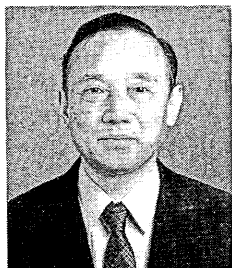


退官記念講演



電力系統における絶縁信頼性向上の追求

Improvement of Insulation Reliability in Electric Power Systems

河村 達雄*
Tatsuo KAWAMURA

UDC 621.315.6 : 621.3.027.3/.8

近年、電力需要の増大に伴って、送電電圧は増大し、近い将来わが国においては、UHV送電が実現される見通しとなっている。これとともに、送電容量も増加の一途をたどっている。このような電力系統においては、絶縁信頼性を向上させることが社会の強い要請となっている。絶縁信頼性の評価に当っては、絶縁上問題となる雷、汚損などの自然条件のほかに、雷、開閉サージのような過渡的に発生する過電圧に関する知見、絶縁物のフラッシュオーバーに関する研究成果や最新の解析技術などが必要とされる。この分野における諸問題と今後の展望について考えてみたい。

1. はじめに

電力系統における絶縁信頼性の評価を行うためには、フラッシュオーバー現象の原因となる自然雷やがし汚損に関連した気象条件などについての研究を進めるとともに、雷や開閉サージなどによって発生する電力回路の過渡現象についての詳細な解析や資料の収集を必要とする。これとともに、電力系統における各種の絶縁物や機器のフラッシュオーバー現象ならびに絶縁強度に関する新しい知見に基づいた解析結果を総合することによって、絶縁信頼性の評価とその向上が可能となる。さらに、高電圧現象を把握するためには、高電圧に関連した測定法や測定精度の向上についても研究を進めることが必要となる。

本文においては、この目的のために筆者の研究グループによって行われた研究とその成果、さらに、これらの課題に関する将来の展望について述べる。

2. 絶縁設計に関連する自然雷の研究

電力系統における絶縁設計の合理化をはかるためには、自然雷についての研究を進めるとともに、設計に必要な自然雷のパラメータに関する資料の収集が必要となる。^{1),2)}

自然雷研究の初期においては、雷放電カウンタを利用して、対地雷放電密度をもとめ、これを従来この目的に利用されていた雷雨日数 (Isokeraunic Level, IKL) と比較検討するとともに、その結果を耐雷設計に利用するための研究を行った。この研究は、国際大電力システム会議 (CIGRE) の計画に対応することも、その目的の一つであった。³⁾

*東京大学名誉教授

雷放電カウンタの回路構成は、初期においては、図1に示す冷陰極放電管が、また後にはトランジスタ回路が用いられた。これと水平アンテナ（後には垂直アンテナも使用された）とを組み合わせ、雷放電度数に関する総合特性の検討を行ったのがわが国での研究の最初であり、これが契機となって、その後全国にわたり、約150箇所の測定点において実測が行われ、約10年間にわたる観測結果によって、全国の対地雷放電度数についての取りまとめがされている。この結果は、諸外国における観測結果と比較検討され、対地雷放電度数に関する国際的な取りまとめに貢献した。^{4),5)}

自然雷放電に伴って発生する電界ならびに磁界を観測し、その結果を解析することによって、雷放電の微細構造を解明する研究も、その後行われた主要な研究課題であった。この研究の成果は、特に、最近性状の特異性により注目されている日本海沿岸地域における冬季雷の解明に威力を発揮し、従来未知であった新しい知見が得られており、国際的にも注目される結果となった。^{1),2),6),7)}

この目的のためには、周波数15MHzの測定システムが

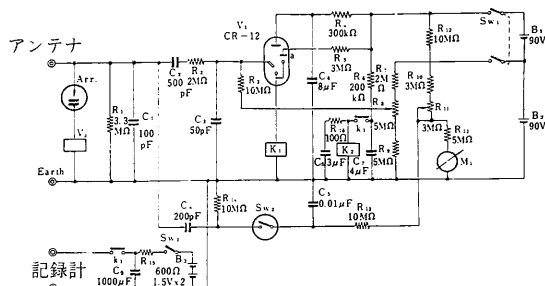


図1 雷放電カウンタ回路

実現されており、これによって、ステップトリーダや主放電に伴って発生する電磁界波形パラメータ、また、対地、雲間放電による波形の相違を明かにすることを目的として、研究を進めた。測定系のシステム構成は、図2に示すとおりであり、雷放電によって発生する電界および磁界を検出し、その結果から雷放電機構を明らかにすることを試みた。実測は、東京および新潟県白根および角海浜において行われたが、データはA/D変換装置とコンピュータによって自動的に収集、記憶されている。^{6),7)} 帰還雷撃に伴って発生する代表的な電界波形を図3に示す。

この研究の結果、正、負極性の帰還雷撃に伴う電磁界変化について信頼性の高いデータを提供したが、これらのデータによれば、正極性第1帰還雷撃による電磁界の立上り時間は負極性よりも長くなっている。また、正、負極性ともに、ファーストトランジションが存在し、その10-90%立上り時間の平均値は110ns程度である。さら

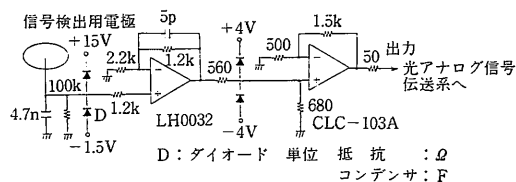


図2 15MHzファーストアンテナの回路構成

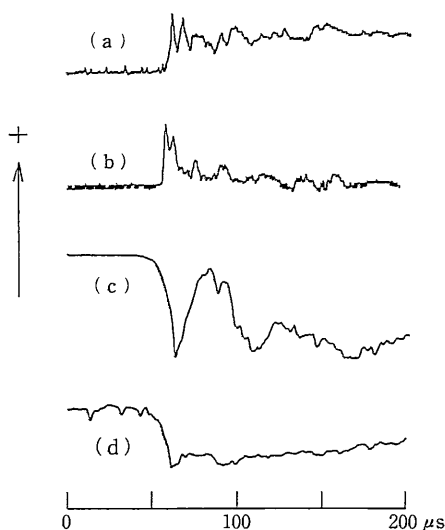


図3 代表的な帰還雷撃に伴う電界波形
(a) 負極性第1雷撃
(b) 負極性後続雷撃
(c) 正極性第1雷撃 (リーダパルスのない場合)
(d) 同上 (リーダパルスのある場合)

に、正極性の第1帰還雷撃については、リーダの進展に伴うパルス状の変化が認められないものの割合が70%以上もあり、正極性のリーダは負極性と異なって、連続進展する場合もかなりあることを示した。また、電磁界変化波形における各種の波形パラメータについて詳細なデータを提供しているが、これらは、落雷位置標定システム (LLS) の評価に役立っている。

落雷によって発生する磁界を利用した落雷位置標定システムを利用して、落雷の位置をもとめるための研究は、昭和57年から開始され、現在に至っている。この測定システムは、図4に示すように、落雷に伴って発生する水平磁界を利用して、落雷点の方位を測定するための3箇所に設置された装置 (DF) と、これらの装置によって得られたデータを1地点に伝送し、ここで落雷点を解析する装置 (PA) から成っている。現在、研究室のDFは新潟県の白根、柏崎、羽茂の3地点に設置され、データの収集がはかられている。^{8),9)}

この研究の結果、夏、冬季における落雷の特徴が明らかにされている。対地落雷のうち、このシステムで捕捉されたものの割合をもとめた結果、夏季の負極性および正極性の落雷については、それぞれ76および69%であり、また、冬季においては、それぞれ48および39%であった。すなわち、冬季の雷については、このシステムにより捕捉率が著しく低下することが明らかになっている。これは、LLSにおいて、対地雷撃と判定するための電磁界変化波形の波形パラメータが夏、冬季で異なるためであって、適切な波形パラメータを設定することによって、捕捉もれの割合を正負とも20%以下に減少させることが可能と考えている。

落雷位置標定システムによって得られた磁界信号強度に、伝送線路モデルを適用して、雷撃電流波高値を推定することが可能となる。推定された負極性第1雷撃の電流波高値の分布を図5に示すが、この結果は、Berger (スイス)、Garbagnati (イタリア) による直接測定によって得られた電流分布ときわめてよく一致することが明らか

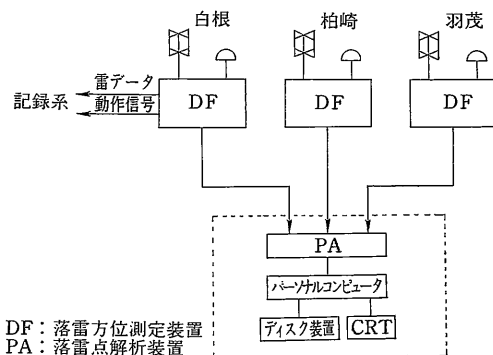


図4 落雷位置標定システムのシステム構成

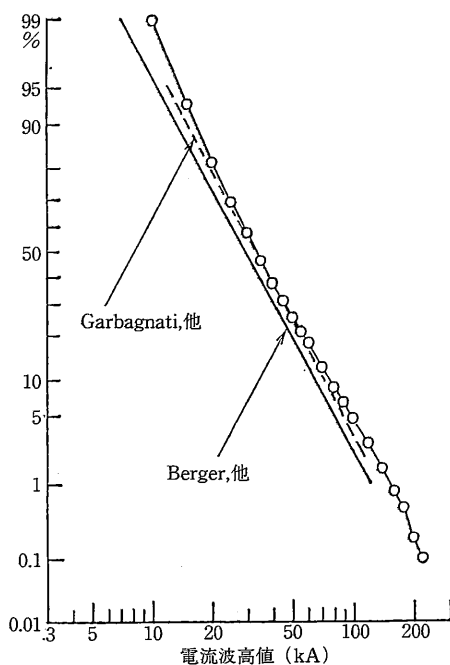


図5 負極性第1雷撃の電流波高値の累積頻度分布

にされている。

現在わが国においては、ほぼ全国的規模で落雷位置標定に関する観測が行われており、得られた観測結果について活発な討議が進められている。今後は、得られたデータの解析によって、自然雷や雷災防止に役立つ新しい知見が得られることを期待するとともに、全国にわたる、有機的なネットワークの構築により広域の情報の集積が特に要望される。

3. 放電現象とその機構

電力系統における絶縁信頼性に関する検討を行うためには、現象の基礎として、放電現象とその機構についての研究が必要とされる。この課題に関して行った主な研究とその成果について述べる。

不平等電界を有する気中放電ギャップにおいて、開閉インパルス電圧印加のもとでのフラッシュオーバー電圧特性を解明するために、その放電機構に関する研究が国内外において集中的に行われた時期があった。この目的のために、フラッシュオーバー直前の空間電荷分布とその時間的推移に関する研究を行った。¹⁰⁾棒—平板電極に静電プローブを設置し、電界、電荷量の測定を行い、これらを印加電圧とともに、光学的伝送線路を経てデータの収集を行った。さらに、放電の光学的測定結果とあわせて、解析を行った。この結果、ストリーマの線電荷密度は、先端で160pC/cm、高電圧電極に近づくにつれて増加し、

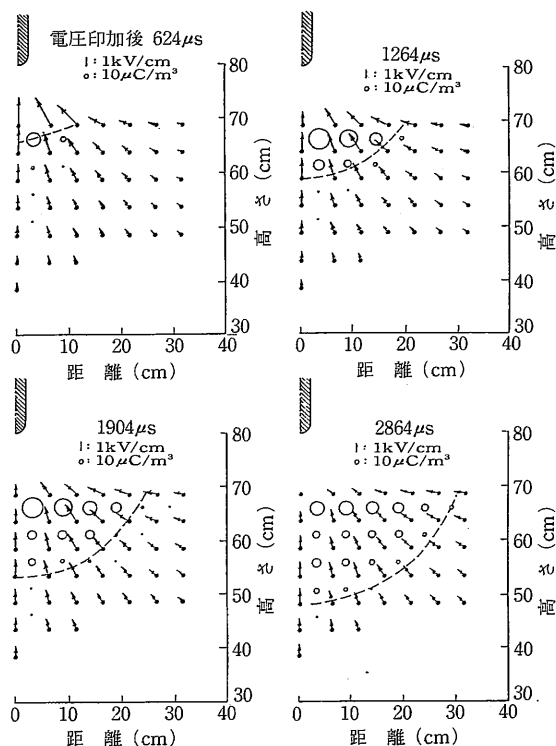


図6 電界の測定値および空間電荷密度の計算値の時間変化

400—500pC/cm程度となることが明らかにされている。

放電ギャップの空間における電荷分布をもとめるために、ポッケルスプローブを用いて、これを通する光の偏波面の回転角の変化から電界をもとめる方式を開発し、ギャップ長80cmの棒—平板ギャップに、250/4,000μsの開閉インパルス電圧を印加した際の、放電ギャップ間の39点における電界の時間的変化をもとめ、この結果からギャップ間における空間電荷の時間的変化について解析を行った。その結果の例を図6に示す。開閉インパルス電圧印加後の時間の経過とともに、空間電荷の進展する様相が、この図から明らかに知ることができる。¹¹⁾

気中放電ギャップにおいて、電極表面あるいは、空間にジャイアントパルスレーザから発する強力なレーザ光を集光させ、放電のトリガを実現することにより、多数の放電ギャップの高速度の同期、急しゅんな波頭を有するインパルス電圧の発生が実現できる。^{12),13)}最近では、同様の方式を利用した誘雷の研究が注目を浴びている。

金属電極にレーザ光を照射した場合に、照射によって生ずる金属表面の温度上昇を解析し、この結果から金属蒸気の噴出に必要なレーザ光パワーのしきい値を計算したところ、実測値ときわめてよく一致する結果を与えている。^{12),14)}また、このようにして実現できる放電のトリガ特性として、トリガ放電の遅れ時間および放電スイッチ

の立上り時間をもとめた結果、従来この目的のために広く利用されている有孔球ギャップと比較して、きわめてよい性能が実現できることが明らかにされている。^{12),15)}

電力系統において絶縁の目的に広く利用されるがいしの表面には台風などによって塩分が付着し、これが原因となってフラッシュオーバー電圧が低下する。この現象は塩害と呼ばれ、四面海に囲まれたわが国の電力系統の絶縁設計上きわめて重要な課題となっている。

汚損がいしのフラッシュオーバー現象は、汚損物の付着とがいし表面の湿潤の二つの要因が重なって発生すると考えられる。この現象に関する基礎的検討を行うために、モデルとしてガラス板を用い、食塩およびこのでガラス表面を汚損させて、周囲の大気相対湿度を変化させた際に生ずる汚損面への吸湿の密度をもとめた結果、相対湿度75%を境として、汚損面への吸湿が生じ、フラッシュオーバー電圧が低下することを実験的に明らかにした。これと並行して、汚損面への吸湿の機構について理論的解析を行って、吸湿速度、飽和吸湿密度を算出し、上記実験結果と照合を行った結果、きわめてよく一致する結果を得ている。¹⁶⁾

がいし汚損面の吸湿現象は、気象因子および汚損物構成要素によって影響を受ける。すなわち、がいし表面温度が周囲の気温と比較して低い場合、また、汚損物として、塩化マグネシウムなどが混在する場合には、吸湿開始の相対湿度が低下する(図7)。汚損面の吸湿現象は、従来あまりよく知られていなかった現象であり、この研究の成果に対して、電気学会より昭和51年論文賞を受賞している。¹⁷⁾

汚損物に印加された電圧によって発生する部分アークの解析も放電機構上きわめて重要な研究課題となる。この目的のために、図8に示す干渉法によって実験を行った結果、部分アークの温度分布が明らかにされている。

直流電圧印加時の汚損がいしの絶縁性能向上をはかるために、温度、湿度などの周囲の気象条件を変化させた場合のフラッシュオーバー特性をもとめ、実験結果について種々の面からの解析を加えるとともに、絶縁設計上有効な資料を得ることができた。^{18)~20)}

その他の汚損がいしに関する研究として、人工汚損試験によって得られた耐電圧の信頼度について検討を行ったが、この結果は、後に述べる統計的手法による耐汚損絶縁設計に有効に利用できる資料を提供するものであった。²¹⁾

4. 高電圧の測定

近年電力需要の増大に伴って、送電電圧は増大の一途をたどっており、電圧階級の高い電力系統においては、特に高度の絶縁信頼性が要求されている。一方試験電圧の増大や高電圧試験の多様化のため、高電圧試験結果の

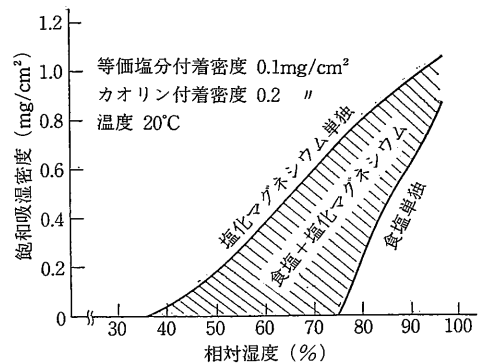


図7 飽和吸湿密度の湿度依存性

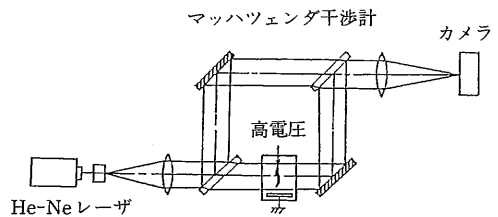


図8 干渉法による部分アーク測定システム

信頼性やその基礎としての高電圧測定の精度向上のためには、新しい技術開発が必要となって来る。このため、国内はもとより、国際的にも国際大電力システム会議(CIGRE)や国際電気標準会議(IEC)において、活発な討議が行われている。

インパルス電圧の測定精度向上は、この中でも新しい技術開発を最も必要とする課題であって、測定用分圧器の開発や測定系の解析等が世界各国において活発に研究され、その成果は多くの学術雑誌や国際会議などで数多く発表されている。^{22),23)}

このような状況から、筆者は、所外の専門の人達との協同によって、インパルス電圧測定用分圧器の抵抗体を絶縁油中に設けることによって、その寸法を縮小化し、これによって応答時間を改善する方法について研究を行い、図9に示す抵抗分圧器を実現した。これは、当時世界で最高級の性能を有するものであった。²⁴⁾この研究に対して、昭和46年電気学会進歩賞を受賞した。

インパルス電圧測定用分圧器が大形化すると、分圧器を校正する際に測定用リード線の影響により、応答時間が変化する。このため、測定される分圧器の応答時間には、リード線の影響を考えて補正する必要がある。一般的な測定系について解析を行い、校正のための標準回路と校正法を明らかにしたが、²⁵⁾この研究成果は、高電圧測定に関する国際電気標準会議(IEC)規格および電気学会

電気規格調査会 (JEC) 標準規格に採用される結果となった。また、この研究に対して、昭和46年米国電気電子学会 (IEEE) 論文賞を受賞した。

この時期における高電圧測定は、応答時間を中心として検討が行われていたが、今後は、高電圧の比較試験を大幅に取り入れた測定精度の確保および高電圧実験室の認証のためのシステムを確立する必要がある。

オプトエレクトロニクス技術は、光とエレクトロニクスとの有機的な結合により従来ほかの方法ではできなかった機能を実現することが可能であるが、高電圧・大電流技術へこれを適用することによって、従来不可能であった機能を果たすことも可能となる。^{12), 26)}

この課題に関して、いくつかの研究を行ったが、最も成功した例として、光学式分圧器があげられる。²⁷⁾この構成は、図10に示すように、分圧器抵抗の頂部に発光ダイオードと抵抗、コンデンサより成る補償回路を設けたもので、発光ダイオードに流れるインパルス電流に比例した光を光ファイバを利用して接地側に導びき、ここで光-電気信号の変換を行い、オシロスコープなどで測定するものである。この方式によれば、高電位点と接地側とを電氣的に無接触の状態で測定することが可能であり、かつ、nsの桁の応答時間を実現することも可能となる。

この外に開発を行った例として、光学式変流器、汚損がいしの分担電圧の測定などがあげられる。²⁸⁾

高電圧技術へのオプトエレクトロニクスの適用は、高電圧測定や電力用機器において、絶縁に関連する難点を解決でき、かつ性能も非常に良好であるために、その後急速に適用の拡大が実現し、現在では一般的な技術として広汎に利用されているが、当時はその初期の段階で、その結果は国内外においてかなりの注目を浴び、電気学会からは、この成果に対して、昭和48年進歩賞を受賞することとなった。

デジタル計測システムは、オシロスコープ等を用いるアナログ計測システムと比較すると多くの利点を有する。自動計測、プリトリガ機能、短いサンプル時間間隔による長時間の現象観測、測定系の応答を考慮した誤差の補正、読み取り誤差の除去などは、アナログ計測では得られない利点であり、このために、デジタル計測システムは、高電圧試験において、ますます広く利用されるようになって来ている。

しかし一方では、測定誤差の解析や測定精度向上の方策については、研究がきわめて少いことに着目して、この解析の研究を進めることを計画した。

アナログデータをデジタル量に変換する目的に使用するディジタル化の有効ビット数が被測定波形の傾き以外にディジタル・コードによって変化することを明らかにし、有効ビット数の評価手法を確立した。^{28), 29)}さらに、図11, 12に示すように、雷インパルス電圧の波高値およ

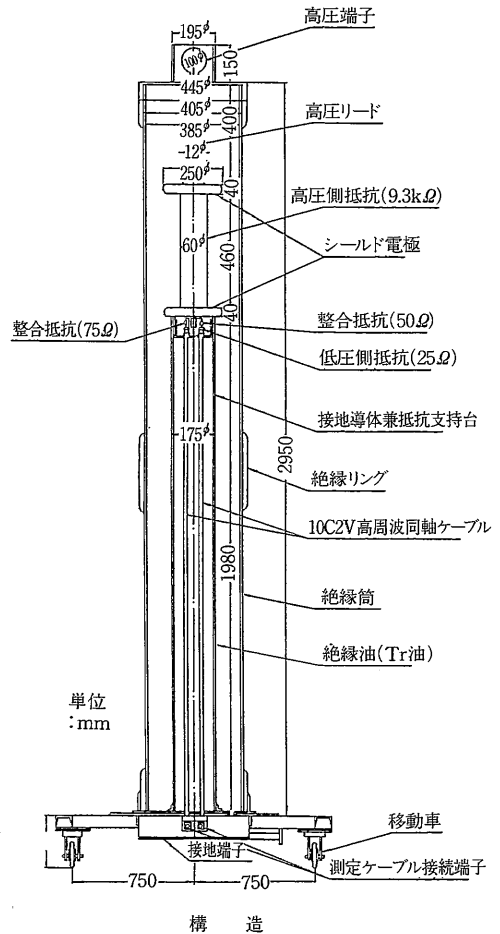


図9 1,000kV超高性能インパルス電圧測定用分圧器

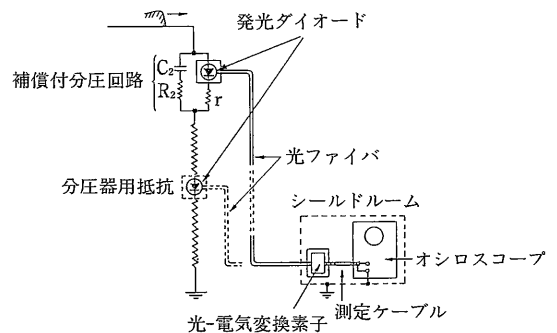


図10 オプトエレクトロニクス利用の分圧器

び規約波頭長に関する測定誤差とサンプル時間間隔、垂直軸分解能との関係を明らかにするとともに、測定誤差を与えた際にサンプル時間間隔、垂直軸分解能に要求される性能を明らかにした。

この結果は、当時検討が進められていたデジタル測

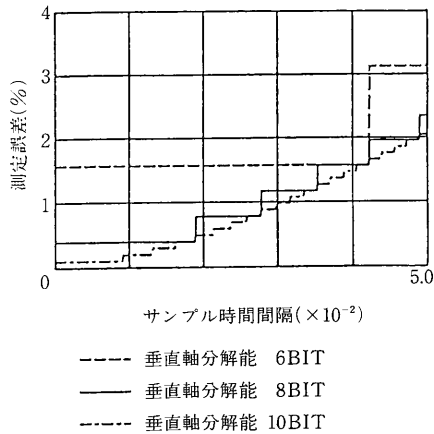


図11 雷インパルス波形の波高値の測定精度

定に関するIEC規格草案に対して提案されたが、今後わが国において予想される標準化にも有力な貢献をなし得るものと期待している。

5. 電力系統の絶縁信頼性向上

電力系統において絶縁信頼性の向上に関する研究は、絶縁設計上最も重要な課題であることは言うまでもない。近年、電力系統における過電圧や自然条件における統計量に着目し、これらの統計量に基づくフラッシュオーバー事故発生確率を算定し、これによって電力系統の絶縁の信頼度やその向上のための方策を考慮する統計的手法が注目を浴びている。この手法については、国内では筆者が中心となって昭和39年に電気学会に設立されたSDグループ (Statistical Design Group) によって、組織的研究が始められ、その後発展的に今日まで調査研究がされている。

このグループにおいては、雷、開閉サージ、汚損条件下における絶縁設計について、統計的手法を利用した解析法について研究を行って来た。この手法の例として、500kV変電所に接続される送電線に落雷が発生し、雷サージが変電所に侵入する際の変電所の各点における電位上昇をモンテカルロ法を利用して解析した結果を示す。³⁰⁾この解析は、図13のモデル系統に示すように、500kV変電所に接続された送電線に逆フラッシュオーバーによって発生した雷サージによる変電所各点における電位上昇を解析するものである。この計算の結果、960年間における8,350の雷撃に対して、変圧器点における電圧に及ぼす各種パラメータの影響を示した結果を図14に示す。

汚損条件下における絶縁信頼度の解析の例として、汚損がいのフラッシュオーバー現象と気象条件との関連をモデル化し、時々刻々の気象条件の変化に対するがいの

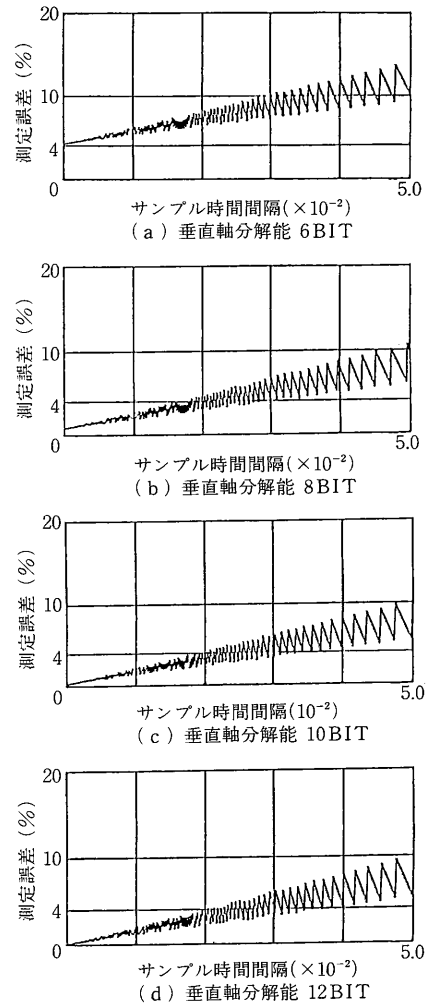


図12 雷インパルス電圧の規約波頭長の測定精度

- (a) 垂直軸分解能 6 BIT
- (b) 垂直軸分解能 8 BIT
- (c) 垂直軸分解能 10BIT
- (d) 垂直軸分解能 12BIT

フラッシュオーバー確率(P)の時間変化を算定した結果を図15に示す。この結果とあわせて、がいのフラッシュオーバー記録(F.O.)と最低フラッシュオーバー電圧(U)とを示してある。フラッシュオーバー確率の変化は、フラッシュオーバー記録ときわめてよい対応を示している。なお、この図には、電圧を10%低減した場合の確率値もあわせて示してある。この結果から、台風の襲来時などの汚損条件のもとにおける電力系統の絶縁信頼性を評価することが可能と考えられる。^{31),32)}

自然雷、汚損とともに、電力系統における絶縁設計上取り上げるべき重要な課題として、開閉サージがあげられる。電力系統における開閉サージ電圧の解析には、ディ

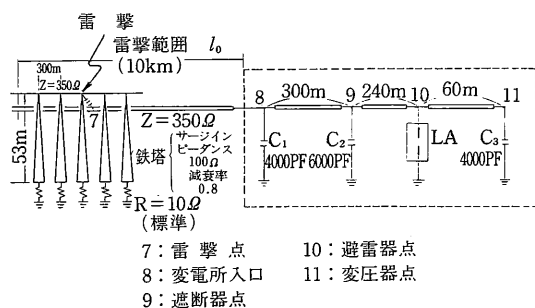


図13 500kVモデル変電所系統

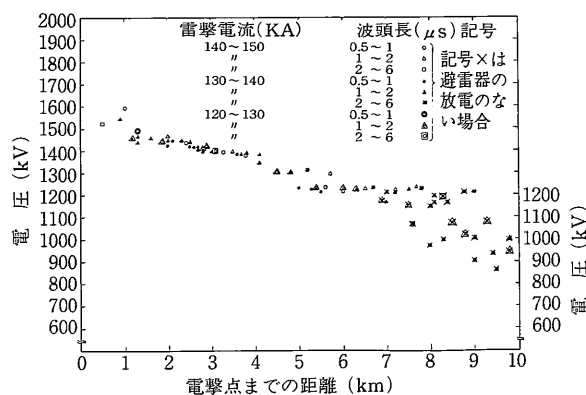


図14 雷撃のパラメータと変圧器点電圧との関係

デジタル計算による方法と、過渡現象解析装置(TNA)によるアナログシミュレーションによる方法があるが、前者の方法によって、発生電圧の統計的解析を行うためには、計算時間の制約のために、計算のステップ幅をある値以下にすることは、不可能であり、デジタル計算の長所は失われる恐れがある。このため、TNAを使用して、その制御やデータ処理にはデジタル計算機を用いたハイブリッド計算システムを開発し、研究を行った。このシステムの構成を図16に示す。

このシステムを利用して、対地ならびに相間開閉サージ電圧の波高値、波形に関する各種パラメータの統計、開閉サージによる送電線のフラッシュオーバー確率の評価などを行い、従来未知であった新しい知見を得ることができた。^{33)~35)}

最近高性能酸化亜鉛形避雷器の電力系統への適用により保護レベルの低減が実現でき、さらに、EMTP(Electromagnetic Transients Program)などの新しい過渡現象解析プログラムの進歩、電力回路や長ギャップ放電に関するモデル化に関する研究成果を利用して、電力系統におけるサージ電圧について信頼できる知見が得られて来ている。

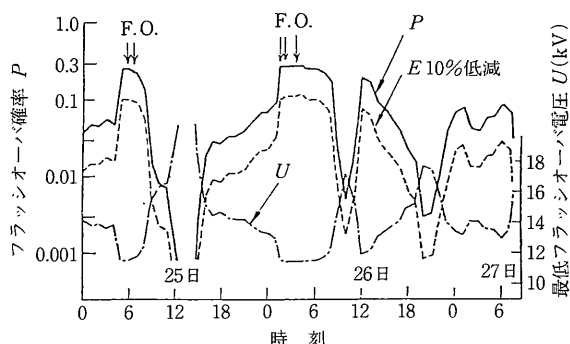


図15 確率値と最低フラッシュオーバー電圧の計算結果

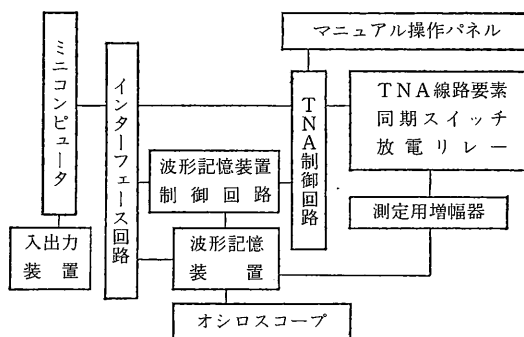


図16 ハイブリッド計算システムの構成図

送電線鉄塔のモデルについては、500kV送電線の雷サージ試験や鉄塔モデルに関する解析に基づいて、送電線鉄塔についての4段モデルが提案され、³⁶⁾また、図17に示す送電線の多相回路模擬により、³⁷⁾変電所に接続された送電線の逆フラッシュオーバーによって、変電所に侵入する雷サージ電圧が低減されることが明らかにされている。

これらの研究成果を取り入れて、現在電気学会試験電圧標準特別委員会において、電力系統における絶縁レベルの検討と、試験電圧低減についての検討が進められている。³⁸⁾この結果、絶縁信頼性を損うことなく、絶縁レベルを低減できる見通しが得られており、その結果の規格、標準化を実現することは、将来の電力系統の絶縁問題に大きな影響を与えるものと期待される。

送電線および変電所における絶縁信頼性に関する研究と比較して、配電線における絶縁については、未知の問題が数多く残されている。配電線においては絶縁レベルが低いために、直撃雷のみならず誘導雷が重要な問題となる。したがって、誘導雷によって配電線路に発生するサージ電圧を解析し、その結果に基づいて、送電線、変電所と同様に、絶縁設計の合理化を実現するための研究が、今後この分野における重要な課題となるものと考え

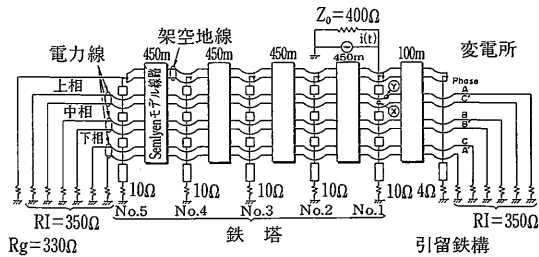


図17 雷サージ解析用多相回路

られる。

従来、誘導雷の解析に当っては、大地を完全導体と仮定した計算が主としてされて来たが、比較的遠方の雷撃に伴って発生する配電線誘導雷電圧についての最近の観測結果から、有限な大地導電率に起因して発生する大地に水平な電界が誘導電圧に重要な役割を果たすことが指摘されている。

この点に着目して、筆者らは、雷放電路を双極子に分割し、各双極子から放射される電界波形をNorton解から求め、これを放電路に沿って積分することによって電界を求める手法を開発した。さらに、配電線における誘導雷電圧を計算する際の、誘導源の電界と線路との結合を適切に表現する等価回路を電磁界に関する境界条件を考慮して導出した。これとともに、水平電界の実測を行うためのセンサを開発し、垂直ならびに水平電界の同時計測を行い、理論結果との比較検討を行い、理論の妥当性の検証を行った。^{39)~41)}

この解析に使用した配電線は、単純な線路であるが、今後これを実際の配電線の構成に拡張し、従来は未知であった誘導雷サージに関する知見を明らかにするとともに、この成果に基づいて、配電線路の絶縁設計の合理化が実現できることを大いに期待している。

6. 電力用機器の信頼性向上

電気エネルギーは、他のエネルギーと比較して、高度の可制御性などすぐれた特長があるために、今後電気エネルギーが他のエネルギーと比較して占める割合は大きく、社会システムを維持するためのエネルギー供給源としての電気エネルギーの果たす役割は大きいものがある。電気エネルギーの輸送システムにおいて、変電技術はきわめて重要な問題であり、その中心となる電力用機器の信頼性向上をはかることはきわめて重要な課題となる。

電力用機器の主体としては、まず変圧器があげられるが、最近では、これとともに、開閉装置特にガス絶縁開閉装置 (GIS) の大容量化、経済性の向上、信頼性の向上を柱とした研究、開発の推進が盛んに行われている。わが国のガス絶縁開閉装置の普及は目ざましく、実用化以

来短期間で適用の拡大がはかられ、使用電圧も数十kVから500kVにわたり、大容量化とともに高電圧化、縮小化、三相一括化が進み、将来のUHV変電所にもガス絶縁開閉装置の適用が計画されている。筆者は、わが国における高信頼性を有し、コンパクト化されたガス絶縁開閉装置の開発、適用ならびに標準化などに主導的な役割を果たし^{38), 42)~44)}これにより、昭和59年電気学会進歩賞を受賞したが、最近ではGISにおける急しゅん波サージに関する研究を進めている。

近年ガス絶縁開閉装置の断路器の開閉動作に伴って発生する急しゅん波サージが世界的に注目を浴びている。これは、GISのガス中に金属異物などの混入などがあると、短い時間領域において、低い電圧でフラッシュオーバーが発生することが指摘されているため、この現象の解明やその結果を、絶縁信頼性や試験電圧の観点から検討することがきわめて重要な課題となるためである。

断路器サージの波形の例を図18に示す。⁴⁵⁾これは、10種類の550kV GISにおける111種の回路条件について、断路器サージ倍数、周波数の分布を計算した結果である。断路器サージの周波数は8MHz程度までであり、さらに高い周波数成分がこれに重畳している。電圧のレベルは、複合形ガス絶縁開閉装置では最大3.3puが認められている。

この現象を明らかにし、GISの絶縁信頼性の検討と絶縁設計上の資料を取得する目的で、図19に示すガス絶縁試験装置を試作した。サージ発生部において発生させた急しゅん波サージ電圧を接続部を経て、球—平面ギャップに印加した。金属異物として、長さ10cmで、直径が異なる2種類の針を平板側に設置した。印加電圧として、1.8MHzおよび10.7MHzの2種類の周波数を持つ振動性インパルス電圧に加えて、波頭長が1.5μs, 20μsの2種類の単一インパルス電圧を使用した。この現象を観測するために、電圧、電流、放電光などをそれぞれ現象が十分把握できる周波数特性を持つ測定システムによって測定を行った。^{46)~48)}

この実験の結果、前駆放電現象は、負極性の場合と正極性のガス圧の低い場合には、ストリーマ性のフラッシュオーバーであり、正極性でガス圧が高い場合には、リーダ進展によるフラッシュオーバーと考えられる。この前駆放電現象は、コロナの発生による空間電荷作用によって大きく影響を受け、また、印加電圧の立ち上がり時間の相違によりコロナ安定化作用が違うことが明らかになっている。

振動周波数1.8MHzの振動性インパルス電圧と立ち上がり時間が1.5μs, 20μsの単一インパルス電圧によるフラッシュオーバー電圧との間には、あまり大きい相違はなかったが、振動周波数10.7MHzの振動性インパルス電圧では、フラッシュオーバー電圧が低くなることが明らかにされている。

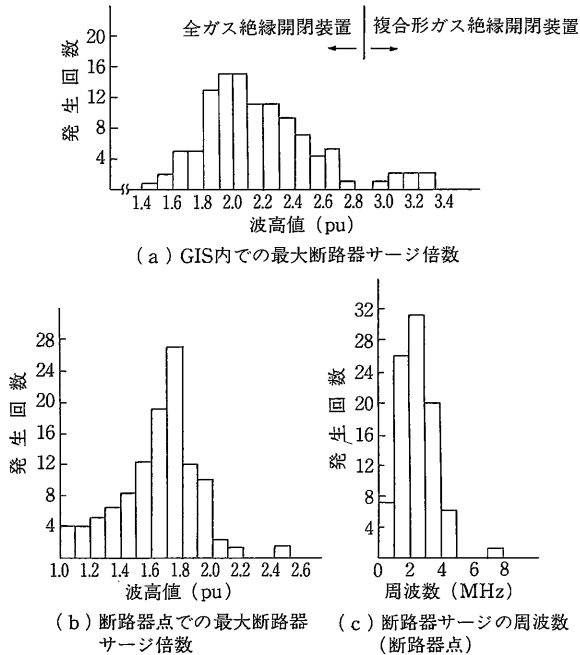


図18 急しゅん波サージ倍数、周波数の分布計算例

今後、さらに詳細な検討を行って、ガス絶縁変電所における絶縁設計のなお一層の合理化と絶縁信頼性向上が実現できることを期待している。

7. む す び

生産技術研究所における32年間の研究生活を終え、停年退官に当り、電力系統における絶縁信頼性向上を求めて行って来たこれまでの研究の展開について述べた。これらの研究成果に対して、電気学会電力賞受賞、IEEE Fellowの光栄に浴したが、今後エネルギーの供給上、電気エネルギーの占める割合はますます大きくなるものと考えられ、高い信頼性をもった安定なエネルギー輸送システムを求めるための研究開発は今後も引き続き推進する必要があると考えられる。その意味で、本文がこのために参考となる点があれば誠に幸いと考えている。

終りに、長い間、一緒に議論し、ご協力をいただいた石井 勝助教授、北條準一助手をはじめ研究室の諸氏、所内外にあって、各方面でご指導、ご援助をいただいた方々に厚く御礼を申し上げる。(1991年5月20日受理)

参 考 文 献

- 1) 河村：雷研究における最近の進展と課題、特集：雷放電と耐雷技術、電気学会雑誌、111-B, 1, 1, 1991.
- 2) 河村、石井：雷を捕える一最近の雷観測技術とその成果、小特集：雷一その発生・観測・災害防止に関する最近の話題、同上、110, 1, 4, 1990.

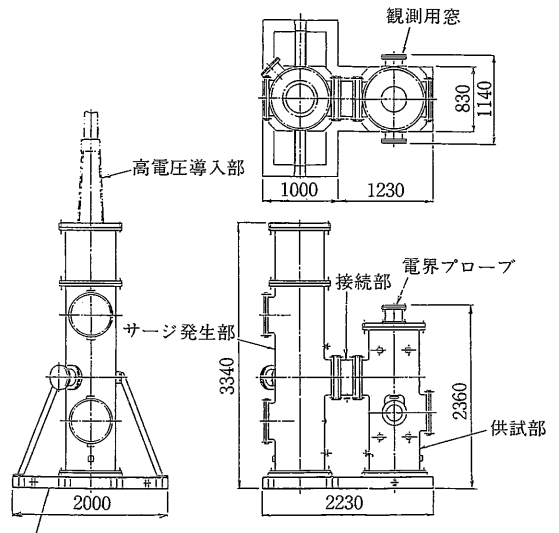


図19 ガス絶縁試験装置の構成

- 3) 河村：雷放電カウンタによる大地放電数の比較測定、同上、84, 9, 1303, 1964.
- 4) J. Hojo, T. Kawamura, M. Ishii and T. Iwaizumi: Development of Vertical Antenna Type Lightning Flash Counter and its Sensitivity Adjustment at Site, Trans. IEE of Japan, 101-E, 11/12, 95, 1981.
- 5) S. Fujitaka, T. Kawamura and S. Tsurumi: Investigation on Results of the Observation using the Pierce-Golde Type Lightning Flash Counter in Japan, Planetary Electronics, 2, 19, Gordon and Breach Publishers, 1969.
- 6) J. Hojo, M. Ishii, T. Kawamura, F. Suzuki and R. Funayama: The Fine Structure in the Field Change Produced by Positive Ground Strokes, J. Geophys. Res., 90, D4, 6139, 1985.
- 7) J. Hojo, M. Ishii, T. Kawamura, F. Suzuki, H. Komuro and M. Shiogama: Seasonal Variation of Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics in the Coastal Area of the Sea of Japan, ibid., 94, D11, 13207, 1989.
- 8) 北條、石井、河村、鈴木、小室、塩釜：落雷に伴う電磁界変化波形の特性と評価法、電気学会論文誌、108-B, 4, 165, 1988.
- 9) T. Kawamura, M. Ishii and Y. Miyake: Site Errors of a Magnetic Direction Finder for Lightning Flashes, Proc. of the 1988 Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, 487, 1988, 4.
- 10) 河村、石井、松本：空中ギャップの空間電荷分布に関する研究、電気学会放電研究会資料、ED-79-60, 1979, 11.
- 11) T. Kawamura, T. Matsumoto, M. Ishii and T. Hisada: Evaluation of Space-Charge Behaviour in Long Airgap Using Pockels' Cells, IEE Proceedings,

- 133, Pt. A, 8, 573, 1986.
- 12) 河村：光ファイバの電力技術への応用—工業計測・制御への応用例，システムと制御，**24**，1, 21, 1980.
 - 13) T. Kawamura, J. Hojo, K. Morita and Y. Maruyama: Breakdown of Air Gaps Irradiated by a Giant Pulse Laser, Proc. of the U.S.-Japan Seminar on Gas Breakdown and its Fundamental Processes, Japan Soc. for the Promotion of Science, 1973.
 - 14) 河村，池田：レーザ光照射による金属蒸気噴出のしきい値の検討；昭和49年電気学会全国大会講演論文集，**82**，1974，3.
 - 15) 河村，丸山：レーザトリガギャップと有孔球ギャップとのトリガ特性の比較，昭和46年電気学会東京支部大会講演論文集，**8**，1971，11.
 - 16) 河村，伊坂：がいし汚損面の吸湿密度—漏れ電流およびフラッシュオーバー電圧の湿度依存性，電気学会論文誌，**93-B**，9，426，1973.
 - 17) 河村，伊坂：がいし汚損面の吸湿現象に影響を及ぼす要因の解析，同上，**94-B**，11，575，1974.
 - 18) T. Kawamura, M. Ishii, M. Akbar and K. Nagai: A Thyristor-Controlled HVDC Source for Contamination Studies, IEEE Trans. Electrical Insulation, **E1-21**，1，53，1986.
 - 19) M. Ishii, M. Akbar and T. Kawamura: Effect of Ambient Temperature on the Performance of Contaminated de Insulators, *ibid.*, **E1-19**，2，129，1984.
 - 20) M. Ishii, T. Kawamura, M. Akbar and K. Nagai: Pressure Dependence of DC Breakdown of Contaminated Insulators, *ibid.*, **E1-17**，1，39，1982.
 - 21) 石井，松本，河村：人工汚損試験によるがいしの耐電圧の信頼度，電気学会論文誌，**102-B**，6，355，1982.
 - 22) 原田，河村，高橋：最近のインパルス電圧・電流測定技術の進歩，電気学会雑誌，**107**，4，285，1987.
 - 23) 原田，河村：急しゅん波衝撃電圧の発生と測定，同上，**91**，3，418，1971.
 - 24) T. Harada, T. Kawamura, Y. Akatsu, K. Kimura and T. Aizawa: Development of a High Quality Resistance Divider for Impulse Voltage Measurements, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, **PAS-90**，5，2247，1971.
 - 25) F.C. Creed, T. Kawamura and G. Newi: Step Response of Measuring Systems for High Impulse Voltages, *ibid.*, **11**，1408，1967.
 - 26) 河村：オプトエレクトロニクスの電力工学への応用，電気学会雑誌，**96**，9，785，1976.
 - 27) T. Harada, T. Kawamura, K. Kishi, Y. Aoshima, N. Ohira, K. Takigami and Y. Horiko: A High Quality Voltage Divider using Optoelectronics for Impulse Voltage Measurements, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, **PAS-91**，2，494，1972.
 - 28) 道下，河村，石井：デジタル計測の単発波形パラメータの測定精度，電気学会論文誌，**110-B**，8，662，1990.
 - 29) 道下，河村，石井：単発波形に対するデジタル計測の誤差評価，同上，**110-B**，9，761，1990.
 - 30) T. Kawamura, T. Kouno, S. Kojima, F. Numajiri, H. Mitani, K. Harasawa and H. Ishihara: Statistical Approach to the Insulation Co-ordination of Substations against Lightning Overvoltage, Group 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination) of the 1974 Session of CIGRE, 33-06, 1974. 8.
 - 31) T. Kawamura, T. Kouno, T. Seta, F. Numajiri and N. Momose: Statistical Estimation of Transmission Line Performance under Polluted Condition, Summer Power Meeting of the IEEE, 71 CP 650-PWR, 1971. 8.
 - 32) 河村，石井：自然条件下における汚損がいし温度差ならびにフラッシュオーバー確率の検討，電気学会論文誌，**96-B**，1，7，1976.
 - 33) 河村，西村：ハイブリッド手法による不ぞろい投入サージの検討，同上，**98-B**，3，227，1978.
 - 34) 河村，西村：ハイブリッド手法による相間開閉サージの検討，同上，**100-B**，6，361，1980.
 - 35) T. Kawamura, K. Nishimura: Distribution of Front Time of Switching Overvoltages, Their Influence on Line Flashover Probability, Proc. IEE, **126**，11，1175，1979.
 - 36) M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Shiokawa, K. Murotani and T. Higuchi: Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis, IEEE Power Engineering Society, 1989 Winter Meeting, New York, 89WM 103-3-PWRD, 1989. 1.
 - 37) J. Ozawa, E. Ohsaki, M. Ishii, S. Kojima, H. Ishihara, T. Kouno and T. Kawamura: Lightning Surge Analysis in a Multi-Conductor System for Substation Insulation Design, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, **PAS-104**，8，2244，1985.
 - 38) 絶縁設計の合理化，電気協同研究，**44**，3，1988. 12.
 - 39) M. Ishii, K. Michishita, J. Hojo, T. Kawamura, S. Oguma and S. Yamada: Correlated Measurement of Vertical Electric Field and Lightning Induced Voltage on a Test Distribution Line, Trans. IEE of Japan, **110-B**，4，368，1990.
 - 40) 道下，石井，北條，小松原，河村，小熊，本郷：対地雷撃に伴う水平電界波形，電気学会論文誌，**110-B**，11，986，1990.
 - 41) 道下，石井，河村：水平方向電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析法，同上，**111-B**，6，101，1991.
 - 42) T. Kawamura, M. Ishii, K. Satoh, Y. Hashimoto, K. Tokoro and Y. Harumoto: Operating Experience of Gas Insulated Switchgear (GIS) and its Influence on the Future Substation Design, Group 23 (Substations) Meeting of the 1982 Session of CIGRE, 23-04, 1982. 9.
 - 43) T. Kawamura, Y. Hashimoto, M. Muramoto and M. Kamiya: Extension and Renewal of an Existing Substation by Applying Gas Insulated Switchgears (GIS), *ibid.*, 23-06, 1984. 9.
 - 44) 河村：ガス絶縁電力機器の開発動向，小特集：ガス絶縁機器の最近の動向，電気学会雑誌，**106**，6，527，1986.
 - 45) 急しゅん波サージとGISの絶縁問題，電気学会技術報

- 告, (II部) 第324号, 1990. 2.
- 46) 河村, 西村, 李, 石井: 振動性急峻波インパルス電圧に対するSF₆ガスの絶縁破壊現象, 平成元年電気学会全国大会講演論文集, 1287, 1989. 4.
- 47) 河村, 李, 西村, 北山, 石井: 急しゅん波インパルス電圧に対するSF₆ガスの絶縁特性, 電気学会開閉保護装置研究会資料, SPD-89-29, 1989. 12.
- 48) 河村, 北山, 石井, 李: 振動性急しゅん波インパルス電圧に対するSF₆ガスの絶縁特性, 平成2年電気学会全国大会講演論文集, 1269, 1990. 3.