 \cdot 秒$ )、降雪片の落下速度 $V_s$ ( $cm/秒$ )、電線の軸に直角な成分を $V_n$ とすると、 $P_G = P\sqrt{1+(V_n/V_s)^2}$ という量が有効で、これを着雪発生気温条件が継続する間について、積算したものを、着雪有効衝突降水量と名づけている。

### Ⅳ. 着雪モデル

着雪量を求めるためには、この着雪有効衝突降水量と着雪量との関係を知る必要がある。着雪有効衝突降水量の全部が着雪となるなら、理論的に着雪量を求めるのは容易であるが、実際には、特に強風下の湿型の着雪では、発達の初期に降雪が融けて水滴となって滴下したり、電線への付着力が小さいため、落下したり、風で吹き飛ばされることによる損失(初期損失)、や発達途中でも脱落したり、水分が吹き飛ばされることによる損失(途中損失)がある。

これらの量は、風速や気温の関係で、しかも、ある統計的な量であろうが、現在のところ、これらの効果は、十分に解明されているとは言い難く、理論にもとづくモデルを作ることは不可能な段階にある。そこで、今のところ、着雪発達を理想化した筒雪モデルを用い、これと実際に観測された着雪量との関係から、着雪率( $\alpha$ )を求めて、これを使う方法を用いることとしている。

理想化された着雪モデルは、着雪が常に電線の中心線を軸とした円筒状に発達すると考えたもので、衝突し捕捉された雪片は、直ちに着雪全体に配分され、外径を一様に

大きくしていくと仮定している。

### Ⅴ. 着雪量の極値分布

年間極値の標本の統計的性質を求めるには、従来、大別して次の2つの方法が用いられている。すなわち

1. 経験的再現期間推定法
2. 理論的方法

前者では、適切な確率紙に順序標本を特定のプロット法を用いてプロットし、この点の並びに適合する傾向線を描いてこれを延長する。後者では、分布がある方則にしたがうとして、理論計算により、再現期間値を求める。

着雪量がどのような分布に適合するのかわかるとは、今のところ定説はない。そこで各種の分布への適合度を調べ、Fisher-TippetのI型(Gumbel)分布を用いることを提案している。

なお、着雪の極値分布は、特に大平洋岸の場合、標準偏差の方が平均値より大きいような性質を有しており、標準誤差がいちじるしく大きいので、値の解釈が困難なところから、低気圧の経路・速度による新しい方法を検討中である。

### Ⅵ. 気象値推定法

前に述べたように、送電線路の経過ルート的大部分は、気象データの得られていないところであり、また着雪量はかなり局地的に異なる性格を有しているため、ルートに沿っての着雪量を推定するには、各地点の着雪量に関係する気象値、すなわち、気温、降水量、風向、風速などを推定する方法が必要となる。

最近、気象庁は気象官署に加えて、多くのAMeDAS(Automatic Meteorological Data Acquisition System)を配置してこれらの観測をおこない毎時記録している。

そこで気象官署とAMeDASの記録を集め、相関解析により、気象官署の記録から、任意の地点の気象値を推定する手法の開発をおこないつつある。

すなわち、同じような変化パターンを示す地域を分類し、その各々について推定法を確立していこうとするもので、これまでに北陸、北海道道東、関東南部、山陰、四国東部などの解析を終り、推定の見込みを得ている。今後、さらに推定の精度を向上しつつ、本邦全域に拡張する予定である。

これらの着雪量の推定研究により、全国的な着雪しやすさの量的評価が可能となり、送配電線の設計荷重の合理的設計ができるようになりつつある。

### 3-5-3 雪害防止

当所では、これまでも送配電線の雪害を重視し、多くの研究をおこなってきたが、昭和55年12月の仙台・郡山地区、および56年1月の富山市周辺の大雪害を契機に、電気事業連合会から5項目の研究課題の研究の依頼を受け、雪害対策プロジェクト・チームを編成し、またこの研究を全国の関係官庁、学識経験者、電力全社、および関係メーカの総力を結集して推進するために、架空電線路雪害対策研究推進委員会を発足させ、4年にわたる研究プロジェクトを組んで、研究を進めている。本節では、その概要について略述する。

#### I. 着雪観測体制の強化

- 5つの研究課題のうち3つ、すなわち
1. 電線着雪量の推定
  2. 送・配電線の難着雪対策の効果の検証
  3. 着雪時のアンバランス荷重

では、実際の着雪に関する信頼性あるデータがぜひ必要である。

最近、特に難着雪電線の開発などには、人工着雪実験が多く用いられているが、このような装置で自然着雪におけるような多様な着雪を忠実に再現することはできないからである。他方、電線の着雪は、1地点毎にみると極めて希な現象で、当所が何ヶ所かに観測設備を設けて観測体制を布いて

も、そこで得られる有効なデータは、微々たるものに過ぎない。そこで、全国の電力会社他の共同体制のもとに、観測体制を布くこととしたものである。

なお、この必要性は以前から指摘され、各社でデータが得られた場合は、当所に送付され、かなりのデータが集まっているが、さらにその体制を強化したものである。

このような観測に当って、実線路を用いるのが良いが、着雪の正確な計測が困難であるし、また振れ特性から考えて試験線を架設するにしても長径間が必要である。

そこで、短径間の線路で、長径間の現象を模擬するため、振れやすさを自由に調整することを考え、その金具の開発をおこなった。この金具はスプリングを用い、径間長5 m(とりつけ金具を含めて)の試験線で、任意の径間長の状態を模擬するように設計できる。さらに着雪重量を電気量として自動的に観測できるようにしている。これらに基づく装置は、東京電力榑石打発電所構内で試用中である。

以上の実線路、試験線、サンプラーでのデータは電算機により統計処理するとともに、データ・バンクとして保存を予定している。

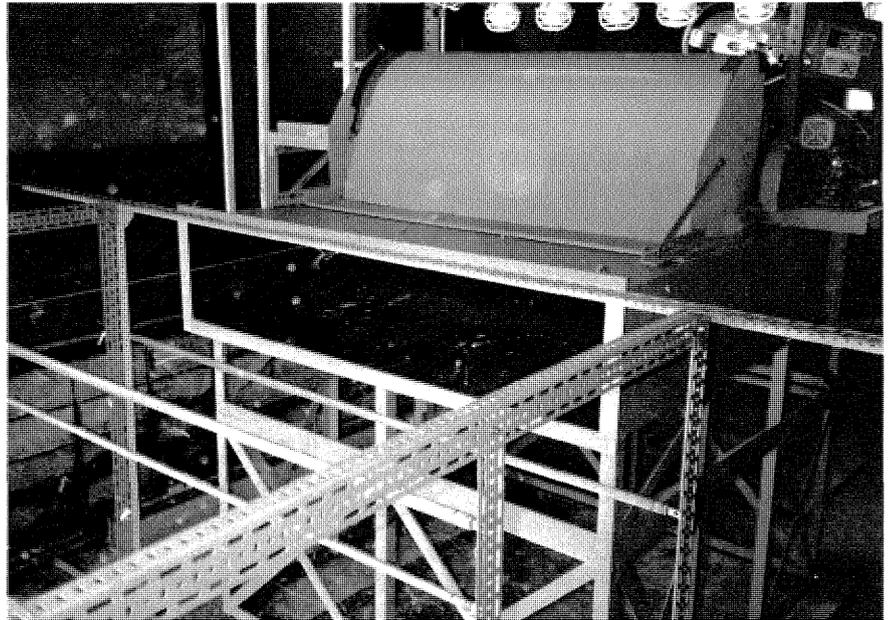
## II. 人工着雪装置による研究

自然の大きな着雪は希な現象であるので、研究を補完する目的で、東京電力榑石打発電所構内にいつでも実験できる人工着雪設備を設置し、実験を開始した。

この設備は、雪の一定量を一定時間おきに投入する装置、雪を加熱して水分を増す装置、雪を粉碎して、風洞中に送り込む装置、送風装置、および模擬電線から成り、積雪を用いて、模擬的に着雪を発生させるのに使用するものである。この写真を図3-5-3に示す。

これを使用すれば、難着雪化の効果および機構が検証でき、この結果を通してさらに効果のある対策が開発されるものと期待される。

図3-5-3 人工着雪設備



また、同じ条件下に風に対する相対角を変えて着雪量を測定すれば、アンバランス荷重についての有力な情報が得られる。

なお、一度地上に降り積った積雪と自然の降雪では性質が異なるので、自然降雪を使用して実験し得るように、装置を改良することも計画中である。

## III. 連鎖倒壊防止対策

電線に大きな着雪が発生し、張力が増した条件で隣接鉄塔に損傷が発生し、片側径間の電線張力が急激に減少すると鉄塔には大きな不平均張力が加わることとなり、連鎖的に鉄塔に損傷が発生する恐れがある。

事実、雪害における鉄塔の被害を調べると、約半数が連鎖倒壊であり、もし、これが防止できれば復旧は、かなり容易となることが期待できる。このような連鎖倒壊の防止対策として、フランスでは、大きな不平均張力が加わったとき、懸垂クランプ内で電線がスリップして不平均張力を緩和するスリップ・クランプが、また1部の国では、アームがスウィングしたり、曲ったりする機構が用いられている。

しかし、このような機構を活用することは、雪害による鉄塔の損傷は防止できても、他の原因で作用し、線路の事故を多く

する可能性がある。そこで線路の建設、保守作業、その他の外力に対する挙動などを詳細に調べ、このような機構の具備すべき条件を見定めてから、アイデアを考えてゆく必要がある。

以上の研究には、各方面の現場知識を必要とするので、電力会社他の共同研究を必要とする。また、多くのケースについてチェックする必要があるので、特に雪害に対して、鉄塔の実存耐力を計算するための、電算機のプログラムを開発中である。

## IV. 動的荷重に対する鉄塔の応答

雪害による鉄塔の損傷を小規模に局限するには、スリット・ジャンプ、断線、隣接鉄塔の倒壊などの場合に鉄塔に加わる動的荷重と、それに対する鉄塔の応答を知ることが必要である。

幸いに、UHV 赤城試験線の動的挙動の研究を通して、鉄塔の地震・風荷重などに対する応答の数学モデルが開発され、荷重の特性が明らかになれば、鉄塔各部の応答は推定できる。そこで、現在雪害時に鉄塔に加わる動的荷重の情報の収集をおこないつつあり、これの評価から、研究を進めることを計画しつつある。

# 4-1 要 旨

電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室 室長 深川 裕正

都市における、電力需要の増大に対処するために、地中送電用電力ケーブルの送電容量増大、絶縁性能など信頼性の向上がのぞまれている。

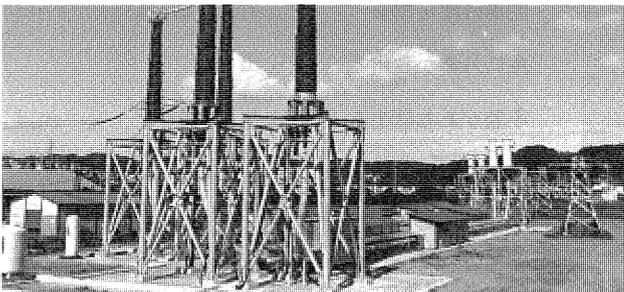
当所では、このような趨勢に鑑み、

1. XLPE(架橋ポリエチレン)ケーブルの絶縁劣化とその判定法
2. ラミネート絶縁OFケーブルの絶縁性能
3. 地中ケーブルの送電容量向上
4. 管路気中送電用ガスの絶縁特性と放電の関係などについて精力的に研究を行っている。

XLPEケーブルは、OFケーブルと比べ、取扱いが容易であり、油槽のような付属装置も不要でしかも、絶縁性能が優れているところから、これまでかなりの実績を有しているが、使用開始後10年程度経過して、絶縁破壊した海底XLPEケーブルの中から水トリーが発見された。

当所は同時期に実験室で同様の現象をみつけ、水トリーが絶縁性能を著しく低下させることを明らかにした。その結果、加速劣化試験法を提案している。さらにこの方法を新しい製造法、3層押出法により製造したケーブルに適用し、電圧-寿命特性を明らかにし、劣化判定法を確立するとともに、乾式架橋方式によるケーブルは、水トリー劣化が比較的起りにくいことを実証した。

一方、超高圧級になると、絶縁厚の低減、運転ストレスの増大が要求されるため、電気トリー劣化が問題になる事を予見して、電気トリーの発生・進展機構を考察すると共に、コンピュータを用いた新たな計測手法を用いて劣化や



事故を予知する方法の開発に努力している。

超高圧OFケーブルの分野では、送電損失が少なく、コンパクトなケーブルが必要となって来ているので、絶縁体での損失が小さく、厚さが薄くできる材料が必要で、当所ではその開発の可能性をさぐるとともに、ラミネート絶縁紙に注目し、実用性の可能性をさぐってきた。その結果、初期特性は満足いくものがあるものの、長期絶縁性能は未解明であることが分り、その中心的問題であるラミネート紙の絶縁油中での膨潤現象や、それによるケーブル半径方向油流抵抗を解明した。

一方、電力会社と共同で、275kV OFケーブルおよび500kV OFケーブルの長期課通電試験を行い、長期絶縁性能の検証を行っている。

275kVケーブルはすでに1年半の課電試験を終了し、現在500kVケーブルの試験を実施している。

地中ケーブルの送電容量向上のためには、発生熱の低減や熱放散の改善も必要で前者に関し、素線それぞれに絶縁をほどこす方式をとると導体による発生熱は低減し、10%程度容量増大が期待出来ることを明らかにした。

一方、後者については、川砂に変わる熱放散特性の良い埋めもどし土壌を開発し、熱伝導シミュレータにより改良土壌の適切な適用範囲を明らかにした。さらに熱供給導管と電力ケーブルの熱干渉を低減するため、それに用いる熱しゃへい板、改良土壌、ハンドホール、ヒートパイプなどの熱影響防止対策の指針を作成した。

管路気中送電に関しては、SF<sub>6</sub>ガス、スペーサ(支持用固体絶縁物)、混合ガスの絶縁特性の研究を行ってきたが、特に最近の検討結果として、

1. 新ガス、混合ガスの絶縁特性
  2. SF<sub>6</sub>ガスの放電電圧と放電時間の特性
  3. 局所放電の絶縁特性に及ぼす影響
- などの結果を得ている。

以下にこれらの課題について研究の成果を概説する。●

# 4-2 XLPEケーブルの劣化とその判定法

担当●電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室 室長 深川 裕正

## 4-2-1 はじめに

XLPEケーブルは実用化後20数年を経過し、使用電圧は当初の3.3kV級から275kV級まで広がっている。1970年代に海底ケーブル(配電用)などに発見された水トリーは世界的な大問題となり、当所では、その発生機構、劣化現象および劣化判定方法を鋭意検討してきた。

XLPEケーブルを超高圧に利用するためには、電気トリーによる絶縁破壊に、これまでより一層注目しなければならないと考えられ、その抑止法に関連する研究を行ってきた。

## 4-2-2 XLPEケーブルの水トリー劣化

### I. XLPEケーブルの水トリー発生状況

水トリーは、その形状から単に水トリーと呼ぶものとボウタイ状水トリーに分類される。

#### 1. 水トリー

内外半導電層から絶縁体内へ出ている水トリー

#### 2. ボウタイ状水トリー

絶縁体内のボイドや異物から蝶ネクタイのように両側に出ている水トリー  
水トリーの発生は、

##### 1. 水の存在

##### 2. 電極界面および絶縁体内の不整

が原因していることを明らかにしたが、半導電層と絶縁体の界面がスムーズで水を含まない特性のものが良いと結論できる。また、水分含有の観点から製造時に水を使用しない方法が望ましく、従来の水蒸気架橋

方式より、乾式架橋方式がよいことを立証した。その結果、含有水分量は低減され、水トリーは激減したが、逆にボウタイ状水トリーが発生していることが明らかになった(表4-2-1)。

このボウタイ状水トリーの有害性については、未だ結論が得られていないが異物やボイドを核として発生するため、これが半導電層近傍に接触すると、水トリーに発展絶縁耐力を低下するおそれがある。

### II. XLPEケーブルの加速劣化試験法

XLPEケーブルの水トリー劣化の加速劣化試験として次の2つの方法を取りあげた。

1. 電圧加速劣化
2. 周波数加速劣化

両者の関連性は図4-2-2に示すV-t特性から明らかである。即ち前者は高電界強度での破壊寿命を低電界の使用電界強度側に外挿して破壊寿命を求める方法であり、後者の方法は、水トリーの成長に周波数加速性が成立することを利用して、商用周波の

数倍から、数十倍の高周波電圧(定格電圧と同じ)を印加して破壊寿命を求める方法である。

電圧加速性に対する等価性は、今のところ、低電界強度のデータが少ないため明確ではないが、モデル試料の実験では、高電界強度領域で水トリーの成長に電圧依存性がないという結果が得られており、印加電圧は定格電圧の3~4倍程度が限界と考えられる。

一方、周波数加速性については、5~6kHz程度が劣化の等価性の限界と考えられており、あまり低周波だと試験時間が長くなり、加速試験の意味がなくなるので、実用上からは1~3kHzが最適周波数であると考えられる。

加速劣化試験は、実用状態を想定して種々の条件下で行われる必要があるが、浸水条件については、導体内浸水が最も過酷である。又、温度条件は高温になるほど過酷となる。

なお周波数加速法では水の含有条件を整えるために前処理(80~90℃温水中に2~

表4-2-1 各種半導電層の方式と水トリー発生状況

	水 ト リ ー	ボウタイ状水トリー
T - T タイプ	内導外から出る	あまり出ない
E - T タイプ	主に外導から出る	出る
E - Eタイプ(水蒸気)	不整があれば出る	比較的少い
// (乾式)	ほとんど出ない	小さいものが見られる

T - T : 内外半導電層ともテープ巻  
E - T : 内 : 押出、 外 : テープ巻

E - E : 内外とも押出

3日間浸漬)が必要である。

### Ⅲ. 水トリー劣化 XLPE ケーブルの絶縁性能と劣化判定法

加速劣化試験などから、XLPE ケーブルの絶縁劣化を判定する暫定的な基準を求めた。それを表4-2-2に示す。今後は、電力会社が実布設ケーブルで得たデータをあわせて、一層合理的なものにしていくことが望まれる。

### Ⅳ. 水トリー劣化防止法

一般に、水トリーを防止するには

1. できるだけ水をケーブル内に浸水させないように遮水構造とする
  2. 水が浸入してきても水トリーを発生しない様に絶縁体を改良する
  3. 電極不整をなくす
- などの方策が考えられる。

1.の方策としては、鉛やアルミ被を用いてしゃ水にすることも考えられるが、超高压以外では、XLPE ケーブルのメリットを損う。

最近、金属膜をかさね巻きするラミネート式しゃ水タイプが開発されている。

2.の方策として、ポリエチレンに水酸基をもつポリエーテルを数%ブレンドすれば、水トリーの発生をかなり抑制出来ることを明らかにした。

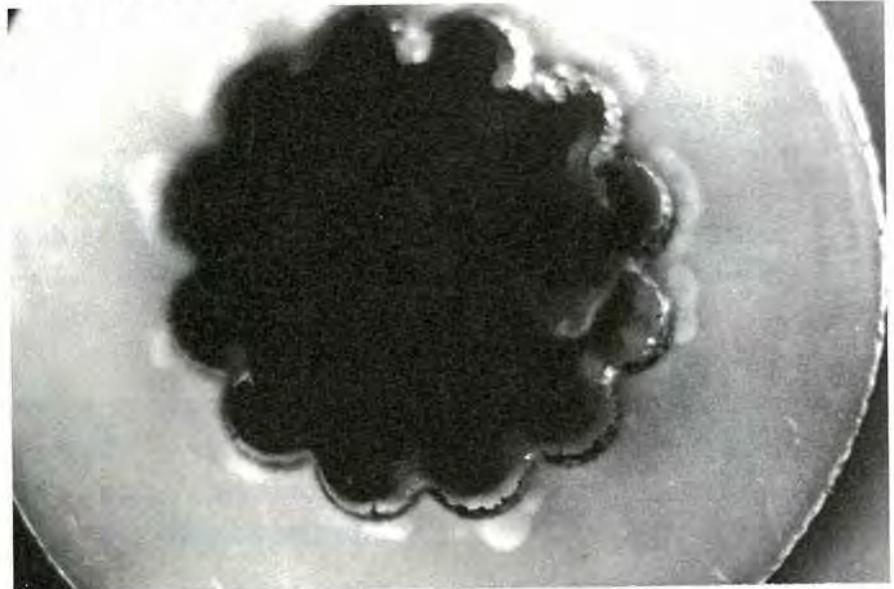
3.の方策として半導電層の材料として高

表4-2-2 XLPEケーブルの劣化判定基準値(暫定)

判定項目	判定基準	備考
絶縁抵抗 ( $\Omega \cdot F$ )	$2 \times 10^{-2}$ 以上	※1 ※2
$\tan \delta$ (%)	5.0以下	常温で定格電圧における値

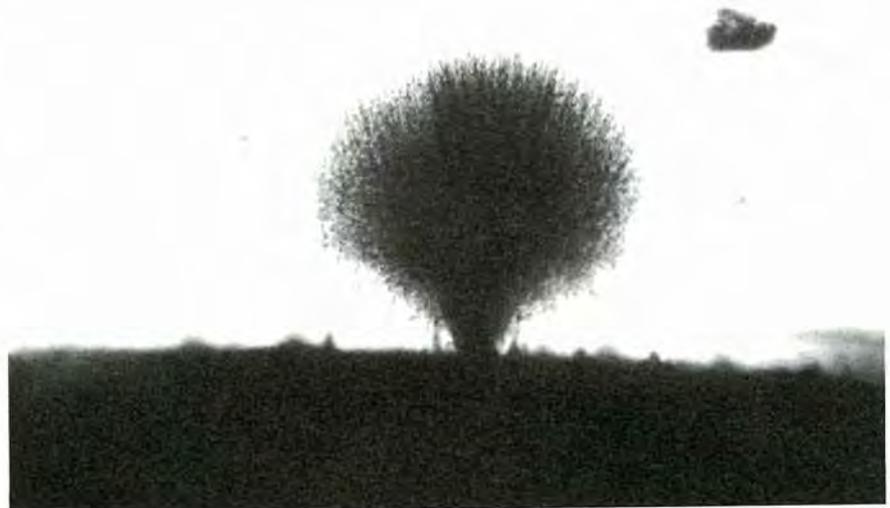
- 注： ※1. 絶縁抵抗値は、常温で定格電圧と同じ値の直流電圧10分値  
 ※2. 静電容量はシェーリング・ブリッジにより定格電圧における  $R_3$  よりの計算値  
 3. 運転に必要な絶縁耐力を  $2E$  とする

図4-2-1 水トリーの例

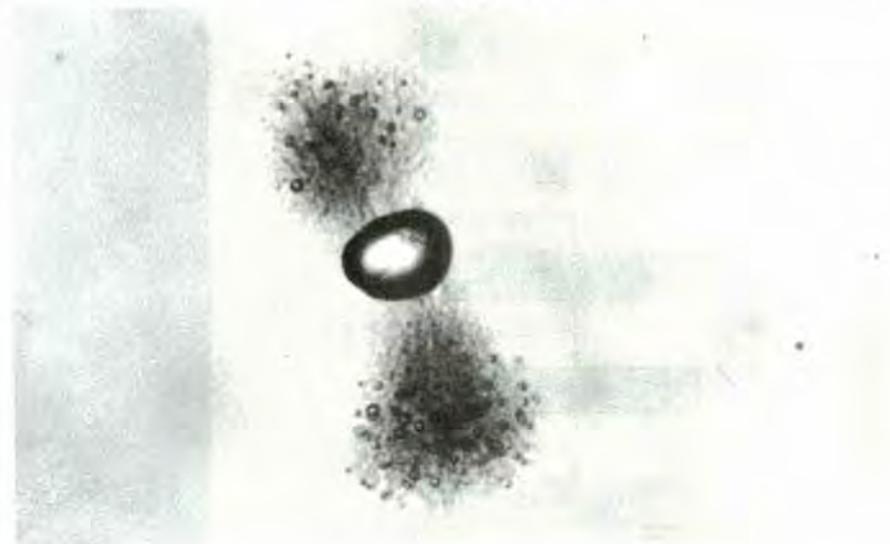


水トリー

水トリー



ボウタイトリー



導電率のカーボンブラックを選び、半導電層と絶縁体との界面を滑らかにすることを考えた。実際に3.3kV級ケーブルを製作し、水中浸漬実験によりその有効性を実証した。

なお、1、2、3の技術は併用が可能である。

### 4-2-3 XLPEケーブルの電気トリー劣化

XLPEケーブルの絶縁劣化形態のひとつに、電気トリー劣化がある。樹枝状に広がるこの発生原因は絶縁体中のボイドや異物、あるいは電極との界面不整である。当所では、このような電気トリーによる絶縁体の劣化機構を解明すると共に、その抑

止法を開発してきた。その結果をふまえ、XLPEケーブルの電気トリー劣化を早期に発見できる技術を開発している。

#### I. ボイドからの電気トリー

絶縁体中のボイド内で、部分放電が発生すると、ボイド内表面が劣化する。劣化が進むとボイド内表面に微小な凹み(ピット)が形成され、やがて電気トリーへと発展し、絶縁破壊に至る。

また、ボイドからの電気トリー劣化機構は、図4-2-3に示すプロセスを経て絶縁破壊に至ると考えているが、このプロセスでは部分放電開始遅れ時間  $t_r$ 、臨界ピット成

長時間  $t_c$ 、およびトリー進展時間  $t_p$  が重要なパラメーターになり、ボイド半径  $r_a$  と印加電界  $E_x$  に大きく依存する。

ボイドからの電気トリーによる絶縁破壊までの時間  $t_B$  は、 $t_r$ 、 $t_c$  および  $t_p$  の和で表われ、この  $t_B$  がケーブルの耐用年数(約30年)より長くなるボイドの半径を計算した結果、例えば10kV/mmのような高い電界設計をするときには、ボイドの許容限界値の大きさは、従来のパシュン則から考えられる値よりも大きくなることが分った。

#### II. 半導電層突起からの電気トリー

XLPEケーブルに電極不整があると、電気トリーが発生するが、この現象に関し、次のことを明らかにした。

1. 初期電気トリーの長さは、5~20 $\mu$ m程度でありこの大きさは電荷が注入される距離に対応していると考えられる
2. 印加電圧  $V$  と電気トリー発生までの課電時間  $t$  の関係は、従来からいわれている  $V^2t = \text{一定}$  の関係を示さず、電気トリー発生に対する印加電圧のしきい値の存在が示唆された
3. 電気トリーが発生する前に0.3~0.4 $\mu$ s微弱パルスが発生し、それは必ず正パルスで始まる。大きさが1~3pcに増加すると、長さ20~50 $\mu$ mの電気トリーが発

図4-2-2 XLPEケーブルの水トリー劣化 V-t 特性

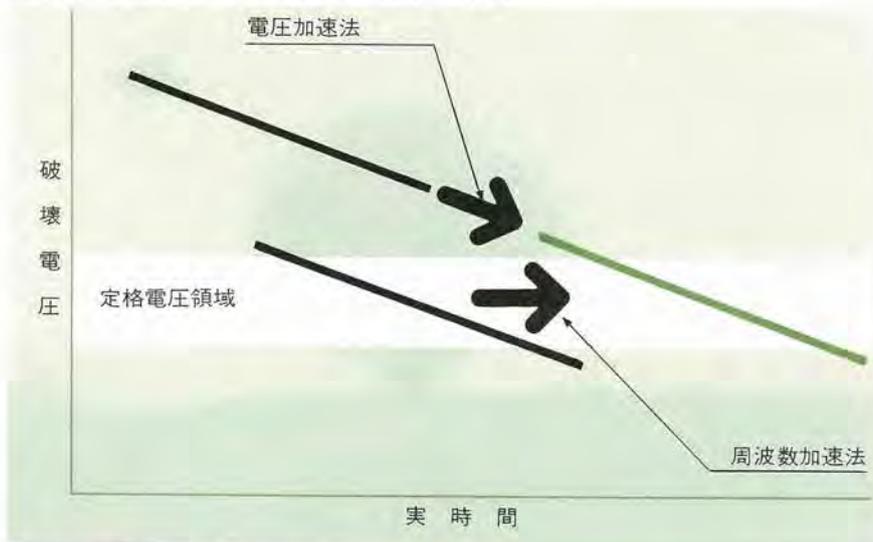
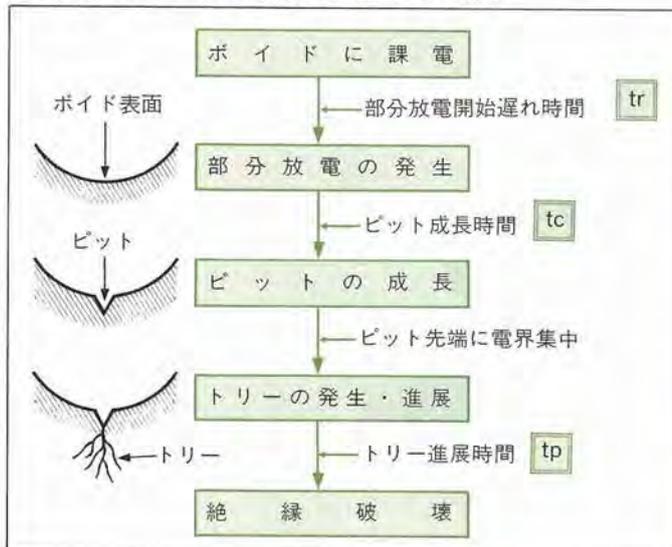


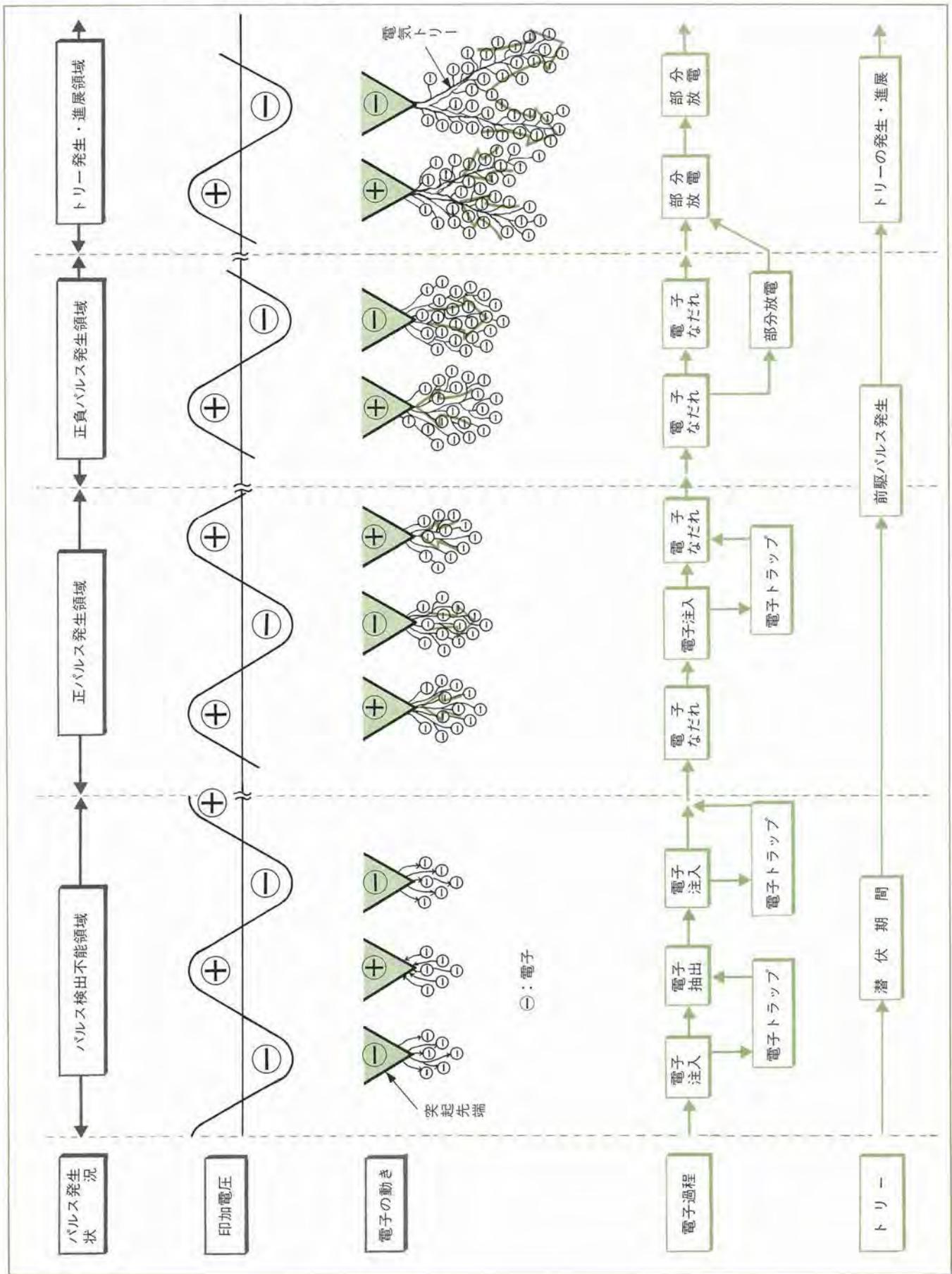
図4-2-3 ボイドからの電気トリー発生モデル機構



発生した電気トリー(写真)



図4-2-4 電子注入・抽出によるトリー発生機構モデル



生ずる

4. この電気トリ-発生時の微弱パルス信号の大きさと発生状況から、図4-2-4に示すトリ-発生機構モデルを提案した

従来から、電気トリ-発生に対して重要なパラメーターは、突起先端部の電界であると言われていた。

しかしこれらの結果より先端から20  $\mu\text{m}$ 程度の範囲の平均電界の方がより重要であると考える。

### III. 電気トリ-劣化とその防止法

XLPE ケーブルの電気トリ-劣化を防止するためには、4-2-1 で述べたようにその発生の起点となる絶縁体中のボイド、異物あるいは半導電層不整を低減することのほかに絶縁材料を改良し、耐トリ-劣化性能を向上する方法がある。

ポリエチレンの結晶化度を高くすると、耐電気トリ-劣化性能が向上する。この原理を利用して XLPE ケーブル用ポリエチ

レンに20%以下の高密度ポリエチレンをブレンドして、交流電圧に対する耐電気トリ-劣化性能を改良できることを確認した。

また、電気トリ-の発生は絶縁材料中の電荷の移動形態に大きく依存するので、その考えに従いポリエチレンに有極性高分子をブレンドして、空間電荷効果を抑制し、衝撃電圧に対する耐電気トリ-劣化性能が向上することを確認した。

### IV. 部分放電検出による事故予知技術の開発

部分放電によって生ずるパルス信号には多くの情報が含まれている。当所では、これらの情報を総合的に把握するために、コンピュータ計測システムを開発した。

このシステムは、従来の計測手法では、不可能であったパルス波高値分布特性( $q-n$ 分布特性)、印加電圧の位相角に対する平均パルス波高値分布特性( $\phi-q$ 分布特性)、および印加電圧の印加位相角に対するパルス発生頻度分布特性( $\phi-n$ 分布特性)などの新しい特性量を迅速に求めることが出来るも

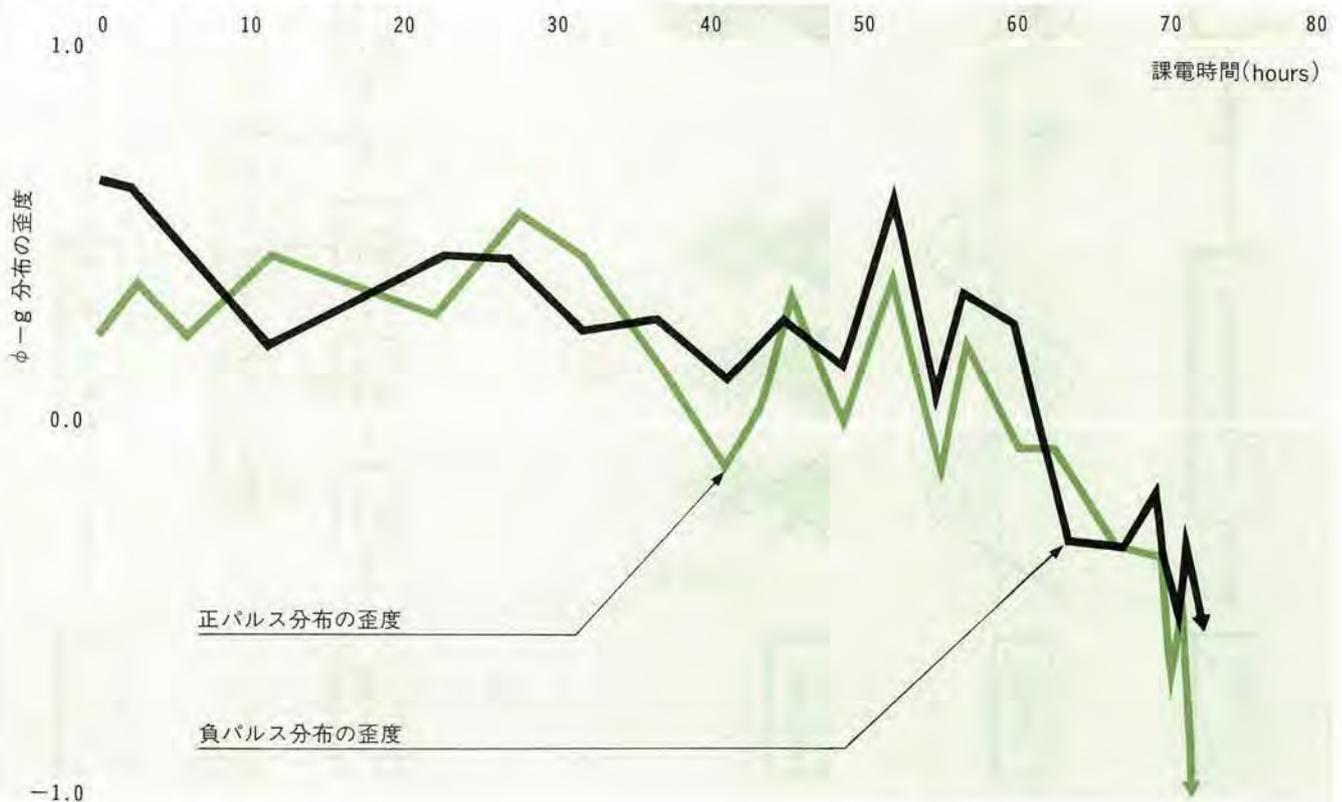
のである。

従来からの部分放電特性量は、最大放電電荷  $q_{\text{max}}$  や平均放電電流  $I_q$  であるが、これでは電気トリ-劣化の進行状態を十分に把握できなかった。そこでこのコンピュータ計測を用いて  $\phi-q$  分布特性を導き、これが電気トリ-劣化検出に有効であることを見出した。

この  $\phi-q$  分布のパターンを歪度という統計量で表わし、この量が電気トリ-劣化の進行とともに変化することを明らかにした。図4-2-5に電気トリ-劣化の進行にともなう正および負パルス分布の歪度の変化を示すが、絶縁破壊に近い時間領域では、正負のパルス分布の歪度がともに負の値を示すことを見出した。

以上の結果から、部分放電を検出し、 $\phi-q$  分布特性を測定し、その歪度を監視すれば電気トリ-劣化による絶縁破壊の予知が出来ると考えられる。この方法を実布設ケーブルに適用すべく現在、技術開発を行っている。

図4-2-5  $\phi-q$  分布パターンの歪度時間変化



# 4-3 ラミネート紙絶縁 OFケーブルの絶縁性能

担当●電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室 室長 深川 裕正

## 4-3-1 はじめに

超高压ケーブルでは絶縁体で発生する損失を低減するため、従来のクラフト紙に代わり、プラスチックフィルムを用いたラミネート紙が開発され、超高压、超々高压ケー

ブルに利用される状況にある。

当所ではこれを先どりして絶縁紙の特性、開発状況を調査して、問題点の抽出を行うと共に、実用化の上で長期安定性の観点から、膨潤現象およびそれによる絶縁性能への影響を基礎的に検討し、また電力会社と

共同で275、500kV級ケーブルの長期課通電試験を行って来た。得られた結果の概要を以下に記す。

## 4-3-2 ラミネート紙の諸特性

### I. ラミネート紙の膨潤

一般にプラスチックは絶縁油中に浸漬されると膨潤、溶解が起る。したがって、これらはプラスチックを用いるラミネート紙による OF ケーブルでは大きな問題となる。当所ではこの問題を解明するために、プラスチック単体としてPP(ポリプロピレン)を用い、DDB(ドデシル・ベンゼン)油中に浸漬して、膨潤による厚さの変化を測定したところ、油の高分子中への拡散が主過程であることが分った。それをもとに、図4-3-1に示す膨潤プロセスを考えた。すなわち

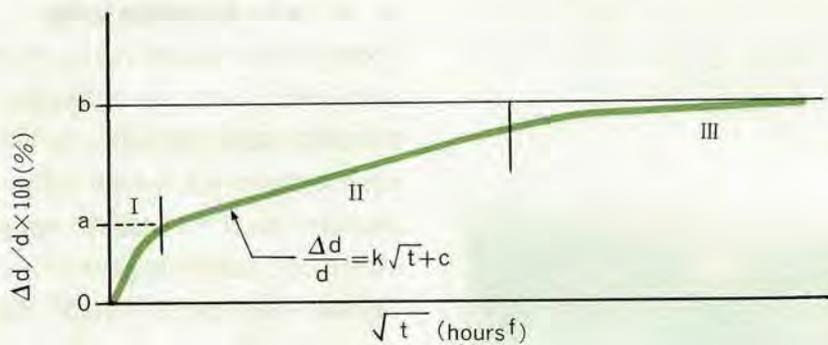
領域 I : 非晶質フィブリル間に液体が吸着する。

領域 II : 結晶質を非晶化し、そのフィブリル間に液体分子が吸着する。

領域 III : その温度で非晶化される結晶質がすべて非晶化され、飽和する。

ラミネート紙(PPLP)を DDB に浸漬した場合、約 1 kg/cm<sup>2</sup> の荷重で 80℃ では厚さ増加率は飽和値 4% である。これはケーブルとして要求される値 5% 以下に入っており、PP を主体とするラミネート紙は膨潤の観点からはケーブル用絶縁体として使用に耐えるものと考えられる。膨潤は超音波で加速することがみつかった。これを用いると、早期に膨潤の飽和値を求めること

図4-3-1 膨潤プロセスのモデル



a : 1 ~ 5 %

b : 膨潤温度に依存する

超音波照射しない場合

約 30% (120℃)

約 7% (100℃)

約 4% (80℃)

~~~~~ : ポリプロピレンのフィブリル

●●● : アルキルベンゼン分子

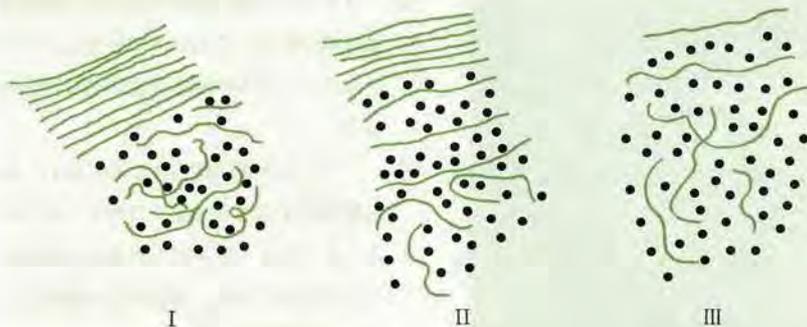
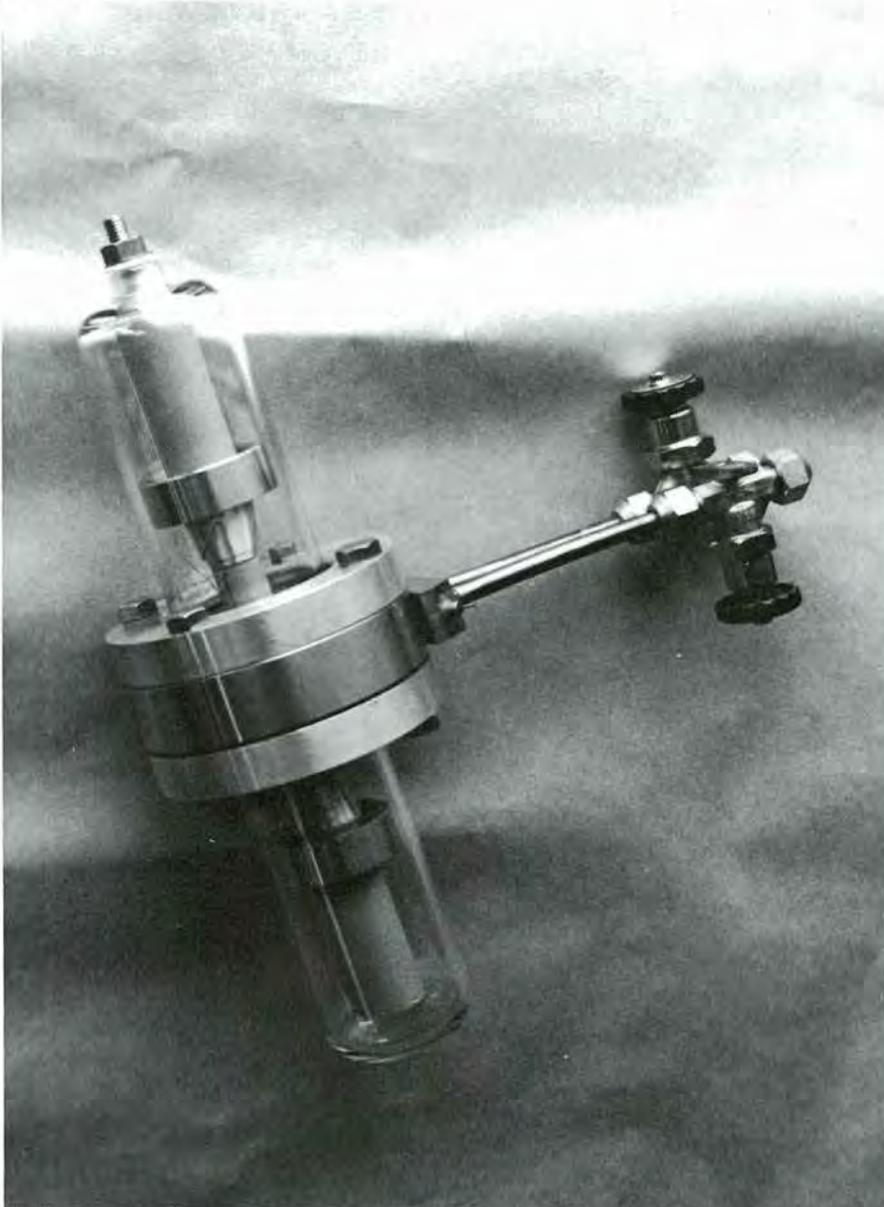


表4-3-1 ラミネート紙の電気特性

| 特性項目                              |         | ラミネート絶縁紙 | P P L P         | P M L           |
|-----------------------------------|---------|----------|-----------------|-----------------|
| 紙 厚 (mm)<br>( 変 動 係 数 )           |         |          | 0.178<br>(1.4%) | 0.200<br>(1.5%) |
| $\epsilon$                        | 常 温     |          | 2.67            | 2.64            |
| tan $\delta$<br>(%)<br>at 20kV/mm | 20°C    |          | 0.066           | 0.155           |
|                                   | 50°C    |          | 0.057           | 0.077           |
|                                   | 80°C    |          | 0.059           | 0.063           |
|                                   | 100°C   |          | 0.071           | 0.071           |
| 交 流 破 壊 強 度<br>(kV/mm)            | D D B 中 |          | 118             | 103             |
|                                   | C D P 中 |          | 188             | 139             |

図4-3-2 ミニモデルケーブル



ができ、短期に材料を評価する時に役立つ。

## II. ラミネート紙の電気性能評価

500kV OF ケーブルに用いられる PPLP および PML について、シート試料を用い、平板電極系で電気的性能を測定した。得られた結果は表4-3-1 に示す通りであり、500kV 級ケーブルとしての目標性能( $\epsilon \cdot \tan \delta$  が0.19%以下、交流電圧破壊強度がクラフト紙(80kV/mm)の1.2倍)を十分満足していることを明らかにした。

次に直径20mmφのステンレス棒にラミネート紙を1mm巻いたミニモデルケーブル(DDB 含浸、図4-3-2)を恒温槽中で長期間加速劣化試験を行った。付加電圧は20kV である。

その結果、以下の事が明らかにされた。

1. ラミネート紙の絶縁劣化に課電はほとんど寄与せず、温度が主たる要因である。
2. ラミネート紙は膨潤するに伴い静電容量は減少する。これは  $\epsilon$  の小さいプラスチックフィルムの厚さ増加が主な要因である。
3. ラミネート紙は熱劣化するに伴い、ある期間をすぎると  $\tan \delta$  は増大しはじめる。これはクラフト紙の熱劣化に起因するものと考えられ、低損失紙の特性として注意が肝要である。
4. ラミネート紙はクラフト紙同様、課電

表4-3-2 長期試験実績

注：(1) 電圧劣化係数  $n=16$  適用 (2) 化学反応速度論  $E=0.98\text{eV}$  適用

| 項目        | 試験 | 評価・加速劣化            | 限界性能〔I〕      | 限界性能〔II〕     | 総実績     |
|-----------|----|--------------------|--------------|--------------|---------|
| 課電電圧      |    | 220kV(1.38E)       | 220kV(1.38E) | 250kV(1.57E) | —       |
| 累積課電時間    |    | 3,800時間            | 4,180時間      | 2,117時間      | —       |
| 電圧等価年数(1) |    | 40年                | 43年          | 167年         | 250年相当  |
| ケーブル導体温度  |    | 常温~95°C<br>ヒートサイクル | 95°C連続       | 105°C連続      | —       |
| 導体温度累積時間  |    | —                  | 3,600時間      | 2,007時間      | —       |
| 温度等価年数(2) |    | —                  | 17.3年        | 21.8年        | 39.1年相当 |
| 熱伸縮       |    | 60回                | 6            | 5            | 60年相当   |

による電気絶縁破壊強度の低下はほとんど認められないが、V-t特性からはnは30程度と考えられる。

5. PPLPではPPのDDBへの溶出は僅少(0.05%)であるが、SIOLAPでは高温(120°C)にするとかなり溶出する。
6. 膨潤に伴い、ラミネート紙の剥離強度は低下するので注意が肝要である。

#### 4-3-3 ラミネート紙 絶縁OFケーブルの性能

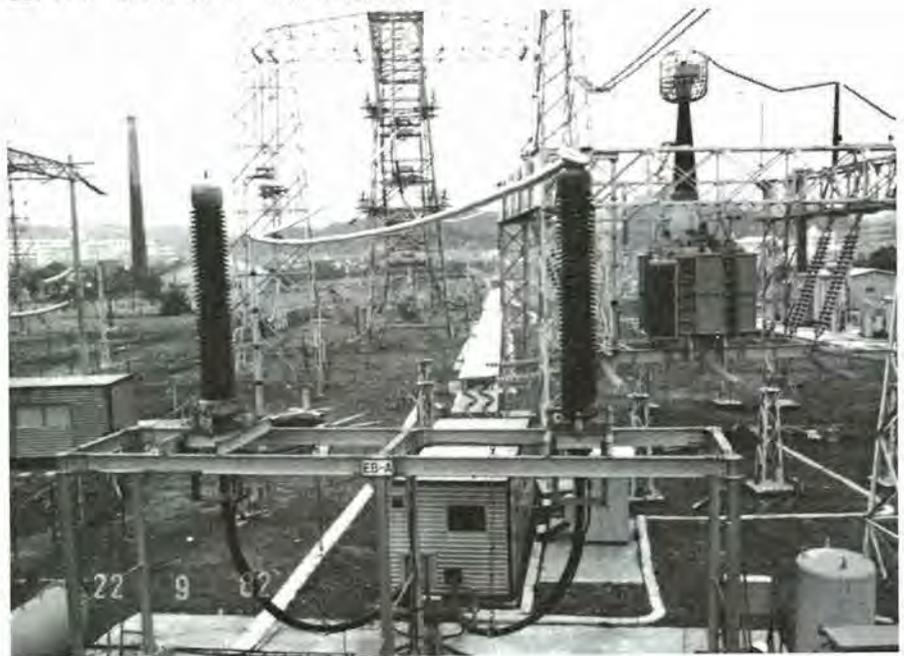
ラミネート紙の膨潤および電気性能は、十分目標性能に入る事が明らかにされたが、ケーブルとして性能も検討しておくことが必要である。そこで、以下の2点を研究対象としている。

##### I. 膨潤に伴うケーブル半径方向 油流抵抗の増大現象

ラミネート紙が膨潤すると厚さが増し、ケーブルでは各絶縁紙間が密着するため、半径方向の油流抵抗が増大し、負荷変動に伴う急激な温度変化の際、絶縁油が補給されず、積層間で負圧になり、絶縁破壊する要因にもなりかねない。

そこで、開発された各種ラミネート紙を用いて製造された、275kV級OFケーブルの油流抵抗の経時変化を実測した。その結

図4-3-3 275kV OF ケーブルの長期試験



果ラミネート紙の膨潤が100時間程度で飽和したように、油流抵抗も飽和することがわかり、その大きさも特に問題とはならないと考えられる。

##### II. 275kV OF ケーブルの長期絶縁性能

当所は関西電力網の依頼により、武山試験研究センターで接続部を含む実規模ケーブルの長期試験を昭和56年から行ってきた(図4-3-3参照)。

試験は表4-3-2に従い

第1ステップ：評価加速劣化

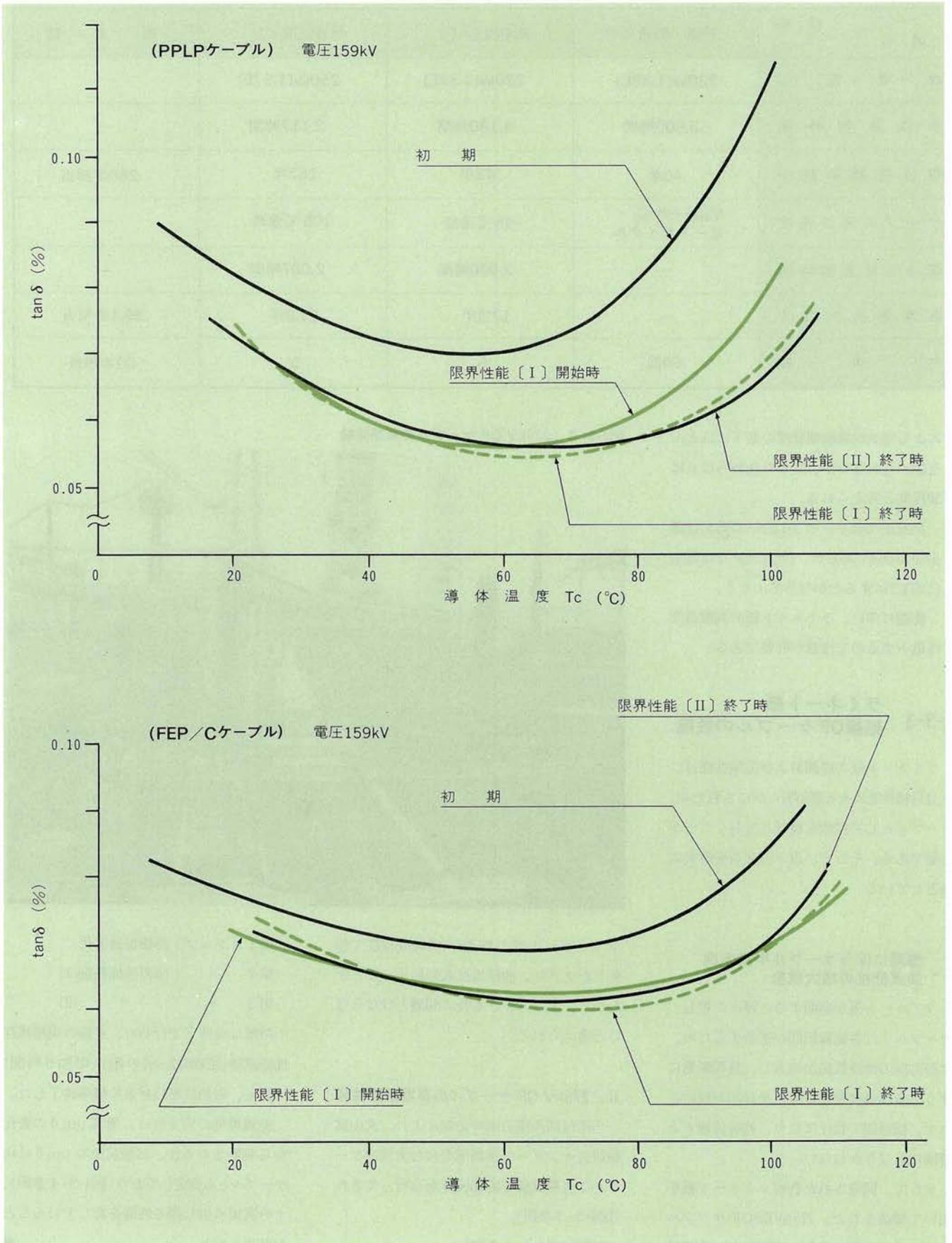
第2 " : 限界性能検証(I)

第3 " : " (II)

の苛酷な条件下で行われ、最後の現地残存性能試験(定格の2.6倍の電圧印加6時間)に耐え、昭和57年11月末に無事終了した。

絶縁性能の安定性は、通常  $\tan \delta$  の変化から判断されるが、試験前後の  $\tan \delta$  は両ケーブルとも安定しており(図4-3-4参照)、十分実用に供し得る性能を有していることが確認された。

図4-3-4 275kV ラミネート紙絶縁 OF ケーブルの  $\tan \delta$  特性 (PPLP ケーブル)



# 4-4 電力ケーブルの送電容量向上

担当●電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室 室長 深川 裕正

## 4-4-1 はじめに

電力ケーブルは、架空送電線と比較して一回線当りの送電容量が小さいばかりでなく、工事費用が著しく高価となるため、その送電容量向上が大きなブレーク・スルーとなる。その方策としては図4-4-1に示す様に種々の方法が考えられるが、当所では、この中から発生熱の低減、熱放散特性の改善について検討を加えた。前者の点からは

1. ラミネート紙の適用に伴う誘電体損の低減
2. 素線絶縁導体による導体損の低減を検討し、後者の点からは、

1. 従来から使用されている川砂に変わる熱放散特性の良い改良土壌の開発
  2. その適切な適用範囲を検討するために、熱放散シミュレータの製作
  3. 最近敷設実績が多くなってきた熱供給導管と電力ケーブルの熱干渉の減少技術の開発
- を行ってきた。

## 4-4-2 電力ケーブル発生熱低減法

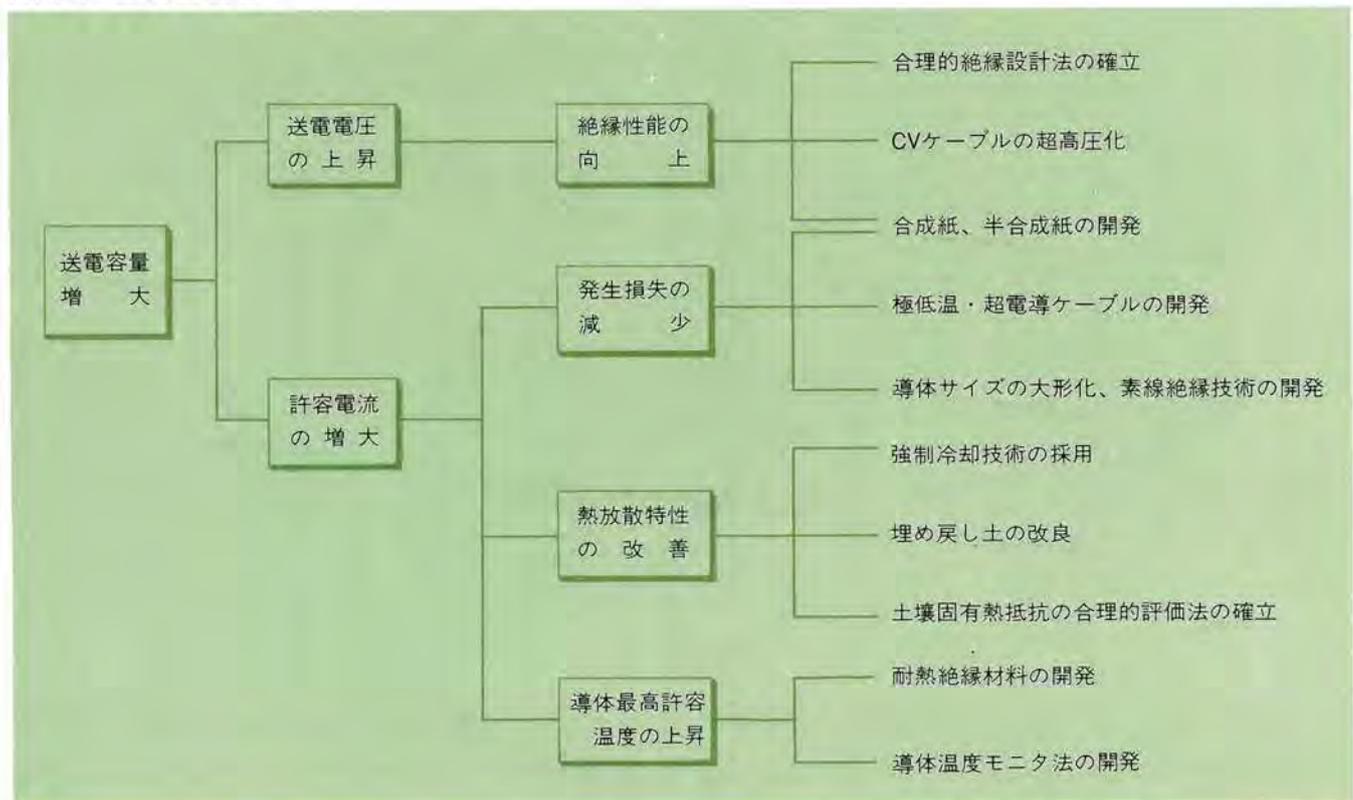
電力ケーブル発生熱を低減するためには、誘電体損の少ないラミネート絶縁紙や交流抵抗の小さい素線絶縁導体を用いることが考えられるがラミネート絶縁紙の適性性に

ついては、既に「4-3」で述べたので、素線絶縁導体に関する研究について記す。

当所は1回線85万kWの275kVケーブルとして、素線絶縁した大導体(3,000mm<sup>2</sup>)高油圧パイプケーブルの交流抵抗低減効果の検討について中部電力㈱から研究依頼を受けた。

そこで、同一断面積を有する素線絶縁導体と普通導体を用いて、交流実効抵抗を実測し、素線絶縁により、交流抵抗は15%程度低減され(図4-4-2参照)送電容量は10%程度増大出来ることを明らかにした。また素線絶縁導体の交流抵抗の計算方法を提案した。

図4-4-1 送電容量増大法



### 4-4-3 熱放散特性の改善

地中ケーブルから発生される熱は周囲土壌を介して地表面から大気へ放散されるので、ケーブル周囲土壌の熱放散特性が送電容量に与える影響は大きい。

従来、ケーブル周囲の埋めもどし土としては施工性の面から川砂が主に用いられている。当所では川砂の熱放散特性、特に地中ケーブルにとって重大な問題となる熱暴走に関連する水分移動現象を明らかにすると共に、熱放散特性の優れた改良土壌の開発を行い、またこれを適用した時の効果をアナログシミュレータを用いて解析した。

#### I. 改良土壌

土の熱放散特性は固有熱抵抗(熱伝導率の逆数)が小さい程、熱放散特性が良好な土となるが、川砂の場合、湿潤時の固有熱抵抗は、それほど小さくはないばかりか乾燥時の固有熱抵抗は $300\sim 400^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ と湿潤時の4~5倍になる。したがって川砂が始めは湿潤していてもケーブルの発熱により水分が移動し乾燥する。これがケーブル温度上昇をもたらし、さらに川砂や周囲土の乾燥化を引き起すような、いわゆる熱暴走を起すことが考えられる。

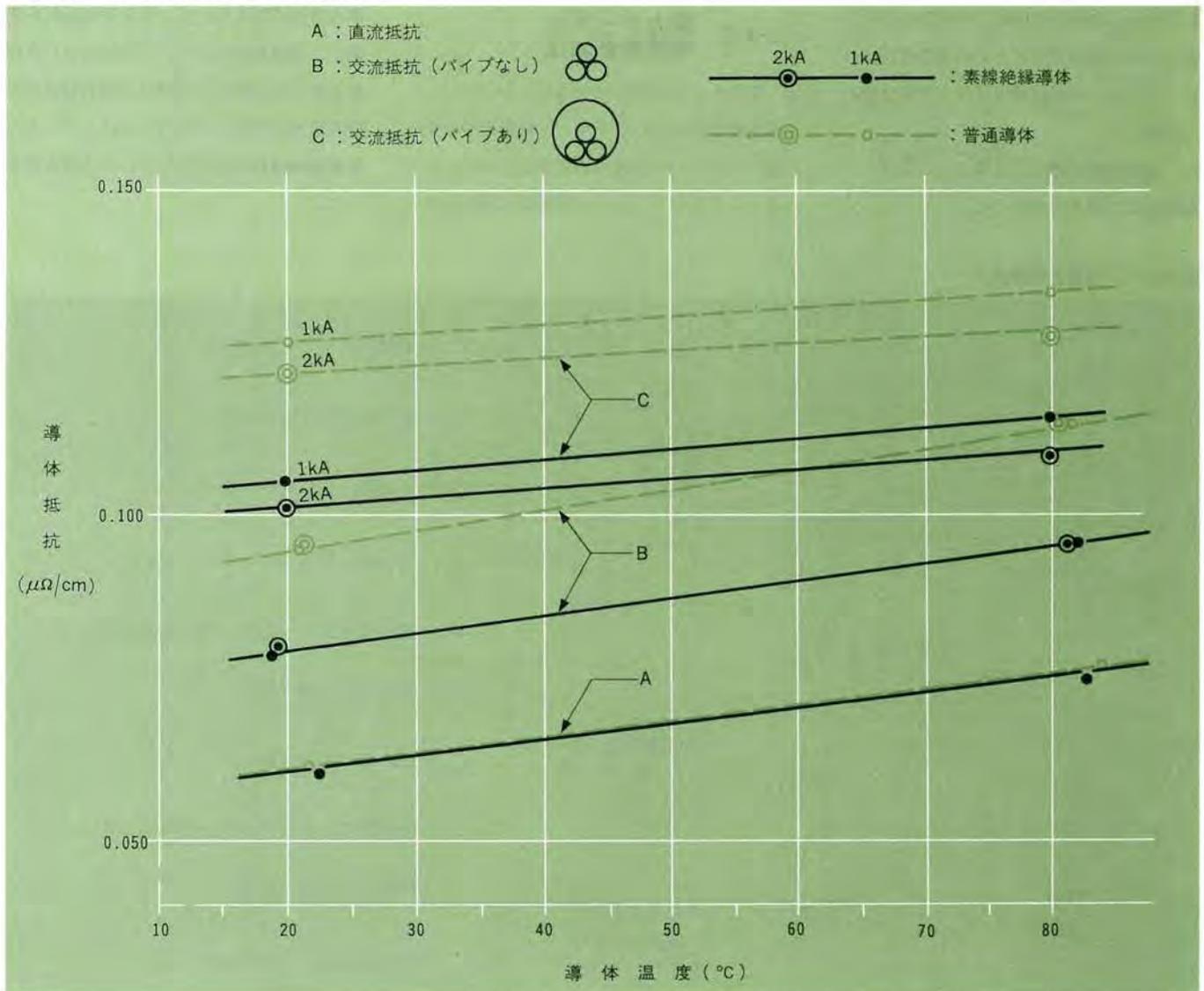
このような川砂の欠点を解消するために乾燥時でも固有熱抵抗の小さい改良土壌の

開発を行った。

川砂などの粉粒体の固有熱抵抗を下げるためには、できるだけ密に充填する必要があるが単一成分のみでは、いくら突固めエネルギーを大きくしても限界があることから、粒径の異なる2~3種の粉粒体を混合し、充填特性を求めた。

最密充填を与える粒度分布は、粉体工学で用いる talbot 指数  $n = 0.5$  になることであることを明らかにした。また粒度配合をした各種の土の間隙比と、固有熱抵抗の関係は、当所が提案した理論式とよく一致しており、間隙比の小さい配合が改良土としてすぐれていることがわかる(図4-4-3 参

図4-4-2 素線絶縁導体の交流抵抗低減効果



照)。

## II. アナログシミュレータの製作

地中ケーブルの温度上昇、特に複雑な温度場の解析のためにアナログ・シミュレータを製作した。

本シミュレータは、熱伝導場を電気抵抗回路網で表わすものであり、簡便に2次元および3次元の熱伝導問題を解くことができる。

2次元問題の1例として、改良土壌の適用による等価土壌熱抵抗を求めたところ、従来、提案されている推定式ではかなり大きく見積ることが分りアナログ・シミュレータの結果によく合う新しい推定式を提案

した(図4-4-4)。

また、3次元問題としては、熱供給導管とケーブルが交叉した場合のヒートパイプによる熱影響防止対策の解析を行い、防止対策の設計法に資した。

## III. 熱放散特性評価法

土壌の熱放散特性の評価上、望ましいことは、次のように言える。

1. 粒度分布がよいこと(talbot 指数で評価)
2. 乾燥密度が大きいこと
3. 保水性がよいこと
4. 粘土分が少ないこと(乾燥時に収縮し

クラックができやすい)

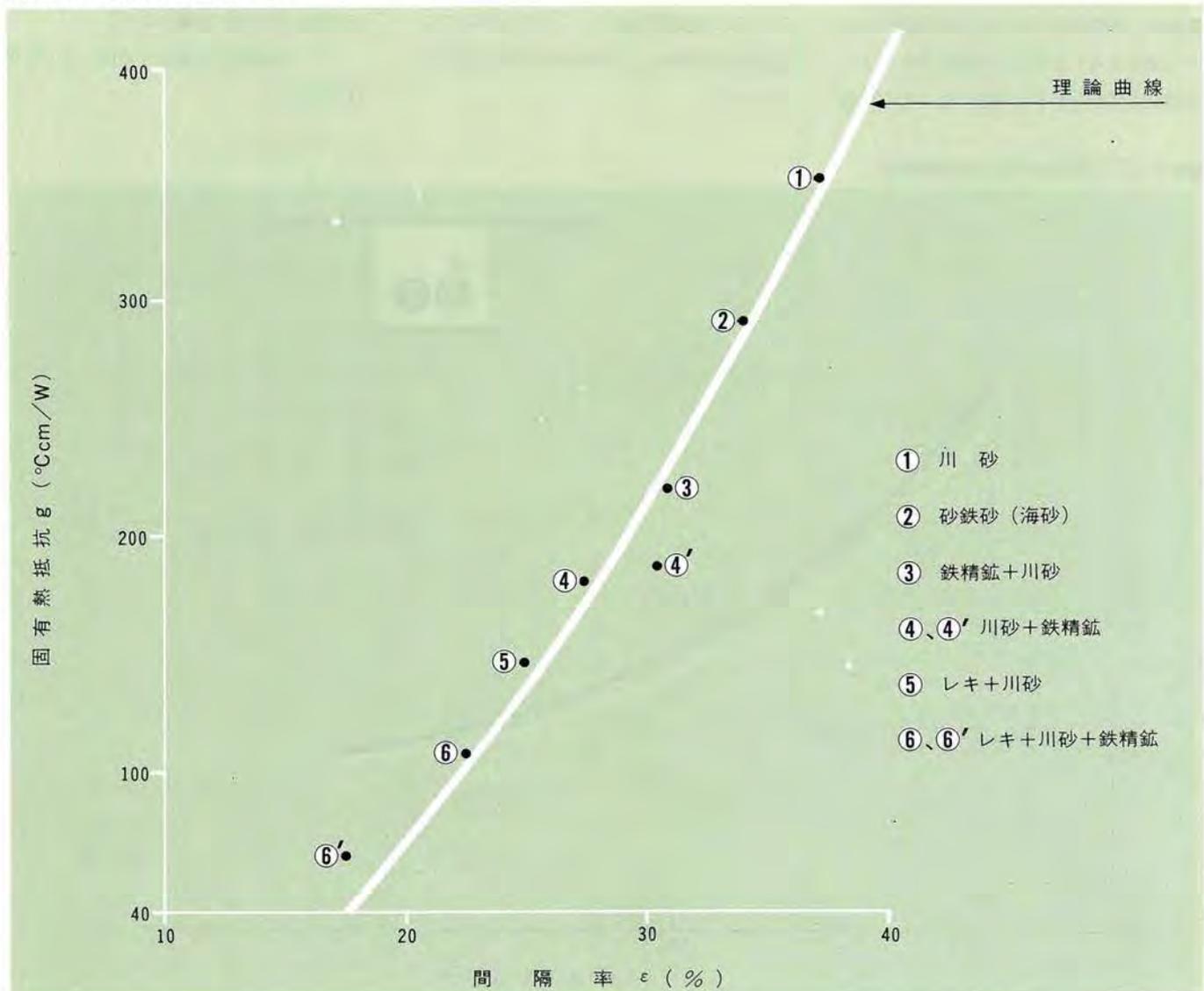
上記のことより土壌の熱放散特性の評価に必要な主な測定項目としては

1. 固有熱抵抗の含水量特性
2. 熱拡散率の含水量特性
3. 密度、含水量、粒度分布などの物理特性があげられる。

## 4-4-4 熱供給導管による熱影響防止方策

都市の地下には、電力ケーブルをはじめ通信ケーブル、ガス管、水道管などが埋設されているが、近年これに地域集中暖房用の熱供給導管(以下、熱水管と略称する)が

図4-4-3 熱抵抗と間隙率の関係



加わり、平行または交叉して接近する場合が多くなって来た。

当所では、熱水管が電力ケーブルに接近した場合の熱影響を検討すると共に、各種の熱影響防止対策を考案した。各防止対策については、実規模モデル実験およびデジタル、アナログ・シミュレーションにより効果および適用法を検討した。

### I. 熱水管による熱影響

熱水管は管内に最高200℃近い高温水を通し各需要先の熱交換器を介して熱を供給するものであり、通常、往復2条の管が平行して埋設される。熱水管による熱影響は管からの漏洩熱によるが、管内の熱水温度が一定とみなせるため、漏洩熱は周囲の温度条件、媒質条件により変り熱影響の大きさも変化する。これは、通常電力ケーブルの温度上昇を計算する場合には、その発生

熱が一定として扱うのと異なっている。

この相違のみ留意すれば、熱影響は従来の電力ケーブルの温度上昇または送電容量の計算法と同一の考え方で求めることができる。一例を示すと、熱水温度200℃の熱水管と電力ケーブルが1.5mの距離に設置されると、電力ケーブルの送電容量は約20%低減しなければならなくなる。

### II. 熱影響防止対策

電力ケーブルと熱水管が平行する場合には、離隔を比較的大きくとすることが容易で、熱影響を小さくすることができる。

しかし両者が交叉する場合、上下に離隔を大きくとることが困難であるため熱影響を防止し、電力ケーブルの送電容量を確保することが必要となる。このことから主に交叉部を対象とし次の各防止対策の検討を行った。

#### 1. 熱遮蔽板による防止対策

熱水管と電力ケーブルの間に断熱性能の優れた熱遮蔽板を挿入し、熱水管からの漏洩熱を抑えるものである。ただし、熱遮蔽板は、ケーブルに対しても熱遮蔽効果があり、ケーブルの発生熱の放散を妨げ、逆にケーブル温度上昇を招くおそれがあるので、適用に当たっての配慮が必要である。

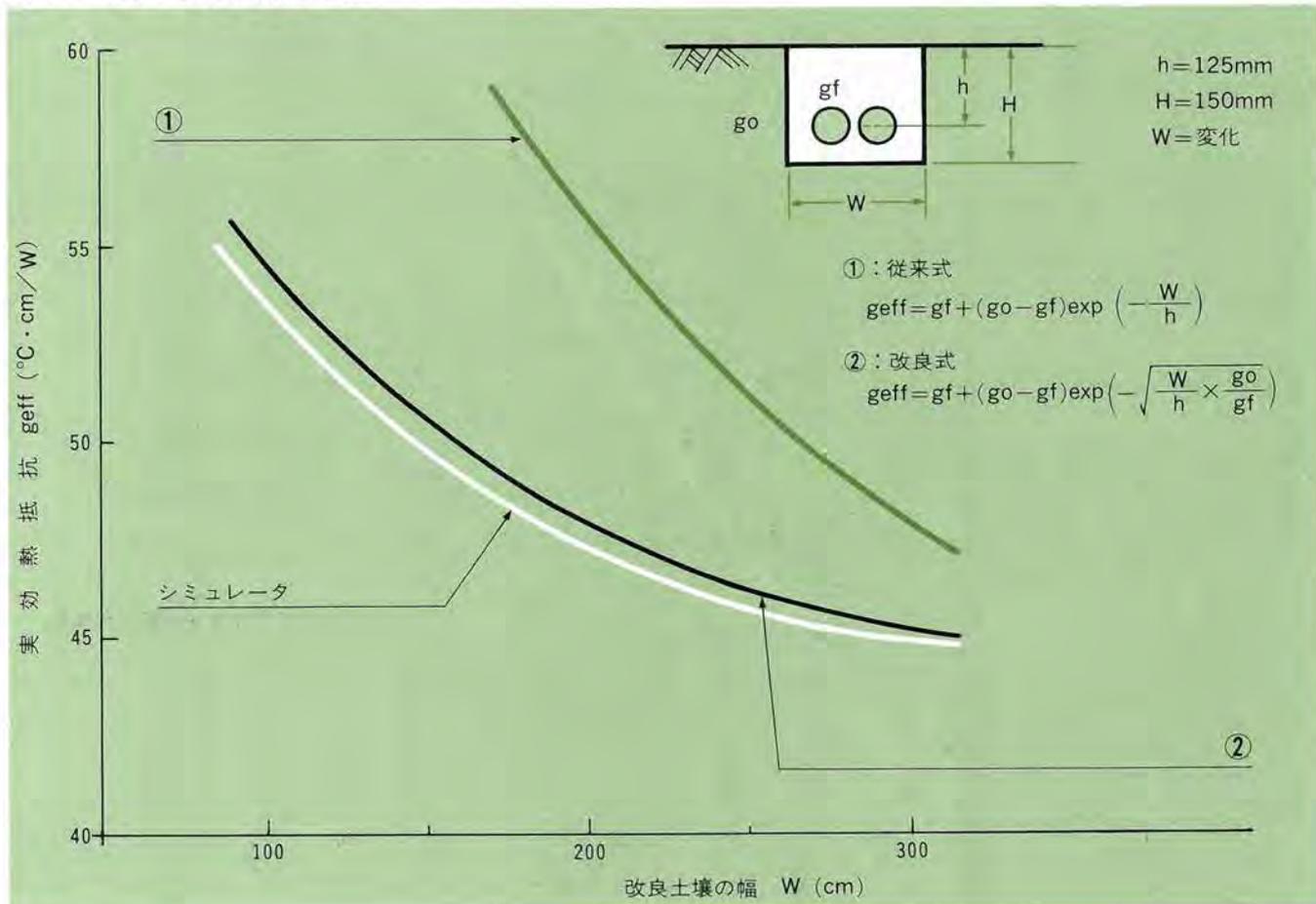
特に、ケーブルが熱水管の下部を通過する場合には、逆効果になることが判明した。

#### 2. 改良土壌による防止対策

改良土壌は前節で述べたように固有熱抵抗の小さい埋めもどし材であり、これを交叉部ケーブル周囲に埋めもどし熱放散を増大し、ケーブルの温度上昇を抑制するものである。適用は管路両側に30~50cm、長さ方向数mとすれば効果がある。

また、熱遮蔽板と組合せて用いると効果は増大する。

図4-4-4 改良土壌寸法と実効熱抵抗



### 3. ハンド・ホールによる防止対策

熱水管と近接する部分のケーブルをハンド・ホール内に収納し、ハンド・ホール内空気の自然対流または強制換気によって熱影響を軽減するものである。比較的小容積のハンド・ホールでも効果はあるが、地下埋設物の輻湊する箇所ではスペースの確保が困難などの難点がある。

### 4. ヒート・パイプによる防止対策

ヒート・パイプは非凝縮性ガスを排気し、蒸発性液体を密閉パイプ内に封入したものであり、パイプ内ガスの潜熱移動の形

で大量の熱を比較的小さいパイプで、温度勾配なく輸送することができる。

近接部のケーブルの温度上昇は数mのヒートパイプをケーブルに沿わせて布設すればよく、送電容量は放熱部の設計によって決定される。熱影響の大きい場合には、放熱部を強制冷却するなどの方策を考へることによって送電容量の確保が期待できる。なおヒートパイプを土中で長期間使用した例がないので、長期性能の安定性や外傷防止、腐食防止、ガスもれなどに配慮が必要である。

図4-4-5に改良土壌+熱遮蔽板、ハンドホールおよびヒートパイプによる防止対策のモデル実験結果の例を示した。いずれも有効な対策であることがわかる。

### III. 防止対策の選定手順

熱影響の各防止対策はそれぞれ得失があるが、熱水管とケーブルの接近状況によっても、適用の適、不適がある。実際の防止対策の選定に当たっては、これらの要因の他、経済性も考慮して決定される(表4-4-1)。

図4-4-5 各種熱影響防止対策の効果(実規模モデル実験結果)

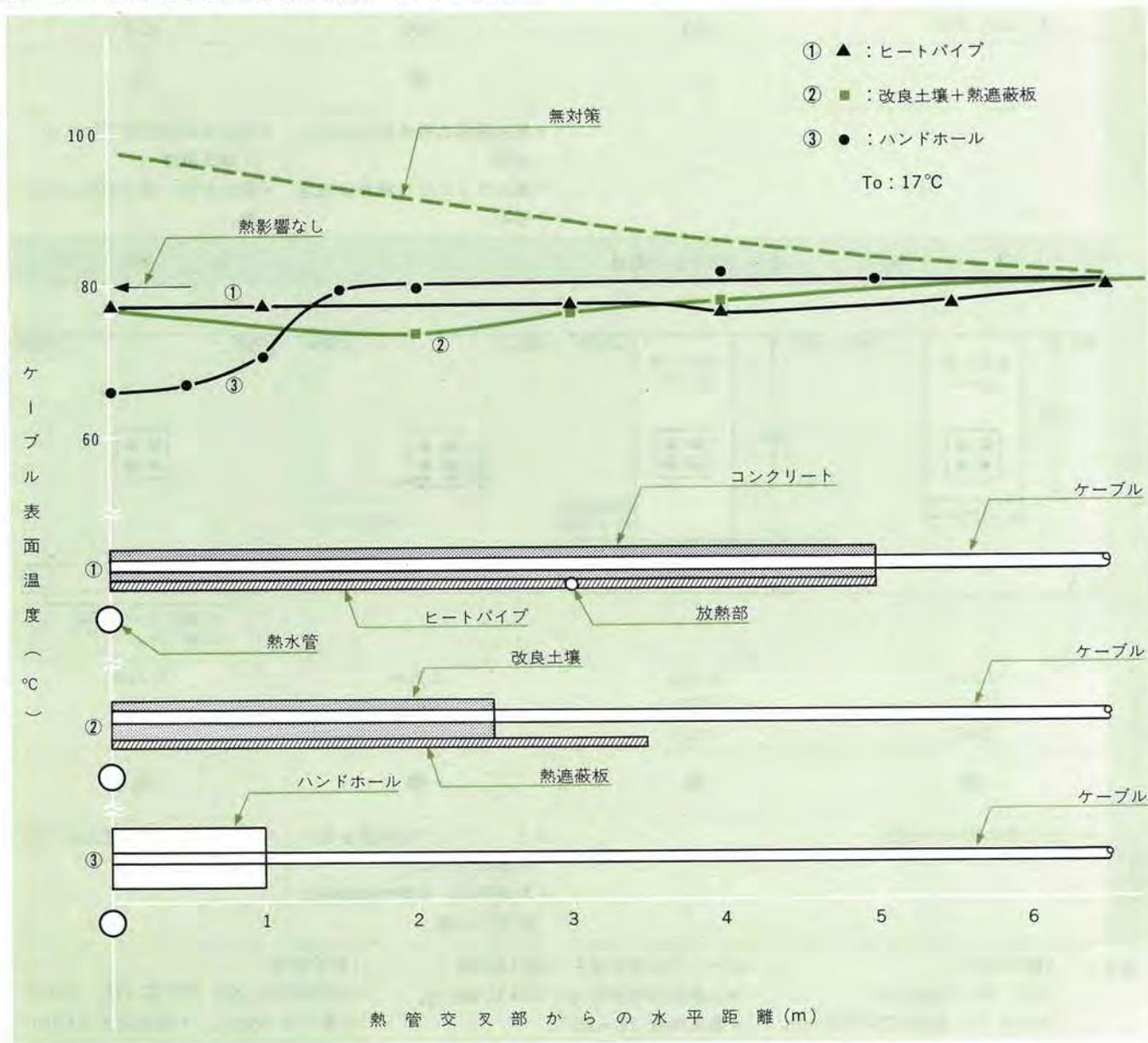


表4-4-1 各種熱しゃへい対策の概要

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 熱影響なし                                                         | 無対策                    | 熱遮蔽板                                                                                               | ハンドホール                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 対策概要                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                               |                        |                                                                                                    |                                                                                              |
| 許容発生熱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | [W/cm·cct]0.304<br>(100%)<br>[A/cct] 390                      | 0.237<br>(78%)<br>345  | 0.258<br>(85%)<br>360                                                                              | 0.341<br>(112%)<br>414                                                                       |
| 施工性                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | —                                                             | —                      | ●                                                                                                  | ▲                                                                                            |
| 問題点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | —                                                             | —                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>●熱遮蔽板の吸水防止対策が必要</li> <li>●電力が下になる場合は適用不可</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>●埋設物輻湊箇所ではスペース確保困難</li> <li>●電力が浅い場合道路占用上難</li> </ul> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 改良土壌                                                          | 改良土壌+熱遮蔽板              | ヒートパイプ                                                                                             | 三重管                                                                                          |
| 対策概要                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                               |                        |                                                                                                    |                                                                                              |
| 許容発生熱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.315<br>(104%)<br>398                                        | 0.341<br>(112%)<br>414 | 0.304<br>(100%)<br>390                                                                             | 0.255<br>(84%)<br>358                                                                        |
| 施工性                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ●                                                             | ●                      | ●                                                                                                  | ●                                                                                            |
| 問題点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>●十分な締め固めが必要</li> </ul> |                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>●ヒートパイプ放熱部を高い位置にすること</li> <li>●外傷防止、長期性能維持に配慮が必要</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>●外傷防止、吸水防止等に配慮が必要</li> </ul>                          |
| <p>備考：（電力条件）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●管路 15cmφ×4</li> <li>●ケーブル 66kV CVT.400mm<sup>2</sup></li> </ul> <p>（熱管条件）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●ケーブル埋設深さ 138,166cm</li> <li>●土壌固有熱抵抗 g=100°C·cm/W</li> <li>●基底温度 To=25°C</li> <li>●管内温水（往）125°C（復）100°C</li> <li>●管外径 35cmφ ●埋設深さ 310cm</li> </ul> |                                                               |                        |                                                                                                    |                                                                                              |

# 4-5 SF<sub>6</sub>ガス絶縁

担当●電力技術研究所 系統絶縁部 次長 宅間 董

## 4-5-1 はじめに

SF<sub>6</sub>(六フッ化いおう)ガス絶縁は、わが国では地中送電の一種である管路気中送電よりも、ガス絶縁小型変電所あるいは開閉装置(GIS)として急速に進展し、現在も発展の一途をたどっている。

当初では、SF<sub>6</sub>ガス、スペーサ(支持用固体絶縁物)、混合ガスの絶縁特性に関して、多くの検討を行ってきたが、ここでは最近の二、三の検討結果を述べる。

## 4-5-2 新ガス、混合ガスの絶縁特性

現在ガス絶縁の絶縁媒体には、常にSF<sub>6</sub>(六フッ化いおう)ガスが用いられているが、より優れた絶縁性能を有するような新しいガスや混合ガスが、国内外で盛んに研究されている。

当所では、これらの研究の現状と見込みを調査してとりまとめたが、結論は次のとおりである。

単独ガスの場合、同じガス圧で比較すると、SF<sub>6</sub>より絶縁耐力(放電電圧)が何倍も高いガスは多数あるが、ほとんどは液化温度(沸点)が高いので、使用温度の低いところではSF<sub>6</sub>ガスに劣る。さらに安定性、有毒性、放電によって生成される分解生成物、価格など絶縁以外の特性を考慮すると、SF<sub>6</sub>ガスが非常に優秀なため、単独ガスで代って使われるものは、当分無さそうである。

一方、混合ガスは

1. 絶縁耐力が混合の比率(分圧比)に対して比例以上に高くなる

2. 液化温度が単独ガスより低くなる
3. 安価なガスを混合すると経済的であるといった利点があり、利用される可能性がある。混合したときの絶縁耐力は、当所の提案した次の式によって予測することができる。

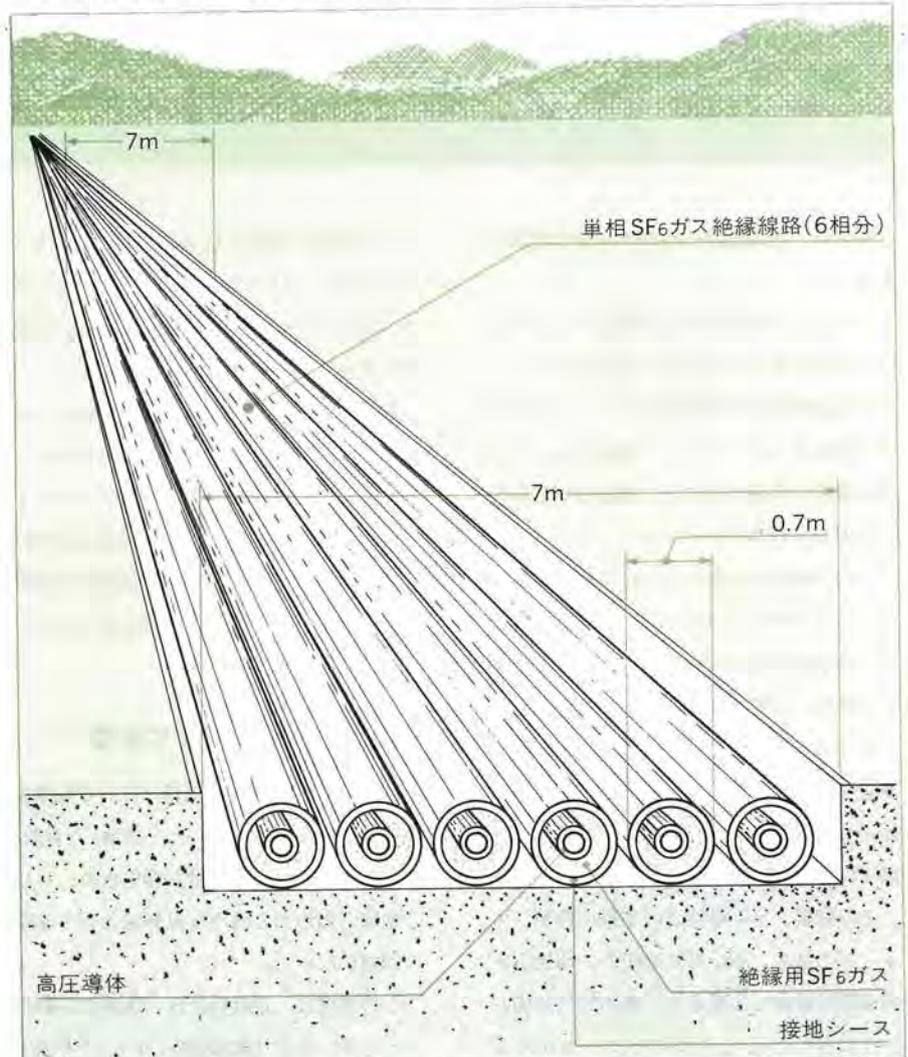
$$V_m = V_2 + \frac{k}{k+C(1-k)}(V_1 - V_2)$$

ここでV<sub>m</sub>は混合ガスの放電電圧、V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>

は混合するガス単独の放電電圧、kはガスの混合比(分圧比)、Cは混合ガスの組み合せに依存する定数である。

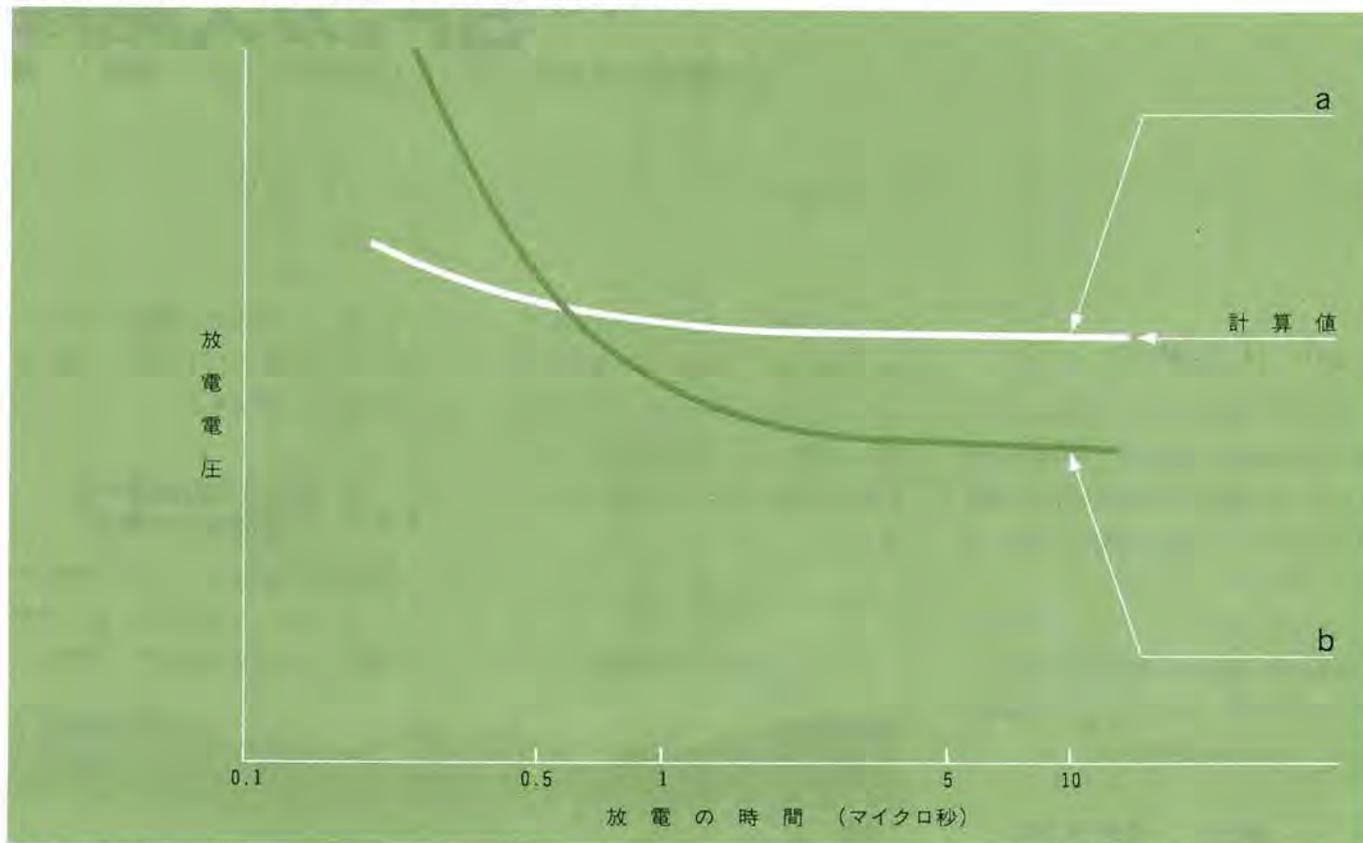
## 4-5-3 SF<sub>6</sub>ガスの放電電圧と放電時間の特性

SF<sub>6</sub>ガスに短時間のインパルスが印加されたとき、ギャップが放電する電圧と時間の関係は、V-t特性(放電電圧-時間特性)



SF<sub>6</sub>ガス絶縁送電線路の概念図(500kV 2回線)

図4-5-1 SF<sub>6</sub>ガス V-t 特性の2つのパターン(ばらつきの下側包絡線)



と呼ばれ、絶縁協調の点から重要な問題である。

このような短時間の(急峻な)インパルスは、変電所近くの送電線に落雷したとき、ガス絶縁断路器が開閉動作を行ったときなどに発生するが、これらの電圧から、ガス絶縁機器を保護するには、機器のV-t特性を把握しなければいけない。

また、機器を保護するためにSF<sub>6</sub>ガスのギャップが用いられることがあるが、十分な保護能力があるかどうかは、やはりV-t特性から判断される。

以上の点から、当所ではSF<sub>6</sub>ガスの基本的なギャップについて、特にこれまで実測データほとんど無かった1マイクロ秒以下の短時間領域の特性を調べた。

その結果、V-t特性は、電極の種類、ギャップの長さ、SF<sub>6</sub>ガスの圧力、印加電圧の極性に依存して変るが、基本的には図4-5-1に示したa、b二つのパターンになることが明らかになった。

ガス絶縁に使用される3~4気圧のガス圧力では、aのパターンは正極性インパルス、bのパターンは負極性インパルスの特性である。

従来、ガス絶縁機器の絶縁設計には、時間が長いとき、放電電圧の低いbのパターンが使用されている。ところが、1マイクロ秒以下の時間領域では、正極性と負極性の放電電圧が逆転し、むしろ正極性の特性を考える必要のあることが明らかになった。

#### 4-5-4 局所放電の絶縁に及ぼす影響

最近、ガス絶縁開閉装置(GIS)で断路器が動作したときに、シース(接地した容器)に放電するという地絡事故が報告され、GISの絶縁信頼の面と適当な試験法という面から問題になった。

この現象は、定性的には、断路器が動作したとき、大きな異常電圧(サージ)を発生することと、断路器の動作が完了するまで

に交流の各サイクルでくり返される、接点間の放電がシースへ移行し易いことで説明される。しかし、発生する異常電圧は回路計算によって解析することができるが、後者については、そのメカニズム、対地絶縁特性低下の場合、ともよく分っていない。

当所では、模擬ギャップを用いて、局所放電が接地された電極へ伸び出す条件と、その機構の検討を行った。

その結果、接地電極に至るのは、SF<sub>6</sub>ガス中の放電が雷放電と同じように自分の電界の力で伸びるためであり、そのため、絶縁距離を長くすることや、SF<sub>6</sub>ガスの圧力を高くすることは、有効な対策でないことを明らかにしている。

また、このような、自分で進展する放電が、発生するメカニズムについて、従来、局所放電針金説とストリーマ逃走説、の二つがあったが、ストリーマ(前駆的な微小放電路)を伴った局所放電の電界上昇が、発生原因であることを提唱している。 ●

第 5 章

5

配電系統

## 第5章 配電系統 ● 目 次

執筆者紹介●( )内は担当箇所、順不同

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 5-1 要 旨                      | 75 |
| 5-2 絶縁設計と保護保安対策              | 76 |
| 5-2-1 はじめに                   |    |
| 5-2-2 配電線耐雷絶縁設計              |    |
| 5-2-3 絶縁電線の断線事故と検出保護方式       |    |
| 5-2-4 400V級配電方式の保護保安         |    |
| 5-3 配電自動化                    | 80 |
| 5-3-1 はじめに                   |    |
| 5-3-2 信号方式と適用システム            |    |
| 5-3-3 総合自動化システムの構想           |    |
| 5-4 配電計画管理                   | 83 |
| 5-4-1 はじめに                   |    |
| 5-4-2 高圧配電線の設備管理・設備形成機械化システム |    |
| 5-5 実証試験                     | 85 |
| 5-5-1 はじめに                   |    |
| 5-5-2 各種実証試験の概要と結果           |    |

|       |         |                                                              |
|-------|---------|--------------------------------------------------------------|
| 久場 英治 | 電力技術研究所 | 送配電部 次長(5-1)                                                 |
| 三谷 弘  | 電力技術研究所 | 系統絶縁部 系統絶縁研究室 室長(5-2編集担当、5-2-1~2)                            |
| 福留 渥  | 電力技術研究所 | 送配電部 配電研究室 室長<br>(5-2-1、5-2-3~4、5-3編集担当、5-3-1~2、5-4全部、5-5全部) |
| 有賀 保夫 | 電力技術研究所 | 送配電部 配電研究室(5-3-3)                                            |

## 5-1 要

## 旨

電力技術研究所 送配電部 次長 久場 英治

電力流通設備の末端に位置し、需要家に直結する配電系統は、設備の規模こそ小さいが、擁する数は莫大である。

これら配電設備は、面的に広がった需要負荷に供給するため、種々の供給地域の環境条件を考慮した設計が行われ、高信頼度供給のための数々の技術開発が必要である。

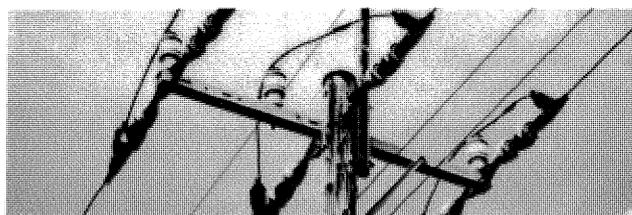
わが国の配電々圧は、高圧系統が6.6kV、低圧系統が100/200Vを主体としていたが、電力需要の増大に伴い、郡部地域の一部長距離配電線の電圧降下改善対策、過密化都市地域の供給容量増大対策の抜本的打開策として20kV級配電々圧が導入されるようになり、また、家電機器の大型化や需要家消費電力の増大、さらには20kV級配電の導入による電圧系列の簡素化などの理由により、低圧電圧の400V級昇圧に関心が高まっている。

これら新しい電圧への昇圧に関しては、配電としての特有な性格を踏えた絶縁設計、保護方式、高調波対策、あるいは新器材開発などの諸課題を解決しなければならない。

一方、配電系統の信頼度向上のためには事故防止技術の開発が必要である。特に、雷害事故低減対策、あるいは絶縁電線断線防止対策は重要な課題である。

当所では、これらの諸問題を解決するため、理論的解析はもとより実験用配電線を昭和44年9月に建設し実規模大の諸実験ができるようにした(赤城試験センター)。

これは、22kVと33kV、低圧側420Vの配電線として、総計約20kmに及ぶ架空と地中の配電線路、並びに10個所の需要家設備(負荷)、さらに受電変電所、配電用変圧器、高電圧実験設備、低圧保安実験設備等により構成されており、その特徴は、



1. 任意に配電系統を構成できる
2. 新規設備などの実用性を実証する試験ができる点を大きな特徴とするものである。

これまで、22kV並びに33kV昇圧に伴う技術として、この設備を主体として研究を進め数多くの成果が得られ、配電近代化に大いに貢献してきたが、その概要を以下に述べる。

絶縁設計については、誘導雷に対する架空地線の効果に検討を加え、合理的な絶縁設計手法の確立に寄与した。

さらに、絶縁電線の断線事故については、アーク溶断機構を解明し、耐アーク性能の向上の指針を与え、断線検出方式についても、負荷側並びに電源端検出について性能を検討した。

400V級保護保安方式については、実運用状態を想定した実証研究を進め、現用漏電しゃ断器の信頼性を明らかにし、対地200V級負荷機器、ならびに屋内配線の地絡・短絡事故時様相を解明し、その保護対策について検討を行った。

配電自動化については、音声周波電圧信号方式として、負荷集中制御規模拡大に対処し得る効率的経済的な、リップルコントロール方式による特高系統への注入方式が実用的に有利となることを明らかにし、進相コンデンサを利用した実用的方式を提案した。

さらに、音声周波電流信号方式として、線路開閉装置の状態監視、あるいは配電線の端末情報(電圧、電流など)を収集するための方式の開発を進めた。

配電計画・管理については、業務の能率向上と設備運用の効率化をはかるため、業務の機械化が強く要請されており、配電線の構成が複雑なため、シミュレーション解析が困難とされている高圧配電系統を主体として、設備形成・管理の機械化手法について検討を進め、電算機システムを開発してきた。

今後も引き続き、配電系統における信頼性と輸送効率の向上をめざして研究活動を進めていきたい。

# 5-2 絶縁設計と保護保安対策

担当●電力技術研究所 系統絶縁部 系統絶縁研究室 室長 三谷 弘

## 5-2-1 はじめに

配電系統は需要家に直結しているため、その信頼性はサービス条件に大きな影響を与える。よって事故発生を可能な限り防止するとともに、万一の事故に対しては、的確に検出・断して、機器の保護と公共保安の確保をはかる必要がある。

配電線の絶縁レベルは、送電線に比べて低い。そのため耐雷対策では直撃雷よりもむしろ、誘導雷サージを主対象としている。そのため当所では下記の研究を行った。

1. 架空地線による誘導雷サージの抑制の理論化
  2. 抑制効果の実証
- 絶縁電線は、地絡・短絡事故の減少や公

衆保安の確保に大きな効果をあげているが、雷サージによるアーク溶断や応力腐食等による断線事故の発生が懸念されるので、適切な対応策を確立することが必要である。

このため当所では、絶縁電線のアーク溶断特性と溶断機構の解明、耐アーク性能向上対策の提案等を行うとともに、「配電線近代化研究会」を組織して、断線事故防止と検出方式について全国大での検討を行った。その後は、より確実に低コストの断線事故検出方式を確立するための研究を行っている。

400V級配電方式は民生用電力需要の増大、負荷機器の大容量化に伴って、省資源省エネルギーの観点から社会的経済的に大きなメリットがあるが、これを一般家庭に

まで普及させるためには、保護保安対策について十分なる検討を行い、万全を期す必要がある。

そこで、当所では、現用漏電遮断器の信頼性を検証し、対地200V級負荷機器ならびに屋内配線器具の地絡・短絡事故時様相を解明し、その保護対策について検討を行った。

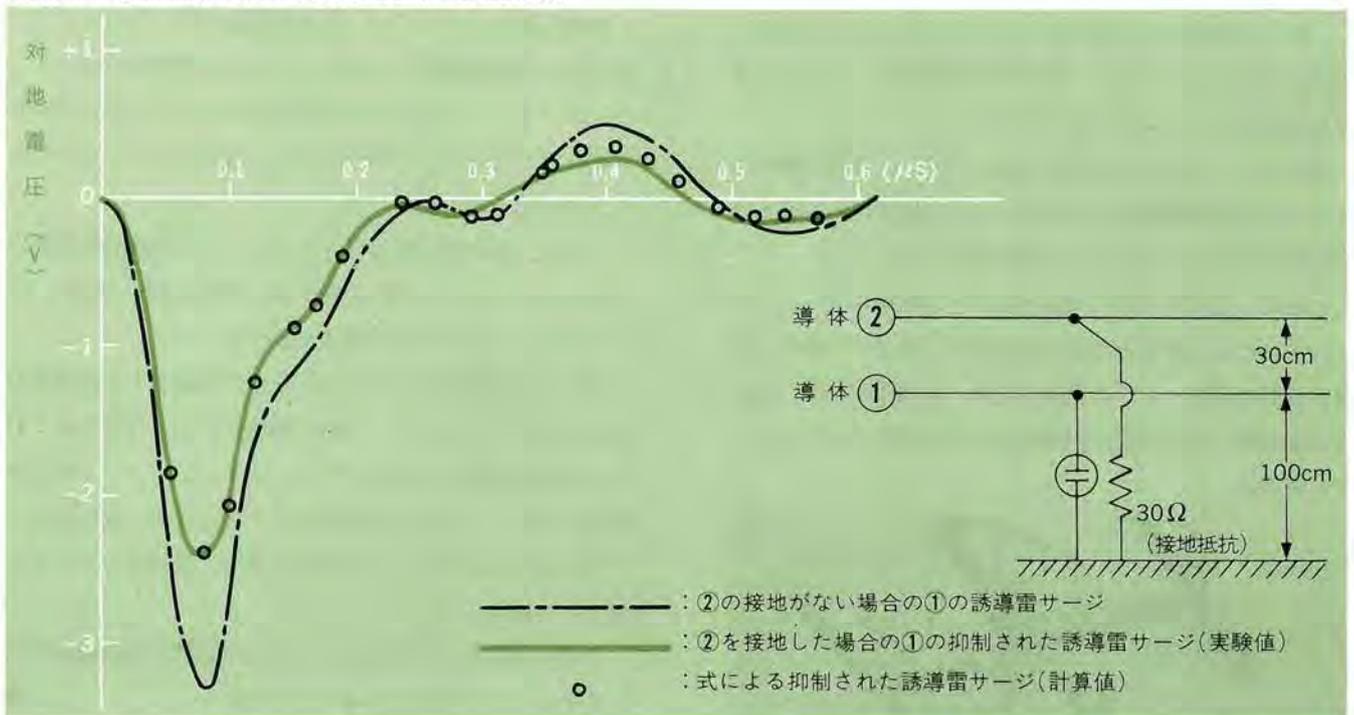
## 5-2-2 配電線耐雷絶縁設計

### I. 架空地線の誘導雷サージ抑制効果の検討

近年、配電線の耐雷性向上の一の方策として、強雷地域では、架空地線の架設が普及してきた。

当所では、架空地線の保護効果に関する

図5-2-1 架空地線が1条の場合の誘導雷サージの抑制例



効果的な設計指針を確立するため、実験的な検討を行って、理論式を導出するとともに、自然雷により保護効果の実証検討を行った。

1. 架空地線の効果に対する理論式の導出  
誘導雷サージに対する架空地線の効果は、架空地線に流れる電流により相導体の誘導電圧を電磁的に低減することであるが、次の2つの場合について、誘導電圧の理論式

を導いた。

(i) 架空地線が1条で1点のみで接地された場合

図5-2-1はこの結果を示したものである。

(ii) 架空地線が2条以上存在し、また接地地点が多数ある場合

## II. 自然雷による実証検討

配電線の誘導雷対策を考える場合の雷撃の位置や誘導電流波形サージ進展方向など

の同時観測が必要であるが、これまで皆無に近かった。

当所では、55年度冬季から北陸電力福井火力発電所構内の高煙突(200m)への雷撃を対象に雷撃電流波形と配電線の誘導雷サージの同時観測を行い、現在までに、約20例の観測に成功している。

### 1. 観測設備の概要

観測用配電線路は発電所構内の海岸寄りに巨長820m、各柱間50mで地上高10mの模擬配電線を設置した。

装柱例は図5-2-2のように導体1と導体2との水平方向の両端距離は2.4m、架空地線としての導体3は導体1の真上に0.5m離れた位置にある。線路の両端は整合抵抗を挿入して無限長相当の線路を模擬した。

### 2. 自然雷による誘導雷サージ波形

高煙突への雷撃電流波形と対応した誘導雷サージの波形は5例得られた。その特徴は次の3つのパターンに分けられる。

- (i) 負極性雷撃電流に対して正極性の誘導雷サージ電圧
- (ii) 正極性の電撃電流に対して、負極性の誘導雷サージ電圧
- (iii) 正極性の雷撃電流に対して正極性の誘導雷サージ電圧

(i)は夏季雷に多くみられるもので雷雲の下層の電荷が⊖極性であるのに対し、大地は⊕極性に帯電するから、大地から雷雲へ向ってリターンストロークが伸び、雲中の負電荷を中和させるものと考えられる。

(ii)は冬季雷に多くみられるもので、雷雲中から正極性ストリーマが地上へ向って進展し、リターンストロークが大地から雷雲へ伸びて、雲中の正電荷を中和する。

(iii)は雷雲中の正電荷が大地へリターンストロークとして伸びてくるものと考えられる。

架空地線が、誘導雷サージをどの程度抑制するかを、配電線路1ルートで検討する

図5-2-2 引き通し柱の装柱(2号柱、4号柱~16号柱)

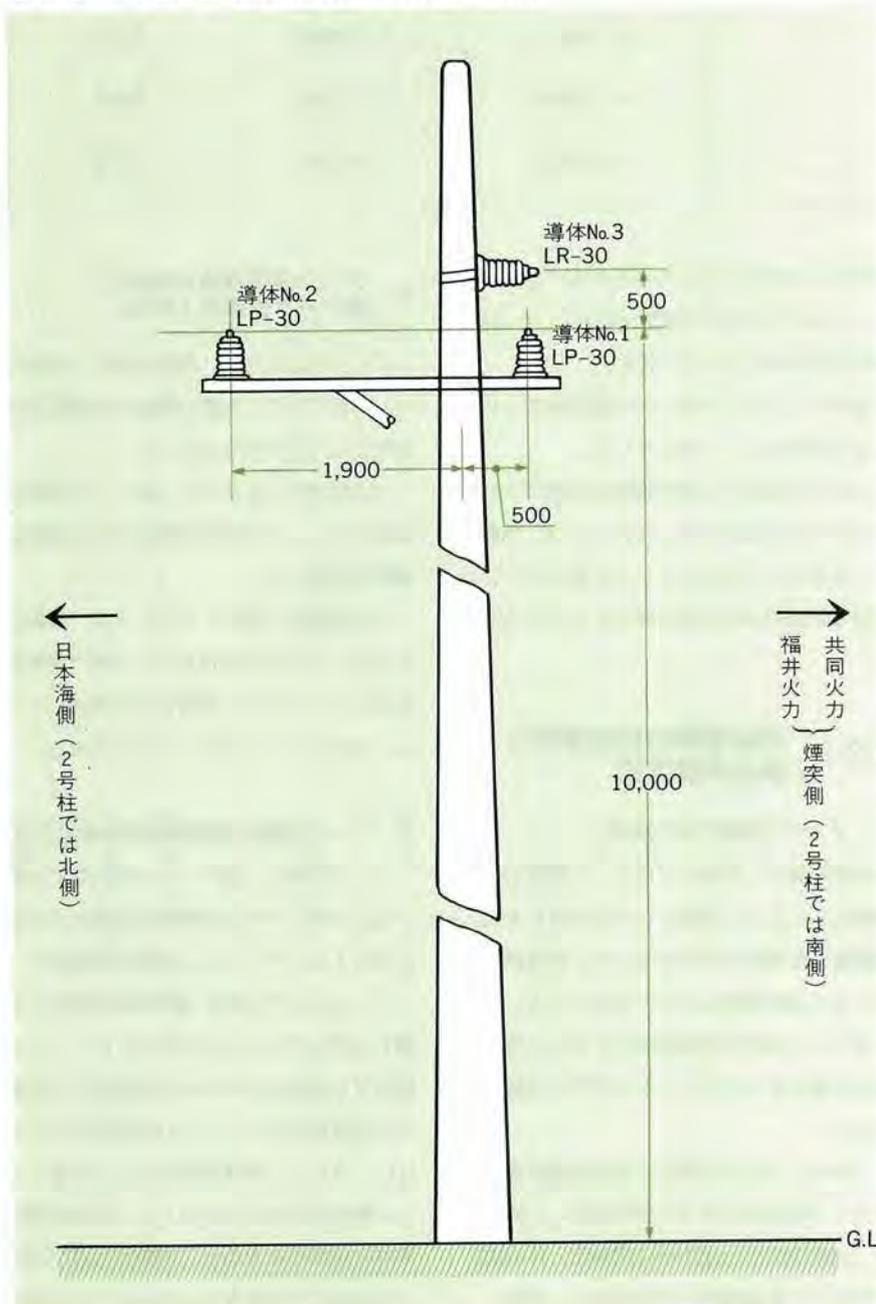


表5-2-1 自然雷による架空地線のしゃへい効果の比較

注：①～⑤ 架空地線の接地がない場合

| 実測波形番号 | 測定月日             | 導体 No.1の誘導電圧波高値 (V <sub>1</sub> ) | 導体 No.2の誘導電圧波高値 (V <sub>2</sub> ) | $\frac{V_1}{V_2} \times 100\%$ |
|--------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| ①      | 1980年12月29日11:39 | + 5.0kV                           | + 5.0kV                           | 100.0                          |
| ②      | // 29日15:05      | + 9.0kV                           | + 8.0kV                           | 112.5                          |
| ③      | 12月30日～1月2日      | +14.1kV                           | +14.4kV                           | 97.9                           |
| ④      | 1981年1月2日16:58   | + 8.5kV                           | + 8.1kV                           | 104.9                          |
| ⑤      | // 1月3日 4:22     | +21.3kV                           | +23.2kV                           | 91.8                           |

注：⑥～⑧ 架空地線の接地がある場合

|   |                |         |         |      |
|---|----------------|---------|---------|------|
| ⑥ | 1981年2月11日1:53 | + 8.8kV | +10.8kV | 81.5 |
| ⑦ | // 2月11日1:55   | + 5.9kV | + 7.0kV | 84.3 |
| ⑧ | // 2月27日7:48   | +11.0kV | +14.2kV | 77.5 |

場合には、相導体を2条はり、1条は架空地線に近づけ、1条は架空地線から離して設置し両者に発生する誘導雷サージ電圧の差を比較すればよい。

表5-2-1は、導体No.1と導体No.2の誘導電圧波高値を、同時測定したものについてまとめたものである。

①～⑤までは、架空地線の接地がない場合で両者の比が92%～113%の範囲であるので両者ともほぼ同程度の誘導電圧波高値になっている。

架空地線があると、表5-2-1⑥～⑧に示すように両者の比は78%～84%で、明らかに架空地線の効果が現われている。

これまでの実験をもとに架空地線による誘導雷サージのしゃへい効果を表わすしゃへい係数の式を導き、その式を使って、模擬配電線路の導体No.1とNo.2のしゃへい係数を求めるとそれぞれ0.59、0.77となる。

すなわち、導体No.1では、架空地線の存在しない場合の59%、導体No.2は、77%に誘導電圧が抑制されることを示している。

高煙突からの離隔距離は200mであるのに対し、導体No.1とNo.2の離隔距離は2.4mと小さいので、架空地線がない場合の誘導

電圧は、ほぼ等しいと考えられるので導体No.1とNo.2に発生する電圧の比はしゃへい係数の比に等しく0.77となる。

表5-2-1で示した⑥～⑧の観測結果と比べると非常によく一致している。

これらの結果から架空地線の効果がこの方式で検討可能であると考えており、今後は、出来るだけ多くのデータを収集して、有効な保護対策を早期に確立する予定である。

### 5-2-3 絶縁電線の断線事故と検出保護方式

#### 1. アーク溶断特性の解明

絶縁電線は、雷撃などによって被覆が絶縁破壊したとき、電流アークが移動せず絶縁破壊した個所に集中するため、裸電線に比べると溶断時間はかなり短くなる。

そこで、適切な断線事故防止対策と検出方式を確立するために、次の特性を実験で求めた。

1. 線種、サイズの異なる各種絶縁電線のアーク電流の大きさと溶断時間との関係
2. 溶断特性におよぼす各種要因、特に電線張力や素線構成と溶断時間との関係

#### II. アーク溶断機構の解明と耐アーク性能向上対策

これらの結果から、溶断時間は、電線のサイズだけでなく素線の構成や残留応力に依存することを明らかにした。

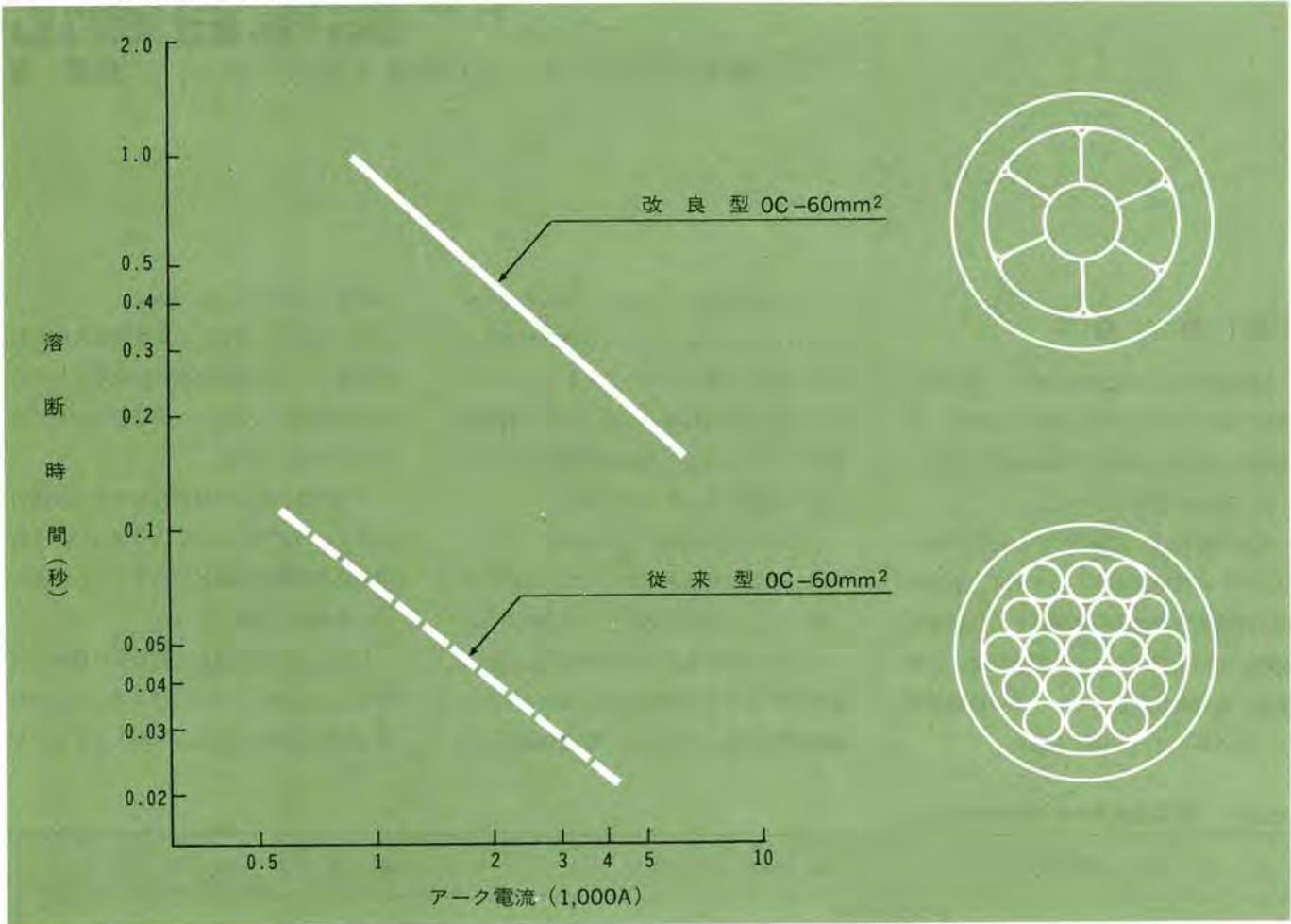
その結果にもとづいて、耐アーク性能が従来のものより10倍程度優れた改良型絶縁電線を開発した。

この電線は、図5-2-3のごとく、素線径を太くして、現用の19本から7本に素線数を減らすとともに、残留応力を除去したスムーズボディタイプとしたものである。

#### III. アーク溶断と電源端断線検出方式

アーク溶断は、雷サージに起因して2線または3線にわたる短絡電流が流れるために発生するものである。現用の過電流リレーで、ほとんどの場合、断線事故の検出と回路しゃ断ができることが判明したが、この場合でも素線切れあるいは電線落下の状態でも再送電成功となり、その後の検出はできない。そこで、現用過電流リレーの整定としゃ断時間の見直しを行って、完全断線状態でしゃ断する方式と、溶断あるいは素線切れ以前に事故除去する方式について検証

図5-2-3 改良型絶縁電線の効果



を行い、目的通り動作することを確認した。

#### IV. 負荷側断線検出方式

応力腐食割れやその他の原因による機械的断線の場合には、変電所側のみで検出することは難しい。そこで、このような断線事故を負荷側で検出する次の2方式を開発した。

##### 1. パルス伝送方式による検出

断線事故時に負荷側に発生する零相電圧を検出し、この電圧により、パルス信号を発生させて変電所に通報する方式

##### 2. コンデンサ投入方式による検出

同様に零相電圧を検出した後、コンデンサを対地間に投入して不平衡状態を拡大させ、変電所設置の現用地絡継電器によりしゃ断する方式

#### V. 各種検出方式の性能検証

電力各社で開発・試作された以下のような検出方式について、その性能を検証し、実用化に向けての改良の指針を出した。

1. リアクトル開閉による検出方式
2. 零相電流変化値による検出方式
3. 各相負荷電流変化値による検出方式

#### 5-2-4 400V級配電方式の保護保安

400V級配電方式の保護保安方式を確立するために、低圧保安実験設備を用い、実運用状態を想定した実証研究を進めている。

これまでに明らかになった主要点は次の通りである。

1. 漏電事故時に人体に流れる電流は電気機器のフレームあるいは外箱の接地により小さくするが、これ単独では「低圧電

路地絡保護指針」に規定されている条件を十分に満足しない。

2. 漏電しゃ断器と外箱の接地を共用する方式は、漏電しゃ断器の感度を適正な値(30mA)に選定すれば前記指針は一応達せられる。
3. 現用の各種漏電しゃ断器は、サージ、機器始動時の過渡電流、電流波形ひずみに対する誤動作の有無など、その信頼性を確めた
4. 対地200V級負荷機器ならびに屋内配線器具の地絡、短絡事故時様相を解明し、その保護対策について検討を行った。

400V級配電に対する保護保安方式は、当然長期の信頼性が要求されるので、今後とも実証を主に研究を続けて行く予定である。

# 5-3 配電自動化

担当●電力技術研究所 送配電部 配電研究室 室長 福留 渥

## 5-3-1 はじめに

配電系統は膨大な設備を擁し、需要家に直接、接して電力を供給することから、設備運用の効率化と供給の高信頼度化に対しては、格段の努力を要する。

配電自動化はこの課題にこたえ得る有力なシステム技術であり、たとえば、温水器等の深夜電力負荷を一括制御する負荷集中制御、線路用開閉器の遠方監視制御、自動検針、設備運用状況のオンライン情報収集システム等がその一例である。

これらの個別システムは、技術的にも共通するところが多いので、最終的にはこれらを統合して機能の向上をはかることにより、系統の最適運用、供給と消費の最適調整を行うことのできる配電総合自動化システムが実現できることになる。

このような自動化システムのキーポイントは、重要な情報をいかにして、正確にかつ低コストで伝送するかという点にある。

このため当所では、我が国の国情に適し、経済的にもすぐれた情報伝送方式として、配電線を信号伝送路とした配電線搬送方式

を選定し、研究を進めてきた。

具体的には、数多くの現場試験と理論解析を通じて、配電線の信号伝送路としての特性を解明し、望ましい信号伝送のあり方を明らかにしてきた。

この結果、多くの自動化システムが電力会社において導入されるようになり、その事前検討や実証試験に協力することによって、実用化に貢献してきた。

たとえば、変電所から需要家に情報伝送を行う、いわゆる下り信号に対しては音声周波電圧信号方式(リップルコントロール

表5-3-1 配電線搬送の代表的信号方式

| 信号方式                                  | 伝送経路 | 適用システム                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 音声周波電圧信号方式<br>(リップルコントロール方式)          |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 負荷集中制御</li> <li>● 線路用開閉器の遠方監視制御<br/>(音声周波電圧信号方式との組み合わせ)</li> <li>● 自動検針、設備運用状況のオンライン情報収集<br/>(音声周波電圧信号方式、低圧線の信号方式との組み合わせ)</li> </ul> |
| 音声周波電流信号方式<br>(電流アンサーバック方式)           |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 線路用開閉器の遠方監視制御<br/>(音声周波電圧信号方式と組み合わせ)</li> <li>● 自動検針、設備運用状況のオンライン情報収集<br/>(音声周波電圧信号方式、低圧線の信号方式との組み合わせ)</li> </ul>                    |
| 低圧配電線の信号方式<br>(音周波信号方式<br>またはパルス信号方式) |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 自動検針、設備運用状況のオンライン情報収集<br/>(音声周波電圧信号方式、音声周波電流信号方式との組み合わせ)</li> </ul>                                                                  |

方式)を確立し、これによる負荷集中制御システムは、既に受信器4万台の実績を有するまでに到っている。

一方、需要家側から変電所に情報伝送を行う、いわゆる、上り信号に対しては、音声周波電流信号方式(電流アンサーバック方式)を、また低圧配電線用として、高周波電流方式ならびにパルス信号方式をそれぞれ開発し、ほぼ実用化の目途を得た。

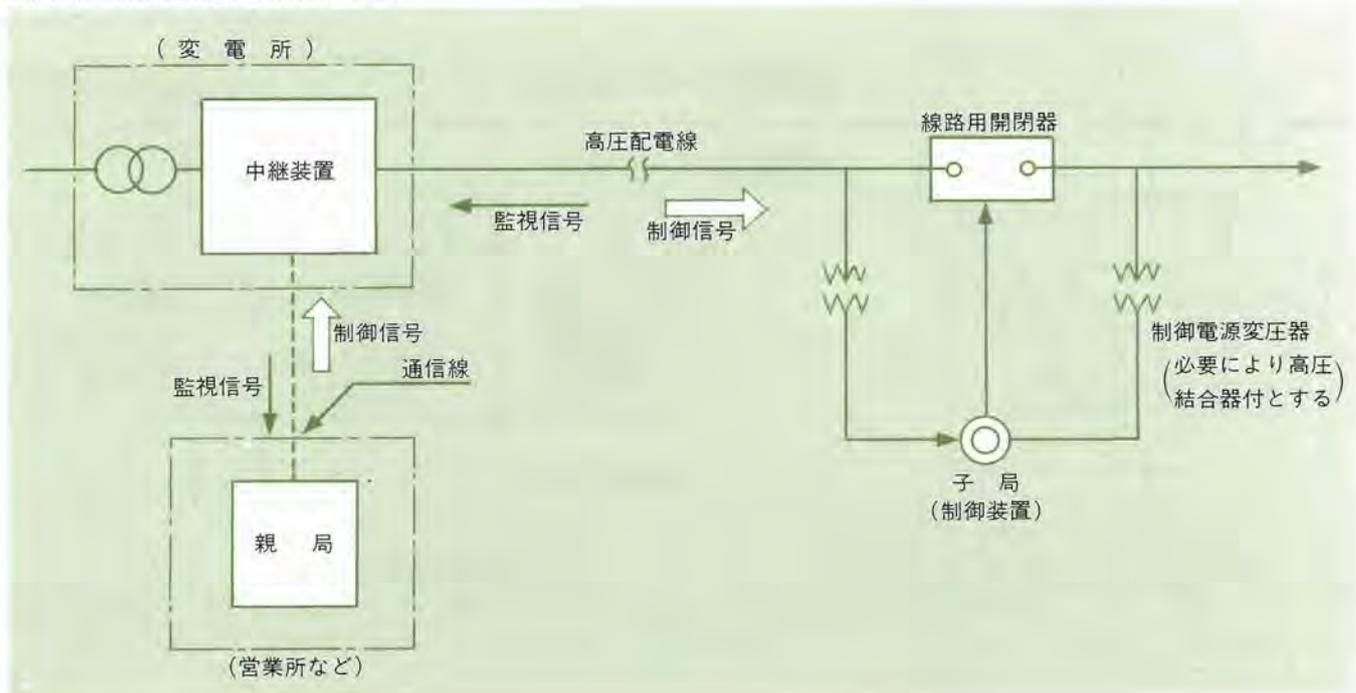
これらを利用した開閉器の監視制御や自動検針システムは試験的に実施あるいは実用化試験を実施中の状況にある。

以上のごとく、配電線搬送により、上り、下りの2方向情報伝送が可能となり、総合自動化システム実現のための展望が開かれた。しかし、特に上り信号については、配電線に含まれる雑音によって影響されない情報伝送の品質と信頼性の改善、装置のコンパクト化等、残された課題もあり、今後とも研究を継続して行く必要がある。

### 5-3-2 信号方式と適用システム

配電線を信号伝送路とした2方向通信技術の主なものを表5-3-1に示す。

図5-3-1 区分開閉器の監視制御システム



これらについて、当所の最近の成果を以下に述べる。

#### I. 音声周波電圧信号方式 (リップルコントロール方式)

この方式は、ヨーロッパで開発されたものであるが、当所では1965年頃から研究し我が国の配電システムに適合する技術として完成させた。現在この方式は電気温水器などの深夜電力負荷の集中制御用として広く実用化されている。

特に最近は、装置のスケールメリットと制御可能範囲の拡大をねらって、上位系統の送電用変電所から1括制御できる、いわゆる特高系統信号注入方式が注目を集めている。このため、「特高系統負荷集中制御実証試験設備」による研究を行い、望ましいシステムについて提案を行った。その要点は次の通りである。

#### 1. 望ましい信号周波数の選定

信号電圧伝送比、雑音特性、所要の注入信号電力の大きさなどを総合判定すれば、信号周波数としては50Hz系においては200Hz以下、60Hz系においては240Hz以下

が望ましい。

#### 2. 望ましい信号注入方式

特高系統の信号伝送特性は変電所に設置されている進相用コンデンサにより著しく低下するが、当所では性能のよいコンデンサ信号注入方式を開発した。この方式は、従来の方式に較べて、信号注入効率が2倍程度、伝送速度が20倍程度向上し、かつ雑音に強い信号方式(すなわち、周波数偏移パルスコード方式)が適用できる。また、既設の進相用コンデンサを有効に活用することができ、装置がコンパクトで済む。

#### II. 音声周波電流信号方式 (電流アンサーバック方式)

この方式は高圧配電線の上り信号として当所が開発したものであり、II.の下り用電圧信号方式と組み合わせることによって、2方向通信が可能になり、適用範囲が大巾に拡大できる。図5-3-1は線路用開閉器の監視制御システムにこれを適用した一例である。

このような電流アンサーバック方式に関して、伝送特性、雑音特性の解明と情報伝

送の高速化の観点から検討を進めた結果、ほぼ実用化の目途を得ることができた。

主なる結果は次の通りである。

### 1. 望ましい信号周波数の選定

高圧配電線の信号電流伝送比(受信信号電流/送信信号電流)と雑音特性、所要注入信号電力の大きさなどを総合判断すると、信号周波数は500Hz以下(60Hz系統では600Hz以下)が望ましいが、奇数次高調波を避けた値が望ましい。

### 2. 望ましいデータ伝送方式

配電自動化の機能を拡大していくには、多種多量の情報を正確かつ高速に伝送することが必要である。

このため、従来方式と比べて情報伝送速度が格段に早い信号方式(すなわち、周波数偏移パルスコード方式)を提案し、これを可能とする簡易な結合装置を開発した。

また、送信電流は20A以上とすべきであることを実証した。さらに雑音特性の実態を踏まえた情報伝送の高信頼度化、望まし

い受信方式、子局のコンパクト化など、研究を進めている。

### Ⅲ. 低圧配電線の信号方式

たとえば自動検針を実施するに当たっては、対象とする需要家数と情報量が膨大となるため、データ伝送の信頼性はもちろんのこと、子局送受信器の小型化とコストダウンが特に重要となる。

そこで当所では、低圧配電線による情報伝送に適した高周波信号方式ならびにパルス信号方式を開発し、現在、電力会社と共同で自動検針実用化のための実証試験を進めている。

これらの方式についてこれまでに次のようなことが明らかになった。

1. 信号伝送特性の実測結果等より、需要家端から柱上変圧器までの上り信号は電流を検出する方式が、また逆の下り信号に対しては、電圧を検出する方式が望ましい。
2. 信号周波数は10kHz~20kHzを使用することが望ましく、所要送信電力は50W程度となる。

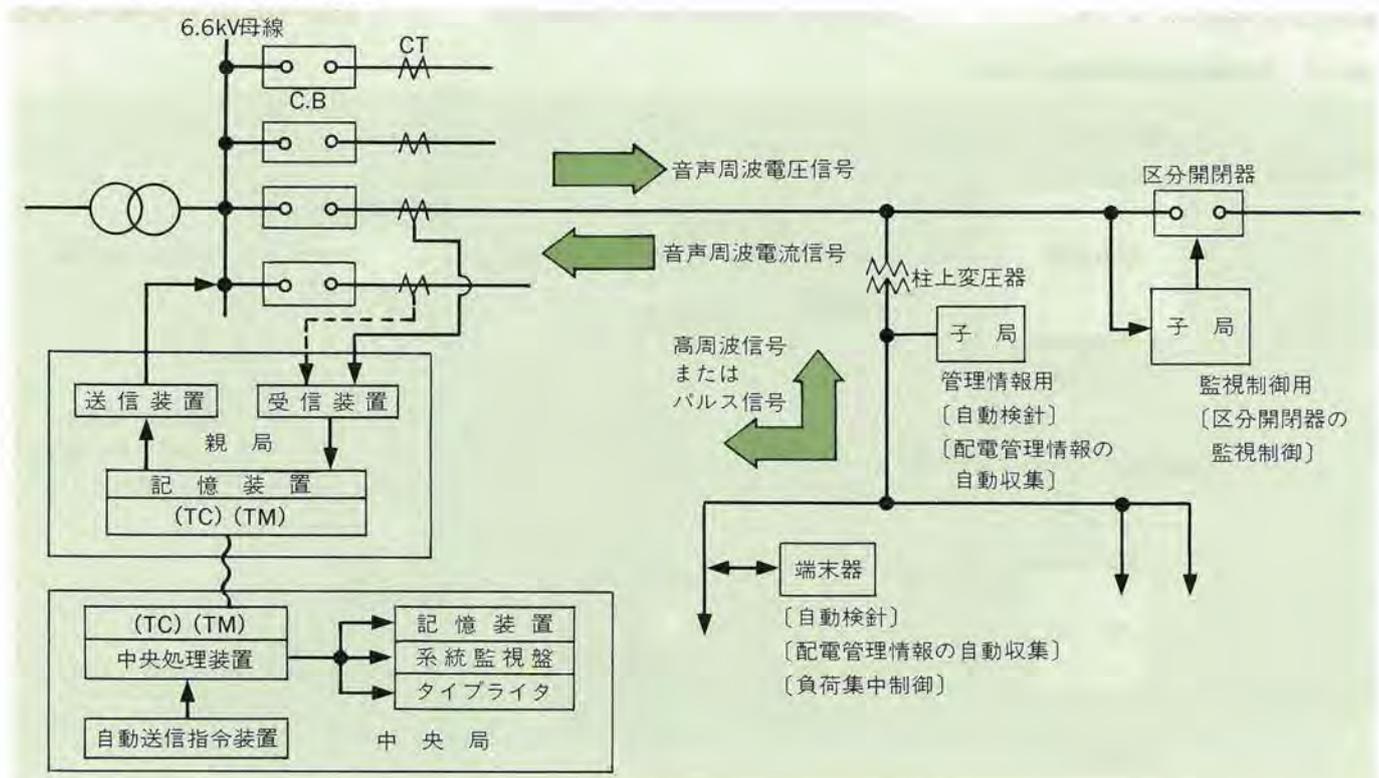
3. パルス信号方式の場合はパルス発生タイミングが重要であり、これを商用周波の0°附近に選定すれば、伝送信頼性の面で極めて有利になるため、実用上十分な精度が得られる。

### 5-3-3 総合自動化システムの構想

これまでに述べた信号方式と各々の制御機能を組み合わせた総合自動化システムの構想図は、図5-3-2の通りであり、次の特徴を有する。

1. 温水器等の深夜電力負荷の集中制御のみでなく、区分開閉器の監視制御、自動検針および配電管理情報の自動収集等多機能の自動化システムに活用でき、設備の合理的運用、管理面の合理化、省力化等が期待できる。
2. 自動検針は都市部の配電用変電所を対象にして、全需要家を15時間で行える。従って、伝送路の雑音が少ない深夜時間帯(0時~5時)をこの情報伝送時間帯に割り当てれば、毎月の検針が3日間で行える。●

図5-3-2 総合自動化システムの構想



## 5-4 配電計画管理

担当●電力技術研究所 送配電部 配電研究室 室長 福留 渥

### 5-4-1 はじめに

配電業務は対象とする設備数が非常に多く複雑多岐に亘るので、多大なマンパワーを必要とする。従って業務の能率向上と設備運用の効率化をはかるためには、業務の機械化が強く要請されており、すでにかなり実施されている。

当所においては、配電線の構成が複雑なため、シミュレーション解析が困難とされている高圧配電システムを主体として、設備形成・管理の機械化手法について、検討を進めている。

また、電力各社と協力して、柱上変圧器

の効率的運用手法、低圧配電線の設備改修計画法などを開発したが、現在20kV級配電あるいは地中配電システムの計画手法を開発検討中である。

このようなシミュレーション手法による設備計画は定量化し難い要素も多いので、最終的には経験豊かな人間による意思決定を必要とするものと考えているが、シミュレーション手法を適用することによって多要因に基づく計画を比較的客観的にかつ能率よく、立案できると期待できる。

今後は、小容量分散型電源の系統連系、ロードマネジメントなど新しい要因を考慮した計画手法の開発研究を進める。

### 5-4-2 高圧配電線の設備管理 設備形成機械化システム

#### I. 高圧配電線の系統解析・設備管理 機械化システム

このシステムは、配電用変電所を含む高圧配電線を対象として、現状設備の稼働状況を診断するものであり、次のような機能と特長をもつ。

1. 高圧配電線の実態をそのまま入力し、電圧電流、電力損失、事故時供給力等の解析を行って、設備稼働状況を把握し、系統運用上の問題点を事前に抽出する。
2. 将来の負荷増に対応して、過負荷切替や電力損失最小の運用方法を自動的に決定するとともに、運用対策だけでは対処できず、真に設備増強が必要となる個所、および時期を的確に予測する。
3. 多量でしかも移動の多い配電設備に関するデータを簡便に更新処理できる機能が組みこまれており、データの維持、管理が容易である。

#### II. 高圧配電線の設備形成 機械化システム

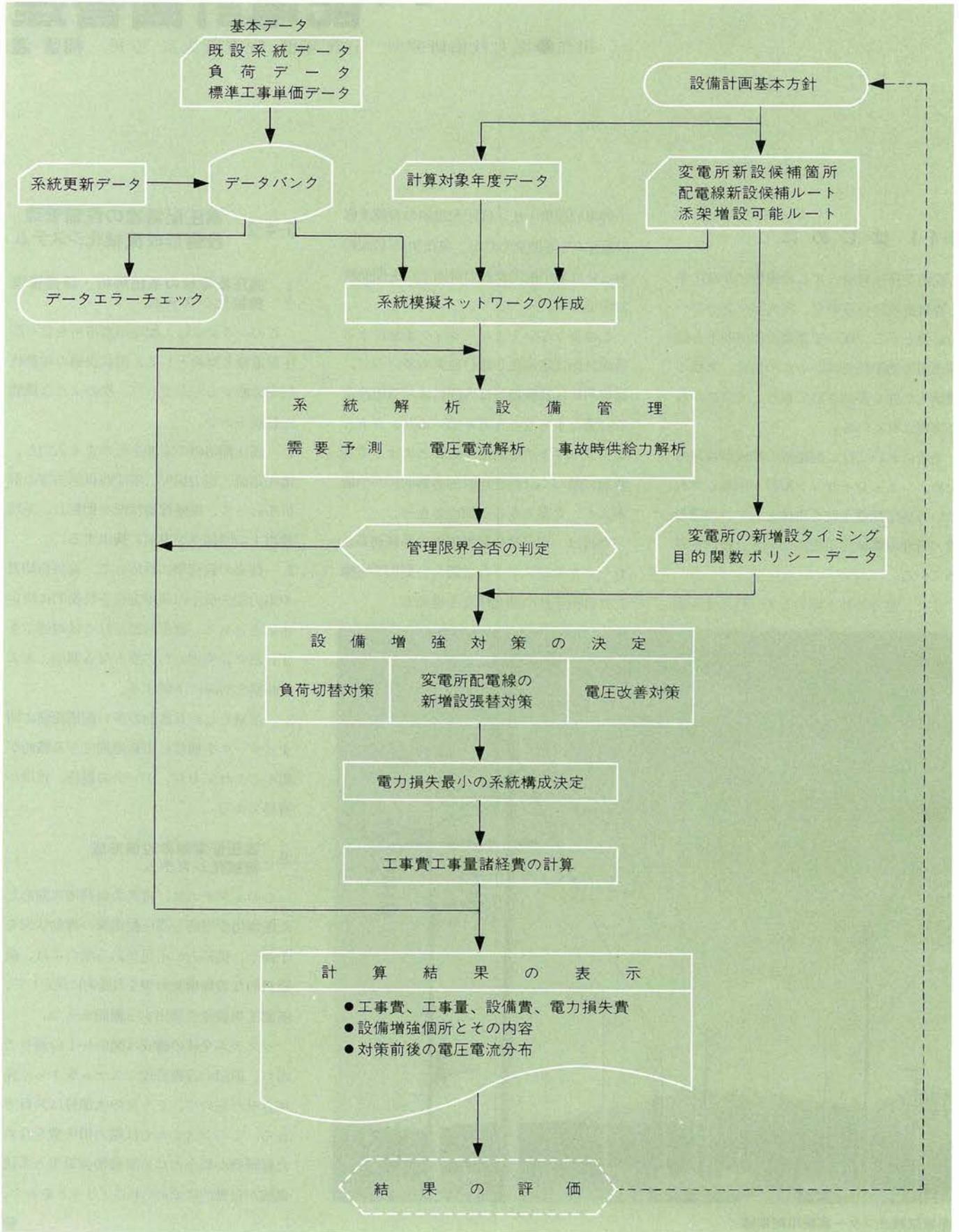
このシステムは、将来の負荷増に対応した配電用変電所と高圧配電線の稼働状況を予測し、供給力の不足がある場合には、最経済的な設備増強対策を自動的に決定して、所要工事資金を算出する機能をもつ。

システム全体の構成は図5-4-1の通りであり、前記の設備管理システムをさらに発展させたもので、データの大部分は共有できる。このシステムでは電力損失費を含めた総経費が最小となる設備増強対策と系統構成が自動的に求められるメリットをもつ。



赤城試験センター実験用配電線

図5-4-1 高圧配電線設備形成機械化システム



# 5-5 実証試験

担当●電力技術研究所 送配電部 配電研究室 室長 福留 渥

## 5-5-1 はじめに

配電系統は需要家に密着して電力を供給するという、特有の性格がある。

従って、技術開発に際しても単なる机上での調査検討だけでは不十分で、総合的かつ実規模大での解明と実証を必要とする分野である。このような実証試験は実際の営業配電線では実施不可能な内容が多く、これを解決するためには実規模大の実証試験設備が必要である。

当所の赤城試験センターにおける実験用配電線は上記の趣旨に従って、

1. 配電線の耐雷、絶縁設計
2. 配電系統の運用とその自動化
3. 配電線事故現象と保護方式
4. 保安および保守
5. 架空配電線の機械的諸問題

などの解明を目的として昭和44年9月に建設された。

この実験設備は、30kV、20kV、6kV、400V、総計約20kmの架空・地中配電線路と10個所の負荷設備を有し、実営業線とはほぼ同等の系統・負荷条件のもとに、各種の実証試験を実施できる特長を有する。

この間、20kV級配電の実用化、雷害事故対策、絶縁電線断線防止対策、配電自動化設備の導入等、配電系統の近代化と高信頼度化に多大な貢献をなしてきた。その研究成果は、総合報告書「配電近代化実験用配電線設備に関する実証研究その1、その2」に詳述されている。

これまでもこの実験設備を用いた研究の成果を述べたが、それ以外のものの概要は以下の通りである。

## 5-5-2 各種実証試験の概要と結果

### 1. 配電線路の長期課電試験

20kV、30kVコンパクト化配電線路ならびに各種耐雷施設、新型機材を採用した6kV配電線路の長期課電試験を実施し、その実用化に供するデータを得た。

### 2. 配電線および機器の故障現象の解明

(i) 非接地配電系統において、各種条件下における地絡故障時の零相電圧発生状況を明らかにし、地絡保護検出感度の管理に供した。

(ii) 机上油入変圧器、モールド変圧器の内部故障時における事故様相の解明と保護装置の動作検証を行った。

(iii) 20kV配電線と6kV配電線の混触事故時における大地電位上昇とその抑制対策を明らかにした。

(iv) 400V級架空配電方式の断線地絡事故時における大地電位上昇について検討を行い、実用上特に問題ないことを確認した。

### 3. 20kV配電方式の保護協調

(i) 22kV/6.6kV連系変圧器方式について、6.6kV配電線あるいは変圧器事故時におけるヒューズと地絡継電器の保護協調のあり方を明確にした。

(ii) 22kV/420V/100/200V配電方式について

保護装置の協調のあり方について明確にした。

(iii) 22kV/100/200V直接降方式について、短絡電流抑制対策の検討と低圧しゃ断器の動作検証を行った。

### 4. 保護継電器の不良動作原因の解明

(i) 塩害時における地絡継電器の不良動作の可能性とその原因を実験的に明らかにした。

(ii) 現用のトランジスタ型継電器について、サージ電圧に対する不良動作や破損の可能性を明らかにした。

(iii) 配電系統をループ運転した場合の回路現象を明らかにし、継電器に及ぼす影響について検討した。

### 5. 保安接地

化学薬品を使用することによる接地抵抗の低減効果とその経年変化を実測により明らかにした。

### 6. 新装置、機材の性能検証

各種の22kV用配電機材や避雷器内蔵機器の絶縁特性の把握、酸化亜鉛型避雷器の保護効果の検証、電撃防止装置の性能検証等新たに開発された装置や機材について、実用上の問題点の有無を確認する実証試験を行い、実用化に協力した。

今後とも、実験用配電線設備を有効に利用し、新技術の開発とその実用化に貢献したいと考えている。

## 関連報告書等

1. 高橋、七原「電源計画のための燃料費算定手法—確率燃料費曲線の応用—」研究報告：179038(1980.5)
2. 七原、高橋「電源計画手法の開発—長期計画シミュレーションプログラムの開発—」研究報告：180044(1981.7)
3. 高橋、田中「系統計画のチェック計算システム」研究報告：178043(1979.6)
4. 田中、高橋「系統計画データファイルのための潮流チェックプログラムの開発」研究報告：180058(1981.7)
5. 田中、高橋他「系統計画検討システムの開発」依頼報告：178527(1979.6)
6. 高橋、橋本「系統計画チェックシステムの開発」研究報告：176035(1977.4)
7. 高橋、田中、染矢「系統計画計算の機械化システムの開発」依頼報告：177516(1978.5)
8. 小宮「電圧・無効電力に関する系統特性定数算定法」研究報告：67028(1967)
9. 小宮他「電力系統における運転基準電圧の決定手法」研究報告：67046(1967)
10. 高橋「電力系統における調相設備の運用と拡充のための最適化計算手法」研究報告：70115(1971.3)
11. 高橋他「電力系統における定常時の電圧管理プログラムの開発」研究報告：69078(1970.3)
12. 小川他「系統電圧調整と設相設備拡充のための最適化計算」依頼報告：176521(1975.5)
13. 小川他「電力系統の変則状態を考慮した調相設備計画手法の開発」研究報告：180054(1981.9)
14. 鈴木「系統信頼度の評価手法—系統運用における定常時の系統信頼度の指標化—」研究報告：180014(1980.9)
15. 高橋、田中他「フェンシング法による電力系統の供給力チェック手法」研究報告：179037(1980.5)
16. 高橋、田中他「電力系統計画計算システムの開発(第2報)」依頼報告：17528(1979.6)
17. 鈴木、児玉「系統信頼度の評価手法—系統過負荷に関する系統信頼度の指標化—」研究報告：177091(1978.5)

## 2-3

1. 大庭、磯田、山上、杉山「週間需給計画システム—(その1)火力機並解例の計画—」依頼報告：179527(1980.5)
2. 磯田、児玉、大庭、山上、杉山「週間需給計画システム—(その2)揚水池運用の計画—」依頼報告：179544(1980.7)
3. 磯田、大庭、山上、西森「週間需給計画システム—(その3)火力機負荷配分の計画、日量規制を考慮した高連火力負荷配分計算法—」依頼報告：180507(1980.11)
4. 大庭、磯田、梶原、西森「週間需給計画システム—(その4)火力・揚水配分の総合計算の実証—」依頼報告：180519(1981.2)
5. 磯田、大庭、米重「日量規制を考慮した火力・揚水発電所負荷配分法」研究報告：178033(1979.4)
6. 磯田「運用制約を考慮した有効・無効電力の最適配分法」研究報告：180042(1981.8)
7. 磯田「長時間需要予測値を用いたオンライン需給平衡制御方式の開発」研究報告：179045(1980.3)
8. 磯田、安海、犬飼、佐藤「東北電力におけるオンライン系統信頼度制御システム—信頼度制約を考慮した経済負荷配分—」依頼報告：182516(1982.11)
9. 磯田、杉山、西森「需給制御システムシミュレーターデジタルシミュレーションの開発—」依頼報告：181525(1982.6)
10. 鈴木、尾出「事故後自動操作論理に関する研究」研究報告：66032(1966.8)
11. 鈴木、尾出、幅「電子計算機による系統自動操作方式に関する研究—定常時自動操作論理の開発—」依頼報告：68071(1969.3)
12. 鈴木、尾出、幅「電子計算機による系統自動操作方式に関する研究—事故後の周波数および需給平衡対策論理の開発—」依頼報告：69107(1969.5)
13. 鈴木、幅、木村「電子計算機による系統自動操作方式に関する研究—系統操作論理の開発—」依頼報告：71514(1971.8)

14. 鈴木、河野他「二次系統の事故後復旧操作論理の開発と系統シミュレータによる実証研究(パターン復旧操作方式)」研究報告：73016(1973.6)
15. 鈴木、児玉他「二次系統の事故後復旧操作論理(オペレーションランチ復旧操先方式)」研究報告：74035(1974.11)
16. 鈴木「電力系統における系統自動操作方式に関する研究」総合報告：30(1976.7)
17. 児玉、鈴木他「東北電力一次系復旧操作論理の開発」依頼報告：176518(1977.4)
18. 児玉、鈴木他「多重ループ一次系統の事故後復旧操作論理(系統ブロック化による復旧操作)」依頼報告：182504(1982.9)
19. 児玉、鈴木他「放射状二次系統の事故時系統操作論理の開発」依頼報告：182509(1982.11)
20. 大庭他「マン・マシンシステムのためのCRTディスプレイ用基礎ソフトウェアの開発」研究報告：73072(1974.3)
21. 大庭他「停電作業計画検討システムの開発」依頼報告：176508(1976.12)
22. 大庭他「会話型潮流計算システムの開発」研究報告：176029(1977.2)
23. 七原「火力・原子力発電ユニットの定期補修計画手法一分枝限定法による論理の開発一」研究報告：182018(1982.9)
24. 尾出他「電力系統における電圧無効電力制御に関する基礎研究」研究報告：65065(1965.11)
25. 高橋他「電力系統の電圧・無効潮流の調整プログラムの開発」研究報告：70008(1970.6)
26. 増茂他「系統シミュレータによる電圧無効電力の計算機制御に関する研究」研究報告：68072(1969.3)
27. 小宮他「東北電力系統の電圧無効電力計算機制御に関する系統シミュレータを用いた実証研究」依頼報告：69655(1970.5)
28. 小川他「四国電力系統の電圧無効電力計算機制御に関する系統シミュレータを用いた実証研究」依頼報告：73516(1973.12)
29. 小川他「中国電力系統の電圧無効電力制御に関する検討」依頼報告：175527(1975.5)
30. 小川他「東北電力系統の電圧無効電力制御に関する基礎特性」依頼報告：72528(1972.9)
31. 小川他「中国電力系統の電圧無効電力制御に関する基礎特性」依頼報告：74549(1974.5)
32. 小川他「東北電力北部系統における電圧無効電力特性試験」依頼報告：180508(1980.11)
33. 長尾「電力系統の電圧異常低下現象」研究報告：74043(1974.12)
34. 小川「電力系統の状態推定法の開発一定常時状態推定法(その1)一」研究報告：71043(1971.10)
35. 小川「電力系統の状態推定法の開発一定常時状態推定法(その2)一」研究報告：72077(1973.3)
36. 小川「潮流感度指数を用いた電力系統の状態推定(第1報)一有効電力潮流推定法一」研究報告：73032(1973.9)
37. 小川「潮流感度指数を用いた電力系統の状態推定(第4報)一電圧無効電力推定法一」研究報告：175027(1976.1)
38. 小川「送電損失を考慮した有効電力推定法」研究報告：177016(1977.10)
39. 小川他「東北電力系統における状態把握のための情報収集地点の検討」依頼報告：176522(1977.5)
40. 小川「潮流感度指数を用いた電力系統の状態推定(第2報)一観測値誤りの評定論理一」研究報告：74032(1974.10)
41. 小川「潮流感度指数を用いた電力系統の状態推定(第3報)一事故時における観測値誤りの評定一」研究報告：74088(1975.3)
42. 小川「電力系統における最適情報収集地点の決定(第1報)」研究報告：176024(1976.1)
43. 小川「電力系統における最適情報収集地点の決定(第2報)一電気所の情報欠損を考慮した場合一」研究報告：176041(1977.5)
44. 小川「電力系統の状態推定法の開発」総合報告：102(1980.3)
45. 小川他「放射状系統の有効電力推定法と欠損データの検出法」依頼報告：178531(1979.6)
46. 小川他「四国電力系統の状態推定のためのオンライン収集情報の検討」依頼報告：74548(1975.5)

## 2-4

1. 植田他「多機系統の動的解析のための新しい発電機シミュレーション手法の開発」研究報告：72046(1972)
2. 植田他「電力系統の動特性解析手法の開発」研究報告：74042(1974)
3. 植田他「電力系統の安定度解析手法の精度向上」研究報告(1982)
4. 植田他「秋田火力4号機運開に伴う系統試験報告書」依頼報告：181507(1982)
5. 電気協同研究「電力系統の安定度」電協研報告：34巻5号(1979)
6. 植田他「電力系統の動特性解析プログラムマニュアル」電研資料(1981)
7. 日豪安定度シンポジウム「Stability of Power Systems and Simulation in Japan」電研資料(1981)
8. 梅津「電力系統における安定度に関する研究」研究報告：60006(1960)
9. 長尾「多機系統の固有定常安定度(現象論と解析手法一推移行列法)」研究報告：175019(1975)

10. 内田他「固有値法による動的定態安定度解析」研究報告：178061(1979)
11. 内田「大規模電力系統の動的定態安定度解析手法—S行列法—」研究報告：179068(1980)
12. 内田他「大規模電力系統の動揺モード解析手法の開発と実証」研究報告：182004(1982)
13. 内田「モード解析による系統縮約手法(その1)—基本論理の開発—」研究報告：180065(1981)
14. 長尾他「電力系統の定態領域における振動現象」研究報告：179065(1982)
15. 長尾「電力系統の電圧異常低下現象(いわゆる電圧安定度について)」研究報告：74043(1974)
16. 長尾他「発電機特性と負荷特性を考慮した夕流計算法」研究報告：180008(1980)
17. 長尾他「系統電圧の異常低下現象の解析手法」研究報告：181513(1981)

## 2-5

1. 市川「電力系統からみた原子力発電所の動特性(その1)—沸騰水型軽水炉式原子力発電所の場合—」研究報告：175079(1976.7)
2. 市川「電力系統からみた原子力発電所の動特性(その2)—沸騰水型原子力発電所の動特性シミュレーション・モデル—」研究報告：176072(1977.7)
3. 市川「電力系統からみた原子力発電所の動特性(その3)—加圧水型原子力発電所の動特性シミュレーション・モデル—」研究報告：177052(1978.5)
4. 市川、植田、上之蘭「電力系統からみた原子力発電所の動特性(その4)—系統故障時のBWRユニットの応動—」研究報告：178051(1979.5)
5. 吉田、竹中、市川、植田、町田「原子力発電所からの直流単独送電(その1)—BWR発電所の場合—」研究報告：179008(1979.10)
6. 吉田、竹中、谷口、植田「原子力発電所からの直流単独送電(その2)—PWR発電所の場合—」研究報告：179066(1980.7)
7. 市川「電力系統からみた原子力発電所の動特性(その5)—系統故障時のPWRユニットの応動—」研究報告：180041(1981.7)
8. 谷口他「タービン高速制御による安定度向上策(第1報)」研究報告：177055(1978)
9. 谷口「安定度解析のための発電機、制御系の基本特性」研究報告：180011(1980)
10. 谷口「タービン高速制御による安定度向上」研究報告：181050(1982)

11. 水谷他「蒸気温度制御系の改良」研究報告：67021(1967)
12. 竹内他「火力発電所総合全自動化シミュレータの開発」研究報告：72128(1973)
13. 植田他「電力系統の周波数過渡変動解析手法の開発」研究報告：181514(1981)
14. 植田他「秋田火力4号機運用に伴う系統試験報告書」依頼報告：181507(1982)
15. 谷口他「渥美火力発電所安定度対策装置の性能実証試験」依頼報告：182503(1982)
16. 上之蘭他「系統事故に起因するタービン発電機軸振動現象の解析」研究報告：175509(1975)
17. 上之蘭他「タービン発電機軸トルク強度からみた再閉路方式の検討」研究報告：175531、175532、176511他(1976、1977)
18. 桑原他「タービン軸材 Ni-Cr-Mo-V 鋼の低サイクル疲労強度」研究報告：277050(1978)
19. 新田他「長期使用タービン軸材の振り疲労強度と破壊靱性値」研究報告：279016(1979)

## 2-6

1. 高橋「大規模電力系統の行列演算法—行列のグラフ表示と三角化分解—」研究報告：176074(1977.6)
2. 大庭、小川他「電力系統計画・運用に用いる技術計算手法—No.1 電力潮流計算手法—」調査報告：73002(1973.8)
3. 高橋「短絡容量計算のための疎インピーダンス行列の作成計算」研究報告：73040(1973.12)
4. 都築「線形制御系の縮約手法の開発」研究報告：176043(1977.5)
5. 江口「線形化電力システムにおける同定、縮約と最適制御」研究報告：179012(1980.3)
6. 江口「線形化電力システムの縮約—縮約システムの近似精度の上下限—」研究報告：179013(1980.4)
7. 内田、長尾「モード解析による系統縮約手法(その1)—基本論理の開発—」研究報告：180065(1981.10)
8. 江口「線形化電力システムの縮約(その2)—主成分分析による縮約システムの作成手法の開発—」研究報告：182006(1982.11)
9. 江口「定常応答の評価による最適補償器の設計と縮約について」研究報告：177054(1978.6)
10. 江口「電力系統におけるフィードバック系の最適化—定常応答の評価による最適補償器の設計と縮約について(その2)—」研究報告：179014(1980.7)
11. 江口、清水、田中「最適制御理論の系統周波数制御問題への適用」依頼報告：180514(1981.4)
12. 江口、堀内、大谷他「動的定態安定度向上のための最適制御

- (その1)」依頼報告：181512(1981.11)
13. 多枝系統における最適制御共同研究委員会「多機系統における最適励磁制御(励磁制御系諸定数の設置目標)」181026(1982.5)
  14. 高橋「フロー理論による潮流計算の開発」研究報告：67014(1967.9)
  15. 大庭他「電力系統計画・運用に用いる技術計算手法No.1(電力潮流計算手法)」調査報告：73002(1973.8)
  16. 北原、高橋「新しい電圧条件の指定方法による潮流計算プログラムの開発」研究報告：178042(1979.6)
  17. 長尾、内田「発電機特性と負荷特性を考慮した潮流計算法」研究報告：180008(1980.9)
  18. 大庭「マルチレベル計算機制御システムのための電力潮流計算手法の研究(第1報)(第2報)」研究報告：74040(1974.12)74059(1975.3)
  19. 大庭他「会話型潮流計算システムの開発」研究報告：176029(1977.2)
  20. 児玉、鈴木「交流法による確率的潮流計算手法の開発」研究報告：178035(1979.3)
  21. 田中、高橋「タップ自動調整ロジックを含む潮流計算」電気学会全国大会：808(1980.4)
  22. 田中「高速潮流計算手法(ニュートンラフソン法の効率化)」研究報告：181012(1981.9)

### 3-2

1. 大和「日本海沿岸の雷性状の検討事項と実測装置」調査報告：178075(1979.5)
2. 岸嶋他「柏崎、刈羽地点の冬季雷撃電流の測定結果(その1)」研究報告：180070(1981.7)
3. 多田他「雷撃現象自動撮影装置による自然雷の撮影」研究報告：178021(1981.7)
4. 三宅他「冬季雷の雷撃進展ならびに静止写真観測結果(その1)」研究報告：81008(1981.8)
5. 多田他「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」研究報告：181025(1981.12)
6. 井上他「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)」研究報告：181001(1981.7)
7. 多田他「雷撃現象自動撮影装置による冬季雷観測(その1)」研究報告：179048(1980.5)
8. 三宅他「冬季雷の雷撃進展ならびに静止写真観測結果(その1)一昭和54年～55年度の観測結果一」研究報告：181008(1981.8)

9. 多田他「雷撃現象自動撮影装置一装置の解説と観測の成果一」研究報告：182020(1982.10)

### 3-3

1. 高梨、千野「酸化亜鉛形避雷器の短時間交流過電圧動作の実験的検討」研究報告：781003(1982.5)
2. 横倉他「酸化亜鉛形避雷器の開閉サージ動作責務」電気学会開閉保護装置研究会資料：SPD-82-4(1982.5)
3. 佐々木他「500kVガス絶縁変電所の雷サージ絶縁協調と酸化亜鉛形避雷器の適用による絶縁低減効果」研究報告：180053(1981.9)

### 3-4

- 渡辺他「冠着氷雪がいしの耐電圧特性(その1)」研究報告：180010(1980.10)

### 4-2

1. 鈴木他「三層押出XLPEケーブルの絶縁特性(その1)」研究報告：177087(1978.5)
2. 鈴木他「三層押出XLPEケーブルの絶縁特性(その2)」研究報告：178031(1979.2)
3. 鈴木他「加速劣化試験による海底6.6kV CVケーブルの交流電圧重畳インパルス破壊特性」依頼報告：181532(1982.5)
4. 池田「6.6kV級XLPEケーブルの長期絶縁性能」研究報告：181039(1982.8)
5. 池田「周波数加速による6.6kV XLPEケーブルの劣化(I)」研究報告：175020(1975.10)
6. 池田「周波数加速による6.6kV XLPEケーブルの劣化(II)」研究報告：176040(1977.6)
7. 池田「6.6kV XLPEケーブルの長期絶縁性能短期評価試験法」研究報告：178041(1979.5)
8. 池田「6.6kV XLPEケーブルの長期絶縁性能短期評価試験法(II)」研究報告：179044(1980.6)
9. 池田「XLPEケーブルの水トリー劣化を判定するための新直流試験法」研究報告：175072(1976.6)
10. 鈴木他「三層押出XLPEケーブルの絶縁特性(その2)」研究報告：178031(1979.2)
11. 新田他「EHV級架橋ポリエチレンケーブル絶縁材料の検討」依頼報告：281522(1981.12)
12. 新田他「高密度/低密度ブレンドポリエチレンを用いた架橋ポリエチレンケーブルの評価」研究報告：280028(1981.1)

13. 池田他「絶縁材料の耐内部放電性評価試験法」研究報告：73085(1974.5)
14. 田中他「ボイド放電によるポリエチレンの V-t 特性」研究報告：73118(1974.6)
15. 岡本他「ボイド欠陥と部分放電パルス群の統計的性質の関係(I)」研究報告：179030(1979.11)
16. 岡本他「ボイド欠陥と部分放電パルス群の統計的性質の関係(II)」研究報告：180005(1980.7)
17. 岡本他「部分放電特性に及ぼすトリッキングの効果」研究報告：180061(1981.3)
18. 岡本他「CV ケーブルのトリッキング劣化」研究報告：182003(1982.6)
19. 田中「ポリエチレンの不平等電界部分絶縁破壊(I)」研究報告：176026(1976.11)
20. 田中「ポリエチレンの不平等電界部分絶縁破壊(II)」研究報告：178006(1978.7)
21. 岡本「CV ケーブルのトリッキング劣化(II)」研究報告：182027(1983.2)
22. 新田「ブレンドによるポリエチレンおよび架橋ポリエチレンの耐トリッキング性の向上」研究報告：277022(1978.2)
23. 新田他「ポリエチレン、架橋ポリエチレンのトリッキング発生電圧に対するポリエチレン球晶半径の影響」研究報告：278017(1978.12)
24. 深川他「直流 XLPE ケーブルの開発」研究報告：281038(1982.5)
25. 田中他「ミニコンピュータを用いた新しい放電々荷計測解析システムの開発」研究報告：177020(1977.12)
26. 田中他「ケーブルコロナの新しい計測法」研究報告：179040(1980.3)
27. 岡本「部分放電特性に及ぼすトリッキングの効果(II)」研究報告：181033(1982.3)

#### 4-3

1. 田中他「EHV/UHV 合成紙絶縁ケーブル技術の現状と研究展望」調査報告：178037(1979.6)
2. 新田他「EHV ケーブル用複合ラミネート紙の膨潤と超音波加速試験」研究報告：179078(1980.3)
3. 新田他「ポリプロピレンフィルムの膨潤と絶縁特性」研究報告：280074(1981.3)
4. 田中他「超高压ケーブル用ラミネート紙の長期絶縁性能評価」研究報告：181043(1982.3)
5. 池田他「500kV OF ケーブル用ラミネート紙の特性評価試験結果」依頼報告：181542(1982.6)
6. 伊藤他「275kV ラミネート紙絶縁 OF ケーブルの武山試験線の

初期性能」依頼報告：180543(1981.7)

#### 4-4

1. 田中他「EHV/UHV 合成紙絶縁ケーブル技術の現状と研究展望」調査報告：178037(1979.6)
2. 深川他「素線絶縁導体高油圧パイプケーブルの通電損失」依頼報告：179533(1980.6)
3. 今城「地中ケーブルの埋め戻し材の開発(2)―最適粒度分布の検討―」研究報告：175063(1976.7)
4. 今城他「地中ケーブル埋め戻し材の水分移動特性」研究報告：179060(1980.10)
5. 今城他「アナログシミュレータによるケーブル温度上昇の解析」研究報告：180062(1982.1)
6. 伊藤他「多孔管路布設ケーブルの熱放散改善策」研究報告：181040(1982.6)
7. 深川他「熱供給導管による電力ケーブルへの熱影響とその防止対策(総括報告)」依頼報告：180533(1982.4)
8. 深川「熱供給導管による電力ケーブルへの熱干渉の解析」依頼報告：175516(1975.6)
9. 深川「パイプラインによる周辺土壌への熱伝導計算法」依頼報告：176506(1976.12)
10. 今城他「地中埋設断熱材の機械的・熱的特性」依頼報告：175515(1975.10)
11. 深川他「電力ケーブルと熱供給導管の交叉部における熱遮蔽板所要寸法」依頼報告：177534(1978.8)
12. 伊藤他「熱供給導管による電力ケーブルへの熱影響防止対策―実規模モデル実験による結果(1)」依頼報告：177537(1978.7)
13. 深川他「熱供給導管の下部を通過した電力ケーブルの熱遮蔽対策と送電容量計算法」依頼報告：179518(1980.3)
14. 深川他「熱供給導管による熱影響を受けた電力ケーブルの許容電流簡易計算法」依頼報告：178523(1979.7)
15. 伊藤他「熱供給導管による電力ケーブルへの熱影響防止対策―実規模モデルによる実験結果(2)」依頼報告：178526(1979.9)
16. 伊藤他「熱供給導管による電力ケーブルへの熱影響防止対策―実規模モデルによる実験結果(3)」依頼報告：179545(1980.7)
17. 今城他「熱供給導管による電力ケーブルへの熱影響防止対策―ヒートパイプの適用に関する検討―」依頼報告：178524(1979.7)

#### 4-5

1. 宅間他「SF<sub>6</sub>ガスと支持用スパーサの絶縁特性」総合報告：32(1977.12)
2. 宅間「SF<sub>6</sub>に代る新ガス、混合ガスの可能性」調査報告：181002(1981.7)

3. 藤波他「SF<sub>6</sub>ガスの短時間領域 V-t 特性」研究報告：180012 (1980.10)
4. 藤波他「ガス絶縁断路器模擬ギャップにおける局所火花の絶縁特性に及ぼす影響」研究報告：181005(1981.7)
5. 藤波他「ガス絶縁断路器の極間火花による対地絶縁耐力低下のメカニズム」研究報告：181032(1982.4)

## 5-2

1. 横山「誘導雷サージに対する架空地線の効果に関する一般式の導出」研究報告：179022(1979.12)
2. 横山「架空地線多条化による誘導雷サージのしゃへい効果」研究報告：180032(1981.2)
3. 横山他「配電線耐雷性の自然雷による実証一北陸電力(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)一」研究報告：180046(1981.6)
4. 横山他「配電線耐雷性の自然雷による実証一北陸電力(株)福井火力発電所における誘導雷サージ観測結果(その2)一」研究報告：182013(1982.9)
5. 河西、水島「配電用絶縁電線のアーク溶断特性と溶断機構について」研究報告：175076(1976.6)
6. 河西、水島「配電用絶縁電線のアーク溶断特性と溶断機構について(その2)」研究報告：176019(1976.11)
7. 河西、水島、伊藤「配電用絶縁電線のアーク溶断特性と溶断機構について(その3)」研究報告：176075(1977.6)
8. 河西、水島、須山他「耐力腐蝕形絶縁電線のアーク溶断特性」依頼報告：177529(1978.5)
9. 水島、河西、伊藤、横田他「配電線用改良形絶縁電線のアーク溶断特性」依頼報告：177535(1978.6)
10. 水島、河西、島田、宮内他「改良形 OC 電線のアーク溶断特性と過電流継電器との協調について」依頼報告：179512(1979.11)
11. 河西、水島、葛間他「150mm<sup>2</sup>改良形 OC 電線のアーク溶断特性とアルミナ含有高圧中実碍子の耐アーク特性」依頼報告：179538 (1980.6)
12. 須山、横田他「リアクトル接地配電線断線事故の電源端における検出方式の実証試験」依頼報告：175534(1976.6)
13. 須山、横田、荻野「高圧配電線断線検出継電装置の開発」研究報告：177026(1977.12)
14. 須山、河西、横田「高圧絶縁電線のアーク溶断現象と断線検出について」研究報告：177068(1978.8)
15. 配電線近代化研究会「絶縁電線配電線の事故防止に関する研究

の現状」研究報告：179001(1979.6)

16. 横田他「零相電流変化値検出方式による高圧配電線断線検出リレーの性能検証」依頼報告：181528(1982.6)
17. 須山、清水、久場「低圧保安実験設備について」調査報告：176008(1977.4)
18. 清水「電気機器漏電時における人体分流電流の実験的検討」研究報告：177039(1978.3)
19. 横田、須山「漏電しゃ断器の性能試験」研究報告：177070 (1978.7)
20. 清水「400V 配電における漏電しゃ断方式の保安効果の検討」研究報告：179027(1979.12)

## 5-3

1. 石川(勝)、荻野、宮内他「負荷集中制御規模の拡大を目的とした特高系統の音声周波帯における信号伝送特性試験」依頼報告：74510(1974.9)、175535(1976.6)
2. 石川(勝)、荻野、松尾他「77kV 送電系統の音声周波帯における信号伝送特性試験」依頼報告：177533(1978.8)
3. 石川(勝)、荻野、松永「特高系統からの負荷集中制御」研究報告：179079(1980.10)
4. 石川(勝)、松永他「負荷集中制御を目的とした特高系統の信号伝送特性試験」研究報告：180006(1980.10)、180007(1980.10)、180026(1981.6)
5. 石川(勝)他「佐渡地域33kV 系統における負荷集中制御方式の実証試験」依頼報告：181526(1982)
6. 中西、荻野、石川(勝)、有賀「配電線における音声周波帯信号伝送特性の解析とその実証実験」研究報告：73005(1973.6)
7. 別府、有賀、荻野他「高圧配電線ならびに低圧配電線におけるデータ伝送基礎特性」依頼報告：175538(1976.9)
8. 有賀、荻野他「配電線におけるデータ伝送試験結果」依頼報告：177519(1978.4)
9. 宮内、荻野、有賀他「配電線のデータ伝送に及ぼす雑音の影響」依頼報告：177522(1978.5)依頼報告：178522(1979.6)
10. 有賀、荻野、石川(勝)他「低圧配電線におけるパルス伝送特性の試験結果」依頼報告：175505(1975.8)
11. 有賀、荻野「低圧配電線における信号伝送特性の基本的検討」研究報告：176062(1978.6)
12. 有賀、荻野、横田他「低圧配電線におけるデータ伝送特性の実験的検討」依頼報告：179541(1980.6)
13. 有賀他「低圧配電線における信号伝送方式の開発」依頼報告：181516(1982.1)
14. 有賀、荻野「配電線搬送方式による集中テレメータ方式の開発」研究報告：180050(1981.6)

## 5-4

1. 久場「低圧配電系統における設備改修計画」研究報告：177089(1978.6)
2. 福留、井手「データバンクによる高圧配電線の系統解析・設備管理機械化システム」研究報告：178029(1979.1)
3. 福留「データバンクによる高圧配電系統の設備計画機械化システム」研究報告：179052(1980.6)
4. 福留「高圧配電系統の設備計画手法に関する研究」総合報告：101(1979.7)
5. 福留他「電力損失軽減対策を考慮した配電設備計画手法の開発」依頼報告：179517(1979.11)
6. 福留他「30kV/400V級配電方式導入計画手法の基礎的検討」依頼報告：180531(1981.6)
7. 二宮、福留他「22kV配電の経済性評価手法の開発」依頼報告：181503(1981.8)
8. 福留、二宮、久場他「柱上変圧器の低損失化」依頼報告：181504(1981.9)
- 175002(1975.6)
13. 山田他「多重ループ系統における零相環流電流の解析的検討」研究報告：74017(1974.8)
14. 宮内他「配電機材の双極性雷サージに対する絶縁特性」依頼報告：181527(1982.6)
15. 粟屋他「22kV配電機材の絶縁特性および避雷器保護特性試験」依頼報告：181536(1982.6)

## 5-5

1. 松本、横山他「赤城実験場における22kVコンパクト化配電線の長期課電実績」依頼報告：74537(1975.3)
2. 山田、多田、楠永他「33kVコンパクト配電線の絶縁協調に関する実証実験」依頼報告：175517(1975.11)
3. 松本、横山、須山「赤城実験場における33kVコンパクト配電線路の長期課電実績」依頼報告：176538(1977.6)
4. 須山他「22kV配電線と高圧配電線の混触事故時諸現象とその保護について」研究報告：72089(1973.3)
5. 須山他「22kV/低圧および22kV/6.6kV配電方式の保護協調に関する実証実験結果」依頼報告：177512(1978.2)
6. 横田他「22kV/ $\frac{100}{200}$ V直接透降配電方式の保護協調実験結果」依頼報告：179507(1979.11)
7. 須山他「22kV—6.6kV併架配電線の混触事故時過電圧と防護対策」依頼報告：179549(1980.7)
8. 須山他「配電用小形変圧器の内部故障現象とその保護について」依頼報告：179511(1981.4)
9. 島田「400V級架空配電線の断線試験および大地電位上昇試験結果」依頼報告：176530(1977.7)
10. 城条他「配電線地絡保護における零相電圧管理方式の適用」依頼報告：178519(1979.4)
11. 城条他「塩害による配電線路の故障現象と現用リレーの応動」依頼報告：180532(1981.6)
12. 清水「化学処理による接地抵抗低減効果の持続性」研究報告：

## 編集後記

電研レビュー第5号(1982年10月)では、UHV送電をとり上げましたが、本電研レビュー(第7号)は、いわば、その姉妹編です。

「かんとうげん」では、電力会社のトップ層の方々から、社会への展望と当所への期待を含めた数々の提言をいただいております。われわれ電研人はその意図をくみとり、研究戦略の組み立てや、研究活動を精力的に行っております。今回は北海道電力株式会社常務取締役 舩田正章氏にはご多忙中快よくご寄稿いただきまして、紙面を借りて心からお礼を申し上げます。

今回の電力輸送特集号の全体の編集は、電力技術研究所 瀬田泰助副所長が担当されました。また電力技術研究所 有働龍夫所長には全般に亘ってご指導いただきました。ここに感謝いたします。

### ●マイクロ・エボリューション●

われわれの祖先は何なのか? 一時期ルーツさがしがはやったことがあるが、日本人の起源は諸説紛々である。人骨や歯の形状から日本人のルーツをさぐる手法があるが、縄文人との関連で研究が進んでいる。縄文人には、アイヌ説、プレ・アイヌ説、コロボックル説などがあるが、どれもあやしい。大森貝塚で有名なモース博士はプレ・アイヌ説の提唱者であった。

現日本人がその縄文人とつながっている

か、断絶しているかが争点となっているが、縄文人を起源として生活環境や文化の変化にマッチするようにマイクロ・エボリューション(小変化)を繰返し、似ても似つかない現日本人に進展してきたというのが、人骨調査による現段階での結論だそうである。

関東一円を主とすれば、例えば頭蓋骨をみると、長頭から次第に中頭へと変化してきており、民族・人種の突然の交代とか大きな移入は考えられないが、ただ、北九州や山口県地方では、弥生時代に、朝鮮半島からの渡来者があり混血が行われた可能性があるという。

マイクロ・エボリューションの繰返しより、二千数百年の間に、元のものとは違ったものに変化してしまったことになる。おどろきであるが、第二次世界大戦後の日本人の体格の変化もめざましく、世代間で画然たる差を生じめていることから考えて、納得できなくもない。

さて、本レビュー特集の日本の送電技術の歴史を一瞥してみよう。明治11年(1878年)、電池50個を用いてアーク炉を点じたのが、日本最初の点灯で、英人の手によった。配電営業が行われたのが明治20年で、ニューヨークとロンドンに遅れることわずか5年である。その後続々、神戸、京都、大阪、熊本、名古屋、横浜に電灯がともった。これらは全て直流配電であった。交流配電は初め火力発電により浅草で明治28年、大阪で明治30年、それぞれ50Hz、60Hzで行われた。その後、水力も発達し、明治32年に10,000V、明治40年に55,000Vにより、比較

的長距離の送電が行われた。

しかし大電力網と呼ぶべきものの発端はなんとといっても大正4年(1914年)に完成した猪苗代水力発電所をベースに東京へ220km、115kVの電圧で37,500kWの送電が行われたことである。アメリカ、ドイツについて世界第3位の送電線であった。

戦後、日本経済の復興期から高度成長期にかけて、その背景となる電力の需要増大に対応して、昭和27年(1952年)に275kV送電、昭和48年に500kV送電が開始され、送電線は超高压時代に入った。このような送電電圧の劇的な変化に伴って、送電網はおどろくほど複雑になってきたが、その運転を可能ならしめたのは、ハード・ウェアおよびソフト・ウェアの大きな技術革新が行われたからである。エネルギー規模においてマイクロ・エボリューションは時代の要請であった。

高度経済成長期の終焉に伴って、電力需要の飛躍的増大のない時代での送配電分野での技術開発はいかなるものか熟慮し、構築していかなければならないが、今後の時代の要請はマイクロ・エボリューションではないだろうか。日本人が縄文人からマイクロ・エボリューションの繰返しで成長してきたように、送配電網もマイクロ・エボリューションの積重ねにより、一層信頼性と効率の高いものに仕上げていく必要がある。そういう意味で本特集のサブタイトルの意義があると思われる。と同時に、今後ともマイクロ・エボリューションの対象は何であるかを追求して欲しい。 ●

R