

電子科学研究科



0002515328 R

通信装置の雷サージ防護対策に関する研究

平成3年11月

桑原伸夫

静岡大学図書

概 要

通信線路の近傍に落雷が生じると通信線路端末に数千Vのサージ（雷サージ）が誘起され電話機等の通信装置に被害をおよぼすことがある。特に、近年、科学技術の進歩により、LSI等の半導体部品が多量に使用されるようになってきており、通信装置の雷サージ耐量が年々低下しているため、通信装置を雷サージから適切に防護するための研究は重要になってきている。

本論文は、(1)通信線路端末に現れる雷サージの観測とその誘起機構の理論解析、(2)通信装置の雷サージ試験法、(3)通信装置の雷サージ耐量設定法の三つのテーマに関して、雷防護に関する検討を行っている。

雷サージ観測では、雷サージカウンタ、雷波形自動記録装置、データレコーダ、光技術を用いた雷サージ観測システムを新たに開発して、線路条件、地域、季節と雷サージの関係や線路端末に生じる雷サージ分布を観測した。その結果、雷サージの線路条件に対する依存性は小さいこと、架空線路、地下線路とも同じ程度のレベルの雷サージが生じること、雷サージは主に大地に水平な電界成分により生じること等を明らかにできた。また雷サージ分布の観測から、雷サージ波高値の分布は指数分布で波頭長、波尾長の分布は対数正規分布で近似的に表されることがわかった。

雷サージ誘起機構の検討では、実際の線路構成に近い、地下線路と架空線路が混在した通信線路に対する誘起機構モデルを用いて加入者側端末と局内側端末に生じる雷サージを求める理論式を導いた。その理論式を用いて解析を行った結果、架空線路のケーブルシースが一定間隔で大地に接地されていることを考慮すると、雷観測から得られた、加入者側と局内側に発生する雷サージの違いを良く説明できることがわかった。また、この理論式を用いて雷サージの分布形を求め、雷観測値とほぼ一致することを示した。

通信装置の雷サージ試験法の研究では、試験を行った被試験装置の雷障害率を推定できる試験回路を求めた。

雷防護設計を行うには、まず、通信装置の雷サージに対する試験法を明確にし、その試験法に基づいて通信装置の試験を行い、その結果から防護回路設計を行うのが合理的である。そのため、サージ発生器とインピーダンスで構成される雷サージ試験器がCCITT

等の国際標準化機関から勧告され使用されているが、従来の試験器はそのサージ波形やインピーダンスの決定根拠が明確でなかったため、試験に合格しても、それが実際の環境下でどの程度の障害率を保障できるか不明であった。

本論文では、この問題を解決するため、通信線路端末に生じる雷サージを模擬する試験回路を検討した。通信線路端末に現れる雷サージは定電圧源と1つのインピーダンス（内部インピーダンス）から構成される等価回路で表すことができる。従って、この定電圧源と内部インピーダンスを求め試験回路を構成すれば、線路端末に生じる雷サージを模擬できる。本論文では、線路端末に生じる雷サージの理論式から内部インピーダンスを表す理論式を求め、この理論式と日本の平均的な線路条件から内部インピーダンスの具体的な値を決定する方法を明らかにしている。また、雷観測より求めた線路端末に生じる雷サージ波形の分布形から定電圧源波形の分布形を求める方法を明らかにしている。さらに、この分布形から、通信装置に印加される雷サージの発生頻度に応じた試験波形を決定する方法を示している。

実際に雷サージ試験回路を構成し、ボタン電話機を用いて試験を行った結果、この試験回路を用いて推定した障害率は実際の障害率の倍程度であった。このことは、この試験回路が通信装置の雷サージに対する障害率を安全側で推定できることを意味している。

通信装置の雷サージ耐量設定法に関しては、地域により装置に印加される雷サージの発生確率が異なることに着目して、装置の雷サージに対する耐量を地域によって変えることにより対策費の軽減が可能であることを示した。コンピュータシミュレーションを行った結果、通信装置の雷サージ耐量を3段階に設定した場合、日本全土を共通の雷サージ耐量にした場合に比べて、対策費が約半分になることがわかった。

目 次

第1章 序論

1. 1	通信設備の雷サージ研究の背景	-----	(1)
1. 2	雷サージ防護対策研究の歴史	-----	(5)
1. 2. 1	雷放電現象と雷放電モデル	-----	(6)
1. 2. 2	雷サージ誘起メカニズム	-----	(11)
1. 2. 3	通信装置の雷サージ耐力試験法	-----	(12)
1. 3	本論文の目的と構成	-----	(15)
付録 1. 1	通信装置の雷サージ防護設計	-----	(19)
	参考文献	-----	(25)

第2章 通信線端末に生ずる雷サージ観測

2. 1	まえがき	-----	(35)
2. 2	雷サージ観測装置	-----	(35)
2. 3	雷サージ観測方法	-----	(45)
2. 4	通信線路上に現われる雷サージ波高値の各種要因依存性	--	(46)
2. 5	現用線路系に現われる雷サージの諸特性	-----	(57)
2. 6	本章のまとめ	-----	(67)
	参考文献	-----	(68)

第3章 光ファイバを用いた雷サージ波形観測

3. 1	まえがき	-----	(70)
3. 2	光ファイバを用いた雷観測システム	-----	(71)
3. 3	雷サージ誘起機構モデル	-----	(75)

3. 4	雷サージ観測結果	-----	(77)
3. 5	本章のまとめ	-----	(82)
付録 3. 1	観測に用いた線路端末に生じる雷サージの解析	-----	(83)
付録 3. 2	観測雷サージ波形の雷撃位置推定	-----	(89)
参考文献		-----	(90)

第4章 通信路端末に生じる雷サージの解析

4. 1	まえがき	-----	(91)
4. 2	通信線路端末に生じる雷サージの解析	-----	(91)
4. 2. 1	雷サージ誘起機構モデル	-----	(92)
4. 2. 2	雷放電により生ずる水平電界	-----	(94)
4. 2. 3	架空線路端末に生ずる雷サージの解析	-----	(97)
4. 2. 4	地下線路端末に生ずる雷サージの解析	-----	(99)
4. 3	数値解析	-----	(100)
4. 4	通信線路端末に生ずる雷サージ分布の解析	-----	(109)
4. 5	本章のまとめ	-----	(113)
付録	線路の曲がりによる雷サージ波高値の変化	-----	(114)
参考文献		-----	(116)

第5章 雷サージ試験回路の設計

5. 1	まえがき	-----	(117)
5. 2	雷サージ試験回路の考え方	-----	(117)
5. 3	雷サージの等価回路	-----	(120)
5. 3. 1	内部インピーダンスの理論式	-----	(120)
5. 3. 2	定電圧サージ電源	-----	(123)
5. 4	雷サージ試験回路	-----	(125)
5. 4. 1	試験回路を構成する回路パラメータの決定法	-----	(125)
5. 4. 2	試験回路素子値の決定法	-----	(130)

5. 4. 3	試験波形の決定法	-----	(131)
5. 5	試験結果から障害率の推定法	-----	(134)
5. 6	試験波形の設定例	-----	(134)
5. 7	従来の雷サージ試験回路の評価	-----	(141)
5. 8	本章のまとめ	-----	(143)
	参考文献	-----	(144)

第6章 通信装置の雷サージ耐力試験装置

6. 1	まえがき	-----	(145)
6. 2	雷サージ試験回路	-----	(145)
6. 2. 1	内部インピーダンス回路パラメータの決定	-----	(148)
6. 2. 2	雷サージ試験波形の決定	-----	(150)
6. 2. 3	試験波形発生器の設計	-----	(157)
6. 2. 4	試験回路のその他のパラメータの決定	-----	(157)
6. 3	通信装置の雷サージ試験結果	-----	(158)
6. 4	本章のまとめ	-----	(159)
	参考文献	-----	(160)

第7章 通信装置雷サージ耐力の経済的設定法

7. 1	まえがき	-----	(161)
7. 2	雷サージ波高値の地域による変化	-----	(161)
7. 3	雷防護対策費を求める基本式	-----	(164)
7. 3. 1	地域別雷防護対策法の考え方	-----	(164)
7. 3. 2	地域区分の手順と定式化	-----	(164)
7. 4	地域別雷防護対策費の具体例	-----	(170)
7. 4. 1	装置の雷障害率分布 $p [M (V_{50})]$	-----	(170)
7. 4. 2	雷防護対策費の地域区分依存性	-----	(172)
7. 4. 3	最適耐電圧	-----	(173)

7. 4. 4 地域区分の具体例	-----	(175)
7. 5 本章のまとめ	-----	(176)
参考文献	-----	(177)
第8章 結論	-----	(178)
謝辞	-----	(181)
本研究に関する発表論文	-----	(182)

本論文の記号

- A_j : j 地域の年間雷雨日数と大地導電率によって定まる係数 (j 地域を表す係数)
- A_n, B_n : 端末条件により決まる定数
- A_0, B_0 : 端末条件より決まる定数
- C_i : 内部インピーダンスを近似する容量成分
- C_{01} : 心線・シース間線路の一次定数 (容量分)
- c : 防護費係数
- d_j : j 地域の冬期雷と夏期雷を考慮した年間雷雨日数
- d_{sj} : j 地域の夏期の雷雨日数
- d_{wj} : j 地域の冬期の雷雨日数
- E_n : 被試験物に印加される雷サージエネルギー
- E_{n1} : 雷放電によって生じる電界の大地に水平な成分
- E_{n1} : 雷放電によって生じる電界の大地に水平な成分 (地上部分)
- E_{n2} : 雷放電によって生じる電界の大地に水平な成分 (地下部分)
- E_s : 雷サージのエネルギー
- $E_v(x, t)$: x 点での垂直電界強度 (周波数領域)
- h_i : 地下線路の埋設深さ
- I_{sp} : 雷放電電流の波高値
- I_a : 雷放電によって通信線のケーブルシースと大地間に流れる
雷サージ電流
- I_0 : 雷放電によって通信線とケーブルシース間に生じる雷サージ (電流)
- K_n : 雷サージ波高値の累積発生頻度分布を表す定数 (加入者側端末)
- K_0 : 雷サージ波高値の累積発生頻度分布を表す定数 (局内側端末)
- k_k : 関東地方の雷サージ波高値の累積発生頻度分布を表す定数 (観測値)
(回 / (雷雨日・回線))
- L_i : 内部インピーダンスを近似するインダクタンス成分
- L_0 : 単位面積当りの雷撃確率

L_{01} : 心線・シース間線路の一次定数 (インダクタンス分)
 l_1 : 架空線路長
 l_2 : 全線路長
 $M(A_j)$: 全雷サージ波高値による機器の障害率
 $m(A_j, V_p)$: j 地域に設置された機器に雷サージ波高値 V_p が印加されたときの雷障害率
 $NT(A_j, V_p)$: 雷サージ波高値の 1 年・1 回線当りの累積発生頻度
 $N(V_p)$: 雷サージ波高値の累積発生頻度分布 (回 / (雷雨日・回線))
 $n(a)$: 定電圧サージ電源の波高値と観測雷サージ波形の比 (V_{1p}/V_p) の分布
 $n(t_{10})$: 定電圧サージ電源波形の零点長累積発生頻度分布
 $n(t_r)$: 雷サージ波頭長の累積百分率 (%)
 $n(t_b)$: 雷サージ波尾長の累積百分率 (%)
 P_a : ケーブルシースと大地で構成される伝送路の反射係数 (加入者側端末)
 P_b : ケーブルシースと大地で構成される伝送路の反射係数 (局内側端末)
 $P_r(V_{pp})$: 雷防護回路の価格
 P_1 : 通信線とケーブルシースで構成される伝送路の反射係数 (加入者側端末)
 P_2 : 通信線とケーブルシースで構成される伝送路の反射係数 (局内側端末)
 $p[M(A_j, V_{pp})]$: 雷障害率分布
 $Q_p(V_p)$: 雷サージ波高値の累積発生頻度
 $Q_e(V_p)$: 雷サージエネルギーの累積発生頻度
 $q_i(A_j, V_p)$: 雷サージ波高値の 1 年・1 回線当りの発生頻度
 R : 線路の midpoint と雷撃点までの距離
 R_a : ケーブルシースと大地間の終端抵抗 (加入者側端末)
 R_b : ケーブルシースと大地間の終端抵抗 (局内側端末)
 R_d : 架空線路の単位長当りの接地抵抗値
 R_i : 内部インピーダンスを近似する抵抗成分
 R_i' : 内部インピーダンスを近似する抵抗成分
 R_{01} : 心線・シース間線路の一次定数 (抵抗分)
 R_1 : 通信線とケーブルシース間の終端抵抗 (加入者側端末)
 R_2 : 通信線とケーブルシース間の終端抵抗 (局内側端末)
 $T(R, \theta)$: x 点での水平電界とその点でのケーブルに平行な電界成分との比

S_j : j 地域における機器の台数

S_0 : 日本全国の機器の台数

$s(V_p)$: 機器に、波高値 V_p の雷サージ印加されたとき、機器に雷障害が発生する確率

$t_{a,r}$: 雷サージ波形の波頭長 (加入者側端末)

$t_{a,b}$: 雷サージ波形の波尾長 (加入者側端末)

$t_{b,r}$: 雷サージ波形の波頭長 (局内側端末)

$t_{b,b}$: 雷サージ波形の波尾長 (局内側端末)

t_{d0} : 雷放電で生じた電界が通信線路まで到達する時間

$t_{d,r}$: 雷放電電流の波頭長

$t_{d,b}$: 雷放電電流が零から立ち上がり再び零になるまでの時間

t_r : 雷サージ波形の波頭長

t_b : 雷サージ波形の波尾長

$t_{1,r}$: 定電圧サージ電源波形の波頭長

$t_{1,b}$: 定電圧サージ電源波形の波尾長

$t_{t,r}$: 試験波形の波頭長

$t_{t,b}$: 試験波形の波尾長

t_{10} : 定電圧サージ電源波形の零点長

t_0 : 雷サージ波形の零点長

V_p : 雷サージ波高値

$(V_p^-)^p$: 雷サージ波高値の分布を表す定数値 (本論文では 1.8)

$V_{p,r}$: 雷サージ波高値 (加入者側端末)

$V_{p,b}$: 被試験物に印加される雷サージ波高値

v_c : 光速度 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

v_i : 雷放電の上昇速度

$V_{p,r}$: 雷サージ波高値 (局内側端末)

V_1 : 定電圧サージ電源 (周波数領域)

V_{10} : 定電圧サージ電源波形の波高値

V_a : 雷放電によって通信線のケーブルシースと大地間に現われる雷サージ (電圧)

V_{p0} : 機器の破壊電圧

V_{tp} : 試験波形の波高値

V_0 : 雷放電によって通信線とケーブルシース間に生じる雷サージ (電圧)

V_1 : 架空線路のケーブルシースと大地間に現われる雷サージ

V_2 : 地下線路のケーブルシースと大地間に現われる雷サージ

v_a : 観測雷サージ波形 (時間領域)

v_r : 定電圧サージ電源 (時間領域)

Z_{a1}, Z_{a2} : 架空部分, 地下部分の水平電界と架空線路端末雷サージとの関係を表す
伝達関数

Z_1 : 通信線端末に現われる雷サージの内部インピーダンス

Z_n, γ_n : シース・大地間線路の特性インピーダンス及び伝搬定数
($n = 1$: 架空線路, $n = 2$: 地下線路)

Z_{xn} : 架空ケーブルシース ($n = 1$), 地下ケーブルシース ($n = 2$) の
伝達インピーダンス

Z_0, γ_0 : シース・大地間線路の特性インピーダンス及び伝搬定数

Z_{21}, Z_{22} : 架空線路, 地下線路の水平電界と地下線路端末雷サージとの関係を表す
伝達関数

α : 線路の折れ曲がり角

ϵ_r, σ : 大地導電率および比誘電率

$\epsilon_v(t)$: x 点での垂直電界強度 (時間領域)

ϵ_0, μ_0 : 真空中の誘電率, 透磁率

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_n$: 垂直電界を計算するための関数

θ : 線路と雷撃点とのなす角度

μ_a : 定電圧サージ電源の波高値と観測雷サージ波形の比の分布の平均値

μ_{ar} : 雷サージ波頭長の平均値 (加入者側端末)

μ_{an} : 雷サージ波尾長の平均値 (加入者側端末)

μ_{br} : 雷サージ波頭長の平均値 (局内側端末)

μ_{bn} : 雷サージ波尾長の平均値 (局内側端末)

μ_r : 雷サージ波頭長の平均値

μ_n : 雷サージ波尾長の平均値

μ_{rr} : 定電圧サージ電源波形の波頭長累積発生頻度分布の平均値

- μ_{1h} : 定電圧サージ電源波形の波尾長累積発生頻度分布の平均値
- μ_{10} : 定電圧サージ電源波形の零点長累積発生頻度分布の平均値
- σ_{1h} : 定電圧サージ電源の波高値と観測雷サージ波形の比の分布の標準偏差
- σ_{1r} : 雷サージ波頭長の標準偏差（加入者側端末）
- σ_{1b} : 雷サージ波尾長の標準偏差（加入者側端末）
- σ_{2r} : 雷サージ波頭長の標準偏差（局内側端末）
- σ_{2b} : 雷サージ波尾長の標準偏差（局内側端末）
- σ_r : 雷サージ波頭長の標準偏差
- σ_b : 雷サージ波尾長の標準偏差
- σ_{1r} : 定電圧サージ電源波形の波頭長累積発生頻度分布の標準偏差
- σ_{1h} : 定電圧サージ電源波形の波尾長累積発生頻度分布の標準偏差
- σ_{10} : 定電圧サージ電源波形の零点長累積発生頻度分布の標準偏差
- σ_j : j 地域の大地導電率（S / m）
- σ_k : 関東地方の大地導電率（ 2.0×10^{-2} S / m）

第 1 章 序論

1. 1 通信設備の雷サージ研究の背景

1876年アメリカのベルによって電話が発明されて以来、電気通信は発展を続け、現在では世界中に張り巡らされた通信網を用いて、世界中のほとんどの人々がその恩恵を受けている。特に、近年、半導体技術の進歩により、従来大規模な回路を必要としていた画像処理等のデータ処理が、小型の装置で実現できるようになったことにより[1],[2]、アナログ音声通信サービスばかりでなく、画像、データ通信等の多様な通信サービスが要求されるようになってきている。この要請に答えるため、現在、ユーザ間の通信を音声サービスに適したアナログ通信からデータ通信に適したデジタル通信に置き換える研究が進んでいる[3],[4],[5]。1988年4月からは、このデジタル通信サービスも開始され[6]、今後、アナログ通信はデジタル通信に置き換わって行くものと思われる。

一方、発展著しい通信技術に対応して、通信網およびそれに接続される通信装置を保守し信頼性の高い通信を提供するための技術は、人類の発展のために重要な技術となっている。信頼性の高い通信を提供するための研究としては、通信に使われているケーブルの抗張力体や半導体素子等の高信頼性化の研究[7],[8],[9]、通信システムの故障原因を診断し修理を行なう保守技術の研究[10],[11]、多ルート化等により網全体の信頼性を高くするネットワーク構成法の研究[12],[13]や情報を確実に相手に届け、通信の秘密を維持するための符号化の研究等[14],[15],[16]が良く知られているが、最近EMCの問題が注目されてきている。

EMCはElectromagnetic compatibilityの略であり、日本語では電磁環境適合性と訳されている。通信について考えると、通信装置が電磁環境下で正常に動作し、かつ同じ環境下で動作する他の装置に悪影響を与えない通信システムを実現することを目的とした研究である[17]-[20]。

電磁環境下で装置が正常に動作するためには、通信装置に妨害を与えると考えられる強い電磁波、例えば放送波[21]-[24]、静電気放電[25],[26]や電源スイッチのON／

OFF時等に生ずるインパルス性電磁波等[27]-[30]で誤動作しないことや、電力線の断線事故や雷等で破壊[31]～[43]しないことが考えられる。また、他の装置に悪影響を与えないためには、通信装置から放射される電波がテレビ受信機等に妨害を与えないこと[44],[45]がある。この電波は電子回路を流れるデジタル信号の高調波成分がプリント配線、電源線や通信線を介して放射されるもので[46],[47],[48]、通信線を介して放射される妨害波の伝搬特性の研究[49]や評価法の研究[50],[51]等が行われてきている。

本論文では、これらEMC問題のなかで、雷に対する通信装置の防護対策問題を取り扱っている。

通信線路や電話局の鉄塔等の通信設備の近傍に雷が生じると通信装置や設備が破壊することがある。通信設備に対する雷障害としては、通信線路や通信設備を設置した建物に直接落雷する（直撃雷）[52],[53]と空間に生じた雷放電により、通信線路端末に誘導した誘導雷サージ（以下単に雷サージと呼ぶ）[54]-[56]により生ずるものがある。図1. 1に通信網と雷障害の場所を示す。この図に示すように、雷障害の発生場

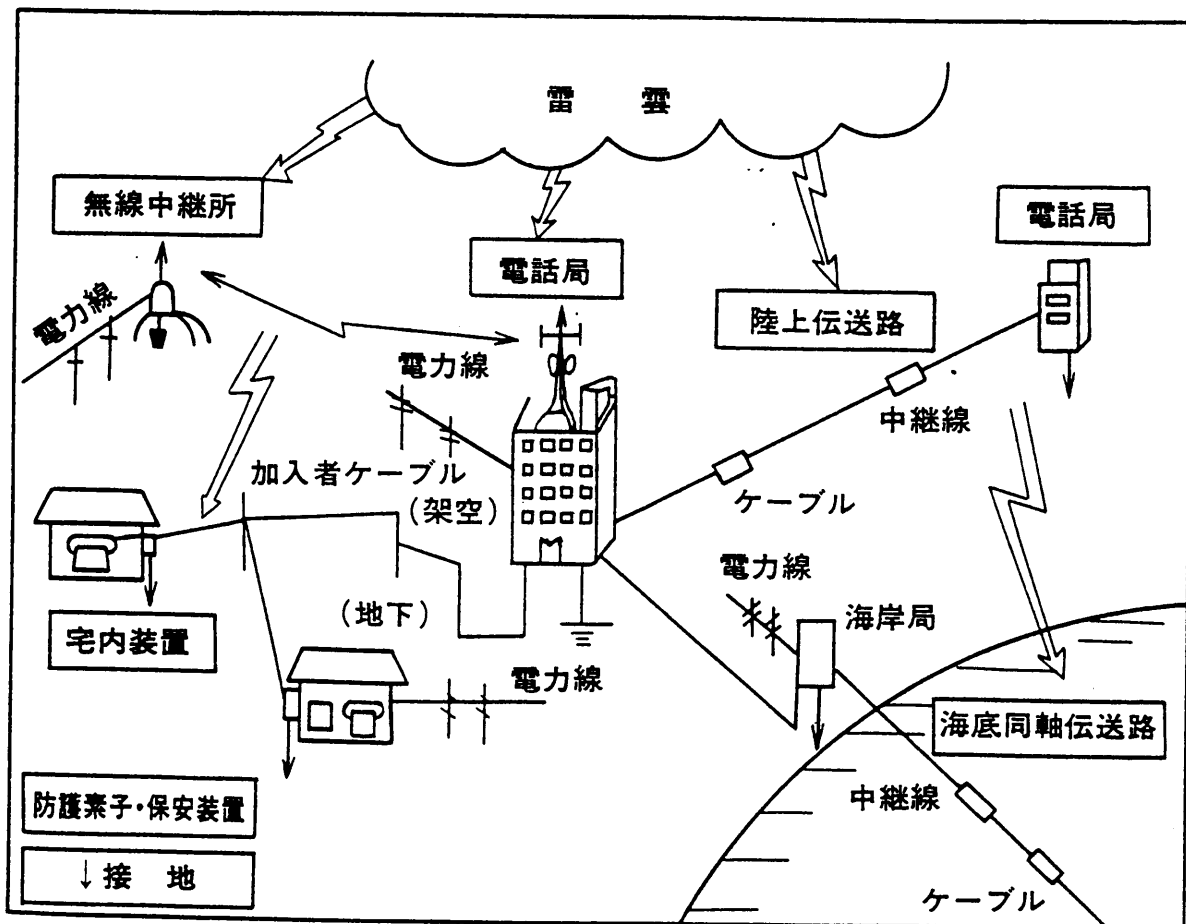


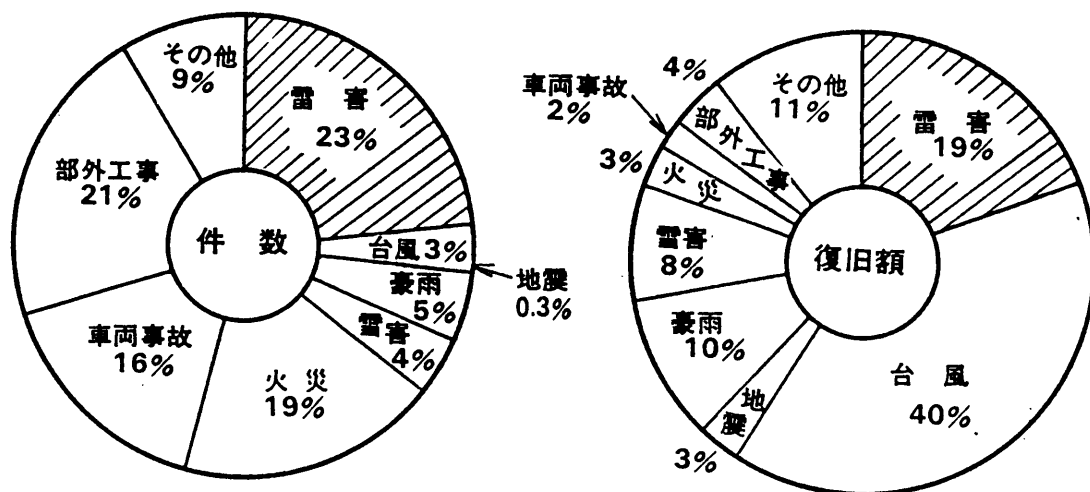
図1. 1 通信システムと雷害

所は山岳地帯の無線中継所[57], 地下中継ケーブル[33], [58], ケーブルに接続されている通信設備[59], [60], さらには海底同軸ケーブル[61], [62]にいたるところにでも生じていることがわかる。

我国に於ける通信網の大部分を占める, NTTの通信設備の災害に置ける障害発生件数(昭和49年~53年度の平均)を図1. 2に示す。図に示すように, 発生件数, 復旧件数ともに全障害件数の約20%が雷障害であり, 上位を占めていることがわかる。

このように, 雷に対する被害は非常に多いので, 雷により生じる電圧や電流から通信設備を適切に防護することを目的とした, 雷防護対策の研究が行なわれて来ている。本論文は, 雷防護対策の研究のなかで特に誘導雷サージ(雷サージ)の問題に関する研究結果を述べたものである。

最も被害の多い市内線路系に対して我国の代表的な多雷地区である宇都宮周辺で昭和48年~51年度まで約5,300件の雷障害について, その障害状況を調査・分析した結果を図1. 3に示す。図に示す雷害の中で, 被害の多い保安器やボタン電話装置に関する被害は雷サージによるものと考えられる。つまり, 図1. 3は通信装置に関する雷害はほとんどが雷サージ(誘導雷サージ)により生じていることを示して



(昭和49~53年度 5年間平均)

図1. 2 通信設備の雷害発生状況

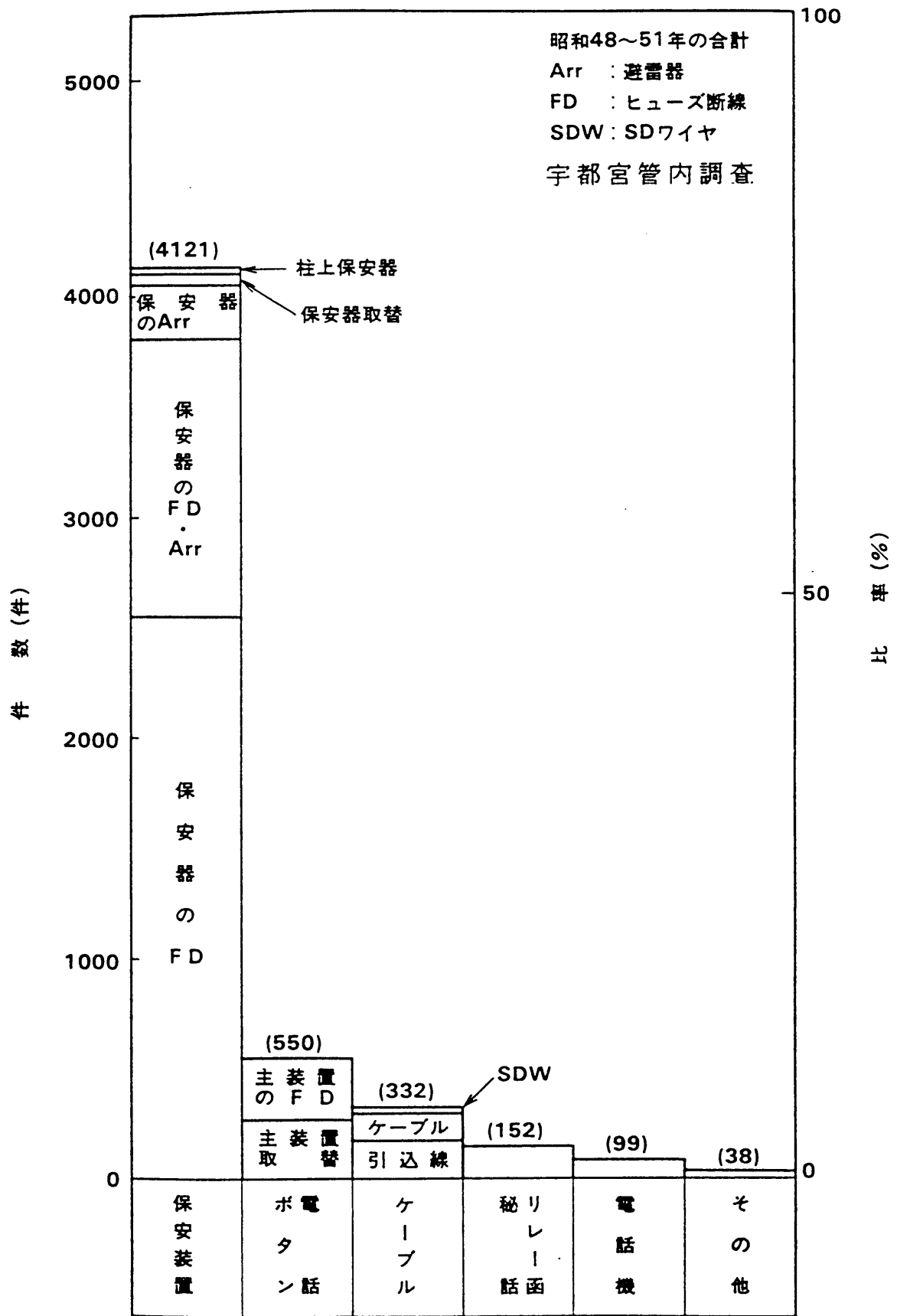


図 1. 3 通信線路, 宅内装置に生じる雷害状況

ている。そのため、通信の分野では雷サージ防護対策に関する研究は盛んに行なわれてきている。以下、これまで行なわれてきた雷サージ防護対策研究の概要を述べる。

1. 2 雷サージ防護対策研究の歴史

雷サージの発生機構を図1. 4に示す[63],[64]。図に示すように、雷雲と地上の間に雷放電が生じると、その電荷の移動により、空間に電磁界変動が生じる。この電磁界変動により、通信線路と大地から構成される伝送路上に電流が誘起され、その電流が線路端末まで伝搬して雷サージとなる。従って、雷サージ防護対策の研究は大きく、①雷サージの誘導源となる雷放電現象の研究、②通信線路端末に雷サージが発生するメカニズムの研究、③通信装置の雷サージに対する耐力試験法の研究、④通信装置や設備に具体的な対策を施す雷サージ防護設計の研究に大別される。本節では、これら

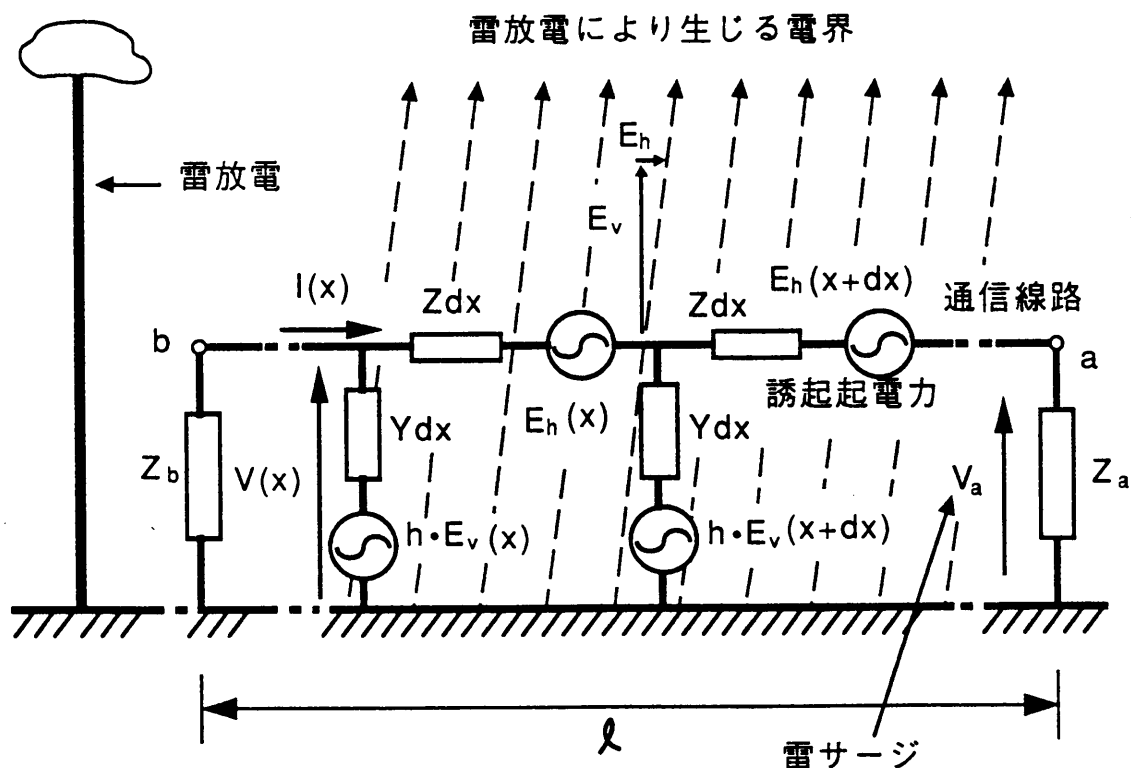


図1. 4 雷サージの誘起機構

各研究課題に関して、過去、多くの研究者が行なって来た成果について述べる。なお、雷サージ防護設計に関する研究の歴史は付録1. 1に示す。

1. 2. 1 雷放電現象と雷放電モデル

雷は、雷雲と大地間もしくは雷雲間の放電により生ずる。雷やそのもととなる雷雲の生成メカニズムに関しては、すでに多くの論文や解説書に述べられているが、大きくは、夏、大地が暖められることにより発生する入道雲により生ずる夏雷、寒冷前線の通過時に生ずる前線雷、冬、大陸からの季節風が本州の山岳地帯にあたることにより生ずる冬雷[65]-[67]等がある。

雷放電現象の研究は古くは1752年、フランクリンの有名な凧の実験に始まっている。しかしながら、雷放電現象の本格的な解明が試みられたのは、1900年代になってボイスカメラ[68]による雷放電電光の写真記録が可能になってからである。雷放電現象には、まだ不明な点が多くあるが、国内外の多くの研究者の努力により雷雲の発生機構、構造、雷放電電流の特性等、かなりの部分が明らかになってきている[65],[69],[70]。

雷の発生には雷鳴と雷放電が伴うが、通信装置等に被害を及ぼすのは、主に雷放電である。雷放電は電荷の異なる物体間の中に生ずる電荷の移動であり、その性質は雷

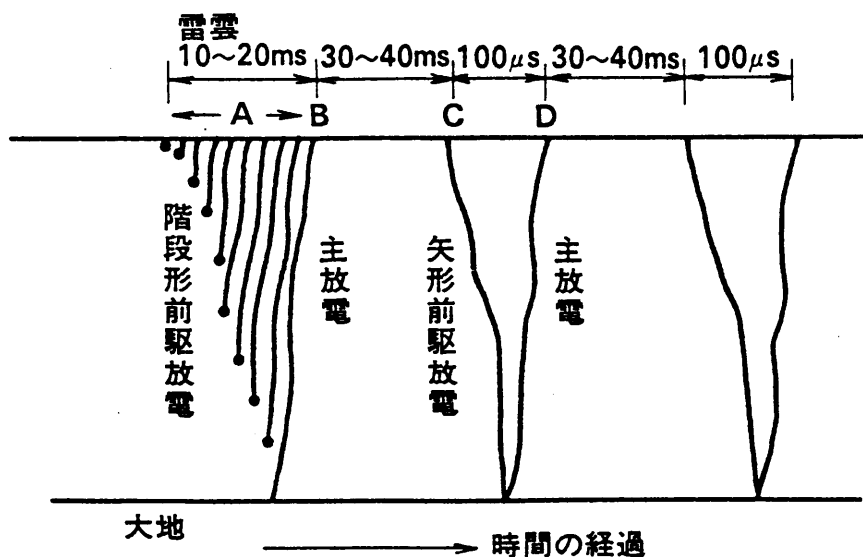


図1. 5 雷放電現象の時間的变化

放電の写真撮影[67]や空間電界の観測[71]-[73]によりかなり説明されるようになってきている。雷放電の進展課程を図1.5に示す[68]。図1.5において横軸が時間の経過、縦軸の上部が雷雲、下部が大地を示している。まず、Aの部分で図に示すように雷雲が成長する。これを段階形前駆放電と呼び、前駆放電が地上に達すると大地から雷雲に向かって主放電が流れる。主放電が終了すると、30~40msの間隔で主放電が平均して3~4回生ずる。このように、一度の放電で多数回雷放電が発生する現象を多重雷と呼ぶ[74]。

雷放電電流の電流値、その波形、移動する電荷量等雷電流に関する種々の性質を明らかにするための観測や理論解析が数多く行なわれてきている[68],[75]-[78]。その結果、雷放電について表1.1に示すような代表的な値が報告されている。ビルの避雷針に落雷した時の雷放電電流波形は観測の結果おおよそ図1.6に示すような形をしている。この波形は近似的には2つの指数関数の和で表わすことができ、図1.6に示すように波頭長、波尾長、波高値の3つのパラメータで表わされる[43]。このパラメータで表わすと雷放電流の平均値は表1.1に示すように、波頭長 $2\mu\text{s}$ 、波高値 $10\sim 20\text{kV}$ 、波尾長 $40\mu\text{s}$ となる[68]。しかし、雷放電に関しては、まだ不明な点も多く、我国においても、夏雷と冬雷の違いに関する検討[67]やロケットによる誘雷実験が現在も行なわれている[79],[80]。

雷放電により空間に生じる電磁界変動の理論解析は雷放電をモデル化し、そのモデルに基づいて電磁界分布を解析するという手法で行なわれてきた。

雷放電の際生じる電磁界の解析は、前項の雷放電モデルを用いて行なわれた。初期の研究では、雷放電路上の電荷による静電界の計算式を時間領域で解いたR.H.Goldeの論文[81]がある。

E. D. Sunde[52]は雷雲から大地まで直線状の電流路があり、雷放電サージ電流の変化に従って電流路全体の電流が変化するモデルを提案し、このモデルを用いて、通信線路端末に生じる雷サージを求めた。しかし、前項に示したように雷放電の観測等により、雷放電モデルが次第に精密なものになって行くに従いさらに正確な雷放電モデルに基づいた解析が必要になってきた。

表 1. 1 雷放電の諸特性

種 別		最小値	代表値	最大値
階段形 前駆放 電	放電間隔 (μs)	30	50	125
	伝搬速度 (m/s)	1×10^5	1.5×10^5	1.5×10^5
	放電路上の電荷の蓄積 (C)	3	5	20
矢形前 駆放電	伝搬速度 (m/s)	1×10^5	1×10^5	1.5×10^5
	電荷の蓄積 (C)	0.2	1	6
主放電	伝搬速度 (m/s)	1×10^5	1×10^5	1.5×10^5
	電流増加率 (kA/ μs)	< 1	10	> 80
	ピーク値までの時間 (μs)	1	2	30
	ピーク電流 (kA)		10~20	110
	電流の波尾長 (μs)	10	40	250
	伝達電荷 (C)	0.2	2.5	20
多重性	放電数	1	3~4	26
	時間間隔 (ms)	3	40	100

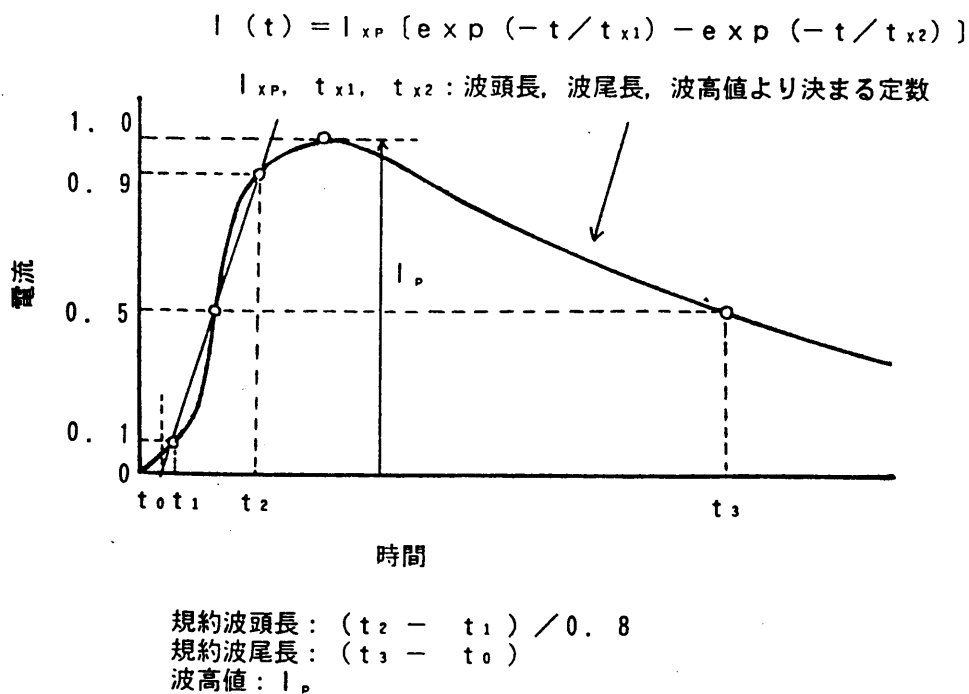


図 1. 6 雷放電電流の近似波形と規定方法

図1. 7 (a) はBruce-Gold[82]の雷放電モデルを示している。このモデルは地上から雷雲に向かって円筒状の電流が上昇し、その電流が上昇しながら時間とともに電流路全体の電流値が変化すると考えた。図1. 7 (a)の横軸は時間の経過を示しており、縦軸は大地と雷雲を示している。また、電流路の幅は電流の大きさを表わしている。このモデルは、電界計算を比較的行き易い特徴があったが放電電流の大きさが地面から放電路の先端まで同時に変化するので、物理的には説明しにくい現象であった。

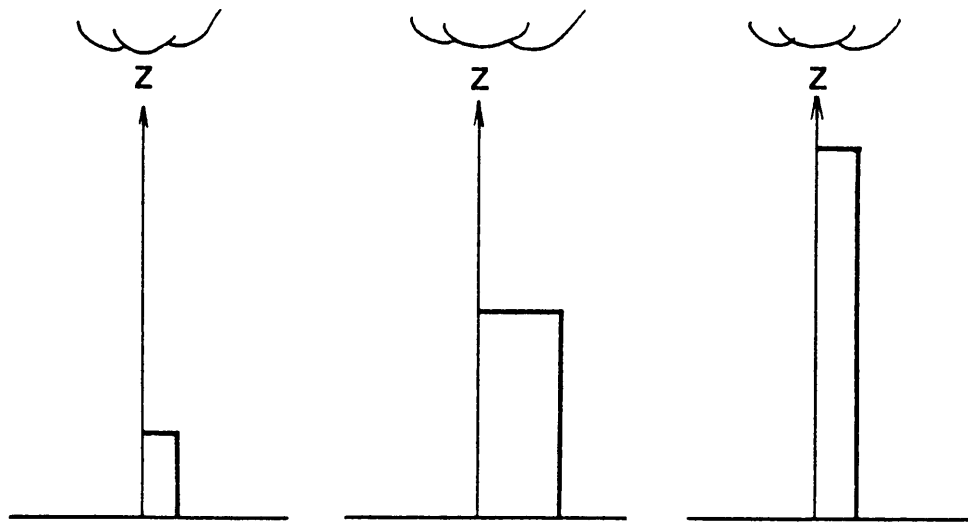
図1. 7 (b) はP. F. Little[83]により提案されたモデルでTransmission lineモデルと呼ばれている。このモデルは、放電路の電流分布が場所により変化しており、実際の雷放電をよく模擬しているため、雷放電の際生ずる電磁界の解析によく用いられている[63][64]。

M. A. Uman[84]はこのモデルを用いて、①雷放電電流路が時間とともに上昇して伸びてゆく、②①の放電路の中の電流の密度も時間的に変化する、③雷放電電流路の長さが時間的に変化する、観測点と放電路までの距離も変化し、観測点まで伝わる電界の変化に時間差を生ずる。以上3つの点を考慮して解析を行なっている。しかし、この解析は解析結果が積分方程式で与えられているため、数値解析が困難であった。

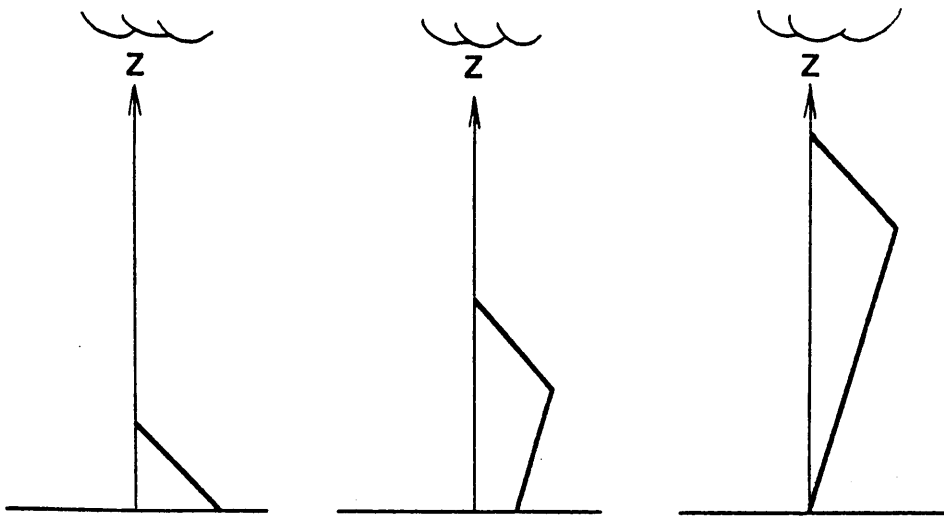
一方、P. Chowdhuri[85]や大和[86]、横山[63]らはM. A. Umanの解析の3つの条件のうち②で示した雷放電電流を単位ステップ電流として空間の電界を計算し、その結果を雷放電電流の形にたたみ込み積分を行なって実際の雷放電電流による観測点の電界を求めた。この計算方法は回路理論の過渡現象の解析に於て、入力信号にインパルス信号または単位ステップ信号を回路に印加した場合に出力端に生ずる応答波形を求めれば、任意の入力信号に対する応答は畳み込み積分を行えば求められるという、回路理論を応用したものである。この方法はM. A. Umanの解析方法に比べ積分方程式を解く必要がないので電界の計算には便利な方法である。

以上示したM. A. UmanやP. Chowdhuriらの解析は全て大地が完全導体と仮定して解析を行なっている。しかし、大地が完全導体であると仮定した解析では、線路端末に誘起される雷サージ波形を十分な精度で求めることができなかつたため、大地を有限の導電率とした場合の解析が行なわれた。

J. D. Nordgard[87]らは大地が有限の大地導電率である場合について、雷放電により空間に生ずる電界を、E. D. Sunde[52]が求めたヘルツベクトルを用いて求めている。



(a) Bruce-Golde モデル



(b) Transmission line モデル

図 1. 7 雷放電モデル

ただし、Nordgard はTransmission lineモデルではなくSundeが用いた初歩的な条件で導いている。また、古賀ら[64]はまず雷放電のモデルとしてTransmission lineモデルを用いてP. Chowdhuriらの方法により大地が完全導体の場合の垂直電界を求め、次に平面波が有限の導電率を持つ媒質を伝搬する場合進行方向に傾く現象（Zennekの表面波として知られている[88]）を用いて大地が有限の導電率を持つために生ずる大地に水平な偏波成分を求めている。

この方法は、比較的、線路端末に現われる雷サージを良く模擬できるので、本論文では、雷放電の際生じる電磁界の解析に古賀らのモデルを用いている。

1. 2. 2 雷サージ誘起メカニズム

通信線路端末に生ずる雷サージ波形を理論的に求める研究は大きく、（1）通信線路端末に生じる雷サージの観測と、（2）通信線路端末に生ずる雷サージの解析に分けられる。

雷サージの観測は、装置が小型で広い範囲の観測が可能な磁網片やPバルブ等が用いられてきた[89]-[93]。しかし、これらの装置は直撃雷を対象として考案された装置であり、通信線路端末に生じるような直撃雷に比べて発生頻度が高く比較的波高値の小さい雷サージに対しては、時間履歴が取れない、測定精度が悪い等の欠点があった。このため、オシロスコープ[94]-[96]、データレコーダ[97]、[98]や雷サージカウンタ[94]、[99]を用いた雷サージ観測が行なわれた。また、最近では、雷サージのより詳細な誘起メカニズムの解明を目的として、小型で広い周波数の雷観測が可能な電気光学効果を利用した雷観測装置の開発が行われている[100]、[101]。しかし、いまのところ、観測データも十分でなく、雷サージの統計的性質や通信ケーブルの各種要因構成に対する雷サージの性質を明確にするには至っていない。

通信線路端末に生じる雷サージの解析は、雷放電の際生じる電磁界と同様な周波数成分を持つ長波用アンテナや中波放送の誘導メカニズムを用いて行なわれた。

H. H. Beverage[102]は平面波の伝搬方向に導体が布設されていた場合、この電磁界は大地の持つ有限の導電率により、進行方向に傾き水平電界成分が生じ、この電界により導体上に誘起した電圧が導体の長さ方向に重ね合わせられて、導体の端に大きな電圧が生ずることを示し、長波用のアンテナに応用している。また、H. Kaden[103]は

導体に入射してくる電磁界が導体表面に達すると電界成分は導体表面に垂直に入射するため、導体付近の電磁界分布が変化する。この変化を起こすように導体表面上に電流が流れ誘導電圧が発生すると考え、中波放送波により通信線路端末に誘導される電圧を求めたている。上記ふたつの理論は本質的には同じであり、どちらを用いても差し支えない。雷放電電界によりケーブルに誘導する雷サージ波形の解析も、雷サージ波形の主なエネルギー成分は長波帯から中波帯に含まれることから上記2つの方法に基づいて行なわれた。

P. Chowdhuri[85]や大和[88]、横山[63]らは大地を完全導体として考え、雷放電によって大地上に生じる垂直電界を通信線路と大地から構成される分布定数線路の誘起電力として雷サージ波形を求めた。これに対してA. K. Agrawal[104]らはH. Kadenの反射電磁波の理論を用いて雷サージ波形を求めた。また、山本[105]らはP. Chowdhuriの等価回路を補正してさらに精密な雷サージ波形の解析を行なっている。古賀[64]らは横山らが使用した等価回路に水平電界成分を加えた等価回路を導き、雷サージ波形の解析を行なっている。

本論文では、古賀らが解析に用いた等価回路をさらに発展させて、導体と大地で構成される回路の伝搬定数、ケーブルの持つ遮蔽特性を加えて、さらに精密な雷サージ波形の解析を行なっている。

1. 2. 3 通信装置の雷サージ耐力試験方法

通信線や電力線に接続される装置は雷サージにより破壊されることがある。このような異常電圧に耐えるように通信装置を設計するために雷サージに対する試験方法が定められている。

Bodle[106]は通信線路端末に生ずる雷サージ波形を観測し、その雷サージ波形の波高値、波頭長、波尾長の発生確率を求め、波頭長は平均値 -3σ の値、波尾長は雷サージのエネルギー分布の平均値 $+3\sigma$ の値から定めている。

表1. 2に通信装置用として定められている雷サージの標準波形を示す。この表で平行ケーブルから侵入する雷サージはBell System, C C I T T K 1 7 [107]などで10 / 1000 (μs) または10 / 700 (μs) の波頭長 / 波尾長の試験波形が与えられている。この波形はBodleの設定方法を用いて定めたもので、数値がBodle[106]

の定めた波形と一致しない理由は不明であるが、CCITTでは各国の意見により調整したためと思われる。なお、ガス入り放電管の試験のためには、IEEE [108]で8/20 (μ s), CCITT K12 [109]で5/65 (μ s), 8/20 (μ s)のような急峻なパルスも設定されているが、放電管は急峻なパルスに対する応答が重要であるため、観測された波形の中から急峻なものを選んで設定したためである。CCITTとIEEEでわずかに波形が異なるのは前者と同様各国間の調整のためと思われる。NTTの試験波形のうち、1/40 (μ s)は電力関係の試験波形をそのまま利用したもので、10/200 (μ s)の設定根拠は不明である。この波形は公開資料としてはなく、昭和52年、通信用保安器委員会でその原型がみられるが根拠は示されていない。

以上のような、試験波形の設定例があり、機関によっては波形が変わっているが、波形の定め方はBodleが示したように、観測波形の発生分布より定めたものである。

CCITT SGVの会議に於いても、表1.2に示す試験波形の妥当性について議論されることもあるが、他の試験波形設定案もなかったため、そのままになっている。

試験波形を発生するサージ発生器も研究されているが、一定の負荷状態で試験波形に一致する波形を発生するように設計されており、接続される通信装置のインピーダンス等の考慮はされていない。また、最近航空機に多くの電子部品が使用されるようになってきているため、航空機への雷サージ試験法の研究もおこなわれている[110]。

以上のように、Bodle等が示した雷サージの試験波形設定法やCCITTなどに示されている雷サージ試験法は、雷サージによる通信装置の障害発生値を予測できる試験波形の設定法や通信装置の種類によらず障害発生値を予測できる試験装置の設計法が明らかになっていない。古賀ら[111]は雷サージのエネルギーの発生確率と電圧の発生確率が等しいと仮定して、通信線路端末に生じる雷サージの発生頻度から発生率に応じた試験波形の設定法を示している。また、元満ら[112]は古賀ら[111]を発展させ雷放電の多重性を考慮した試験波形の設定法を示した。しかし、これらは、いずれも、通信線路端末に生じる雷サージを模擬したものでないため、試験を行なっても通信装置の雷障害発生値を予測できなかった。

本論文では、通信線路端末に生じる雷サージ観測、雷サージの誘起機構モデルの検討から雷サージを表す等価回路を求め、この等価回路と日本の通信線路の平均的な値

表 1. 2 各機関の雷サージ電圧・電流試験波形

機関等	試験波形			備考
	波高値	波頭長	波尾長	
Bell system (D.W. Bodleによる)	1.2 kV	10 μ s	1000 μ s	炭素避雷器用
CCITT K.17	1.5 kV	10 μ s	700 μ s	平衡ケーブル中継器用
IEEE Standard 28 (ガス入放電管 用)	5 A	8 μ s	20 μ s	インパルスライフテス ト用
	20 A			
	50 A	10 μ s	1000 μ s	
	500 A			
CCITT K.12 (ガス入放電管 用)	5 kV	5 μ s	65 μ s	インパルス放電電圧テ スト用
N T T	200 A	10 μ s	200 μ s	ヒューズ, 避雷器用
	200 A	1 μ s	40 μ s	避雷器用

から、通信装置の種類によらず障害発生値を予測できる試験装置の設計法を示している。また、雷サージ観測より得た雷サージ分布より、通信装置の障害発生値を予測できる試験波形の設定法を示している

1. 3 本論文の目的と構成

以上述べてきたように、雷放電現象は自然現象であり、多くの研究者の努力にもかかわらず、雷サージ防護対策法は明確になっていない。しかし、通信装置の雷サージ防護対策の重要性は年々増しておりその解決が望まれている。

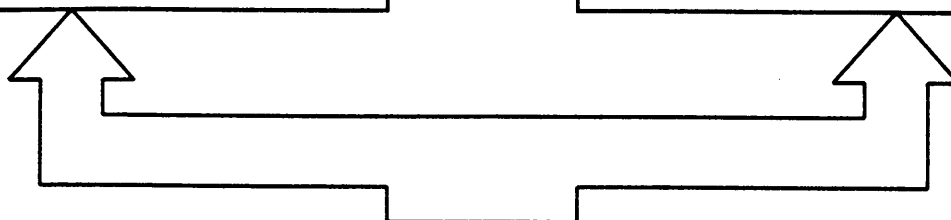
通信装置の雷防護対策を行なうには、適切な雷サージ試験装置を用いて通信装置の耐雷サージ試験を行い、その結果をもとに対策を施すことが合理的である。本論文は、雷サージ防護対策に関連して、通信装置の雷サージ試験法について検討を行なっている。前項に述べたように、通信装置の雷サージ試験法はC C I T T等で決められているが、通信装置の雷障害率を推定できないため、類似の装置に関する過去の経験をもとに障害率を推定したり、実際に設置した後対策を行なってきた。そこで、本論文では、雷障害率の推定が可能な試験回路の設計法と試験波形の設定法を提供することにより、この問題の解決を図っている。

本研究の位置づけと範囲を図1. 8に示す。雷放電は自然現象であるため、雷放電電流の大きさや落雷場所が一定していない。通信線端末に生じる雷サージはこれらのパラメータにより大きく影響を受けるので、雷サージを理論的に求めることは困難である。そこで、線路端末に生じる雷サージを観測しその結果から試験に必要な雷サージの性質を明らかにする必要がある。本論文では線路端末に生じる雷サージの観測を日本国内4ヶ所で行い、①ケーブルの各種要因構成（ケーブル長、ケーブル高さ、ケーブル端末条件、ケーブル構造等）、②ケーブルの設置場所要因（大地導電率、夏雷、冬雷等）③通信線路端末に生じる雷サージ分布について、通信線路端末に生じる雷サージ特性を明かにしている。また、光技術を用いた雷サージ観測システム、雷波形自動記録装置、雷サージカウンタ等の測定装置の開発を行い、通信ケーブルの両端に生じる雷サージの同時観測を実施し、地下線路に生じる雷サージと架空線路に生じる雷サージの関係等を明かにしている。

雷サージ観測データは、年間雷雨日が限られているため多くのデータ収集が困難で

通信装置の雷サージ試験法		
	従来	本研究
波形	<ul style="list-style-type: none"> 雷サージ発生分布確率より決定 	<ul style="list-style-type: none"> 装置に要求される障害率に対応して決定
回路	<ul style="list-style-type: none"> パルス発生器で波形を発生(装置の入力インピーダンスを考慮せず) 	<ul style="list-style-type: none"> 通信装置の入力インピーダンスに追従する試験回路設計法

通信装置の雷サージ防護対策	
従来	本研究
<ul style="list-style-type: none"> 各通信装置別の雷防護回路の検討 接地, 防護回路の調和性の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 地域性を考慮した通信装置耐量の経済的設定法の検討



雷サージの特性把握とその誘起機構モデルの検討																																													
雷サージ観測		雷サージ理論解析																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">雷サージの特性</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">実験線路</td> <td> <table border="1"> <thead> <tr> <th>線路構成要因</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 線路長 線路地上高 端末条件 ケーブル種別 </td> </tr> <tr> <td rowspan="2">現用線路</td> <td> <table border="1"> <thead> <tr> <th>線路布設条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table> </td> <td colspan="2"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">観測装置の改良</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷サージカウンタ データレコーダ 雷波形自動記録装置 雷撃位置測定装置 </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">雷サージ分布形</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷サージ波高値, 波頭長, 波尾長の分布 </td> </tr> </tbody> </table> </td> <td colspan="2"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">新観測装置の開発</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> 光技術を用いた雷サージ波形観測システム </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">従来</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷放電のモデル化 大地を完全導体と仮定した時線路末端に現れる雷サージ解析 大地導電率を考慮した架空線路末端に現れる雷サージ解析 </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">本研究</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 大地の影響を考慮した, 地下線路地下・架空線路に現れる雷サージの解析 通信線路末端に現れる雷サージ分布の解析 </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table>		雷サージの特性		実験線路	<table border="1"> <thead> <tr> <th>線路構成要因</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 線路長 線路地上高 端末条件 ケーブル種別 </td> </tr> <tr> <td rowspan="2">現用線路</td> <td> <table border="1"> <thead> <tr> <th>線路布設条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table>	線路構成要因	<ul style="list-style-type: none"> 線路長 線路地上高 端末条件 ケーブル種別 	現用線路	<table border="1"> <thead> <tr> <th>線路布設条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 </td> </tr> </tbody> </table>	線路布設条件	<ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">観測装置の改良</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷サージカウンタ データレコーダ 雷波形自動記録装置 雷撃位置測定装置 </td> </tr> </tbody> </table>		観測装置の改良		<ul style="list-style-type: none"> 雷サージカウンタ データレコーダ 雷波形自動記録装置 雷撃位置測定装置 		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">雷サージ分布形</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷サージ波高値, 波頭長, 波尾長の分布 </td> </tr> </tbody> </table>		雷サージ分布形		<ul style="list-style-type: none"> 雷サージ波高値, 波頭長, 波尾長の分布 		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">新観測装置の開発</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> 光技術を用いた雷サージ波形観測システム </td> </tr> </tbody> </table>		新観測装置の開発		光技術を用いた雷サージ波形観測システム				<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">従来</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷放電のモデル化 大地を完全導体と仮定した時線路末端に現れる雷サージ解析 大地導電率を考慮した架空線路末端に現れる雷サージ解析 </td> </tr> </tbody> </table>		従来		<ul style="list-style-type: none"> 雷放電のモデル化 大地を完全導体と仮定した時線路末端に現れる雷サージ解析 大地導電率を考慮した架空線路末端に現れる雷サージ解析 				<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">本研究</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 大地の影響を考慮した, 地下線路地下・架空線路に現れる雷サージの解析 通信線路末端に現れる雷サージ分布の解析 </td> </tr> </tbody> </table>		本研究		<ul style="list-style-type: none"> 大地の影響を考慮した, 地下線路地下・架空線路に現れる雷サージの解析 通信線路末端に現れる雷サージ分布の解析 	
雷サージの特性																																													
実験線路	<table border="1"> <thead> <tr> <th>線路構成要因</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 線路長 線路地上高 端末条件 ケーブル種別 </td> </tr> <tr> <td rowspan="2">現用線路</td> <td> <table border="1"> <thead> <tr> <th>線路布設条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table>	線路構成要因	<ul style="list-style-type: none"> 線路長 線路地上高 端末条件 ケーブル種別 	現用線路	<table border="1"> <thead> <tr> <th>線路布設条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 </td> </tr> </tbody> </table>	線路布設条件	<ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">観測装置の改良</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷サージカウンタ データレコーダ 雷波形自動記録装置 雷撃位置測定装置 </td> </tr> </tbody> </table>		観測装置の改良		<ul style="list-style-type: none"> 雷サージカウンタ データレコーダ 雷波形自動記録装置 雷撃位置測定装置 																																	
	線路構成要因																																												
<ul style="list-style-type: none"> 線路長 線路地上高 端末条件 ケーブル種別 																																													
現用線路	<table border="1"> <thead> <tr> <th>線路布設条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 </td> </tr> </tbody> </table>	線路布設条件	<ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 																																										
	線路布設条件																																												
<ul style="list-style-type: none"> 大地導電率 季節(夏・冬) 架空地下 																																													
観測装置の改良																																													
<ul style="list-style-type: none"> 雷サージカウンタ データレコーダ 雷波形自動記録装置 雷撃位置測定装置 																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">雷サージ分布形</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷サージ波高値, 波頭長, 波尾長の分布 </td> </tr> </tbody> </table>		雷サージ分布形		<ul style="list-style-type: none"> 雷サージ波高値, 波頭長, 波尾長の分布 		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">新観測装置の開発</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> 光技術を用いた雷サージ波形観測システム </td> </tr> </tbody> </table>		新観測装置の開発		光技術を用いた雷サージ波形観測システム																																			
雷サージ分布形																																													
<ul style="list-style-type: none"> 雷サージ波高値, 波頭長, 波尾長の分布 																																													
新観測装置の開発																																													
光技術を用いた雷サージ波形観測システム																																													
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">従来</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 雷放電のモデル化 大地を完全導体と仮定した時線路末端に現れる雷サージ解析 大地導電率を考慮した架空線路末端に現れる雷サージ解析 </td> </tr> </tbody> </table>		従来		<ul style="list-style-type: none"> 雷放電のモデル化 大地を完全導体と仮定した時線路末端に現れる雷サージ解析 大地導電率を考慮した架空線路末端に現れる雷サージ解析 																																							
従来																																													
<ul style="list-style-type: none"> 雷放電のモデル化 大地を完全導体と仮定した時線路末端に現れる雷サージ解析 大地導電率を考慮した架空線路末端に現れる雷サージ解析 																																													
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">本研究</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> 大地の影響を考慮した, 地下線路地下・架空線路に現れる雷サージの解析 通信線路末端に現れる雷サージ分布の解析 </td> </tr> </tbody> </table>		本研究		<ul style="list-style-type: none"> 大地の影響を考慮した, 地下線路地下・架空線路に現れる雷サージの解析 通信線路末端に現れる雷サージ分布の解析 																																							
本研究																																													
<ul style="list-style-type: none"> 大地の影響を考慮した, 地下線路地下・架空線路に現れる雷サージの解析 通信線路末端に現れる雷サージ分布の解析 																																													

図1. 8 本研究の位置づけと範囲

ある。そのため、少ない観測データを有効に利用し、効果的な観測を実施するために、雷サージ誘起機構モデルに基づいた雷サージの理論的解析が必要である。本研究では、大地の影響を考慮した、架空線路、地下線路及び地下・架空の混在した線路端末に生じる雷サージの誘起機構モデルを構成しこのモデルに基づいて雷サージの理論解析、雷サージ分布の理論解析を行い、これらの解析結果と雷サージ観測結果と比較を行ない誘起機構モデルの妥当性を示している。

通信装置の雷サージ防護対策を効果的に行なうためには、雷サージ試験により雷障害率が予測できる試験回路が必要である。本論文では、理論解析により求めた雷サージ誘起機構モデルを用いて、線路端末に現われる雷サージを表す等価回路を求め、この等価回路に基づいて雷サージ試験回路を設計する方法を示している。このようにして雷サージ試験回路を設計すれば、通信装置の入力インピーダンス変化を模擬することができる。また、雷サージ観測から求めた通信線路端末に生じる雷サージの分布形から、通信装置の雷障害率に応じた試験波形の設定法を示した。このようににして求めた、雷サージ試験回路と試験波形を用いれば、通信装置の種類によらず雷サージに対する雷障害率の推定が可能である

最後に、地域により大地導電率、雷雨日が異なることに着目して、地域性を考慮した通信装置の雷サージ耐力の経済的な設定法を示している。

本論文は8章より構成され、その内容は以下のとおりである。

第1章は序論であり、雷サージ問題の背景、雷サージ研究の歴史、本論文の目的・構成について述べる。

第2章では通信線路端末に生ずる雷サージの誘起機構の解明およびその特性を把握するために行なった雷サージの観測方法・装置を示している。また、検討の結果明らかとなった(1)雷サージ波形の基本的性質、(2)線路設備の構成(線路の長さ、線路の接地抵抗、線路の分岐の有無)と雷サージの関係、(3)地域差(大地導電率の差、冬雷・夏雷の差)と雷サージの関係、(4)通信線路端末に生じる雷サージの発生分布について述べる。

第3章では光ファイバを用いて同一の雷放電により通信線路のはなれた点に生じる雷サージ波形を観測するシステム及びそのシステムにより明かとなった雷サージの性質について述べる。

第4章では通信設備の概要と、通信線路端末に生ずる雷サージの解析方法及び解析の結果明かとなった雷サージ特性について述べる。解析では、雷放電電流の大きさ、放電路が時間的に変化する場合に空間に発生する電界により線路端末に生じる雷サージ波形を求める理論式を導き、これをまず架空線路・地下線路の端末に生ずる雷サージ特性の解析に適用し、さらに、架空線路と地下線路が複合した場合の理論式を導いている。最後に、この理論式を用いて通信線路端末に生ずる雷サージ分布の解析方法を示している。

第5章では通信装置の耐雷サージ特性を定量的に把握するための試験回路について述べる。本章では、通信線路端末に生ずる雷サージの誘起メカニズムから試験回路を求め、その回路定数を通信線路設備の状況（通信線路長、心線径）から決定する方法について述べる。また、決定された試験回路と通信線路端末に生ずる雷サージの分布から、通信装置に要求される雷サージ耐力に応じた試験波形の決定法についても述べる。

第6章では、第5章で検討した雷サージ試験回路を実際に構成し、試験を行なった結果について述べる。また、試験結果と雷障害調査の結果より求めた実際の装置の雷サージ耐力を比較している。

第7章では、雷サージの発生頻度が地域により異なることに着目し、通信装置の雷サージの経済的な設定方法について述べる。

第8章は本論文のまとめである。

本論文では、通信装置の雷サージ試験回路について述べており、具体的な通信装置の雷防護設計に関しては研究を行っていない。しかし、雷サージ防護対策の研究を行なう上で、個々の対策設計法を把握しておくことは非常に重要であり、以下に、これまで行なわれて来た通信装置の雷防護設計に関する研究成果について述べる。

通信装置の雷防護設計は、落雷等により装置に印加される異常電圧、電流（雷サージ）から通信装置を保護することを目的としており、基本的には、装置に印加される雷サージを大地に放流する機能、および機器・部品への侵入を阻止する機能の組み合わせから構成される。ユーザ宅に於いて、電話機等の端末装置と通信線の間には挿入される加入者保安器はその代表的なものである。

従来の通信機器は構造が単純であり、比較的大きな耐雷サージ性を有していたため、防護設計の研究が盛んになりだしたのは、通信装置への半導体部品の導入が始まった昭和30年代後半からである。特に、最近、通信装置の固体電子化の進展により、装置の絶縁耐圧・サージ耐量が低下したにともない、保安装置の高性能化の研究が行われている[107]。

通信装置の雷防護設計の研究は大きく、（1）防護素子の研究、（2）通信装置の防護回路の設計、（3）雷サージを大地に放流するための接地構成法の研究に分類される。

（1） 防護素子

防護素子は、炭素避雷器、ガス入避雷管、酸化亜鉛バリスタ、シリコンサージ防護素子および電流遮断素子に分類される。各防護素子の諸特性を付表 1. 1 に示す[107]。

炭素避雷器は構造が簡単で安価であるため、加入者保安器やクロスバー交換器の保安素子として使用されてきたが、放電開始電圧等の動作特性が不安定であるため、徐々に高性能なガス入避雷管に置き変わる傾向にある[108]。

ガス入避雷管は金属電極を低圧のガス中に封入したもので、放電電流が大きく取れ、電極間容量が1 p F程度と小さいため、当初はPCM中継装置、海底同軸中継装置のサージ防護素子として開発された。最近では、通信装置の高度化に伴い、加入者保安器

にも使用されるようになってきている[115].

酸化亜鉛バリスタは、比較的新しい防護素子であるが、電圧非直線性・動作電流電圧範囲・応答速度等の性能及び経済性等に優れているため、電力系統用アレスタや電子回路用サージ吸収素子として利用されている[116].

サージ防護用半導体素子は動作速度が速いため、避雷器やバリスタを通過してきた残留高周波サージを吸収するために使用されており、種類としてはPNPNダイオードやツェナーダイオード等がある[117].

最後に、電流遮断素子としてはヒューズやヒートコイルがある。特にヒューズについては、本来、電力線が通信線に事故により接触した際に線路端末に生じる電圧を防ぐことを目的として使用されるが、第1章で示したように、雷サージによる溶断が問題となる。そこで、雷サージに対する耐量を増した耐雷ヒューズの開発等が行われている[118].

付表1. 1 各防護素子の諸特性

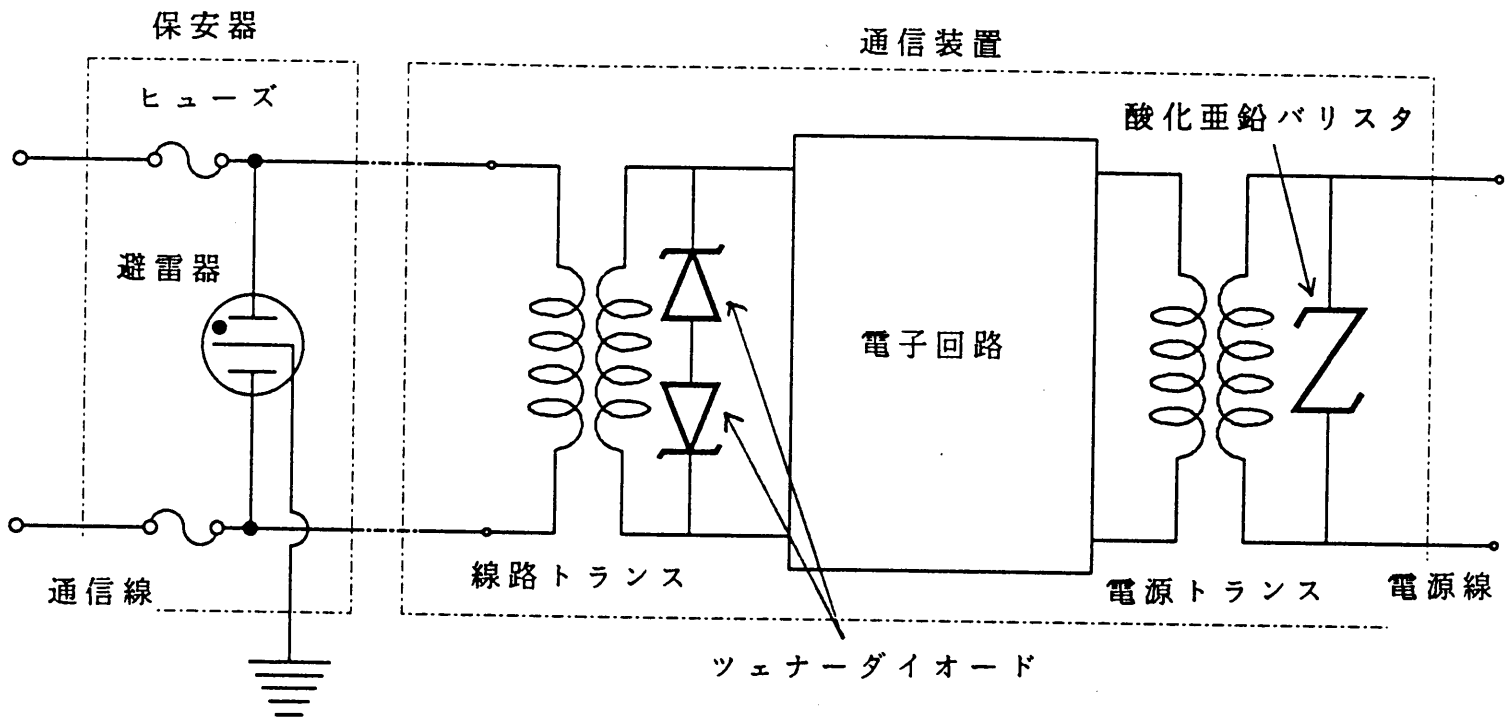
防護素子	応答時間 (μ s)	動作電圧 (V)	サージ 電流耐量 (A)	静電容量 (pF)	用途
炭素避雷器	~10	10^2 ~ 10^3	10^4 100μ s	~50	屋外内の接続部
ガス入避雷管	~1	10^2 ~ 10^3	10^5 100μ s	~1	屋外内の接続部
酸化亜鉛 バリスタ	~0.05	10^1 ~ 10^3	10^3 20μ s	~ 10^4	屋外内の接続部 装置の入出力部
サージ防護用 半導体素子	~0.001	10^0 ~ 10^2	10^5 10μ s	~10	装置・機器の各回路

(2) 防護回路設計

個々の通信装置の雷防護設計回路の研究は非常に多く実施されている。この研究を大きく分けると中継器などの防護設計[119]-[123]，交換器の防護設計[124]-[127]，電話機などの宅内装置の防護設計[128]-[131]が主なものであり，間接的に雷防護設計に影響する接地技術の研究がある。

中継器等の防護設計では，入力端子とアース間に接続されている避雷器の放電のバラツキにより導体間に現われる雷サージの対策方法，入力側と出力側へ抜ける雷サージ対策方法などが主な研究内容である。交換機の雷防護設計においては，デジタル化にともなって加入者回路（入力端子）の電子化により耐雷性能が悪くなり問題が大きくなった，主な技術内容は，交換機内部の接地電位を共通接地を行なって電位差を小さくする技術，1次アレスタと2次防護回路（バリスタ）により，入力サージを減少させる技術が行なわれている。

宅内装置の雷防護回路に於いては，商用電源を有していない装置と有する装置で対策法が異なり，前者では1次，2次防護素子を組み合わせてサージ電圧を減少させ，後者では前者の技術に加えて通信側に生じた雷サージが商用電源側に通過して行く現象に対する雷サージ対策技術が検討されている。宅内装置の防護回路例を付図1. 1に示す。図に示すように加入者保安器で周波数成分の低い雷サージを減少させ，宅内装置内部に設置したツェナーダイオードで高周波成分を取り除いている。電源側から侵入する雷サージについては電源側に挿入した酸化亜鉛バリスタで取り除いている。最後に，線路側と電源線側に挿入されているトランスにより，通信線から侵入して電源線側に抜ける雷サージ及びその逆の経路を通る雷サージに対する耐力の向上を図っている。

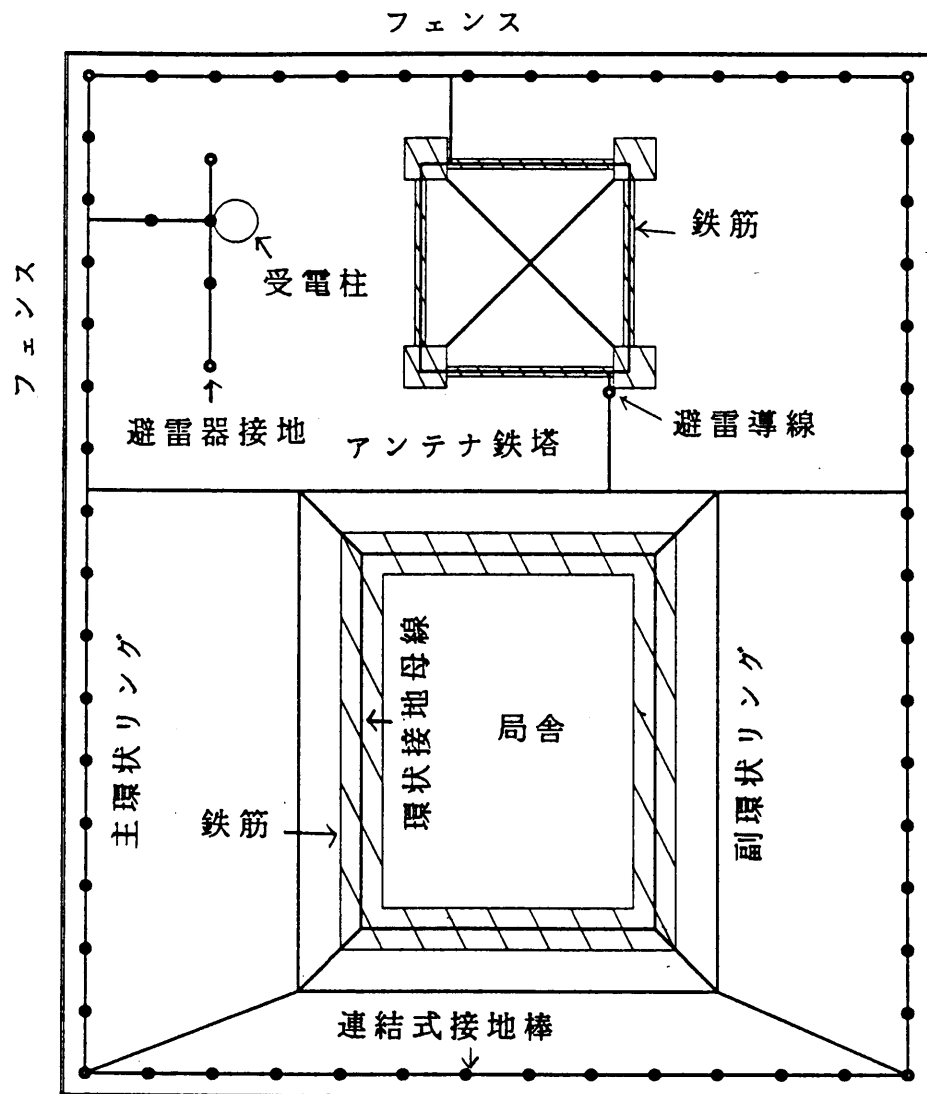


付図 1. 1 宅内装置の雷防護回路例

(3) 接地構成法

接地構成法に関する技術に於いては、低抵抗接地を行なう技術、複数の接地間を共通化する技術、接地の高周波特性に関する技術が行なわれている[132], [133], [57].

一例として、山頂無線中継所の接地構成[57]を付図1. 2に示す。図に示すように、雷の無線鉄塔への直撃が多い山頂無線中継所では、中継所周囲に多数の接地極を埋設し、これを導線で接続して主環状リングとし、また、局舎周囲には地中に導線を埋設して副環状リングとし、さらに局舎内では壁面に沿って導体を張り巡らして局内環状母線として、これら3つのリングを数カ所で互いに接続して網状にすることにより落雷時の電位の均一化と接地の高周波特性の改善を図っている。



付図 1. 2 山頂無線中継所の接地構成

参考文献

- [1]山口開生, "電気通信サービス・技術の展望", N T T R & D, 38, 4, pp.339~347, 1989
- [2]戸田巖, "N T Tの研究開発の動向", N T T R & D, 38, 4, pp.351~363, 1989
- [3]五嶋一彦, 岩橋栄治, "デジタル加入者系システムの構成方式", 電気通信研究所研究実用化報告, 32, 11, pp.2425~2432, 1983
- [4]都丸喜成, "デジタル通信網への展望", 電気通信研究所研究実用化報告, 28, 7, pp.1217~1220, 1979
- [5]池田博昌, 塚田啓一, 木村英俊, 江川哲明, "I S N伝達システム", 36, 8, pp.967~975, 1967
- [6]江川哲明, 吉田真, "I S D Nシステムの概要", 38, 7, pp.721~728, 1989
- [7]桑原伸夫, 満永豊, 古賀広昭, "光ケーブルに用いるFRPの破断寿命推定法", 信学論(B), J68-B, 9, pp.1081-1082, 1985
- [8]桑原伸夫, 古賀広昭, "ノンメタル光ケーブル用高信頼性FRP抗張力体", 信学論(B), J71-B, 5, pp.626~632, 1988
- [9]石井芳一, 高沢尋佳, "通信用材料の開発とその信頼性—新素材開発から劣化対策まで—", N T T R & D, 40, 7, pp.933~934, 1991
- [10]藤本尋作, 秋山延義, 川島信, "I S N伝達システムの運用保守システム", 研実報, 36, 8, pp.1003~1010, 1987
- [11]吉田正勝, 難波大二, 池田幸雄, 馬場正和, "計算機システム診断支援への知能処理技術の応用", 研実報, 36, 9, pp.1127~1139, 1987
- [12]阿部威郎, 林正博, 能條哲, "通信網の信頼性設計評価法", N T T R & D, 40, 10, pp.1327~1334, 1991
- [13]山本秀男, 小山田聡, 及川寿雄, 前川英治, "加入者光線路網の構成法", 研実報, 34, 7, pp.1099~1110, 1985
- [14]大川原忠義, 金谷文夫, 松岡毅, "フレーム間符号化方式の概要", 26, 1, pp.1~6, 1977

- [15]北脇信彦, "音声品質の客観評価法の実現を目指して", N T T R & D, 39, 12, pp.1625~1630, 1990
- [16]高橋謙三, 渡辺一央, "I S Nに向けた映像伝送品質規定法", N T T R & D, 37, 3, pp.233~pp.243
- [17]山崎満則, 飯出泉二郎: 衛星の電磁適合性システムデザインインテグレーション, 電子通信学会誌, 67, 2, pp.177~183, 1984
- [18]人工雑音の発生と対策, 電気学会誌, 89, 7, pp.1191~1244, 1969
- [19]荒木庸夫: 電磁妨害防止対策の原理と実際, 電気学会誌, 103, 3, pp.231~238, 昭58-3
- [20]電磁環境技術小特集, 電子通信学会誌, 67, 2, pp.136~173, 1984
- [21]小島伸哉, 石田之則: 既設市内ケーブルに対するラジオ電波妨害, 電気通信研究所研究実用化報告, 20, 4, pp.837~855, 1971
- [22]栗山明海, 島村辰男, 中川正和: ラジオ放送波の電話機への混入対策・その1, 混入状況の調査とAM波帯用フィルタ, 電子通信学会技術研究報告, EMCJ82-1, pp.1~6, 1982
- [23]服部光男, 元満民生, 大槻文男, 山根宏, 古賀広昭: 加入者通信線に現れる放送波誘導電圧, 電子通信学会論文誌B, 67B, 7, pp.822~823, 1984
- [24]M. Hattori, F. Ohtsuki, T. Motomitsu and H. Koga : Radio Broadcast wave Induction Voltage and Pair Unbalance in Subscriber Cable, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.884~889, 1984
- [25]高分子学会編: 静電気ハンドブック, 他人書館, 昭42-1
- [26]伴野明, 長山忠洋: 電子化ボタン電話装置用静電気サージ吸収回路, 昭和57年度電子通信学会通信部門全国大会 641, 昭57-8
- [27]栗林仁, 石田之則, 藤原貢, 井手口健: パルス性線路雑音の評価法に関する検討, 電子通信学会論文誌C, 69C, 8, pp.974~983, 1986
- [28]越後宏, 栗原裕司, 佐藤利三郎: 都市におけるインパルス雑音発生頻度の統計的性質, 電子通信学会論文誌B, 66B, 10, pp.1191~1198, 1983
- [29]服部光男, 元満民生, 大槻文男, 古賀広昭: メタリック加入者線路の外部誘導電圧, 電気通信研究所研究実用化報告, 32, 11, pp.2611~2621, 1983

- [30]M. Ohmura, H. Koga and K. Yoshida : Noise Characteristics for Existing Subscriber Loop, Review of Electrical Communication Laboratories, 32, 2, pp.377~385, 1984
- [31]H. Fukutomi and I. Tsuboya : A General View of Lightning Protection Technology, Japan Telecommunications Review, April, pp.112~119, 1981
- [32]丸林元 : 通信線に対する雷サージ問題, 電子通信学会技術研究報告, EMCJ77-56 1977
- [33]坂本崇, 中尾善嗣, 富室久 : 中継器給電サージ防護に関する実験的検討, 電子通信学会技術研究報告, CS 73-72, 1973-9
- [34]T. Motomitsu, M. Hattori, H. Yamane and H. Koga : Interference with Digital Transmission Signal due to Lightning Surges Induced on Paired Cables, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.736~741, 1984
- [35]服部光男, 古賀広昭, 井手口健 : アレスタと電磁誘導しゃへいケーブルによる誘導電圧減少法, 電子通信学会論文誌B, 66B, 2, pp.185~192, 1983
- [36]元満民生, 服部光男, 大槻文男, 山根宏, 古賀広昭 : 加入者線路系に生じる電力線からの誘導電圧, 電子通信学会論文誌B, 67B, 7, pp.824~825, 1984
- [37]山根宏, 服部光男, 古賀広昭 : 3極アレスタ放電特性を考慮した通信ケーブルの電磁誘導対策, 電子通信学会論文誌B, 67B, 3, pp.305~312, 1984
- [38]井手口健, 田口守彦 : ケーブルの誘導遮蔽外被構造, 電子通信学会技術研究報告, CS 75-152, pp.17~24, 1975
- [39]服部光男, 山根宏, 古賀広昭 : 3極アレスタによる通信ケーブルの電磁誘導対策設計法, 電子通信学会論文誌B, 68B, 3, 1985
- [40]藤高周平, 三田昇, 費田寛, 大重力 : 雷撃電流と雷しゃへいの基本問題, 電気学会誌, 89, 11, pp.2019~2028, 1969
- [41]山上功, 大木芳造, 小川正気 : 宅内設備の雷防護対策, 施設, 29, 7, pp.52~59, 1977
- [42]安生晃一郎 : 送電線の耐雷設計, 電気評論, 臨時増刊, pp.585~590, 1976

- [43] CCITT : The protection of telecommunication lines and equipment against lightning discharge, Published by The International Telecommunication Union, 1974
- [44] CISPR Pub. 22, 1987
- [45] 徳田正満, 栗山明海, 金子義正, "通信装置のEMC技術の概要", N T T R & D, 40, 4, pp.467~472, 1991
- [46] ノイズ対策最新技術編集委員会編, "ノイズ対策最新技術", 総合技術出版社, 1986
- [47] 雨宮不二雄, 桑原伸夫, 田淵誠, "通信装置が発生する通信線端子妨害波の試験法", 40, 4, pp.473~480, 1991
- [48] 服部光男, 池田直司, 大槻文男, 小林幸治, "ISDN ネット64に適用するメタリック加入者線路系のEMC評価", 研究実用化報告, 37, 12, 1988
- [49] N. Kuwabara and T. Ideguchi, "Calculation on near field emitting from telecommunication lines", Trans. IEICE Japan, E70, 4, pp.247-249, 1987
- [50] N. Kuwabara, T. Ideguchi, "Probe for measuring interference voltages at ISDN telecommunication line interfaces", IEEE Int. Symp. on EMC (Seattle) pp.311~316, 1988.
- [51] N. Kuwabara, F. Anemiya and T. Ideguchi, "Interference field emission due to unbalance in telecommunication lines", IEEE Int. Symp. on EMC (Nagoya) pp.487~492, 1989
- [52] E. D. Sunde "Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover Pub., 1968
- [53] 大和玄一, 三谷弘: 雷害事故実態, 電気学会誌, 98, No. 12, pp.1151~1155, 昭53-12
- [54] 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦, 貝津良輔, 山口開生: 通信線路端末に現れる雷サージ波形の特性, 電子通信学会論文誌B, 64B, 7, pp.627~634, 1981
- [55] 大和玄一: 誘導雷サージとその発生頻度の考察, 電気学会誌, 84, 12, pp.1956~1965, 1964
- [56] R. L. Carroll and P. S. Miller: Loop Transients at the Customer Station, Bell System Technical Journal, 59, No.9, pp.1609~1643, 1980

- [57]向笠和夫, 上池啓一, 愛宕清, 東濃勇, 藤岡信照, 清谷幸雄: 無線中継所の雷害対策, 電気通信研究所研究実用化報告, 25, No. 5, pp.907~940, 1976
- [58]石田之則, 元満民生: PCM-100M伝送路の雷害予測解析, 電気通信研究所, 研究実用化報告, 21, 8, pp.1581~1596, 1972
- [59]関野吉宏, 大竹和虎, 清水幸雄, 飯塚文男: 通信用電力設備への進入雷サージとその防護, 電気通信研究所研究実用化報告, 30, 15, pp.1187~1198, 1981
- [60]R. Mosch: Overvoltage Protection of Telephone Switching Equipment Containing Components, Electrical Communication, 49, No.2, pp.159~169, 1974
- [61]K. Takemoto: Surge Propagation Characteristics on Submarine Repeated Line, IEEE, COM-26, No.10, pp.1421~1425, 1978
- [62]沢栗達也, 竹本憲治, 袴田吉朗, 堤俊介: 海底同軸中継伝送路における雷防護, 電気通信研究所研究実用化報告, 30, 5, pp.1217~1228, 1981
- [63]横山茂: 数値解析手法による誘導雷サージ現象の解明, 電気学会論文誌B, 96, No. 11, pp.561~568, 昭51-11
- [64]H. Koga, T. Motomitsu and M. Taguchi: Lightning Surge Waves Induced on Overhead Lines, Trans. of IECE of Japan, E62, 4, pp.216-223, 1979
- [65]畠山久尚: 雷の科学, 河出書房新社, 1970
- [66]北川信一郎: 雷と雷雲, 電気評論-特集, 雷害防止対策の最近の動向-, pp.569~584, 1976
- [67]竹内利雄: 北陸における冬季雷の研究, 電気学会誌, 98, No. 12, pp.1156~1159, 昭和53-12
- [68]M. A. Uman: Lightning; Dover publications New York, 1984
- [69]E. J. Workman, M. Brook and N. Kitagawa: Lightning and Charge Strobe, Journal of Geophysical Research, 65, 5, pp.1513~1517, 1960
- [70]N. Kitagawa, M. Brook and E. J. Workman: Counting Currents in Cloud-to-Ground Lightning, Journal of Geophysical Research, 67, 2, pp.637~647, 1962
- [71]E. J. Workman, M. Brook and N. Kitagawa: Lightning and Charge Strobe, Journal of Geophysical Research, 65, 5, pp.1513~1517, 1960

- [72]M. Brook and N. Kitagawa : Some Aspects of Lightning Activity and Related Meteorological Conditions, Journal of Geophysical Research, 65, 4, pp.1203~1210, 1960
- [73]W. L. Taylor : A VHF Technique for Space-Time Mapping of Lightning Discharge Processes, Journal of Geophysical Research, 83, C7, pp.3575~3583, 1978
- [74]K. B. Mceachron : Multiple Lightning Strokes, AIEE, 53, Dec., pp.1633~1637, 1934
- [75]I. W. Gross, G. D. McCann and E. Beck : Field Investigation of the Characteristics of Lightning Currents Discharged by Arresters, AIEE Trans., 61, May, pp.266~271, 1942
- [76]G. D. McCann : The Measurment of Lightning Currents in Diréct Strokes, AIEE, 63, pp.1157~1164, 1944
- [77]笠井孜 : 建造物の高さと雷撃頻度, 電気試験所 報, 28, 7, pp.481~484, 1964
- [78]K. Berger : Novel Observations on Linghtning Discharge : Results of Research on Mount San Salvatore, Journal of the Franklin Institute, 283, 6, pp.478~525, 1967
- [79]R. P. Fieux, C. H. Gary, B. P. Hutzler, A. R. Eybert-Berard, P. L. Hubert, A. C. Meesters, P. H. Perround, J. H. Hamelin, J. M. Person : Reserch on Artificially Triggered Lightning in France, IEEE Trans., PAS-97, No.3, pp. 725~733, 1978
- [80]堀井憲爾, 宮地巖 : ロケットによる雷放電トリガの実験, 電気学会誌, 98, No. 12, pp.1160~1162, 昭53-12
- [81]R. H. Golde : Lightning Surges on Overhead Distribution Lines Caused by Indirect and direct Lightning Strokes, AIEE, 73, PtⅢA, pp.437~446, 1954
- [82]Y. T. Lin, M. A. Uman and R. B. Standler : Lightning Return Stroke Models, Journal of Geophysical Research, 85, C3, pp.1571~1583, 1980
- [83]P. F. Little : Transmission line representation of a lightning return

stroke, Appl. Phys., 11, pp.1893~1910, 1978

- [84]M. A. Uman, D. K. McLain and R. J. Fisher: Electric Field Intensity of the Lightning Return Stroke, Journal of Geophysical Reseaech, 78, 18, pp.3523~3529, 1973
- [85]P. Chowdhure: Voltages surges induced on overhead lines by Inghtning strokes, Proc., IEE, 114, NO.12, pp.1899~1907, 1967
- [86]大和玄一: 誘導雷サージとその発生頻度の考察, 電気学会誌, 84, 12, pp.1956~1965, 1964
- [87]J. D. Nordgars, Chin-Lin Chen: Lightning-induced Transients on Buried Shielded Transmission Lines, IEEE Trans. on EMC, EMC-21, No.3, pp.171~181, 1979
- [88]虫明康人, 安達三郎: 基礎電波工学, 共立出版, 1970
- [89]後藤幸弘, 成田憲一, 内藤文信, 堀英一, 米田英彦: 独立高鉄塔の雷電流測定, 電子通信学会技術研究報告, EMC J 77-58, pp.13~18, 1977
- [90]電気学会編: 避雷器とその適用, 電気学会, 昭和43年
- [91]永野敏美: 磁鋼片による符号の異なる雷電流の測定, 電子通信学会論文誌 B, 67 B, 7, pp.805~811, 1984
- [92]向笠和夫, 上池啓一, 愛宕清, 東濃勇, 藤岡信照, 清谷幸雄: 無線中継所の雷害対策, 電気通信研究所研究実用化報告, 25, No. 5, pp.907~940, 1976
- [93]石田之則, 中平瑞穂, 元満民生, 麦田真佐夫: 平衡形ケーブルに生じる誘導雷サージの観測結果, 電気通信研究所研究実用化報告, 20, No. 7, pp.1517~1531, 1971
- [94]P. Chowdhuri: Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes, Proc. IEE, 114, No.12, pp.1899~1907, 1967
- [95]E. Bennison, A. J. Ghazi and P. Ferland: Lightning Surges in Open Wire, Coaxial, and Paired Cables, IEEE Trans., COM-21, No.10, pp.1136~1143, 1973
- [96]D. W. Bodle and P. A. Gresh: Lightning Surges in Paired Telephone Cable Facilities, Bell system technical Journal, March, pp.547-576, 1961

- [97]横山茂：配電線誘導雷現象の解析とその実証に関する研究，
学位論文（東京大学），昭61
- [98]R. L. Carroll: Loop Transient Measurements in Cleveland, South Carolina,
Bell system Technical Journal, 59, No. 9, pp.1645~1680, 1980
- [99]J. Dutt: Overvoltages on Subscriber Lines, Electrical Communication 54,
No. 2, pp.115~119, 1979
- [100]N. Kuwabara, F. Amemiya and M. Tokuda, "An electric-field probe using a
bulk LiNbO₃ electro-optic crystal", Third Optoelectronics Conference
(OEC'90), 12B3-14, 1990
- [101]N. Kuwabara, K. Tajima and F. Amemiya, "Development of wide-band and
highly sensitive electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator",
IEEE Int. Symp. on EMC, (New Jersey), pp.267~272, 1991
- [102]H. H. Beverage: The Wave Antenna, Trans. AIEE, 42, pp.215-216, 1923
- [103]H. KADEN : Das Nebensprechen zwischen parallelen koaxialen Leitungen,
Elektrische Nachrichten Technik, Nov., 1936
- [104]A. K. Agrawal, H. J. Price and S. H. Gurbaxani: Transient response of
multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electro-
magnetic field, IEEE Trans. on EMC, EMC-22, 2, pp.119-129, 1980
- [105]山本賢司, 松原一郎, 木下仁志, 岡重信: 架空配電線の近傍落雷時の誘導雷サー
ジ解析, 電気学会論文誌 B, 103, No.11, pp.735~742, 昭58-11
- [106]D. W. Bodle and P. A. Gresh: Lightning Surges in Paired Telephone Cable
Facilities, Bell System Technical Journal, March, pp.547~576, 1961
- [107]CCITT Recommendation of the K series K17: Test on power-fed repeaters
using solid-state devices in order to check the arrangement for
protection from external interference, Red Book, 1985
- [108]IEEE Standard 28-1974, IEEE Standard for Surge Arresters for
Alternating-Current Power Circuits
- [109]CCITT Recommendations of the K series K12: Characteristics of gas
discharge tubes for protection of telecommunications installations, Red
Book, 1985

- [110] D. W. Cliffoord, K. E. Crouch and E. D. Schulte: Lightning Simulation and Testing, IEEE Trans., EMC Trans., EMC-24, No. 2, pp. 209~224, 1982
- [111] 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦, 貝津良輔, 山口開生: 通信装置に印加される雷サージ試験波形設定法, 電子通信学会論文誌 B, 64 B, 8, pp. 785~792, 1981
- [112] 元満民生, 古賀広昭, 大槻文男: 雷サージの多重性を考慮した試験波形, 電子通信学会論文誌 B, 68 B, 4, pp. 539~546, 1985
- [113] 通信保安体系出版委員会編: 通信保安体系—雷害対策ハンドブッカー, サンコーシャ, 1986
- [114] 福富秀雄, 坪谷一郎: 雷防護技術の展望, 電気通信研究所研究実用化報告, 30, 5, pp. 1137~1144, 1981
- [115] 黒沢英行, 上条芳昭, 根岸九十九: 通信用ガス入避雷管, 電気通信研究所研究実用化報告, 30, 5, pp. 1229~1242, 1981
- [116] 寺崎善之, 富室久: 酸化亜鉛バリスタ, 電気通信研究所研究実用化報告, 30, 5, pp. 1229~1242, 1981
- [117] 平岡一則, 佐野興一, 金森周一: サージ防護用半導体素子, 電気通信研究所研究実用化報告, 30, 5, pp. 1257~1267, 1981
- [118] 石崎, 松平: 加入者保安器用耐雷ヒューズ管の実用化, 電気通信研究所研究実用化報告, 28, 2, pp. 255, 1979
- [119] 石田之則, 元満民生: PCM-100M伝送路の雷害予測解析, 電気通信研究所研究実用化報告, 21, 8, pp. 1581~1596, 1972
- [120] 向笠和夫, 上池啓一, 愛宕清, 東濃勇, 藤岡信照, 清谷幸雄: 無線中継所の雷害対策, 電気通信研究所研究実用化報告, 25, No. 5, pp. 907~940, 1976
- [121] 袴田吉朗, 沢栗達也: 海底同軸中継器のサージ防護設計法, 電子通信学会論文誌 B, 63 B, 4, pp. 325~332, 1980
- [122] 坂本崇, 島田悠紀: 同軸PCM中継器における給電サージ防護に関する検討, 電気通信研究所実用化報告, 23, 4, pp. 613~630, 1974
- [123] 藤岡信照, 上條芳昭, 綿谷秀雄, 渡辺保, 黒沢秀行: PCM-24C中継伝送方式中間中継盤の雷防護, 電気通信研究所研究実用化報告, 30, 12, pp. 2895~2909, 1981

- [124]出口文彦, 山田博希 : D 7 0 デジタル交換機加入者回路の雷防護設計, 電気通信研究所研究実用化報告, 3 3, 7, pp.1787~1798, 1984
- [125]黒沢秀行, 藤岡信照, 根岸九十九 : D 7 0 デジタル交換機用保安器, 電気通信研究所研究実用化報告, 3 3, 7, pp.1799~1813, 1984
- [126]R. Mosch : Overvoltage Protection of Telephone Switching Equipment Containing Electronic Components, Electrical Communication, 49, No.2, pp.159~169, 1974
- [127]UK Post Office : The Protection of Electronic and Crossbar Telephone Exchange Equipment from Surges due to Lightning, CCITT, Study Group V Contribution No.12, Oct., 1977
- [128]R. Tharby : Protection of Telecommunications Lines and Equipment Against Overvoltages and Overcurrents, International symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.274~279, 1984
- [129]山森和彦, 紺野正次, 吉利誠, 渡辺保 : 電子化電話機の回路構成, 電気通信研究所研究実用化報告, 3 3, 6, pp.1255~1268, 1984
- [130]新田義昭 : 電力用電子通信機器の接地設計, 電気評論, 臨時増刊, pp.595~599, 1977
- [131]藤岡信照, 広田真一郎, 加藤邦紘, 濃沼健夫 : 宅内及び局内装置の雷防護, 電気通信研究所研究実用化報告, 3 0, 5, pp.1209~1216, 1981
- [132]吉田幸司, 清谷幸雄, 関進, 開沼啓, 木島均 : サージインピーダンスによる接地の評価, 電気通信研究所研究実用化報告, 3 0, 5, pp.1199~1207, 1981
- [133]福富秀雄 : 電気的低接地工法の選定手法, 電子通信学会論文誌 B, 6 3 B, No. 3, pp.254~261, 1980

2. 1 まえがき

通信装置の雷サージ防護対策を行なうためには、通信装置に印加される雷サージの発生メカニズムや発生状況を明らかにする必要がある。しかし、雷放電は自然現象であり、それを発生源として生じる雷サージの発生メカニズムは複雑で、多くの科学者の努力により少しずつは解明されてきているが、通信線路端末に生じる雷サージを理論のみで明確にできるまでにはいたっていない。また、雷放電電流の大きさや落雷場所が一定していない。通信線路端末に生じる雷サージはこれらのパラメータにより大きく影響を受けるので、雷サージ防護対策を行なうためにはその統計的な性質を把握する必要がある。

そこで、雷サージの観測を行い、その結果から、雷サージの発生メカニズム、通信線路の条件と雷サージの関係、雷サージの分布形等を明らかにしてゆく必要がある。

本章では、上記の目的のために、雷に対する被害の多い加入者線路を主対象として、①雷サージ観測装置、②雷サージ観測方法、③観測の結果明かとなった雷サージの統計的性質及び通信線路の各種要因と雷サージとの関係について述べる。

2. 2 雷サージ観測装置

通信線路端末に現われる雷サージは自然現象であり、その特徴を列挙すると以下のようになる。

- ①雷サージは瞬時エネルギーが大きく、人体に対する危害や測定装置の破壊を起こす可能性がある。
- ②雷の発生時刻、場所を予測することは困難であるので、常時、無人で観測できる体制を維持する必要がある。
- ③雷サージは μs ～ ms で発生、消滅するパルスであるため、その主な周波数成分は直流から数MHzの範囲に広がっている。
- ④雷サージの波高値は、数10V～数10kVの範囲であり、測定に際しては広いダイナミックレンジを必要とする。

⑤測定は屋外で行なわれるため、測定装置に要求される環境条件（温度、湿度、塵埃、振動）に対する条件が厳しくなる。

⑥少ない観測データより、通信線路の各種要因依存性を明らかにするためには、同一雷放電により通信線路上のいろいろな場所に現われる雷サージを観測する必要がある。

このように、雷サージ観測にはいくつかの特徴があるため、使用する装置の市販品はなく、測定対象に応じて観測装置を構成する必要がある。現在、雷サージの観測に用いられている主な観測装置を表2. 1に示す。以下、本研究で使用した観測装置の構成について述べる。

表2. 1 雷サージ観測装置の主な仕様と特徴

観測項目	観測装置	主な仕様	観測に用いている機能	備 考
雷サージ 電圧 波形	クリドノ グラフ[1]			測定精度が悪く使用されていない
	雷サージ カウンタ [2],[3]	0.4~1kV (3V \wedge N)[4] 0.1~1kV (6V \wedge N)[3]	電池駆動のコンパ レータと電磁カウ ンタを使用	長期間の測定に適する。本 研究では文献[3]の改良品 を使用
	オシロス コープ [3],[4], [5],[6]		オシロスコープと 自動巻取りカメラ を使用	雷サージの立ち上がり部分 の測定が困難であり、現在 は使用されていない。
	データレ コーダ [7],[8]		エンドレスの磁気 テープデータレコ ーダを使用	長い時間波形の観測に適す る。本研究では多重雷の観 測に使用
雷サージ 電流 波高 値	磁網片[9], [10],[11]		網片の帯磁特性を 利用	広い範囲での観測に適する が、雷サージの到来回数を 測定するのは困難であり、 直撃雷等の発生頻度の小さ い雷サージの観測に使用さ れている
	アレスタ 放電[12]		アレスタ動作後の 放電痕を利用	
	Pバルブ [13]		アルミニウム箔上 の放電痕を利用	

(1) 雷サージカウンタ

雷サージの波高値を記録する装置としては、磁網片[9]やクリドノグラフ[1]など小型軽量で操作が簡単なものがあるが、これらはいずれも測定精度や雷サージの到来回数が記録できない等の問題点がある。

そこで、これらの欠点を補うための波高値記録装置として雷サージカウンタが考案された[2],[3]。雷サージカウンタの構成を図2. 1に示す。雷サージカウンタは主に以下に示す回路により構成されている。

- ①回路A：侵入雷サージ波形の極性を無関係にする全波整流回路
- ②回路B：雷サージ波高値分圧回路
- ③回路C：回路Bの出力電圧があるレベルになると電磁カウンタを動作させるコンパレータ回路

本研究で使用した雷サージカウンタの外観を図2. 2、雷サージカウンタの性能を表2. 2に示す。本研究では、観測精度を改善するため、雷サージカウンタの動作時間、レベル設定に改良を加えた。

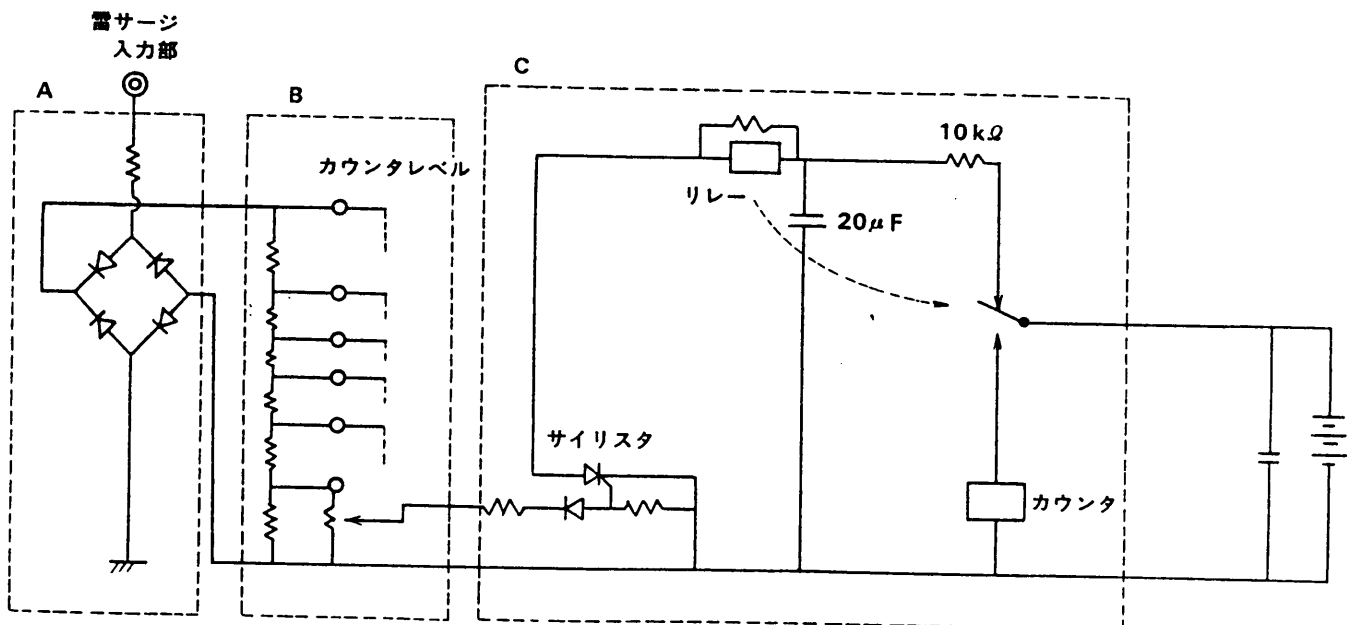


図2. 1 雷サージカウンタの回路構成

まず、雷放電は第1章で述べたように多重性[14]があり、1回の落雷で平均で3回の雷放電が起こる。この多重雷の放電間隔は平均40ms～100msである。雷サージカウンタの電磁カウンタの動作時間は数10msであるため、一度の落雷で、雷サージカウンタが1度動作したり2度以上動作する場合があります。雷サージ発生頻度を把握する上で測定誤差となる。このため、最初の雷サージをカウントした段階で一定時間カウンタの機能をマスクする機能を追加した。マスク時間としては、多重雷放電の時間が1秒以上続くことはほとんどないので[14]1秒とした。本機能は回路Cのコンデンサ(20 μ F)と抵抗(10k Ω)により定めている。

また、雷サージカウンタの動作電圧レベルは表2.2に示すように設定した。観測では、屋外型と屋内型の2種類のカウンタを用いその電圧レベルを5:1に設定した。これは、これまでの雷サージ波高値の観測の結果、加入者側(屋外型で観測)の電圧は局内側(屋内型使用)の電圧に比べて5倍程度大きくなる事が予測されているので[3]、電圧設定レンジを細かくし、雷サージ波高値を正確に測定するためである。

さらに、外国では雷サージの最大値が1～2kVと報告されているが[2]、雷放電電流の発生分布から推定すると、長い期間の観測ではかなりの高い波高値も観測されることが予測されるので、屋外型の雷サージカウンタの最大動作電圧レベルを10kV、屋内型の最大動作レベルを2kVとしている。

この装置を用いて雷サージ波高値の分布、通信線路の各種要因(地域差、季節等)依存性の観測をおこなっている。



図2.2 雷サージカウンタの外観

表 2. 2 雷サージカウンタの性能

項目	屋外型	屋内型
入力インピーダンス	100k Ω 以上, 30pF以下	100k Ω 以上, 15pF以下
電圧設定レベル	200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 (V)	50, 100, 200, 500, 1000, 2000 (V)
設定精度	各レンジの $\pm 10\%$	
マスク時間	1秒以上	
動作極性	正及び負	
基準波形	矩形波10 μ sまたはサージ波形(5/20 μ s)	
許容入力	最大レンジの2倍(試験波形(10/200 μ s))	
使用温度	-10 $^{\circ}$ C \sim 60 $^{\circ}$ C	-10 $^{\circ}$ C \sim 50 $^{\circ}$ C
度数計	各レンジ4桁	各レンジ5桁
電源	電池(4D-D6V, 3個)	電池(4D-D6V, 4個)
寸法 (mm)	360 \times 400 \times 250	420 \times 210 \times 240

データレコーダは、到来した雷サージの波形を磁気テープにアナログ信号として記録する雷サージ波形記録装置である[7],[8]。本研究で使用したデータレコーダの構造を図2.3に、その性能を表2.3に示す。

従来、雷サージ波形の記録にはオシロスコープと自動巻き上げカメラが使用されていた[3]。しかし、このシステムでは、

- ①オシロスコープにトリガがかかる前の波形は記録できないので、雷サージ波形の立ち上がり部分の観測が困難である、
- ②時間分解能が悪いので、多重雷等の1秒程度の長い波形を観測すると、雷サージの細かい部分がわからなくなる、

といった欠点がある。そのため、データレコーダ装置が開発された。

この装置は、図2.3に示すように、制御部、エンドレス部、ため込み部で構成される。制御部は常時通信線端末に生じる電圧を監視しており、予め設定した電圧レベルを越える電圧を検出すると装置全体の電源を動作状態にする。エンドレス部は、エンドレスの磁気テープレコーダで構成され、常時動作し続け、到来雷サージをすべて一時記録する。一方、ため込み部は、エンドレス部に記録された雷サージのうち、予

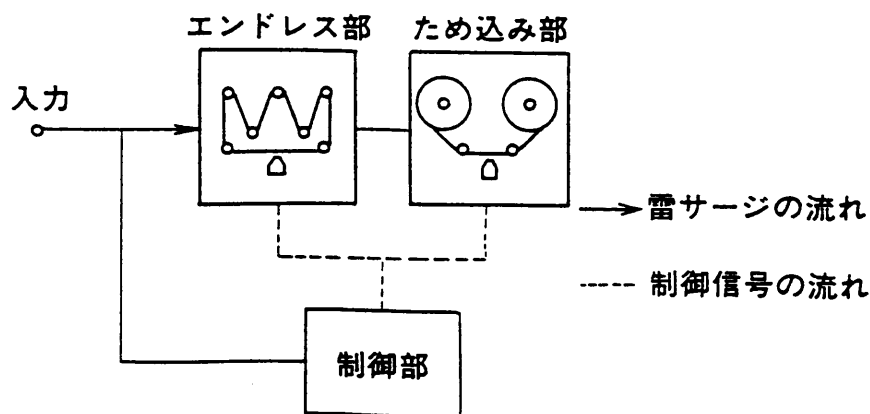


図2.3 データレコーダシステムの構成

め設定したレベルを越える雷サージ波形のみを記録する。その際、ため込み部が動作するまで1～2秒の時間を必要とするが、それはエンドレス部のテープ長を変え、記録から再生までの時間を制御することにより得ている。従って、ため込み部の磁気テープに必要な雷サージを効率良く記録することができる。

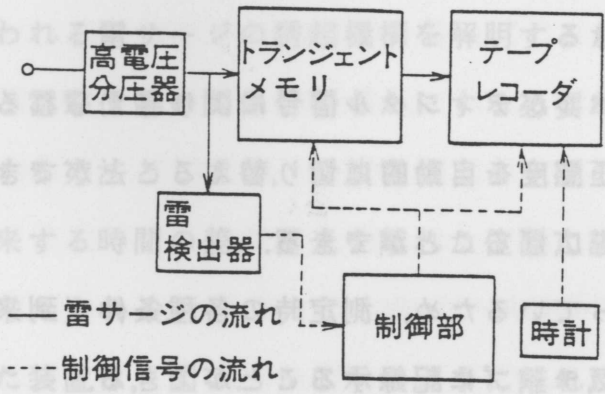
本装置の特徴は、①エンドレス部は常時電圧波形を記録しているの雷サージ波形の立ち上がり部の測定が可能であること、②長時間の波形記録が可能なこと、この測定装置により、通信線路端末に生じる雷サージの多重性の観測を行なっている。

表 2. 3 データレコーダの主な仕様

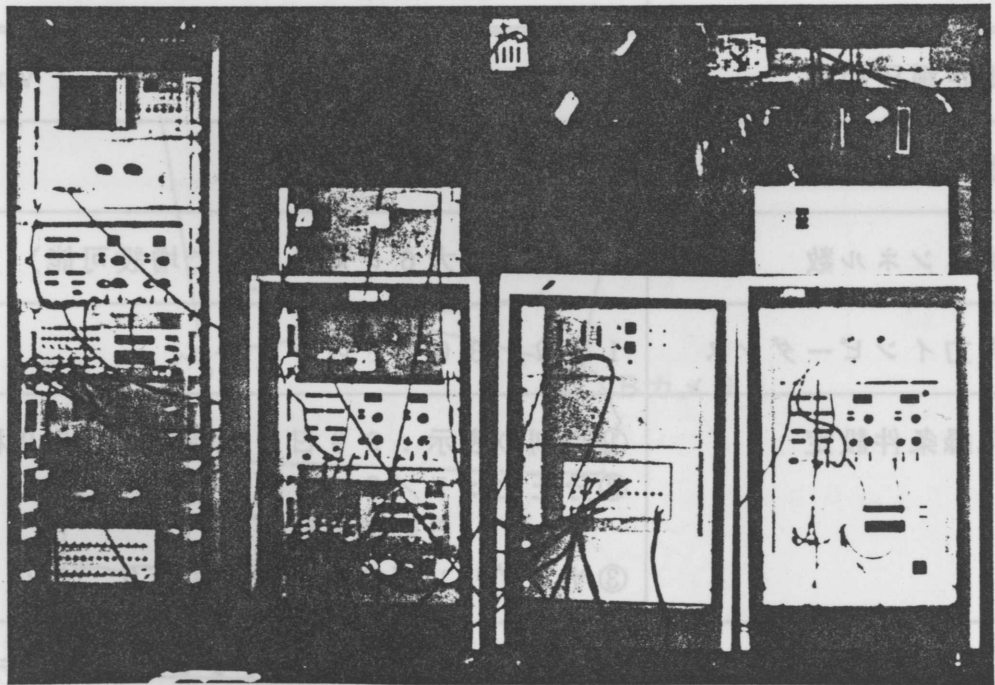
項 目	仕 様
入力電圧	2 VP-P～40 VP-P
チャンネル数	4 チャンネル
入力インピーダンス	100 k Ω
周波数範囲	DC～20 kHz
S/N比	42 dB rms以上
使用温度	10℃～40℃
電源	100 V AC
寸法・重量	600*1800*850(cm), 400kg

(3) 雷サージ波形自動記録装置

データレコーダシステムのエンドレス部を半導体メモリで置き換えたものが波形自動記録装置である。本装置の外観と構成を図2. 4に示す。到来した雷サージは高電圧分圧器で一定のレベルまで分圧された後にトランジェントメモリ部に送られる。ト



(a) 動作機構



(b) 外観

図2. 4 雷波形自動記録装置の動作機構 (a) と外観 (b)

ランジェントメモリ部では入ってきた信号をA/D変換器によりデジタル信号に変換して半導体メモリに蓄える。半導体メモリがいっぱいになると半導体メモリの内容は、書き込み時間の早いものから順次更新されてゆく。ある一定のレベルを越えた雷サージが到来すると半導体メモリの書き込み動作がとまり、メモリの内容はデータレコーダに送られ記録される。

本装置の仕様を表2.4に示す。本装置の特徴は以下のとおりである。

- ① デジタル信号記録であるため、測定可能周波数範囲が広く、雷サージ波形を正確に記録することができる。
- ② 到来した雷サージのレベルがデジタル信号により与えられるため、デジタル処理により、装置の電圧感度を自動的に切り替えることができる。従って、装置のダイナミックレンジを広げることができる。
- ③ デジタル処理を行なっているため、測定時の各種条件（到来時刻、電圧感度、時間分解能）を磁気テープに記録することができる。

表2.4 雷波形自動記録装置の主な仕様

項目	主な仕様
測定電圧範囲	4.2 kV (マニュアルにより0.1 Vから設定可)
最大許容入力	10 kV
チャンネル数	2 cH (最大6システムまで増設可能)
入力インピーダンス	1 M Ω , 30 pF以下
記録条件設定	①時刻の表示：99日23時59分59秒まで ②分圧比：1/2, 1/5, 1/10, 1/20 自動切り替え ③サンプリングタイム：1 s ~ 0.1 μ s
モニタ出力	オシロスコープ、X-Yレコーダ、紙テープ
使用温度	10 $^{\circ}$ C ~ 40 $^{\circ}$ C
電源	AC 100 V
寸法・重量	590 × 1680 × 870 (cm), 300 kg

④最大6システムまで増設可能であるため、通信システムのいろいろな場所に現われる雷サージ波形の同時観測が可能である。

この装置を使用して、雷サージ波形の分布形や通信線路の各種要因（長さ、終端抵抗）と雷サージ波形の関係等の観測を行なっている。

（4） 雷撃位置測定装置

通信線路上に現われる雷サージの誘起機構を解明するためには、通信線路上に現われる雷サージ波形と雷撃位置の関係を明らかにする必要がある。

雷撃位置を測定する方法としては、雷放電による空間の電磁界変化や雷光の到来する時間と雷鳴の到来する時間の差、雷光を離れた位置に設置したテレビカメラで同時観測する方法等が考えられる。

今回観測に用いた装置は、図2.5に示すように離れた位置に置かれた2台のVTRカメラにより雷光を記録し、それぞれのカメラが見込んだ角度により雷撃位置を測定するものである。本研究では、この装置を用いて、雷撃位置と雷サージ波形の関係を観測している。

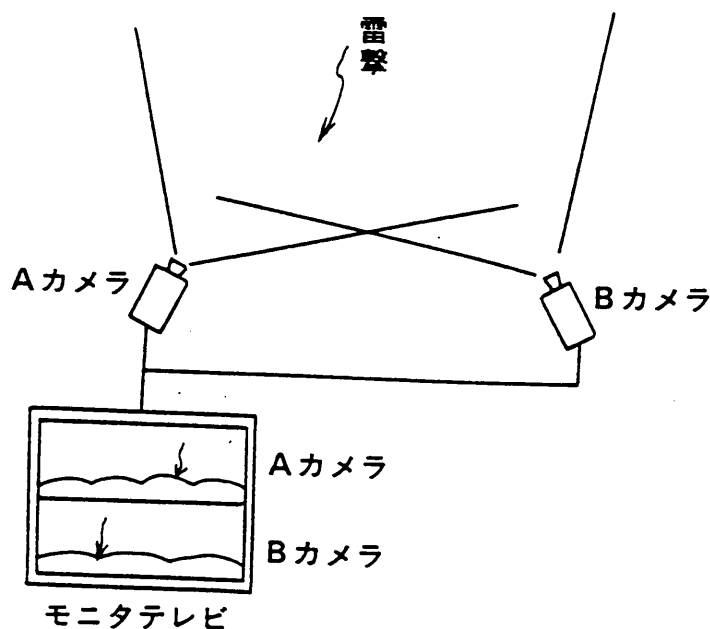


図2.5 VTRカメラを用いた雷撃位置測定装置

2. 3 雷サージ観測方法

雷は地域により発生する季節や大きさが異なり、その発生場所も時間により変化する。雷サージデータを蓄積するためには長期間に渡って広い範囲で観測を行なう必要がある。また、実際の通信線路は、曲がりや分岐があり、架空部、地下部が混在し編目状に広がり複雑な様相を呈している。従って、これら通信線路上に現われる雷サージを単に測定しただけでは、容易に雷サージに対する各種要因の明確化や一般化を引き出すことはできない。そこで、特に雷の多い3地域を選んで現用線路上に現われる雷サージの観測を実施すると同時に、雷サージに対する要因効果が分離しやすい測定専用の通信線路（以下単に実験線路と言う）を建設し、そこに現われる雷サージ波形も測定することとした。

測定実施場所は、①雷の多発地域である、②大地導電率の依存性が観測できる様に大地導電率が異なる地域である、③夏雷と冬雷が観測できる、等の理由から図2.6に示す場所を選んだ。図2.6において、①宇都宮、大田原は日本の代表的な多雷地区であるため、②熊本一の宮、人吉はこの地域が火山帯で大地導電率が小さいため、砺波、金沢、武生は冬雷の多発地域であることから選択した。

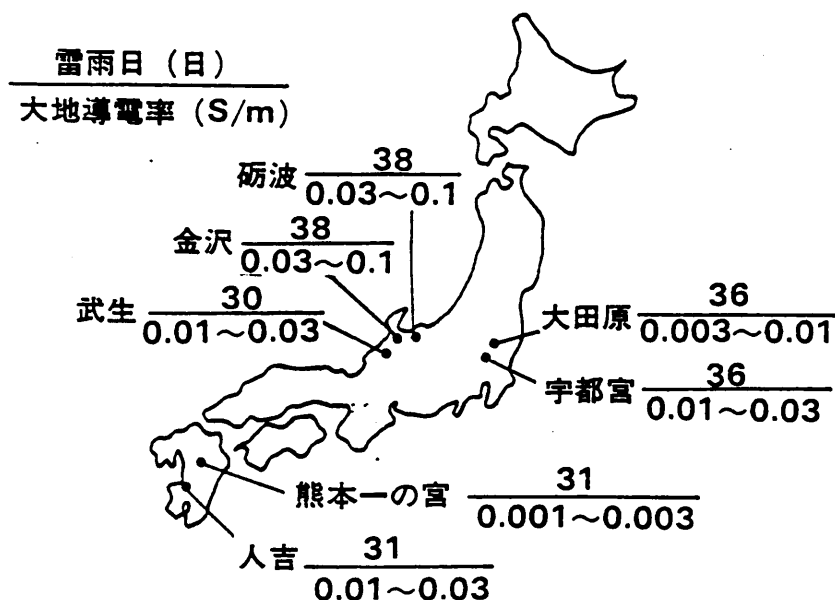


図2.6 雷サージ観測実施場所

測定項目，測定方法，測定場所を表2. 5に示す。測定線路の端末は，原則として，雷サージ波形の反射を小さくするため線路のサージインピーダンス（線路の心線と大地で構成される分布定数線路の特性インピーダンス）にほぼ等しい200Ωで終端し，その両端に現われる雷サージを測定した。

2. 4 通信線路上に現われる雷サージ波高値の各種要因依存性

通信線路上に現われる雷サージは，通信線路の状況（線路長，分岐，接地状況）や当該地域の状況（雷の発生回数，大地導電率）により影響を受ける。そのため，前節に述べたように観測場所を変えて測定を行ったり，実験線路を用いて測定を行なった。以下，雷サージ波高値の各種要因効果について明らかになった事柄について述べる。

表2. 5 雷サージ観測の実施場所

実施場所	観測ルート数	大地導電率(S/m)	線路長(km)	襲雷日数
関東	9	0.01~0.03	1.1~7.9	12
北陸 ^(*)	9	0.01~0.1	1.2~6.2	26~38
九州	10	0.001~0.03	1.4~6.0	15~27

(*)関東，九州は夏期（5月から10月）のみ、北陸は夏期（5月から10月）と冬期（11月と3月）の2期測定。

(1) 雷撃位置依存性

雷撃距離（雷撃点と通信線路との距離）と通信線路上に現われる雷サージとの関係を明らかにするため、雷サージ波形の波高値を測定すると同時に雷撃位置の観測を行った。雷サージ波高値の測定には雷波形自動記録装置を、雷撃位置の測定には1 km離して設置されたVTRカメラを使用した。

観測の結果、雷撃位置とその雷撃により発生した雷サージが対応づけられた測定データを9例得られた。その結果を図2.7に示す。図2.7で計算値は文献[15]に従って計算したものである。

各雷撃の放電電流特性が不明でかつデータ数が少ないため、計算値との厳密な対応づけはできないが図2.7から測定値と計算値はかなり良く一致すると考えられる。なお、雷撃距離による雷サージ波形（波頭長、波尾長）の変化はほとんど認められなかった。

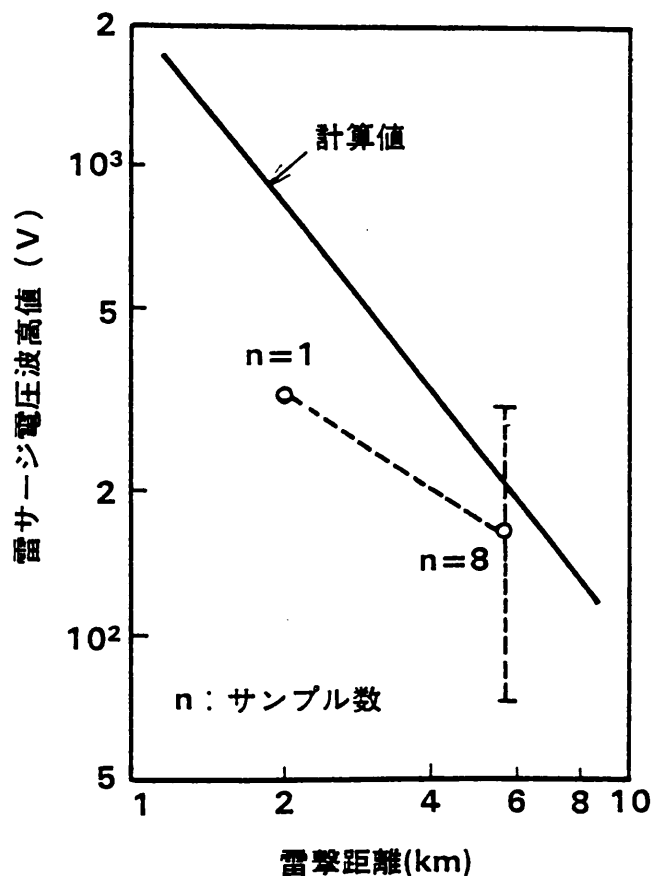


図2.7 観測した雷サージ波高値の雷撃位置依存性

(2) 線路長依存性

実際に使用されている通信線路の長さは一定ではない。そこで、雷サージと線路長
の関係を調査した。調査では直線上の同一ルート上に、線路長の異なる屋外線（長さ、
0.26km, 0.42km, 0.99km, 1.9km）を建設しそこに現われる雷サージを雷波形自動記録装置
を用いて測定した。測定結果を図2.8に示す。図2.8には、観測結果とともに文
献[15]に従って求めた雷撃位置（雷撃点—雷サージ測定点間の距離）が2kmと4k
mの場合の計算結果を参考値として示している。

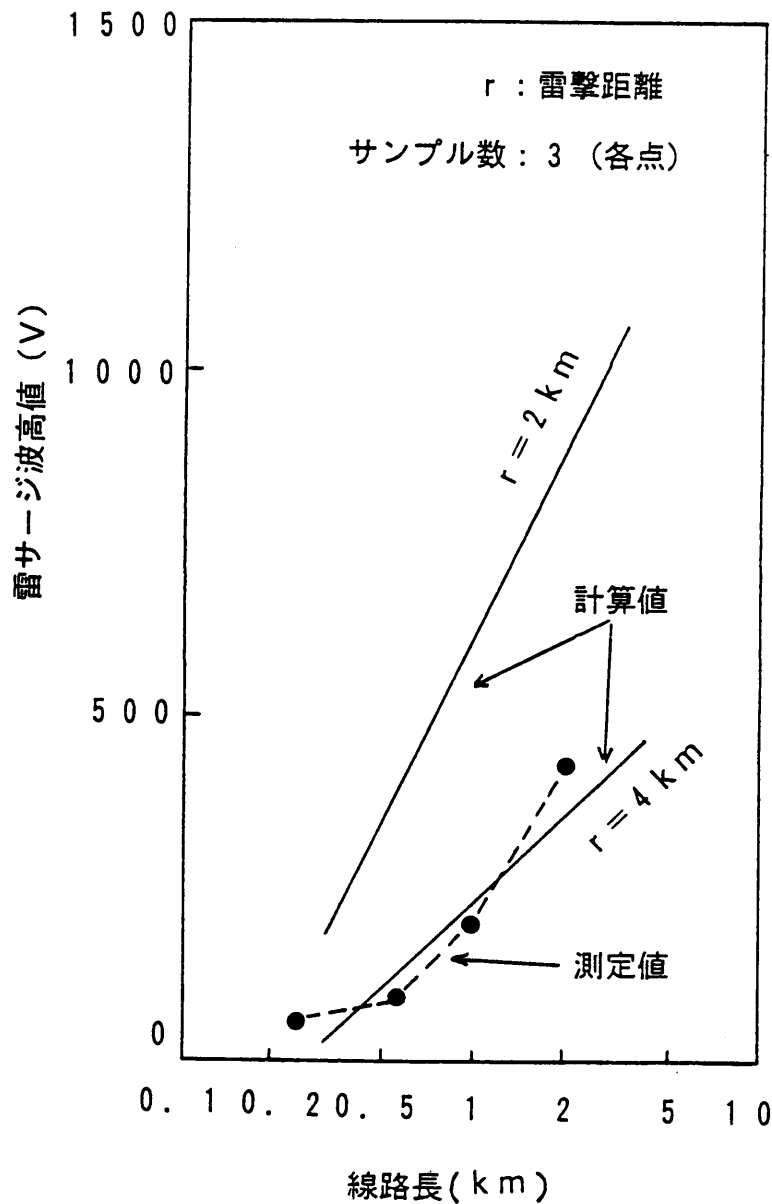


図2.8 観測した雷サージ波高値の線路長依存性

測定結果は、各線路長の資料数が3でかつそれぞれが同一の雷により発生したものである。図より、線路長が長くなると雷サージ波形の波高値は次第に大きくなっていることがわかる。また、測定した雷サージと雷撃位置の対応が取れなかったので、理論値との対応付けは正確にはできないが、この測定結果は理論解析結果とその傾向はほぼ一致していることがわかる。

(3) 分岐線路依存性

通常、通信線路は網目状に構成され、必ずといってよいほど分岐線路を有している。従って、線路の分岐状態と通信線路末端に発生する雷サージの関係を求めることは重要である。

観測では、市内CCPケーブルで、幹線路長2km、分岐長1kmの分岐線路と、幹線路長2kmの実験線路を同一ルート上に構成し、線路末端に生じる雷サージ波形を雷波形自動記録装置を用いて測定した、同時にテレビカメラを使用した雷撃位置測定システムを用いて雷撃位置を測定した。なお、各線路の末端は200Ωの抵抗で大地に終端した。

測定結果を図2.9に示す。観測の結果、雷撃位置角が $-30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の雷サージが7例観測された。なお、線路と雷撃点との距離はテレビカメラ一台が故障したため測定できなかった。図2.9で横軸は雷撃位置角、縦軸は分岐のある線路に生じた雷サージ波高値と分岐のない線路に生じた雷サージ波高値の比である。また、実線は線路と雷撃点との距離が6kmとして計算した理論値[15]である。

観測の結果以下のことが明かとなった。

- ①分岐を有する線路の雷サージ波高値と分岐のない線路の雷サージ波高値の比は雷撃位置角により変化する。これは、分岐線路に生じた雷サージが雷サージが幹線部分に生じた雷サージを打ち消す場合と相加する場合があるためである。
- ②分岐線路があることによる雷サージ波高値の変動は約40%であり、分岐のない線路で雷サージの要因効果を考察しても大きな誤差は生じない。

(4) 終端（接地）抵抗依存性

通信線路の端末は、通常、保安器を介して大地に接地されている。雷サージが線路端末に生じた場合、保安器は動作状態にあるので、通信線路は保安器の接地抵抗で終端される。従って、接地抵抗値と雷サージの関係を明らかにすることは、通信装置に印加される雷サージ特性を明らかにする上で重要である。そこで、CCP-Pケーブルの心線（1対（ L_1 , L_2 一括））を大地へ、それぞれ 20Ω , 200Ω , 2000Ω で終端し、そこに現われる雷サージを測定した。

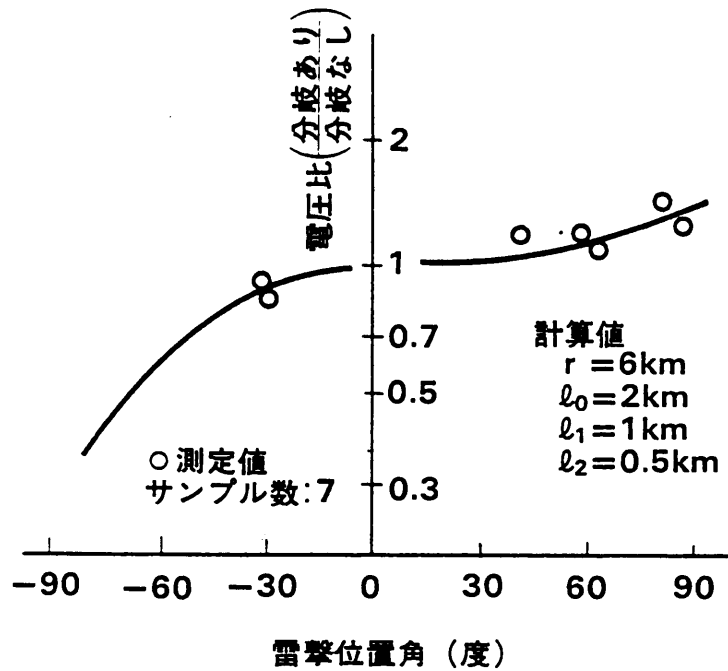


図 2. 9 雷撃位置角と観測した雷サージ波高値の電圧比（分岐有／分岐無）の関係

測定結果を図 2. 10 に示す。なお、各測定点の資料数は 13 であった。同図には、計算結果 [15] も併せて示しているが、この図から、終端抵抗値を 20 Ω 程度とかなり低くしても雷サージの減少率は 30 % 程度 (1000 Ω に対して) であり、終端抵抗を 20 Ω 程度と低くしても、その値は 200 Ω での測定結果とほとんど変わらないことがわかる。

(5) ケーブル構造依存性

通信線路上に生じる雷サージを低減する手段として、通信線の外側をアルミシース等で遮蔽を施したケーブルの利用が考えられる。そこで、ケーブル構造 (シース構造) と雷サージの関係を観測した。

測定では、対象ケーブルとして、屋外線、CCP-P ケーブル、CCP-AP ケーブル、アルミ被誘導しゃへいケーブルの 4 種類を選び、同一雷によりケーブル端末に現われる雷サージ (金属シースのあるケーブルの場合はケーブルシース-大地間、ない場合は心線 (L₁, L₂-括) -大地間) を測定した。なお、ケーブルの両端は 200 Ω で大地に対して終端し、線路長は 0.42 km ~ 1.9 km である。

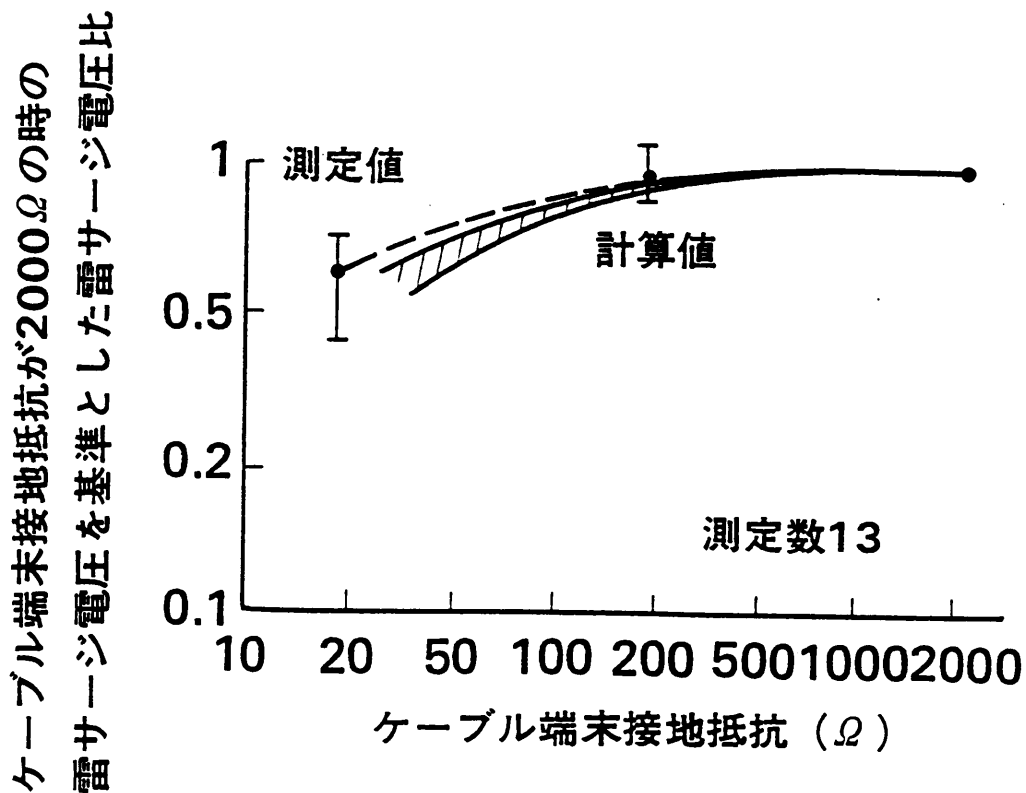


図 2. 10 観測した雷サージ波高値の接地 (終端) 抵抗依存性

図 2. 1 1 にケーブル構造を図 2. 1 2 に測定結果を示す。また、図 2. 1 3 には、CCP-APケーブル（ケーブルシースー大地間）と CCP-Aケーブル（心線（L₁, L₂一括）ー大地間）に現われた雷サージ波形の測定例を示す。

図 2. 1 2 より、ケーブル構造に関わりなくほぼ同じレベルの雷サージが観測されていることがわかる。従って、ケーブルシースの接地抵抗が 200 Ω 程度では、金属シースの雷サージに対する遮蔽は期待できないことがわかる。

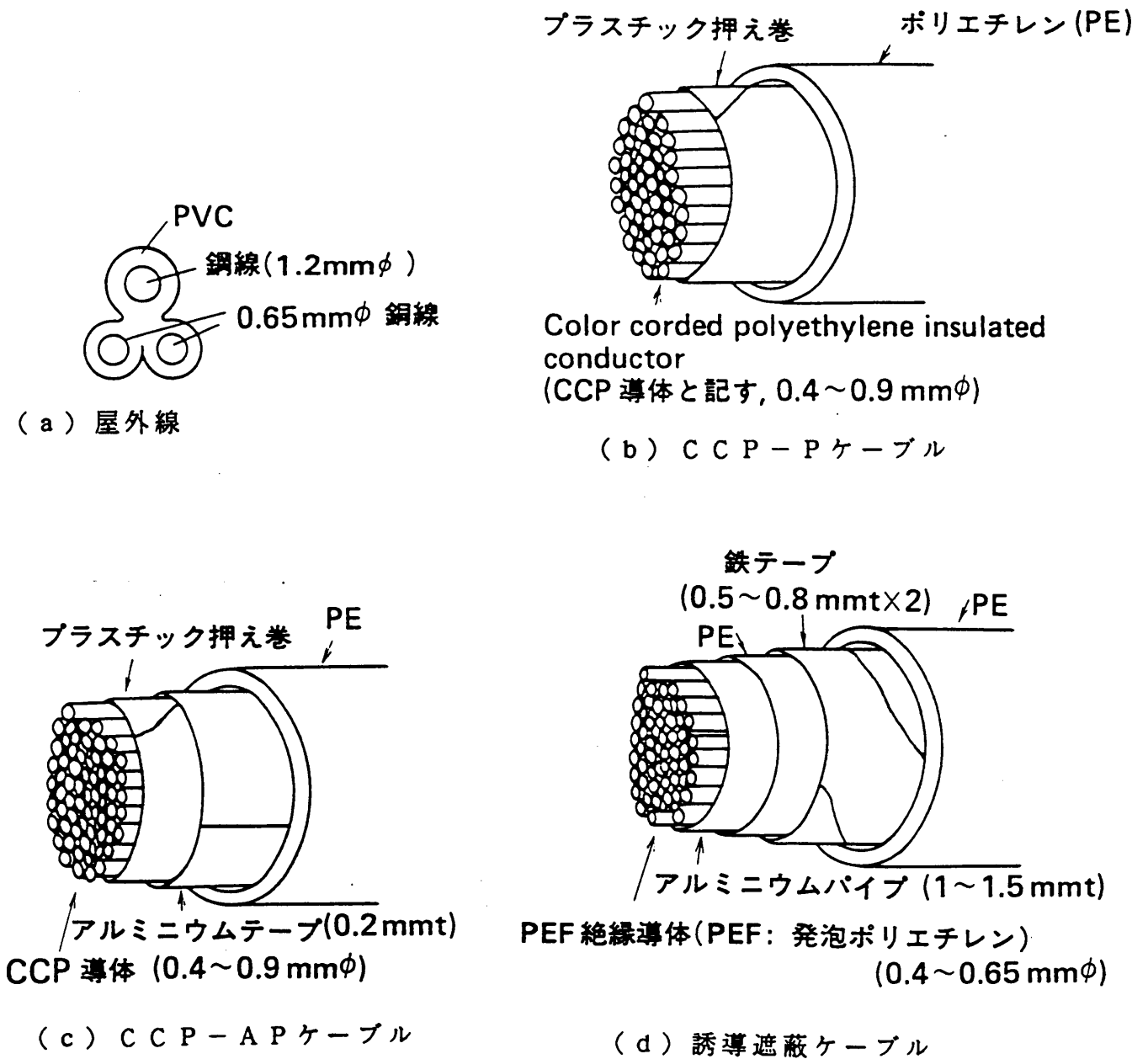


図 2. 1 1 通信用各種ケーブルの構造

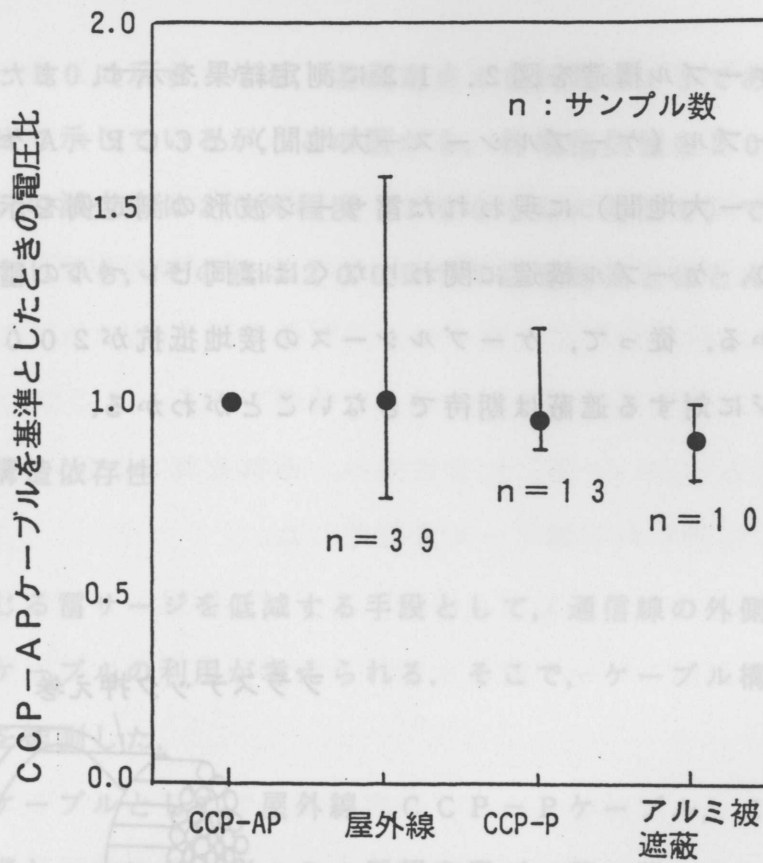


図2. 12 ケーブル構造と観測した雷サージ波高値の関係
(終端抵抗: 200Ω, 線路長: 0.12~1.9km)

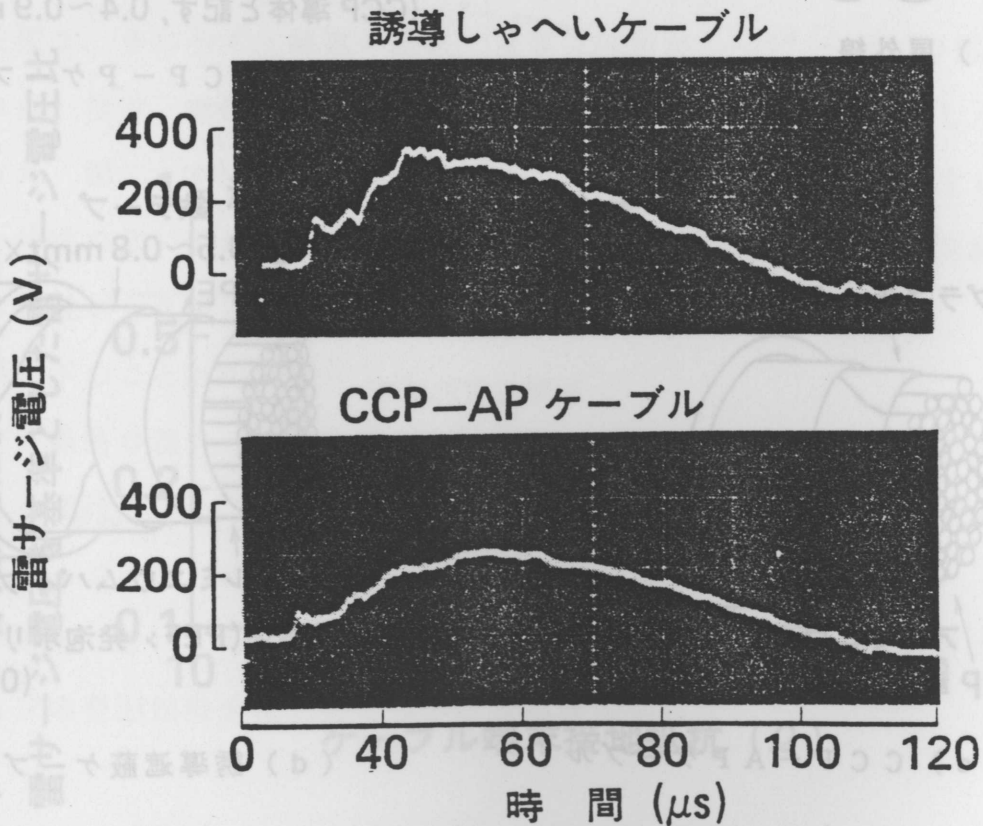


図2. 13 CCP-APケーブルとアルミ被誘導遮蔽ケーブルの観測した雷サージ波形例

(6) 地上高依存性

通信線路の地上高は場所によって異なるため、雷サージの地上高依存性を測定した。測定では、地上高5 mに布設した線路と地表面上に布設した線路に現われる雷サージを雷波形自動記録装置を用いて測定した。測定結果を図2. 14に示す。図2. 14からわかるように、地上高5 mの線路端末に現われる雷サージと地表面上に布設した線路端末に現われる雷サージとに大きな差は認められないことがわかる。

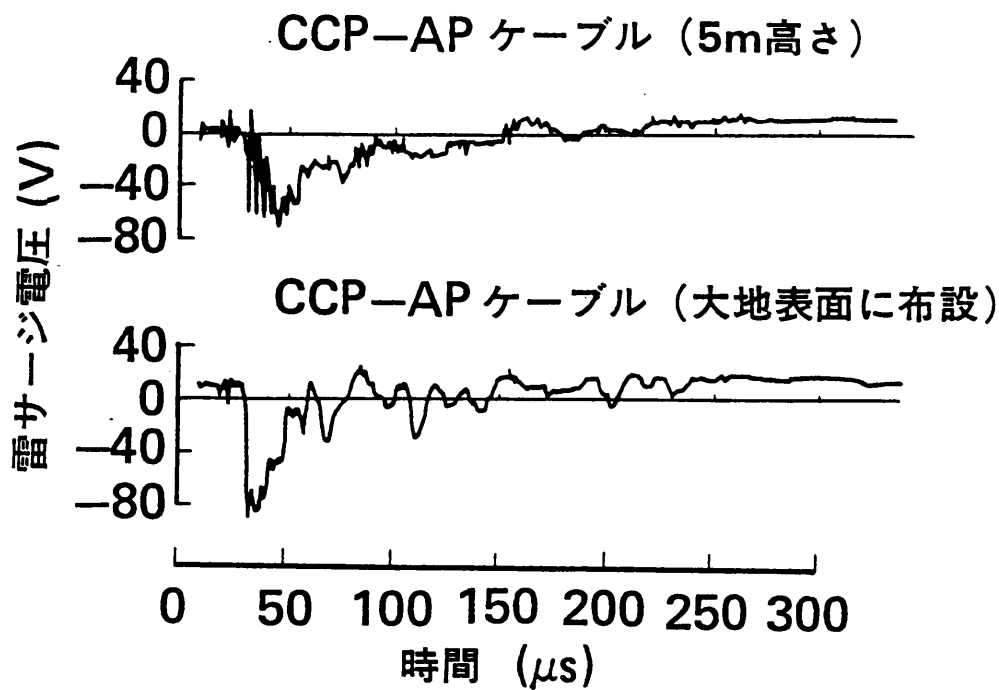


図2. 14 観測した雷サージ波高値の地上高依存性

(7) 大地導電率依存性

日本の大地導電率は、ほぼ0.0003~0.3 S/mの間にばらついている[16].
 そこで、雷サージ波高値と対置導電率の関係を明らかにすることは、通信線の末端に
 生ずる雷サージの地域差を明らかにする上で重要である。そこで、大地導電率の異な
 る地域を選定し、その地域の現用線路を借用して、その末端に現われる雷サージの波
 高値を雷サージカウンタを用いて測定した。測定を実施したルートを表3.5に示す。
 なお、測定用回線は、加入者端末では心線(L₁, L₂-括) - 大地間を、また、局内
 端末では心線(L₁, L₂-括) - ケーブルシース間をそれぞれ200Ωで終端し、そ
 の両端に現われる波高値を測定した。測定結果から、加入者端末に200V以上の雷
 サージ波高値が一雷雨日、一加入者当り何回到来したかを求めた結果を図2.15に
 示す。同図から、大地導電率が小さくなると波高値は大きくなる傾向があることがわ
 かる。

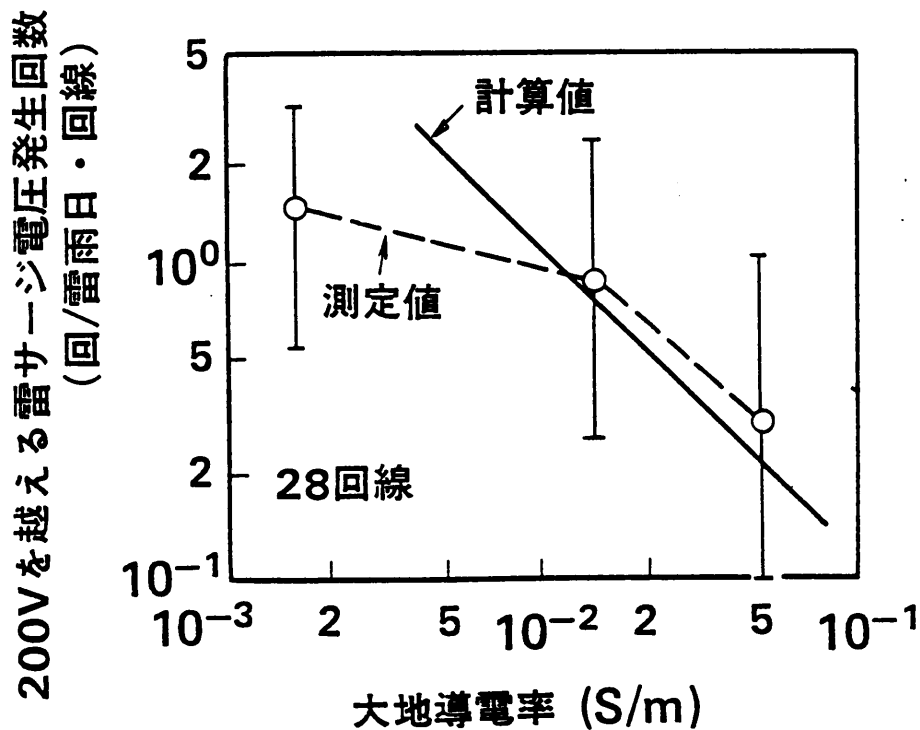


図2.15 観測した雷サージ波高値の大地導電率依存性 (サンプル数: 25)

(8) 夏雷, 冬雷による差異

関東地方や九州地方では雷が発生するのは、はほとんど夏期であるが、北陸地方では冬期にも雷が発生する。一方、夏雷と冬雷ではその性質が異なるとの報告がある[17]。そこで、夏雷と冬雷の差異を確認するため、北陸地方において、同一の現用線路を用いて夏雷と冬雷の雷サージ波高値の観測を行なった。図2. 16は夏期(5月から10月)及び冬期(11月から3月)の雷により線路端末に現われた200V以上の雷サージ波高値の発生頻度を表したものである。図2. 16から、夏雷による雷サージの発生頻度は冬雷の2倍程度多いことがわかる。

以上、通信線路上に現われる雷サージ波形の各種要因効果について述べてきたが、それらを要約した結果を表2. 6に示す。

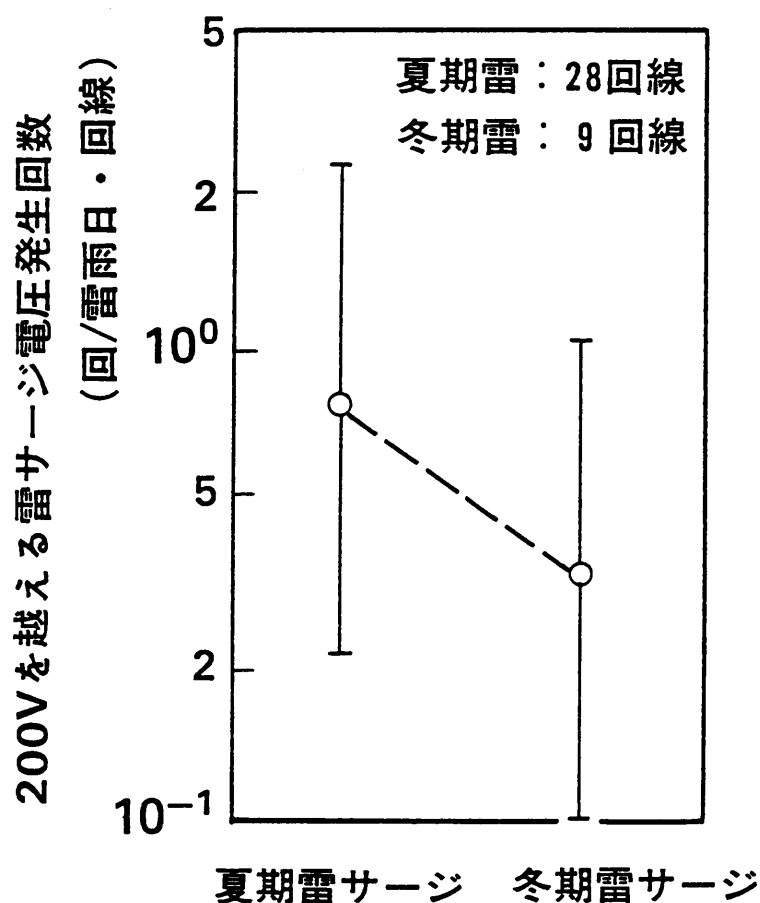


図2. 16 観測した雷サージ波高値の夏季雷, 冬季雷による差異

表 2. 6 各種要因に対する雷サージの変化

項目	変化量	備考	
線 路 構 成	線路長	線路長に比例	雷撃位置にも依存する
	分岐	電圧変化は40%以下	電圧は分岐の状況により、分岐のない場合より増加したり減少したりする
	終端抵抗	20～30%以下	終端抵抗20Ω以上の場合に成り立つ
	ケーブル構造	影響なし	遮蔽効果を得るためには、ケーブルシースの接地抵抗をシース-大地間のインピーダンスと同等もしくは小さくする必要がある。
地上高	影響なし	地上高0～5mの観測結果	
大地導電率	$1/\sqrt{\sigma}$	大地導電率0.001～0.05S/mの地域の観測結果	
夏雷と冬雷	夏雷 = 2 × 冬雷	理由は不明	

2. 5 現用線路系に現われる雷サージの諸特性

これまで、主に実験線路を用いて雷サージの諸特性を検討してきたが、実際の線路は分岐があったり、複数の位置で接地されていたり複雑な形状をしている。従って、いまのところ、実験線路の測定結果から、実際の現用線路端末に発生する雷サージの分布を完全に予測することは困難である。そのため、現用の通信線路を用いて線路端末に生じる雷サージの観測を行なうことが必要となる。ここでは、市内線路系の加入者端末及び局内端末に現われる雷サージの発生頻度分布、及び雷サージの多重性について述べる。

(1) 雷サージ波高値の分布形

宇都宮市内の電話回線を用いて測定回線を構成し、その加入者端末及び局内端末に現われる雷サージ波高値を測定した。測定に用いた線路の構成を表2.7、測定回路を図2.17に示す。測定は線路長の異なる10回線の現用線路を用いその両端に雷サージカウンタを接続して行なった。

加入者側の宅内装置には通常心線-大地間の雷サージが印加されることから、心線(L₁, L₂-一括)-大地間に現われる雷サージ波高値を測定した。また、参考のため、

表2.7 測定線路の構成

地域名		徳次郎					芳賀			河内		平均
ルートNo.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
線路長	地下(km)	2.8	0.4	4.6	2.3	0.4	1.4	3.8	0.4	2.7	0.3	1.9
	架空(km)	2.2	3.3	1.2	3.1	1.1	4.4	4.1	1.8	3.1	0.8	2.5
	全長(km)	5.0	3.7	5.8	5.4	1.5	5.8	7.9	2.2	5.8	1.1	4.4

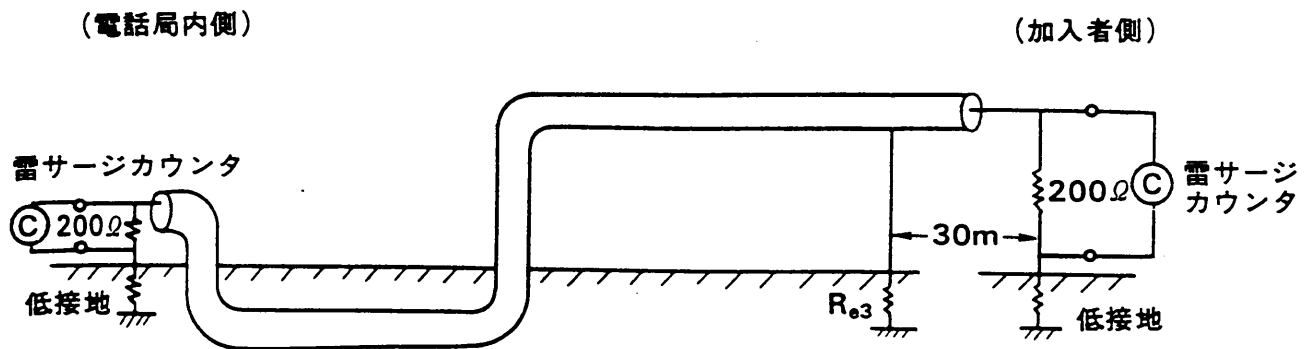


図2.17 雷サージカウンタによるケーブル端末の雷サージ観測方法

ケーブルシース（市内CCP-APケーブルのアルミシース）-大地間も併せて測定した。なお、心線-大地間は75Ω以下、200Ω、2000Ωの3種の抵抗で終端し、終端抵抗による影響も同時に測定した。一方、局内側の端末では、交換機等の局内装置のアースがすべてケーブルシースに接続されたため、心線（L₁、L₂-括）-ケーブルシース間に現われる雷サージ波高値を測定した。なお、心線（L₁、L₂-括）-ケーブルシース間は加入者側端末に対応して、75Ω以下、200Ω、2000Ωの3種の抵抗で終端した。また、測定期間中の宇都宮地方の雷雨日数は延べ10日であった（気象庁発表）。

現用線路端末に現われる雷サージの測定結果を図2. 18に示す。図より、①終端抵抗を75~2000Ωに変化してもほとんど雷サージの波高値は変化しない。②心線-大地間に生じる雷サージとケーブルシース-大地間に生じる雷サージの波高値はほぼ等しい。③加入者側の端末に生じる雷サージは局内側の端末に生じる雷サージより大きいことがわかる。

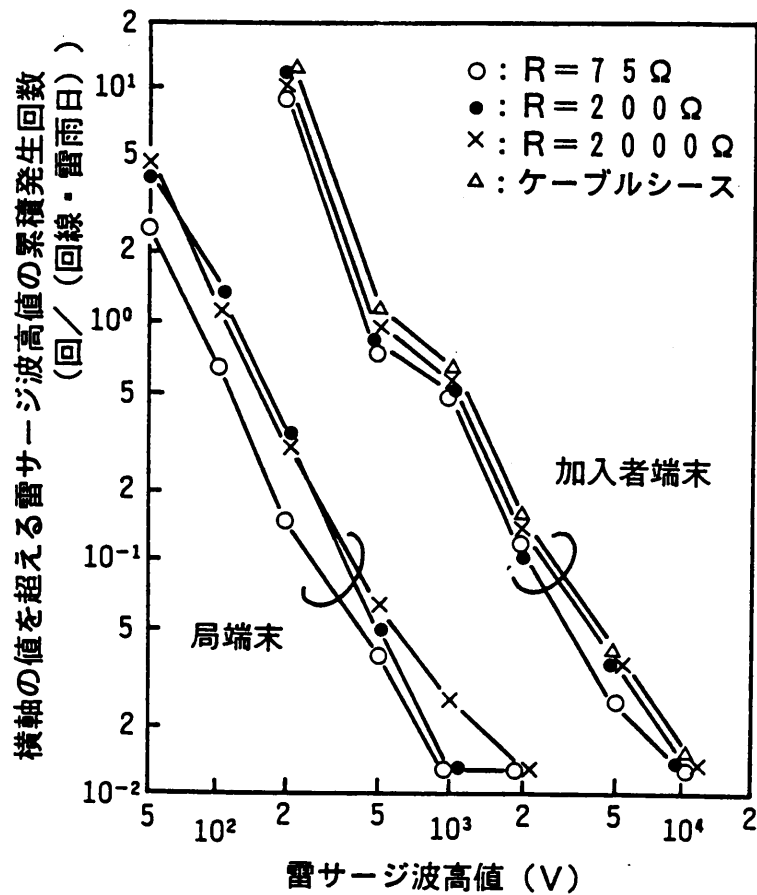


図2. 18 観測により得られた市内線路系に現われる雷サージ波高値の発生頻度分布（雷雨日数：10日）

終端抵抗が $200\ \Omega$ の場合の測定結果を図 2. 19 に示す。図で縦軸は、1 回線、1 雷雨日当りに発生するの雷サージ波高値の発生頻度で、横軸の値が 10^{-1} 、縦軸の値が $2000\ \text{V}$ であることは、 $2000\ \text{V}$ 以上の波高値を持つ雷サージが 10 雷雨日に一回発生することを意味している。図に示すように、測定結果は両対数グラフ上で直線で表され、その累積発生頻度は式 (2-1)、(2-2) で与えられる。

$$N(V_{sp}) = K \cdot V_{sp}^{-1.8} \quad (2-1)$$

$$N(V_{bp}) = K_b \cdot V_{bp}^{-1.8} \quad (2-2)$$

ここで

V_{sp} : 加入者側端末に生じる雷サージ波高値

V_{bp} : 局内側端末に生じる雷サージ波高値

K : 雷サージ波高値の累積発生頻度を表す実験式 (加入者側端末) (0.5×10^5)

K_b : 雷サージ波高値の累積発生頻度を表す実験式 (局内側端末) (0.36×10^4)

K 、 K_b は分布を表す定数値で、その値を表 2. 8 に示す。

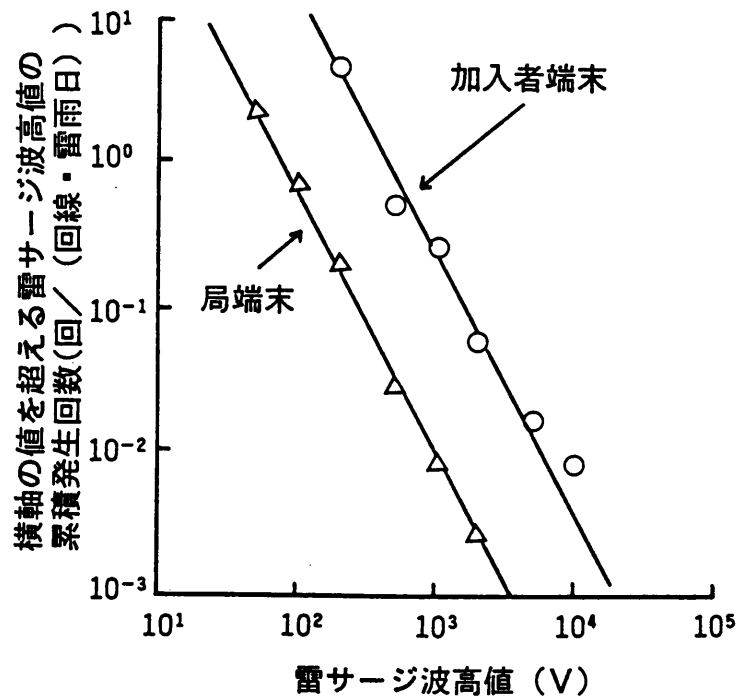


図 2. 19 観測により得られた市内線路系端末に現われる雷サージの累積発生頻度

表 2. 8 雷サージの分布を表す定数値

定数名		加入者側端末	局内側端末	分布を表す式
波高値	K	0.5×10^5	0.36×10^4	$N(V_p) = K V_p^{-1.8}$
波頭長	平均値 (μ)	20 (μ s)	60 (μ s)	$n(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sigma}\right) \ln(t/\mu)\right\}^2$
	標準偏差 (σ)	0.56	0.56	
波尾長	平均値 (μ)	100 (μ s)	250 (μ s)	
	標準偏差 (σ)	0.56	0.36	

(2) 雷サージ波形の分布形

地下線路長2.8km(0.4×100ついCCP-JFケーブル), 架空線路長1.9km(0.4×30PCCP-Pケーブル)から構成された加入者線路の加入者端末及び局内端末に現われる雷サージ波形を雷波形自動記録装置を用いて測定した。なお, 測定回線は加入者端末では心線-大地間を, 局内端末では心線-ケーブルシース間をいずれも200Ωで終端して測定した。雷サージ波形の測定例を図2. 20に示す。図に示すように, 雷サージ波形は複雑な形をしているが, それを図に示すように三角波形で近似し, 波頭長, 波尾長であらわした。

波頭長, 波尾長の分布を図2. 21に示す。図に示すように, それぞれの分布は, ほぼ対数正規分布で表すことができ, 式(2-3), (2-4)で与えられる。

$$n(t_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left\{-\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_r} \ln \frac{t_r}{\mu_r}\right\}^2 \quad (2-3)$$

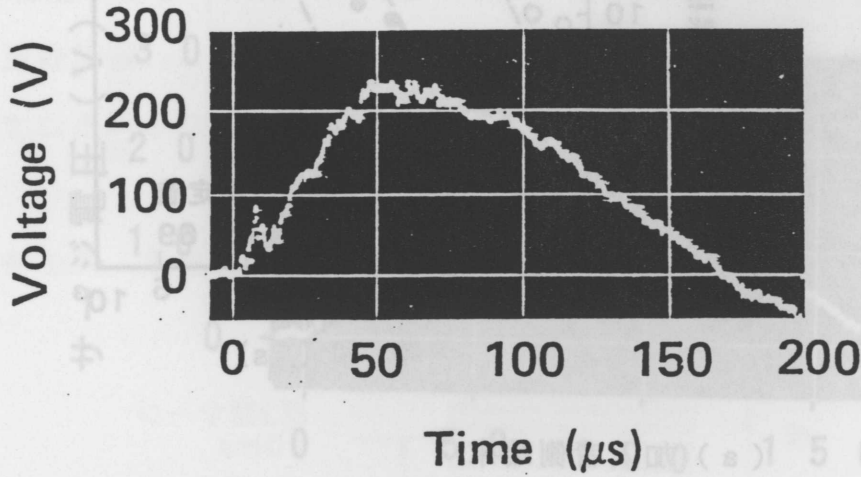
$$n(t_h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_h} \exp\left\{-\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_h} \ln \frac{t_h}{\mu_h}\right\}^2 \quad (2-4)$$

ここで、

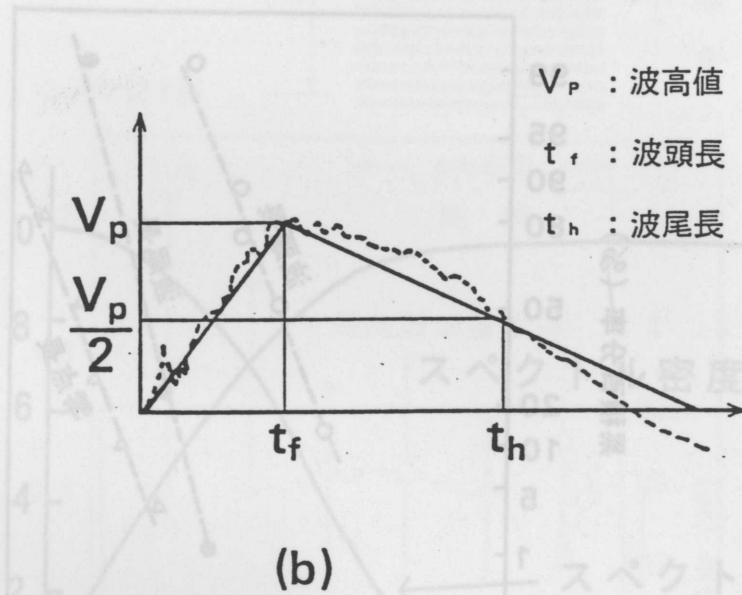
μ : 平均値 (t_f : 波頭長, t_h : 波尾長)

σ : 標準偏差 (t_f : 波頭長, t_h : 波尾長)

である。加入者端末および局内端末の平均値及び標準偏差を表 2. 8 に示す。



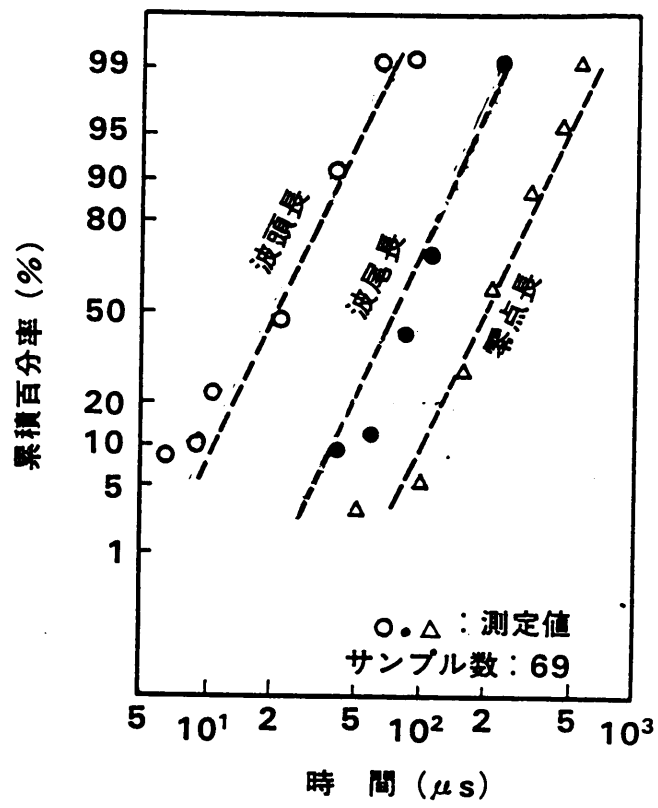
(a)



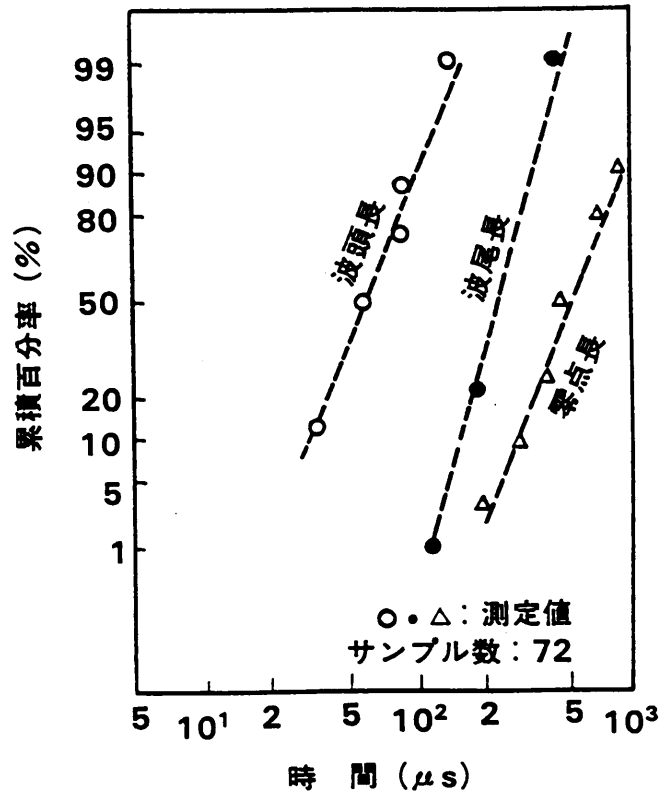
(b)

図 2. 20 雷サージ波形例とその近似方法

図 2. 22 観測により得られた雷サージ波形の周波数スペクトル例



(a) 加入者側端末



(b) 局内側端末

図 2. 2 1 観測により得られた市内線路系端末に現われる雷サージ波頭長, 波尾長の発生分布

(3) 雷サージ波形の周波数スペクトル

雷サージ波形の周波数スペクトルの計算結果を図2. 22に示す。検討では、雷波形自動記録装置を用いて測定した雷サージ波形データを紙テープに打ち出し、それを大型計算機に入力して、FFTを用いて周波数スペクトルを求めた。宇都宮地区に建設した実験線路を用いて観測した雷サージ波形10例について、周波数スペクトルを求

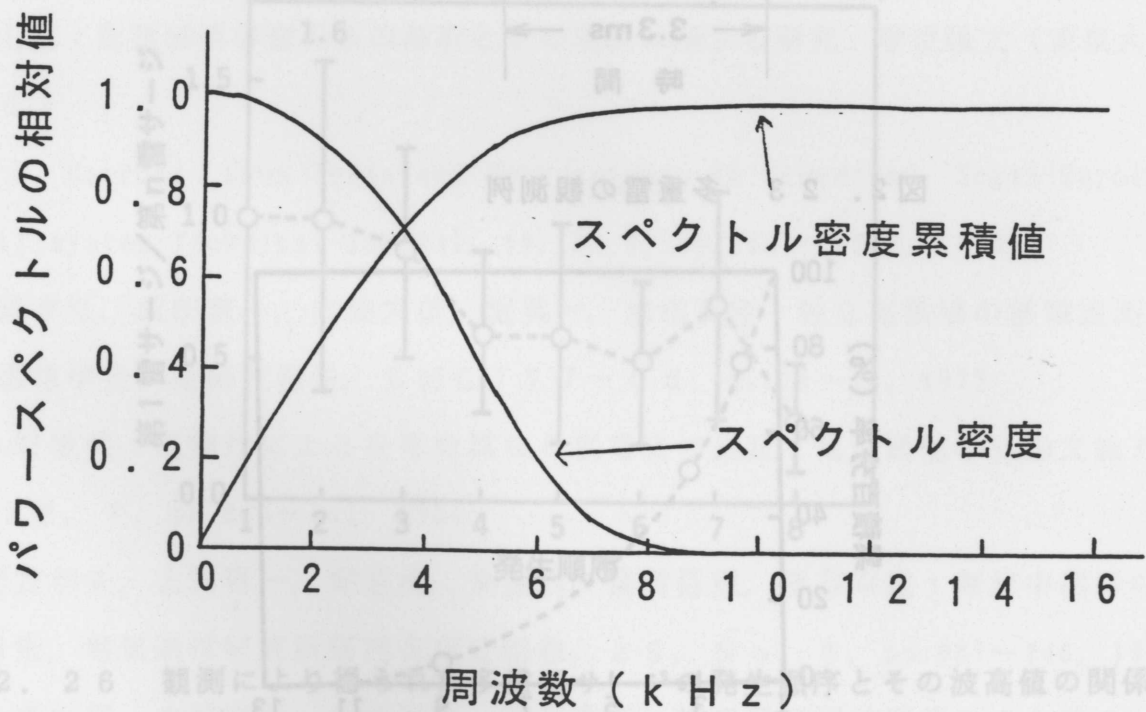
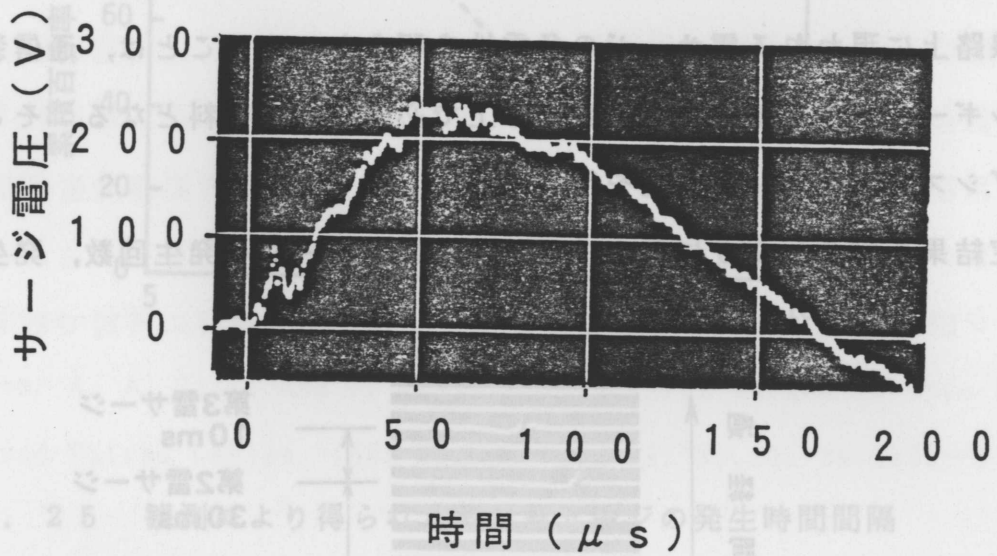


図2. 22 観測により得られた雷サージ波形の周波数スペクトル例

めたが、図2. 22はその典型的なスペクトル例を示している。なお、他の波形についても、周波数スペクトルの形はほぼ同じである。図より、雷サージエネルギーの主なエネルギー成分は50kHz以下に含まれることがわかる。

(4) 雷サージの多重性

雷サージは、単独ではなく複数の雷サージが連続して到来するのが普通である[14]。通信線路上に現われる雷サージの多重性を明らかにすることは、通信装置の雷サージエネルギーによる破壊効果を検討する上で必要な基礎資料となる。そこで、データレコーダシステムを用いて測定を行なった。

測定結果を図2. 23に示す。また、多重雷サージの発生回数、発生時間間隔、発

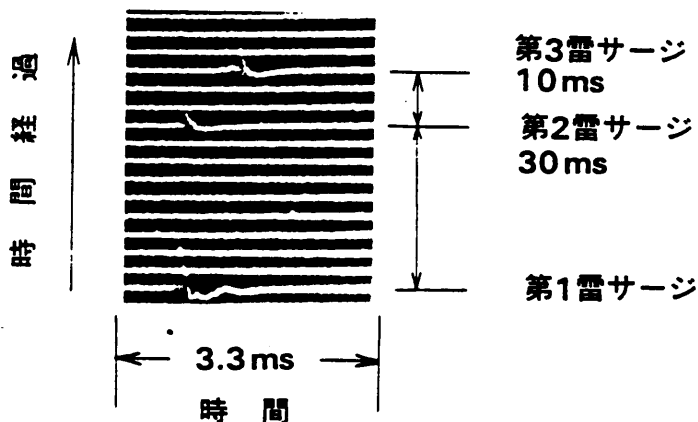


図2. 23 多重雷の観測例

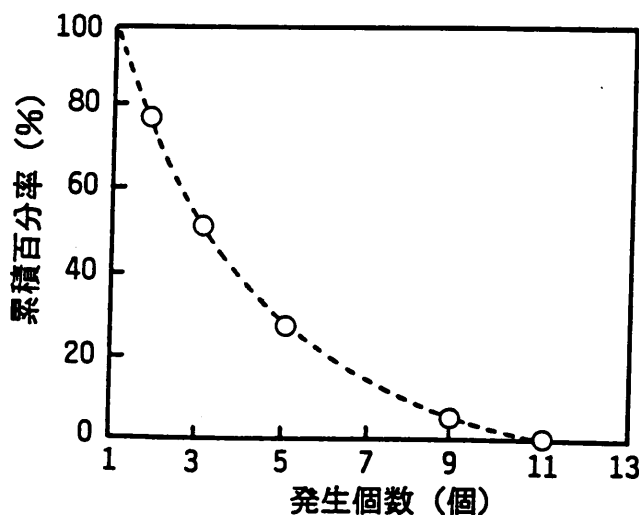


図2. 24 観測により得られた多重雷サージの発生回数

生順序と波高値の関係をそれぞれ図2. 24, 25, 26に示す。これらの図より、通信線路には、2～3個の雷サージが約80ms間隔で到来することがわかる。また、雷位置雷サージの波高値に比べ、それ以降の雷サージ波高値はやや小さくなる傾向があることがわかる。

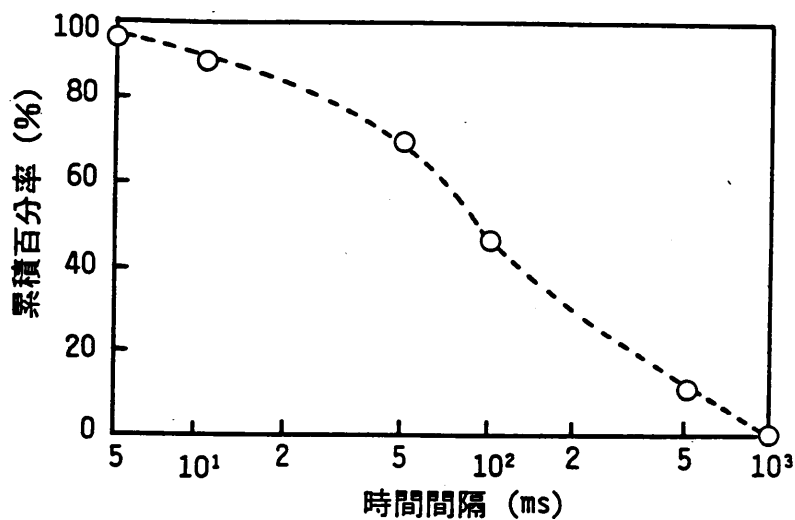


図2. 25 観測により得られた多重雷サージの発生時間間隔

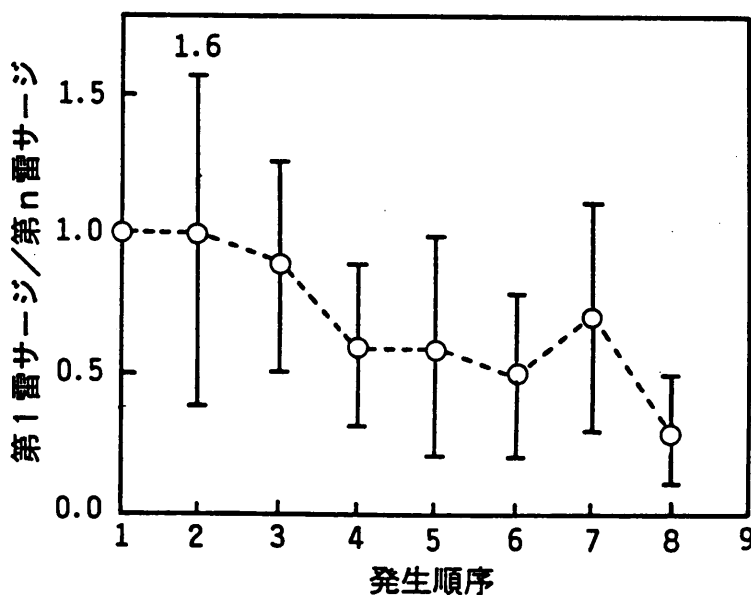


図2. 26 観測により得られた多重雷サージの発生順序とその波高値の関係

2. 6 本章のまとめ

本章では、観測装置の開発及び日本各地に於いて通信線路端末に現われる雷サージ観測を行い、雷サージに影響を及ぼす各種要因効果の把握を行なっている。また、市内線路系の雷サージの発生頻度、多重性などその主要な特性を明らかにしている。

雷サージ観測に当たっては、雷サージカウンタ、データレコーダ、雷波形自動記録装置、雷撃位置測定装置を新たに開発して観測を行なった。雷サージ観測の結果、①雷撃距離依存性、②線路長依存性、③分岐線路依存性、④終端抵抗依存性、⑤ケーブル構造依存性、⑥地上高依存性、⑦大地導電率依存性、⑧季節の違い、⑨雷サージ波高値の累積発生頻度、⑩雷サージ波形の波頭長、波尾長の累積発生頻度、⑪雷サージの周波数スペクトル、⑫雷サージの多重性、を明らかにできた。これらのデータは、雷サージ誘起メカニズムの検討に雷サージ試験回路の検討に有効である。

参考文献

- [1] F. R. Perry, G. H. Webster and P. W. Baguley: The Measurement of Lightning Voltages and Currents in Nigeria (Part 2, 1938~1939), J. IEE, 89, Pt II, pp. 185~203, 1942
- [2] J. Dutt: Overvoltages on Subscriber Lines, Electrical Communication 54, No. 2, pp. 115~119, 1979
- [3] 石田之則, 中平瑞穂, 元満民生, 麦田真佐夫: 平衡形ケーブルに生じる誘導雷サージの観測結果, 電気通信研究所研究実用化報告, 20, No. 7, pp. 1517~1531, 1971
- [4] P. Chowdhuri: Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes, Proc. IEE, 114, No. 12, pp. 1899~1907, 1967
- [5] E. Bennison, A. J. Ghazi and P. Ferland: Lightning Surges in Open Wire, Coaxial, and Paired Cables, IEEE Trans., COM-21, No. 10, pp. 1136~1143, 1973
- [6] D. W. Bodle and P. A. Gresh: Lightning Surges in Paired Telephone Cable Facilities, Bell system technical Journal, March, pp. 547-576, 1961
- [7] 横山茂: 配電線誘導雷現象の解析とその実証に関する研究, 学位論文(東京大学), 昭61
- [8] R. L. Carroll: Loop Transient Measurements in Cleveland, South Carolina, Bell system Technical Journal, 59, No. 9, pp. 1645~1680, 1980
- [9] 後藤幸弘, 成田憲一, 内藤文信, 堀英一, 米田英彦: 独立高鉄塔の雷電流測定, 電子通信学会技術研究報告, EMC J 77-58, pp. 13~18, 1977
- [10] 永野敏美: 磁鋼片による符号の異なる雷電流の測定, 電子通信学会論文誌 B, 67 B, 7, pp. 805~811, 1984
- [11] 向笠和夫, 上池啓一, 愛宕清, 東濃勇, 藤岡信照, 清谷幸雄: 無線中継所の雷害対策, 電気通信研究所研究実用化報告, 25, No. 5, pp. 907~940, 1976
- [12] 大槻文男, 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦: 炭素避雷器放電痕による雷サージ電流推定法, 電子通信学会論文誌 C, 65 C, 1, 1981
- [13] 電気学会編: 避雷器とその適用, 電気学会, 昭和43年

[14]M. A. Uman : Lightning. McGraw Hill, 1969

[15]H. Koga, T. Motomitsu and M. Taguchi : Lightning Surge Waves Induced on
Overhead Lines, Trans. of IECE of Japan, E62, 4, pp.216-223, 1979

[16]電気学会, 電気通信学会 : 日本の大地導電率, 1969

[17]竹内利雄 : 北陸における冬季雷の研究, 電気学会誌, 98, No.12,
pp.1156~1159, 昭和53-12

第3章 光ファイバを用いた雷サージ波形観測

3.1 まえがき

通信線路端末に生じる雷サージの誘起メカニズムを明らかにするためには、雷放電により通信線路上に生じた雷サージがどのようにして線路端末まで伝搬するかを明らかにする必要がある。そのためには、通信線路の各位置の雷サージの大きさを測定する必要がある。しかし、雷サージの原因となる雷放電は、発生する位置も放電電流も、毎回変化するので、誘起メカニズムを明らかにするためには、1つの雷放電にたいして線路の各部に生じる雷サージ波形を同時観測するのが効果的である。

同時観測を行なうためには、雷放電が、第2章に示したように、数msの間隔で生じる多重性があるため、発生時間により雷サージ波形を特定することは困難であり、離れた位置に生じる雷サージを一か所に集める必要がある。その場合、雷サージを集めるために同軸ケーブル等の金属線を使用すると、その線にも雷サージが誘起されてしまうため、正確な測定が困難になる。

光ファイバは電磁界の影響を受けないので、雷放電等の強電磁環境下での信号伝送路として有効であり、雷サージの検出[1]や直撃雷サージ電流[2]の観測に使用されている。本章は、光ファイバを用いて同一雷により通信線路のはなれた複数点に生ずる雷サージを観測するシステムについて述べる。また、このシステムを用いて雷サージ観測を実施し、その結果明らかとなった雷サージの誘起メカニズムについて述べる。

3. 2 光ファイバを用いた雷観測システム

雷観測線路のルート図を図3. 1に、雷観測システムの構成を図3. 2に示す。観測システムは雷の多い栃木県内に設置した。観測線路は交換局と観測小屋を結ぶ全長5 kmの地下線路と架空線路より構成される線路で、道路沿いに建設されており、図3. 1に示すように地下線路から架空線路に立ち上がる地点で直角に折れ曲がっている。折れ曲がり点から交換局側が地下線路、観測小屋側が架空線路であり、地下線路長が2. 8 km、架空線路が2. 2 kmである。

図3. 2に示すように、観測線路は観測線路Ⅰと観測線路Ⅱの2本の線路から構成されている。観測線路Ⅰは地下線路と架空線路に生ずる雷サージの比較を目的としており、地下線路にはCCP-JFケーブルが架空線路には光ファイバ複合CCPケーブルが使用されている。これらは線路が地下から架空に立ち上がる点で分離されており両端末とも柱上に設置されている観測装置の電気-光変換器(E/O変換器)に接続されている。観測線路Ⅱは、加入者線路を模擬しており、実際に通信に使用されている加入者線路端末に生ずる雷サージの観測を目的としている。そのため、日本の多雷地域の布設されている平均的な加入者線路の線路形態をとっており地下線路にはスタルベスケーブルが架空線路にはCCPケーブルが使用され、地下ケーブルの金属シースは交換局の接地に接続されている。また、架空部分ではケーブルの金属シースとケーブルのつり線はケーブルの接続部毎に接続されており、ケーブルを支える柱が金属製であるため、ケーブルの金属シースは各柱毎につり線を介して接地されている。

線路が地下より架空に立ち上がる地点に設置された観測装置(柱上装置)には線路端末に生じた雷サージ波形を光信号に変換して観測小屋に送るための電気-光変換回路が内蔵されており、観測小屋に設置された装置には立ち上がり点より伝送されて生きた光信号を電気信号に再変換するための光-電気変換器と、変換器により再変換された雷サージ波形を記録する雷波形自動記録装置が内蔵されている。

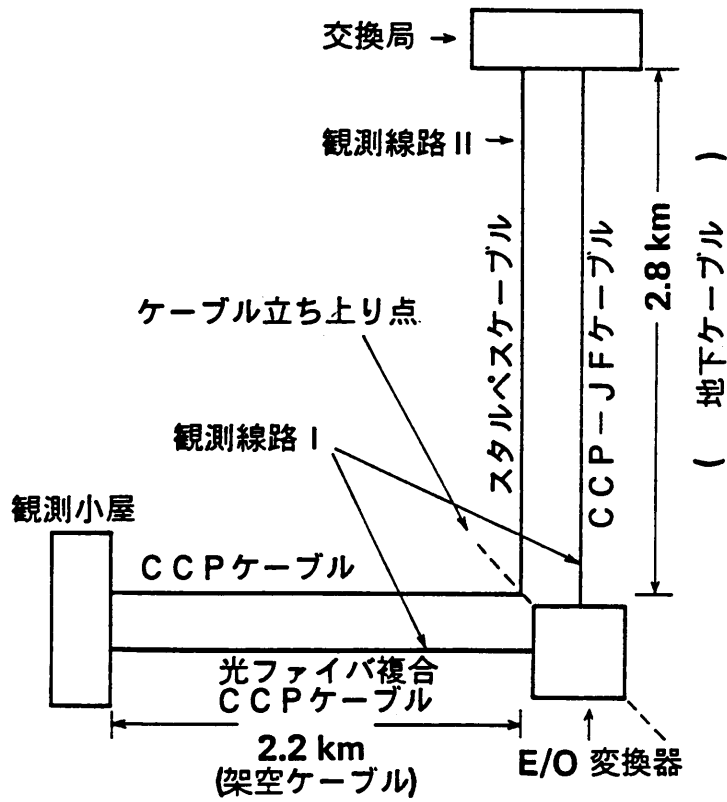
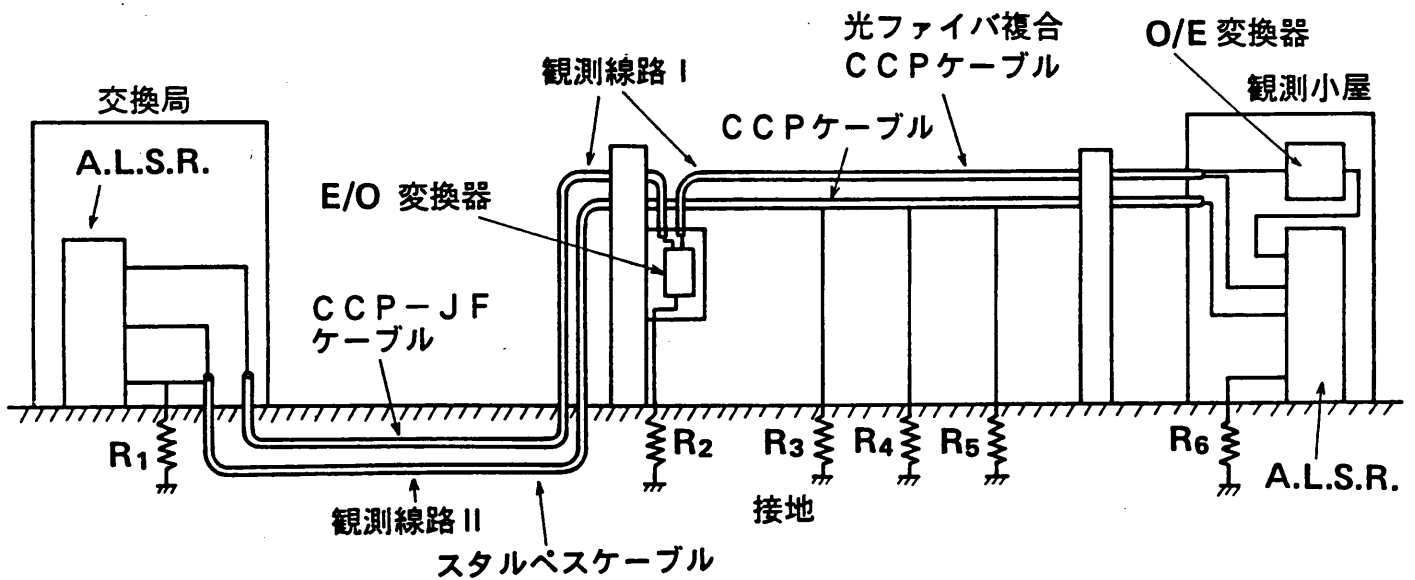


図 3. 1 雷観測線路のルート図



A.L.S.R. : 雷波形自動記録装置
 R₁ ~ R₆ : 接地抵抗

図 3. 2 光ファイバを用いた雷サージ観測システムの構成

図3. 3に光ファイバ複合線路の構造を示す。このケーブルは0.4mmφ-10対のCCPユニット、グレーデッド形光ファイバ心線（ファイバコア径50μm、クラッド径125μm）2心とFRP2本を寄り合わせた2心光ユニットからなり、各2ユニットがFRP抗張力体の回りに集合され、その外側にLAPシースを施している。このケーブルで、CCPユニットの一つは柱上の観測装置の制御と給電に、残りのCCPユニットとLAPシースは雷サージ観測用の実験線路として使用する。なお、2心光ユニットは金属物を使用しておらずCCPユニットに影響を与えない。

図3. 4に雷観測システムのブロック図を示す。線路端末に生じた雷サージは電気-光変換器で光信号に変換され光ファイバにより観測小屋に伝送される。観測小屋では光-電気変換器により電気信号に変換された後、雷波形自動記録装置へ送られる。雷波形自動記録装置は電気信号に再変換された雷サージ波形をA/D変換器によりデジタル符号に変換した後、観測時間とともに、データレコーダを用いて磁気テープに記録する。

電気信号を光信号に変換する方式としてはパルス変調方式とアナログ変調方式がある。パルス変調方式は遠距離に信号を伝送しても品質が劣化しない、LED、ホトダイオードの温度特性の影響を受けない等の利点があるが、広い伝送帯域が必要、変調装置が複雑になるなどの欠点があるため、本システムでは伝送可能距離は比較的短いが変調装置の簡単なアナログ変調方式を用い、LED、ホトダイオードの温度特性の補償にはAGCを用いた。AGC回路は、雷サージ波形のレベルを正確に測定するためのもので、図3. 4に示すように柱上装置で振幅の安定した校正信号を作りそれを観測小屋に伝送して、小屋内部で電気信号に変換しその大きさを小屋に設置した装置の基準レベルと比較することによりAGCアンプのゲインをコントロールするものである。

雷波形自動記録装置の制御部は常時動作して線路端末に生じるサージのピーク値を監視しており、この値が予め設定した値を越えると全システムを動作させ観測体制にはいる。柱上装置はバッテリーを内蔵しており観測時は観測小屋からの信号によりバッテリー動作に切り替わり、ケーブルと柱上装置は完全に絶縁される構造となっている。また、バッテリーは待機時にCCPユニットを用いて小屋より充電され長期の観測に耐えるようになっている。

雷サージ波形を光信号に変換し観測小屋で電気信号に再変換するまでのシステムの周波数帯域は測定の結果DC~100kHzであった。2章に示すように、雷サージのエネルギーの90%は10kHz以下の周波数範囲に含まれるので、本システムは雷サ

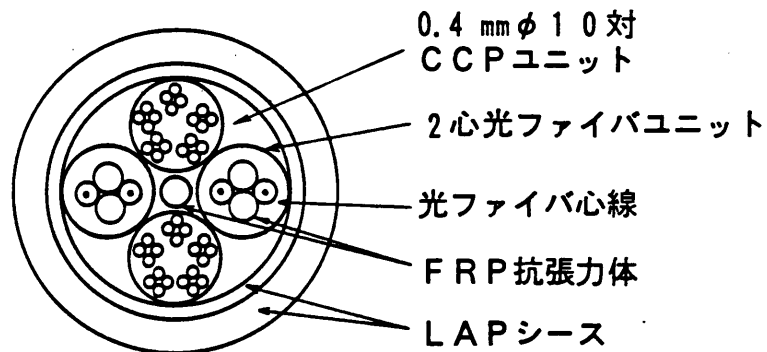
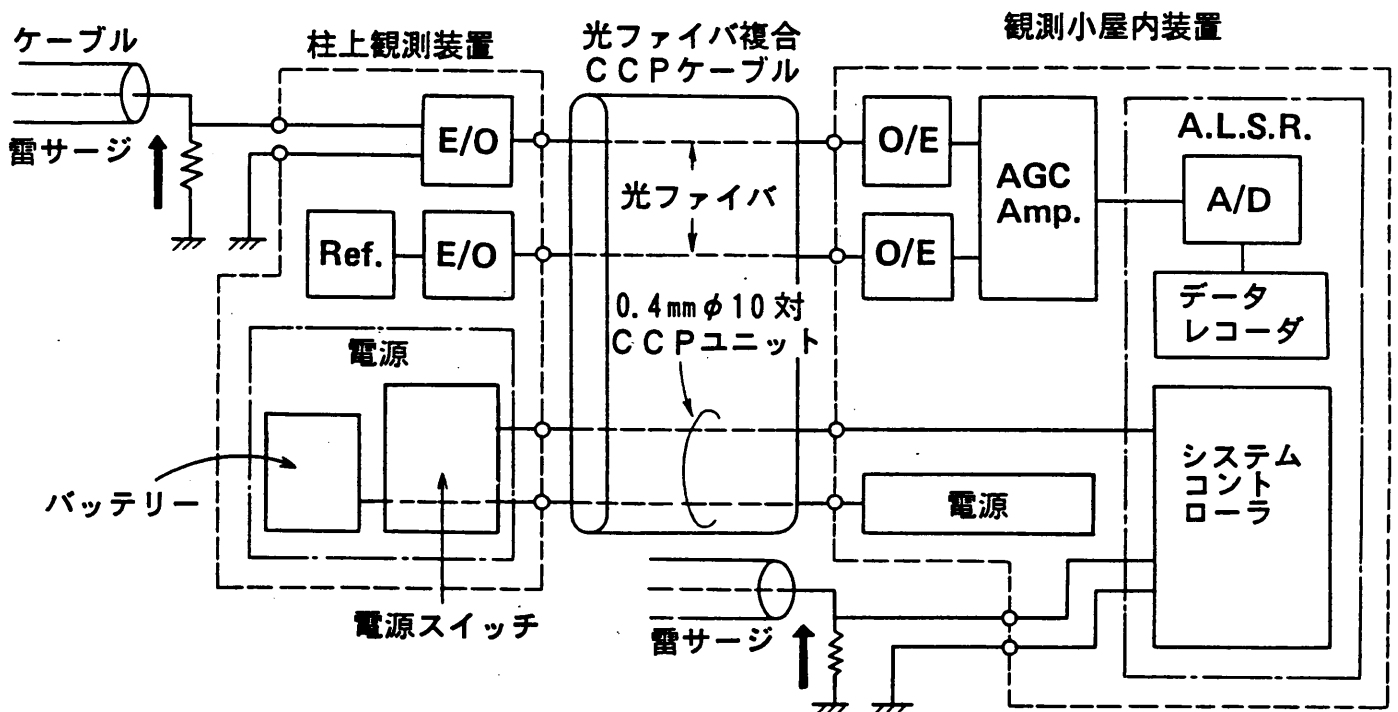


図 3. 3 雷観測に用いた光ファイバ複合 CCP ケーブル



E/O : E/O 変換器, O/E : O/E 変換器, A/D : A/D 変換器,
 Ref. : 校正信号, AGC Amp. : 自動制得調整増幅器,
 A.L.S.R. : 雷波形自動記録装置

図 3. 4 光ファイバを用いた雷観測システムブロック図

—ジ波形観測のために必要な条件を十分に満たしている。

柱上装置は2つの入力端子をもっており、地下から架空への立ち上がり点に生じた二つの雷サージの同時観測が可能である。

3. 3 通信ケーブルの雷サージ波形観測

雷サージ観測は観測線路 I, II を用いて行なった。観測線路 I では架空線路及び地下線路に生ずる雷サージの観測を目的として図 3. 5 に示す雷サージ波形観測回路を使用した。図に示すように立ち上がり点では観測線路 I の地下線路と架空線路の一对の心線を抵抗を介して接地し、その抵抗と接地抵抗の和が、雷サージが伝搬する心線と大地より構成される伝送路の特性インピーダンスの絶対値に近い値である $200\ \Omega$ となるようにした。また、これら二つの接地と柱上に接地された観測装置の接地については、雷サージ電流が流れると接地点近傍の大地電位が上昇して誤差を生じるため、接地点を $10\ \text{m}$ 以上離しお互いに干渉しないようにした。観測小屋側、交換局側の端末では観測線路 I, II より一对の心線を取り出しそれを $200\ \Omega$ の抵抗を介して接地した。なお、これらの端末の接地抵抗は $200\ \Omega$ より十分小さいため接地抵抗による電圧降下を無視できる。

図 3. 5 に示す観測線路を用いて地下線路端末に生ずる雷サージ V_4 、架空線路両端末に生じる雷サージ V_1 、 V_2 と観測線路 II に端末に生じる雷サージ V_3 の観測を行なった。これらの雷サージのうち V_1 、 V_4 は立ち上がり点より観測小屋まで光ファイバを用いて伝送し V_1 、 V_2 とともに雷波形自動記録装置を用いて同時観測した。

雷サージ観測は昭和 56 年 6 月から行なわれ、6 例の雷サージ波形が観測された。観測された雷サージ波形の一例を図 3. 6 に示す。図 3. 6 で、 $V_1 \sim V_4$ はそれぞれ観測線路 II の観測小屋端末、観測線路 I の観測線路側端末、立ち上がり柱側架空線路端末、地下線路端末の雷サージを表しており、 V_1 、 V_2 は観測小屋に接地された雷波形自動記録装置を、 V_3 、 V_4 は図 3. 4 に示す光ファイバを用いた観測システムを用いて観測した結果である。また、縦軸は電圧、横軸は時間である。

図より、観測線路 II の観測小屋側端末に生ずる雷サージ波形（加入者線路の加入者端末に生ずる雷サージ波形を模擬）は架空線路端末に生ずる雷サージ波形に比べ波高値は小さいが波頭長、波尾長とも長くなること、両者の極性は同じであること、架空線路の

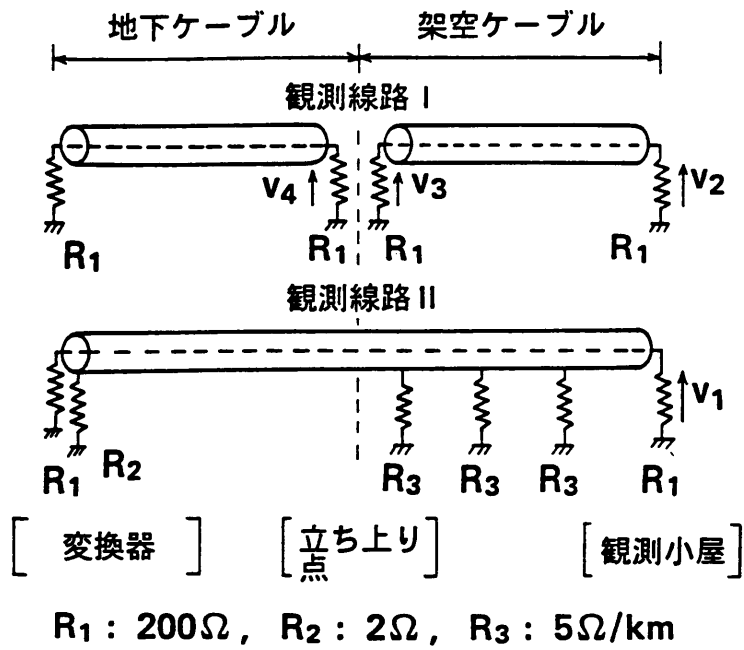


図 3. 5 雷サージ観測回路

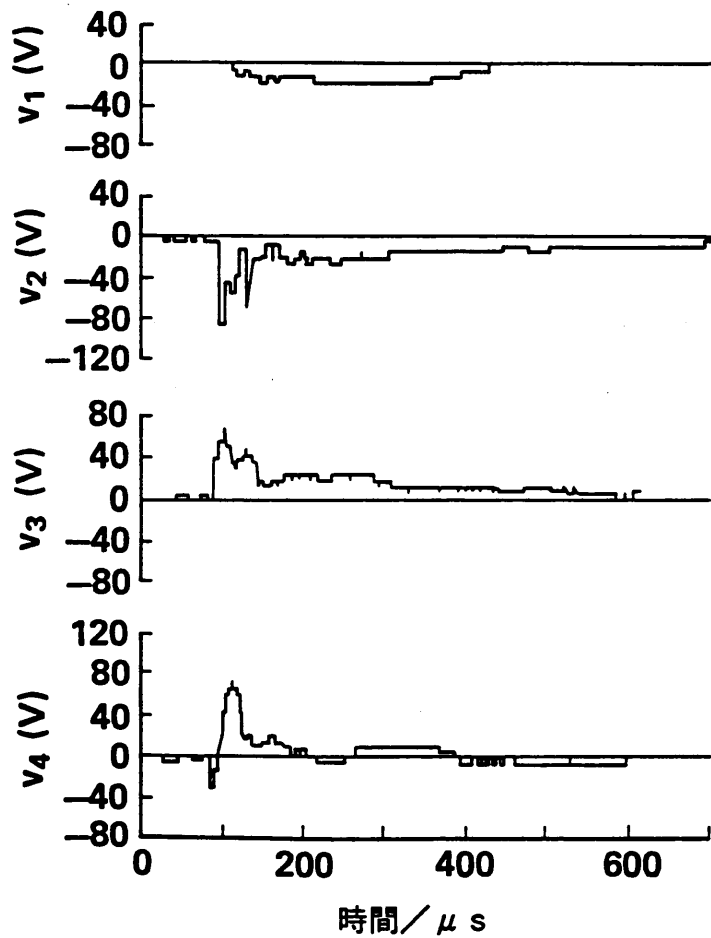


図 3. 6 同一雷により生じた観測雷サージ波形

両端に生ずる雷サージ波形は極性は逆であるがその形はほぼ同じであること、地下線路端末に生ずる雷サージ波形と架空線路端末に生ずる雷サージ波形はほぼ同じであることがわかる。

3. 4 雷サージ観測結果

本観測システムを用いた観測結果から明かになった事柄を以下に述べる。

(1) 架空線路の両端末に生じる雷サージ

架空線路の両端末に生じる雷サージ波形のピーク値（以下雷サージ波高値と呼ぶ）の観測値と解析値を図3. 7に示す。図で●印は観測された雷サージ波形より求めた観測値、□印は雷サージが垂直電界 E_v のみにより生じていると仮定したときに線路の両端に生じる雷サージ波高値の分布を示す解析値、×印は雷サージが水平電界 E_h のみにより生じていると仮定したときの線路の両端に生ずる雷サージ波高値の分布を示す解析値である（解析方法は付録3. 1参照）。図より、観測値は雷サージが水平電界 E_h のみにより生じていると仮定したときに両端に生ずる雷サージ波高値の分布とほぼ一致している。このことは、架空線路端末に生ずる雷サージは主に雷放電により生ずる電界成分のうち大地に水平な成分により生じていることを示している。

(2) 架空線路と地下線路に生ずる雷サージ

架空線路と地下線路の端末に生ずる雷サージ波高値の観測値と解析値を図3. 8、図3. 9に示す。これらの図で、×印は解析値（解析方法は付録3. 1参照）、●印は地下線路・架空線路よりほぼ等距離の雷放電（詳細は付録参照）により生じた雷サージ波形より求めた観測値であり、縦軸は地下線路端末に生ずる雷サージ波高値、横軸は架空線路端末に生ずる雷サージ波高値である。

図3. 8は埋設深さが200mの時の地下線路端末と架空線路端末に生ずる雷サージ波高値の解析値を、図3. 9は地下線路の埋設深さが1.5mの時の地下線路端末と架空線路端末に生ずる雷サージ波高値の観測値と解析値を示している。図3. 8、

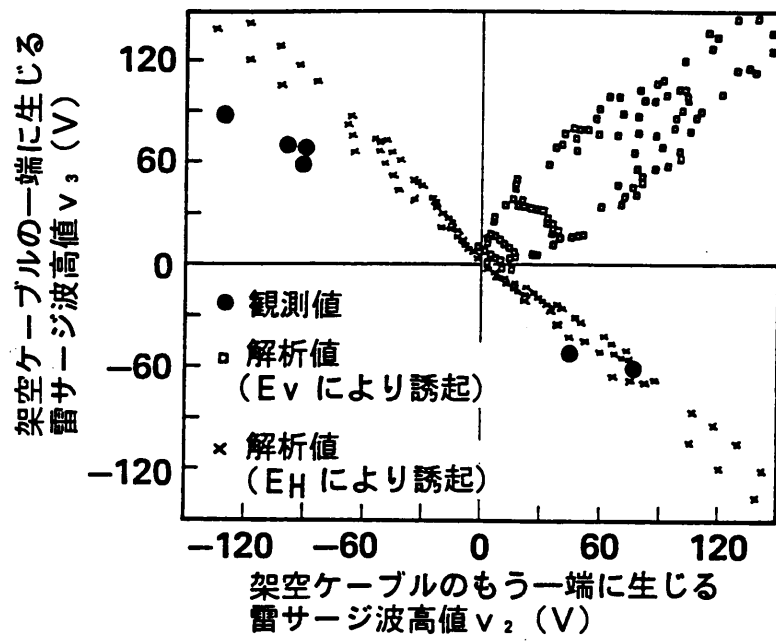


図 3. 7 架空線路の両端に生ずる雷サージ波高値

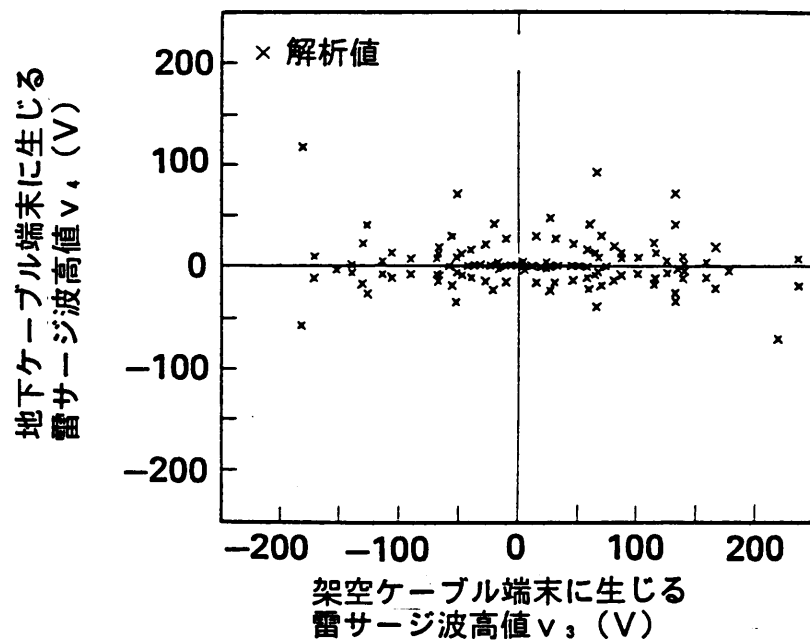


図 3. 8 地下線路端末と架空線路端末に生ずる雷サージ波高値
(地下線路の長さ 200 m の場合)

図3.9より、地下線路の埋設深さが200mの場合は、雷放電の再空間に生ずる電磁界が減衰するため、地下線路端末に生ずる雷サージ波高値の方が架空線路端末に生ずる雷サージ波高値に比べて小さいが、地下線路の埋設深さが1.5mの場合、雷放電の再空間に生ずる電磁界はほとんど減衰しないため、地下線路端末に生ずる雷サージ波高値は架空線路端末に生ずる雷サージ波高値とほぼ同じであることがわかる。また、図3.9に示すように、地下線路端末と架空線路端末に生ずる雷サージ波高値の観測値はほぼ同じである、また、解析からこれらの波形が地下線路、架空線路からほぼ等距離の雷放電により生じていると推定できる（解析方法は付録3.2参照）。このことは、実際の地下線路は平均して深さ1.5m程度の埋設されているので、架空線路端末と地下線路端末に生ずる雷サージはほぼ同じとなることを意味している。

(3) 金属シースの雷サージ抑圧効果

観測線路Ⅰの架空線路端末と観測線路Ⅱの観測小屋側端末に生ずる雷サージ波高値の観測値と解析値を図3.10, 3.11に示す。これらの図において、●印は観測雷サージ波形より求めた観測値、×印は解析値（解析方法は付録3.1参照）である。また、図3.10, 3.11において、縦軸は架空線路端末に生ずる雷サージ波高値、横軸は観測線路Ⅱに生じる雷サージ波高値である。

図3.10は観測線路Ⅱの架空ケーブル金属シースが接地されていないときの架空線路端末と観測線路Ⅱの端末に生ずる雷サージ波高値の解析値を示している。図より、解析値は、ほとんどが第1象限、第3象限の $V_1 = V_2$ の波線近傍にあり、架空線路端末と観測線路Ⅱの端末に生ずる雷サージ波高値はほぼ同じであることがわかる。また、図3.11は、観測線路Ⅱの架空ケーブル金属シースの接地抵抗が $5 \Omega / \text{km}$ の時の架空線路端末と観測線路Ⅱの端末に生ずる雷サージ波高値の解析値と観測線路Ⅱの観測値を示している。図より、解析値と観測値はほぼ一致していること、解析値はほとんどが第1象限の $V_1 = V_2$ の波線より上の領域と第3象限の波線より下の領域にあり、架空線路端末と観測線路Ⅱに生ずる雷サージ波高値は、ほとんどが架空線路端末の方が大きいことがわかる。

このことは、ケーブルがたとえ金属の遮蔽層（金属シース）を持っていても、それを適切に接地しなければ、雷サージの遮蔽効果はないこと、実際に通信に使用されている

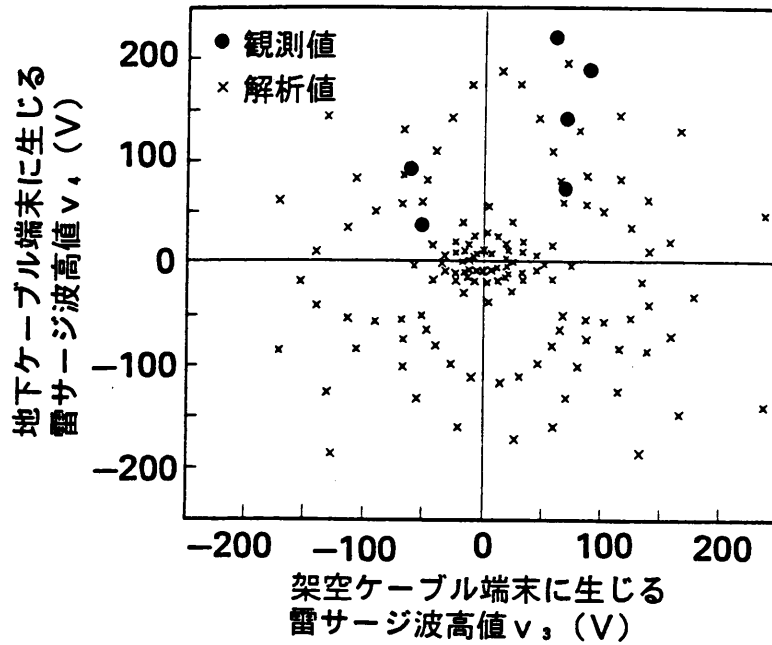


図 3. 9 地下線路端末と架空線路端末に生ずる雷サージ波高値
(地下線路の長さ 1.5 km の場合)

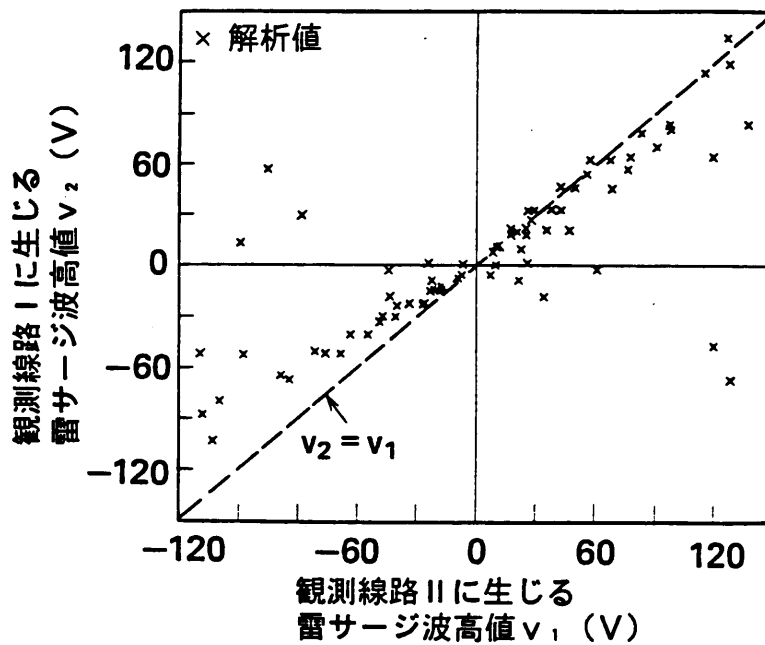


図 3. 10 観測線路 II の端末と架空線路端末に生ずる雷サージ波高値
(観測線路 II の架空ケーブル金属シースが接地されていない場合)

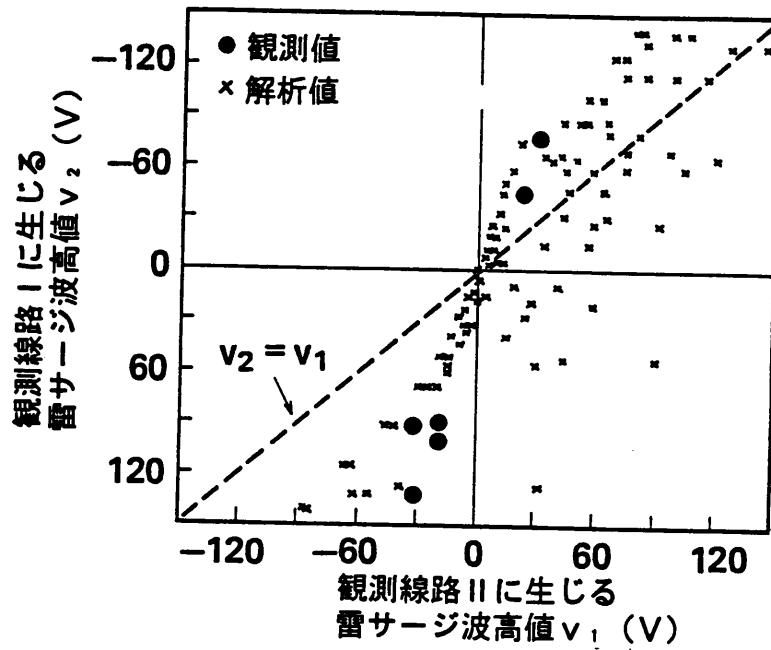


図 3. 1 1 観測線路 II の端末と架空線路端末に生じる雷サージ波高値
 (観測線路 II の架空ケーブル金属シース接地抵抗 $5 \Omega / \text{km}$
 で接地されている場合)

加入者線路はケーブルの金属シースをつり線を介して各柱ごとに接地することにより、雷サージを抑圧していることがわかる。

3. 5 本章のまとめ

通信線路端末に生ずる雷サージの誘起機構を明らかにするため、同一雷放電により離れた点に生ずる雷サージを観測できる光ファイバを用いた雷観測システムを構成し、雷サージ波形の観測を行なった。観測には2本の観測線路を使用し、1本は架空線路および地下線路に生ずる雷サージ波形、もう1本は実際に通信に使用されている加入者線路端末に生ずる雷サージ波形の観測を行なった。観測より、架空線路端末に生ずる雷サージは主に雷放電の再空間に生ずる電界の大地に水平な成分により誘起すること、地下線路端末には架空線路端末と同程度の雷サージが誘起すること、架空ケーブルの金属シースを接地することにより架空線路端末に生ずる雷サージ波高値は小さくなることを明らかにできた。

観測結果との対応づけを行い、通信線路の雷サージ誘起機構を明確にするために、観測線路の誘起機構モデルを考え、このモデルに基づいて線路端末に生ずる雷サージの解析を行なった。以下、解析方法を示す。なお、解析方法の詳細については、第4章で述べる。

(1) 観測線路 I の雷サージ誘起機構モデル

観測線路 I の雷サージ誘起機構モデルを図 3. A 1 に示す。なお、図 3. 5 に示すように、観測線路 I のケーブルと金属シースは接地されていないため遮蔽電流がほとんど流れず、その遮蔽効果は無視できるので[3]、図 3. A 1 に示すモデルでは金属シースを無視した。

架空線路端末では大気中に雷放電が起こると図に示すようにケーブル心線と大地の間に垂直成分が E_v 、水平成分が E_h の電界が生ずる。これらの電界がケーブル心線上の誘起起電力となる。誘起した雷サージはケーブルと大地よりなる伝送路を伝搬し線路端末でケーブル心線と大地間の雷サージとなる。また、地下線路では大地とケーブル心線間の空間に雷放電による電界が生ずる。この電界が誘起起電力となりケーブル心線と大地よりなる伝送路を伝搬し線路端末でケーブル心線と大地間の雷サージとなる。

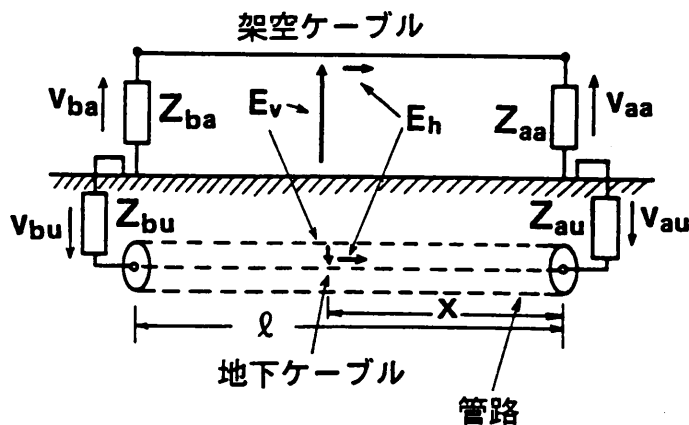


図 3. A 1 架空線路および地下線路の雷サージ誘起機構モデル

垂直電界，水平電界により伝送路上に誘起する電圧 $V_n(x)$ ，電流 $I_n(x)$

($n = 1$: 架空線路， $n = 2$: 地下線路) は式(3-1), (3-2)に示す伝送方程式を解くことにより求められる[4].

$$-\frac{\partial V_n(x)}{\partial x} = Z_n I_n(x) + E_{nn} \quad (3-1)$$

$$-\frac{\partial I_n(x)}{\partial x} = Y_n (V_n(x) - h E_v) \quad (3-2)$$

式(3-1), (3-2)において Z_n , Y_n は伝送路の一次インピーダンスと一次アドミッタンス, E_{nn} は地下および架空の水平電界成分 ($n = 1$: 架空線路, $n = 2$: 地下線路), h は架空線路の地上高である.

式(3-1), (3-2)の微分方程式の解は式(3-3), (3-4)となる[4].

$$V_n(x) = Z_n \{A_n + S_n(x)\} \exp(-\gamma_n x) + Z_n \{B_n + Q_n(x)\} \exp(\gamma_n x) \quad (3-3)$$

$$I_n(x) = \{A_n + S_n(x)\} \exp(-\gamma_n x) - \{B_n + Q_n(x)\} \exp(\gamma_n x) \quad (3-4)$$

ここで,

$$S_n(x) = \frac{1}{2Z_n} \int_0^x \{-E_{nn} + \gamma_n h E_v\} \exp(\gamma_n x) dx \quad (3-5)$$

$$Q_n(x) = \frac{1}{2Z_n} \int_0^x \{-E_{nn} - \gamma_n h E_v\} \exp(-\gamma_n x) dx \quad (3-6)$$

式(3-3)~(3-6)において Z_n , γ_n は雷サージが伝搬する伝送路の特性インピーダンス, 伝搬定数 ($n = 1$: 架空線路, $n = 2$: 地下線路) で架空部分は文献[5]で地下部分は文

献[6]で検討されている。A, Bは伝送路の端末条件により決まる定数である。

図3. A1に示す雷サージ誘起機構モデルより端末条件は式(3-7), (3-8)となる。

$$x = 0 \quad \text{で} \quad V_{\bullet}(0) = -Z_{\bullet} I_{\bullet}(0) \quad (3-7)$$

$$x = l \quad \text{で} \quad V_{\bullet}(l) = Z_{\bullet} I_{\bullet}(l) \quad (3-8)$$

式(3-7), (3-8)で Z_{\bullet} , Z_{\bullet} は雷サージが伝搬する伝送路の終端インピーダンスで, 架空線路の場合 Z_{\bullet} , Z_{\bullet} である。また, $V_{\bullet}(0)$, $V_{\bullet}(l)$ は線路の両端末に生ずる雷サージで, 架空線路の場合 V_{\bullet} , V_{\bullet} , 地下線路の場合 V_{\bullet} , V_{\bullet} である。式(3-7), (3-8)に基づいて線路端末に生ずる雷サージを求めると式(3-3), (3-4)より式(3-9), (3-11)となる。

$$V_{\bullet}(0) = \frac{Z_{\bullet}(1 + P_{\bullet})}{\exp(\gamma_{\bullet} l) - P_{\bullet} P_{\bullet} \exp(-\gamma_{\bullet} l)} \times \{P_{\bullet} S_{\bullet}(l) \exp(-\gamma_{\bullet} l) - Q_{\bullet}(l) \exp(\gamma_{\bullet} l)\} \quad (5-9)$$

$$V_{\bullet}(l) = \frac{Z_{\bullet}(1 + P_{\bullet})}{\exp(\gamma_{\bullet} l) - P_{\bullet} P_{\bullet} \exp(-\gamma_{\bullet} l)} \times \{S_{\bullet}(l) - P_{\bullet} Q_{\bullet}(l)\} \quad (5-10)$$

ここで

$$P_{\bullet} = \frac{Z_{\bullet} - Z_{\bullet}}{Z_{\bullet} + Z_{\bullet}}, \quad P_{\bullet} = \frac{Z_{\bullet} - Z_{\bullet}}{Z_{\bullet} + Z_{\bullet}} \quad (5-11)$$

である。

(2) 観測線路Ⅱの雷サージ誘起機構モデル

観測線路Ⅱの雷サージ誘起機構モデルを図3. A 2に示す。図3. 2に示すように観測線路には交換局より地下線路で伸び、立ち上がり点で架空線路となり観測小屋に達している。また、架空線路部分ではケーブルの金属シースは各柱毎に接地されており、地下ケーブルの金属シースは交換局の接地に接続されている。

大気中に雷放電が起こると図に示すようにケーブルと大地の間に垂直成分が E_v 、水平成分が E_h ($n=1$: 架空, $n=2$: 地下) の電界が生ずる。これらの電界がケーブルの金属シース上の誘起起電力となる。誘起した雷サージはケーブルの金属シースと大地よりなる伝送路を伝搬し線路末端で金属シースと大地間の雷サージとなる。観測線路Ⅱの観測小屋端末には心線-シース間の雷サージ V_a が現われるが、観測結果[7]によれば、この雷サージは金属シース-大地間の雷サージ(Z_c の両端に現われる雷サージ)とほぼ等しいので、解析では金属シース-大地間の雷サージを V_a とした。

図3. A 4に示す雷サージ誘起機構モデルは文献[4]に報告されている架空・地下複合線路の雷サージ誘起機構モデルと同じである。よって、観測小屋の観測線路Ⅱの端末に生ずる雷サージは文献[4]より式(5-12)となる。

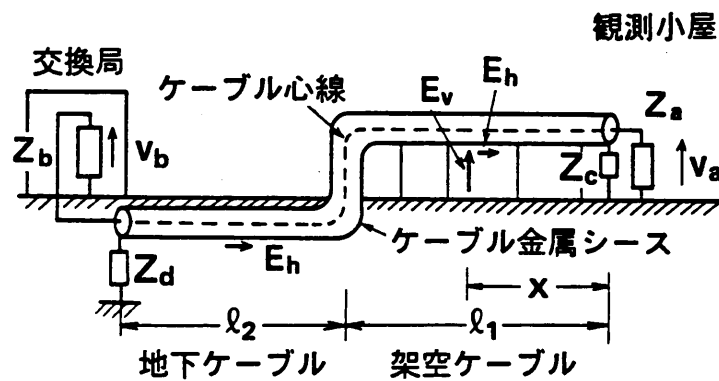


図3. A 2 観測線路Ⅱの雷サージ誘起機構モデル

$$\begin{aligned}
V_s = & \frac{Z_1 (1 + P_c)}{T_2 T_3 - T_1 T_4} \{ (T_4 - Z_1 T_2) S_1 (l_1) \exp(-\gamma_1 l_1) \\
& - (T_4 + Z_1 T_2) Q_1 (l_1) \exp(\gamma_1 l_1) \\
& + 2 Z_2 S_2 (l_2) P_d \exp(-2 \gamma_2 l_2) - 2 Z_2 Q_2 (l_2) \}
\end{aligned} \tag{5-12}$$

ここで

$$S_1 (l_1) = \frac{1}{2 Z_1} \int_0^{l_1} \{-E_{h1} + \gamma_1 h E_v\} \exp(\gamma_1 x) dx \tag{5-13}$$

$$S_2 (l_2) = \frac{1}{2 Z_2} \int_{l_1}^{l_1 + l_2} \{-E_{h2}\} \exp(\gamma_2 (x - l_1)) dx \tag{5-14}$$

$$Q_1 (l_1) = \frac{1}{2 Z_1} \int_0^{l_1} \{-E_{h1} - \gamma_1 h E_v\} \exp(-\gamma_1 x) dx \tag{5-15}$$

$$Q_2 (l_2) = \frac{1}{2 Z_2} \int_{l_1}^{l_1 + l_2} \{-E_{h2}\} \exp(-\gamma_2 (x - l_1)) dx \tag{5-16}$$

$$T_1 = P_c \exp(-\gamma_1 l_1) - \exp(\gamma_1 l_1) \tag{5-17}$$

$$T_2 = 1 - P_d \exp(-2 \gamma_2 l_2) \tag{5-18}$$

$$T_3 = Z_1 (P_c \exp(-\gamma_1 l_1) + \exp(\gamma_1 l_1)) \tag{5-19}$$

$$T_4 = Z_2 (1 + P_d \exp(-2 \gamma_2 l_2)) \tag{5-20}$$

$$P_c = \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1}, \quad P_d = \frac{Z_d - Z_2}{Z_d + Z_2} \tag{5-21}$$

である。式(5-12)～(5-21)で Z_1, γ_1, ℓ_1 は架空線路, Z_2, γ_2, ℓ_2 は地下線路のケーブル金属シースと大地よりなる伝送路の特性インピーダンス, 伝搬定数, 線路長で, 特性インピーダンス, 伝搬定数は文献[5],[6]で検討されている。また, Z_{01}, Z_{02} は観測線路Ⅱの両端の金属シース-大地間の終端インピーダンスである。

(3) 雷サージの分布

図3. A3に示す位置に雷放電があった時に, 各観測線路端末に生じる雷サージを求めた。解析では, まず, 誘起起電力となる垂直電界, 水平電界を文献[8]に従って求め, 次に, 観測線路Ⅰの架空線路, 地下線路については式(3-9)から(3-10)を用い, 観測線路Ⅱについては式(3-12)を用いて線路端末に生ずる雷サージを求めた。なお, 図3. A3では, 線路より雷撃位置が遠いときは, 雷撃位置に対する雷サージの依存性が小さくなるため[4], 雷撃点間隔を広くとった。解析に用いた定数値を表3. A1に示す。解析に当たっては, 雷放電電流, 放電上昇速度, 大地導電率については日本の平均値を用い, 観測線路の線路長, 終端インピーダンス等の値は図3. 2, 3. 5に示す観測線路の条件を用いた。

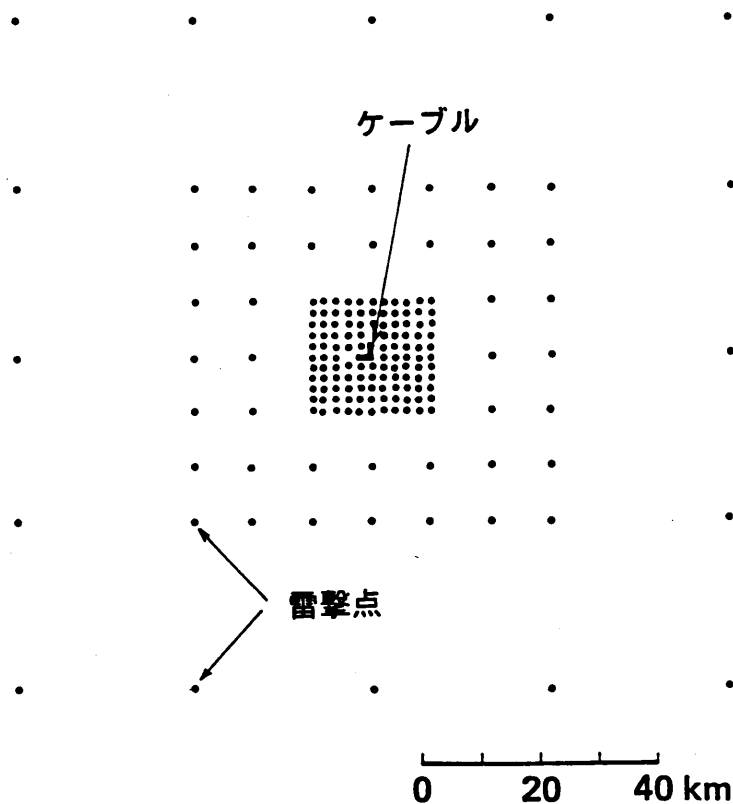


図3. A3 雷撃点と観測線路の位置関係

付録 3. 2 観測雷サージ波形の雷撃位置推定

図 3. 9 に示す観測雷サージ波高値の雷撃点が地下線路，架空線路からほぼ等距離にあることを以下に述べる。

線路末端に同じ雷サージ波高値を生じさせる雷撃点は雷放電電流，放電上昇速度が一定と仮定すれば 1 本の線上（以下等電圧サージ曲線と呼ぶ）に位置する。そこで，架空線路末端，地下線路末端の観測雷サージ波高値の等電圧サージ曲線を文献 [4] に示す方法で求めその交点より雷撃点を求めた。その結果を図 3. A 4 に示す。図 3. A 4 において破線，一点鎖線はそれぞれ架空線路末端地下線路末端の等電圧サージ曲線を示しており，No. 1 の●印がその雷撃点である。No. 1 から No. 6 の雷撃点は同一日の観測値より求められており，番号が大きくなるほど遅い時間に生じた雷撃点である。一般に雷撃点はほぼ I 方向に移動するので，この解析により求めた雷撃点は妥当なものであると考えられる。

図 3. A 1 より No. 1 から No. 6 の雷撃点は地下線路，架空線路からほぼ等距離にあることがわかる。

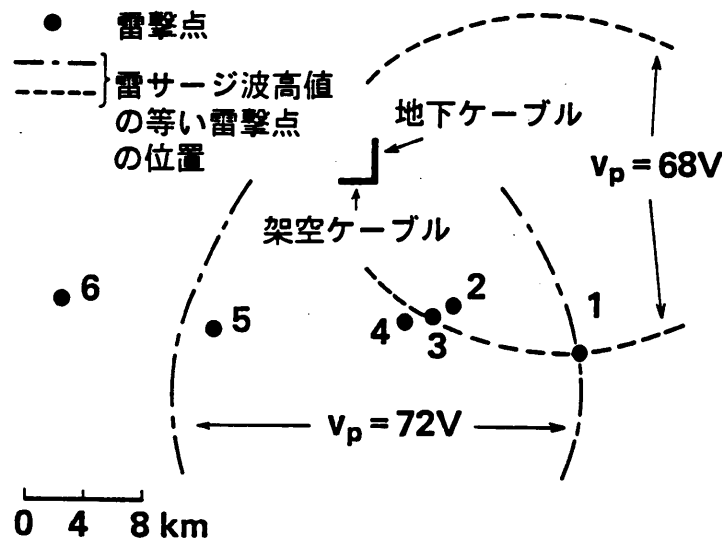


図 3. A 4 雷サージ波高値の観測値より求めた雷撃点の解析値

参考文献

- [1]村松, 佐藤:”光ファイバを用いた巨大サージ対策システムおよび新しいサージ検出法の現場試験”, 沖電気研究開発, 第108号, 46, 1, pp.45-50 (昭54-09)
- [2]中堀, 渡辺, 江川, 井原, 辻井, 岩見:”無人雷波形記録装置”, 住友電気, 第119号, pp.25-31 (昭56-09)
- [3]桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦:”架空通信線路に現れる雷サージ電圧の検討(分布接地の影響)”, 昭56信学総全大
- [4]桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦:”架空・地下複合線路端末に生ずる誘導雷サージ”, 信学論(B), J65-B, 1, pp.31-38 (昭57-01)
- [5]J. R. Carson:”Wave propagation in overhead wires with ground return”, Bell Syst. Tech. J., 5, pp.539-554(May 1926)
- [6]桑原伸夫, 古賀広昭, 大槻文男, 元満民生:”架空・地下複合線路系に誘起する雷サージの検討”, 信学技報, EMCJ79-50, (1979-12)
- [7]元満民生, 古賀広昭, 田口守彦, 桑原伸夫, 大槻文男, 貝津良輔:”通信線路に誘起する雷サージの諸特性”, 研実報, 30, 5, pp.1157-1173 (昭56)
- [8]阿部徹治, 古賀広昭, 桑原伸夫:”雷放電電流による大地上の電界について”, Sys 信学技報, EMCJ83-2 (1983-04)

第4章 通信線路端末に生じる 雷サージの解析

4. 1 まえがき

通信線路端末に生じる雷サージ特性を明らかにするためには、通信線路端末に生じる雷サージの観測を行なうことが最も確実な手段であるが[1]、雷の多い地域を選んでも1年間に数日程度が限度であり、解明に長い期間が必要となる。そのため、雷サージの誘起機構モデルを設定し、そのモデルに基づいた雷サージの解析が行い、雷観測データと比較を行いなながら、雷サージの誘起メカニズムを解明してゆくことが必要になる。

文献[2]では、架空線路のみの場合について、雷放電の際生じる電界の大地に対して垂直の成分と水平の成分により雷サージが生じると考えて解析が行なわれ、かなり観測結果を説明できるようになってきている。しかし、一般の通信線路、とくに市内加入者線路は、架空線路と地下線路で構成される場合が多く、通信線路の接地系も単純ではない。そして、このような線路（以下地下・架空複合線路と呼ぶ）に対する雷サージ誘起メカニズムは明らかにされていない。

本章では、架空・地下複合線路について線路端末に生じる雷サージの誘起機構モデルを設定し雷サージ波形を求める理論式を導いている。次に、理論式を用いて架空線路側端末及び地下線路側端末に生ずる雷サージ波形について、架空ケーブルを多点で接地した場合、雷撃位置を変えた場合に対する影響を求めている。また、線路端末に生じる雷サージ波形の発生頻度分布を求め、雷観測の結果得られたデータと比較して、よい一致が得られることを示している。

4. 2 通信線路端末に生じる雷サージの解析

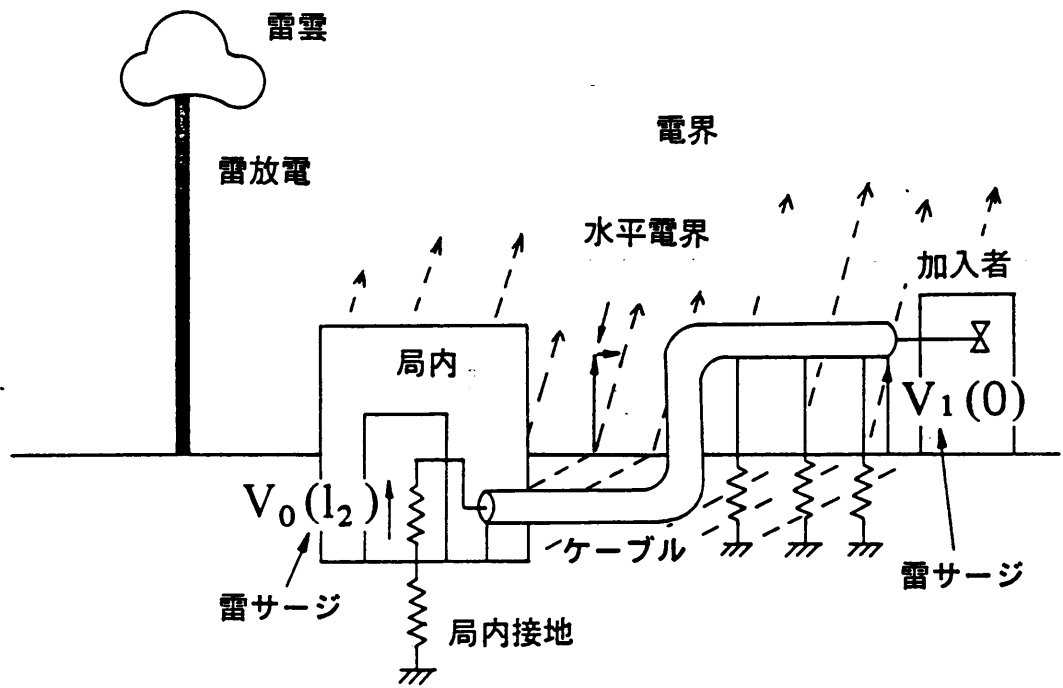
本節では、架空・地下複合線路の雷サージ誘起機構モデルの設定と線路端末に生ずる雷サージの解析方法について述べる

4. 2. 1 雷サージ誘起機構モデル

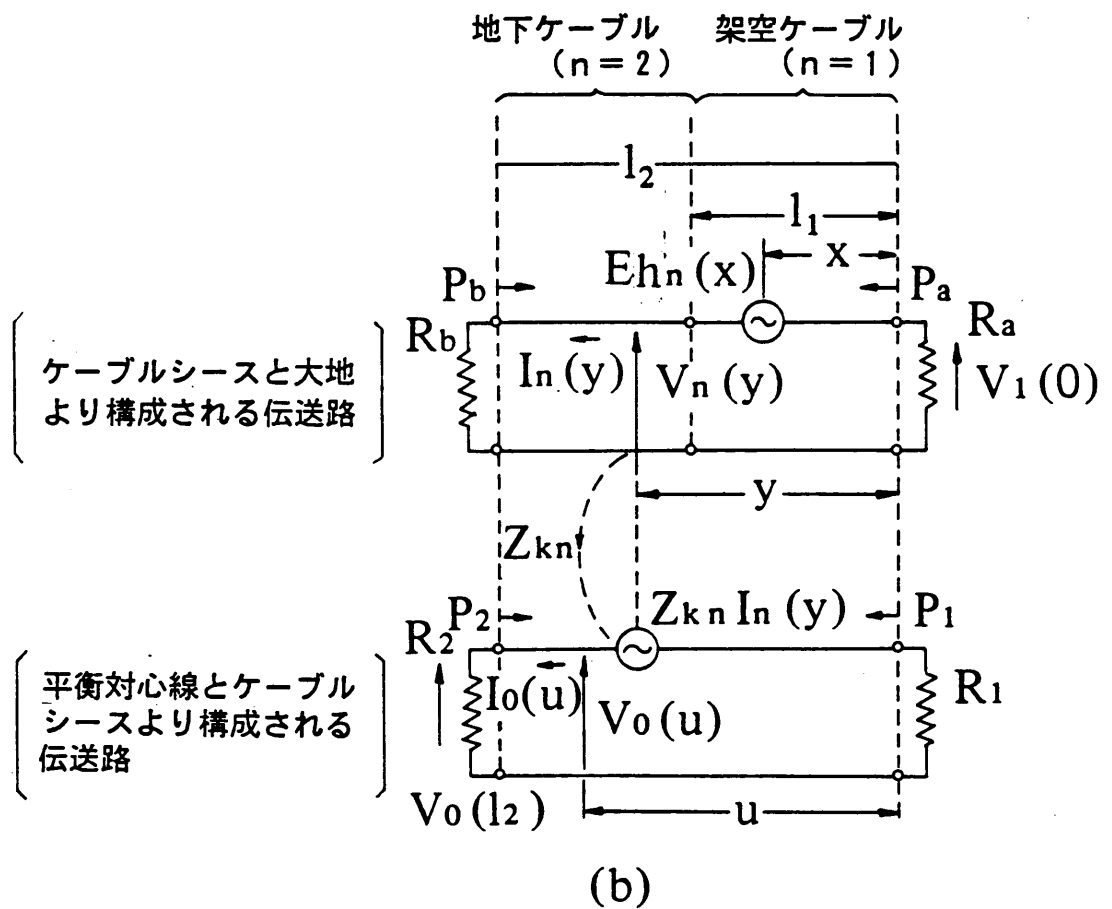
市内加入者系の一般形態である架空・地下複合線路の雷サージ誘起機構モデルを図4. 1 (a) に示す。実際の通信線路は分岐，曲がり，供架など種々の条件で布設されているが解析に当たっては図4. 1 (a) に示すような架空線路と地下線路が水平方向に一直線で伸びたモデルを設定した。なお，地下から架空へ線路が立ち上がる地点で線路を水平方向に $0 \sim 45^\circ$ 曲げたとしても後述する雷サージ発生頻度分布に与える誤差は10%程度（付録4. 1参照）のため直線モデルとした。図4. 1 (a) に示すように，線路は交換局から地下線路で伸び途中から立ち上がって架空線路となり加入者に達し，架空ケーブルは数十～数百mの間隔で接地されている。解析では，一般の通信線で用いられている，架空線路ではCCP-APケーブル（アルミ遮蔽0.2mm）が，地下線路にはスタルベスケーブル（アルミ遮蔽0.2mmと鉄遮蔽0.18mm）が布設されていると考える。

図4. 1 (a) に示すように，交換局側の端末では，地下ケーブルのケーブルシースは交換機の接地とともに局の接地に接続されるため局内装置には心線・シース間に現われるサージが印加される。一方，加入者側ではケーブルシースは大地に直接接地され，宅内装置は心線にのみ接続されるため，宅内装置には心線・大地間に生ずる雷サージが印加される。なお，架空線路側端末の雷サージ波高値はシース・大地間の雷サージ波高値とほとんど差はないという結果が得られているので[1]，架空線路側端末の雷サージ解析はシース・大地間について行なった。従って，本論文では地下線路側端末の雷サージは心線・シース間のサージ，架空線路側端末の雷サージはシース・大地間のサージを意味する。

以下，地下線路側端末，架空線路側端末に生じる雷サージ誘起機構を説明する。まず，雷雲と大地間に雷放電が生じ，その放電電流によって大気中に電界が生じる。この電界は大地が有限の導電率をもつ場合には図4. 1 (a) に示すように電界が傾き大地に対して垂直な成分と水平な成分が生じる[2]。これらの電界がケーブルシース上の誘起機電力となる。この電界は地中にも生じて地下ケーブルシース上の誘起機電力となる。この誘起機電力は線路を伝搬して，架空線路側端末ではシース・大地間に雷サージとなって現われる。一方，地下線路側端末ではシースを流れる電流が金属シースの伝達インピーダンス[3]を介してシース内表面に誘起機電力を生じさせ，それが伝搬してシース・心線



(a)



(b)

図 4. 1 架空・地下複合線路の雷サージ誘起機構モデル (a) とその等価回路 (b)

間に雷サージを発生させる。

この誘起機構モデルの等価回路を図4. 1 (b) に示す。この等価回路ではケーブルシース・大地間線路と心線・シース間線路は独立した線路と考え、雷放電によって生じた架空部分及び地下部分の水平電界成分 E_{h1} , E_{h2} がそれぞれ架空・地下ケーブルのケーブルシース上の誘起機電力となり架空線路側端末にサージ $V_1(0)$ を生じさせる。そして、これらの電界によってシース・大地間線路に電流 $I_s(y)$ が流れ、 $I_s(y)$ はケーブルシースの伝達インピーダンス Z_{ss} を介してシース内表面に起電力 $Z_{ss} I_s(y)$ を生じさせる。この起電力により地下線路側端末にサージ $V_0(l_2)$ が生じる。また、図4. 1 (a) で示しているように架空線路側部分は一般に多点で接地されているが接地点の間隔は雷サージの主なエネルギー成分が含まれる 10 kHz の波長より十分小さいことから、この等価回路では解析の簡略化も考慮して、架空ケーブルシース・大地間は分布定数的に接地されているとして取り扱う。

4. 2. 2 雷放電により生ずる水平電界

通信線路と雷撃位置の関係を図4. 2 に示す。雷放電により生ずる水平電界の線路に平行な成分は、文献[2], [4]より式(4-1)

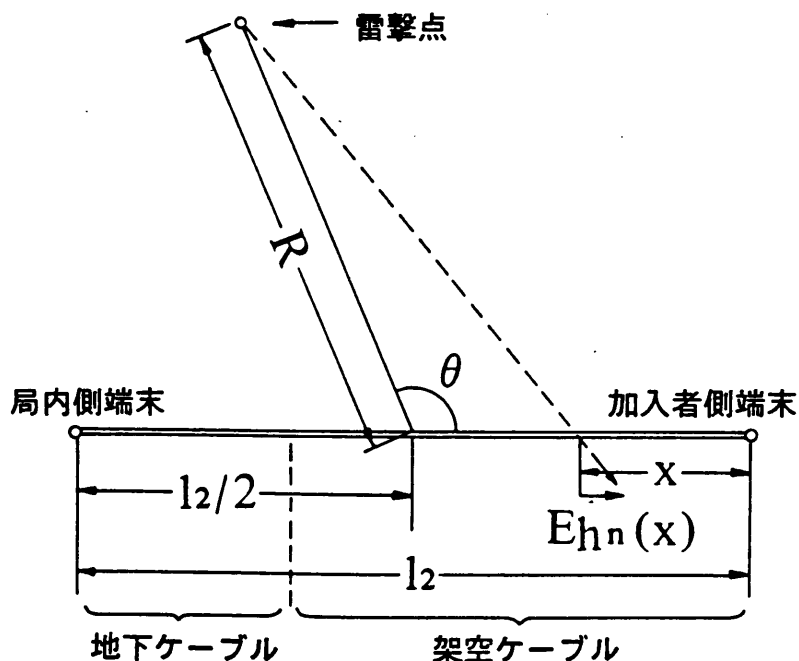


図4. 2 雷撃点と線路の位置関係

$$\varepsilon_r \ll \sqrt{j\omega\varepsilon_0/\sigma} \quad (4-1)$$

の条件下で、架空部及び地下部に於てそれぞれ式(4-2), (4-3)となる。

$$E_{h1}(\omega) = T(R, \theta) \sqrt{j\omega\varepsilon_0/\sigma} E_v(x, \omega) \quad (4-2)$$

$$E_{h2}(\omega) = T(R, \theta) \sqrt{j\omega\varepsilon_0/\sigma} \exp(-\sqrt{j\omega\mu_0\sigma} h_t) \cdot E_v(x, \omega) \quad (4-3)$$

但し

$$E_v(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_v(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (4-4)$$

$$T(R, \theta) = \frac{x - (R \cos \theta - l_2/2)}{\sqrt{(R \sin \theta)^2 + (x - (R \cos \theta + l_2/2))^2}} \quad (4-5)$$

$E_{h1}(\omega)$: 架空部分の水平電界強度

$E_{h2}(\omega)$: 地下部分の水平電界強度

ε_0, μ_0 : 真空中の誘電率, 透磁率

ε_r, σ : 大地導電率および比誘電率

h_t : 地下線路の埋設深さ

$\varepsilon_v(t)$: x 点での垂直電界強度

$T(R, \theta)$: x 点での水平電界とその点でのケーブルに平行な電界成分との比

R : 線路の中心と雷撃点(Lightning strike point)との距離 (図4. 2 参照)

θ : 線路と雷撃点とのなす角度 (図4. 2 参照)

l_2 : 架空・地下複合線路の全線路長 (図4. 2 参照)

式(4-4)で $\varepsilon_v(x, t)$ は x 点での垂直電界強度であり、文献[2]で与えられており、以下の式で表される。

$$t < t_{d0}$$

$$\varepsilon_z(t) = 0 \quad (4-6)$$

$$t_{d0} \leq t < t_{d0} + t_{d1}$$

$$\varepsilon_z(t) = \varepsilon_1(t) \quad (4-7)$$

$$t_{d0} + t_{d1} \leq t < t_{d0} + t_{d2}$$

$$\varepsilon_z(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) \quad (4-8)$$

$$t_{d0} + t_{d2} \leq t$$

$$\varepsilon_z(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t) \quad (4-9)$$

$$\varepsilon_n(t) = -60 a_{dn} \left((v_c - v_1) / (v_c v_1^2) \right)$$

$$\cdot \ln \left[\frac{\{ t_{dn} + \sqrt{t_{dn}^2 + ((v_c^2 - v_1^2) / (v_c^2 v_1^2)) R^2} \}}{\{ R/v_c + R/v_1 \}} \right]$$

$$+ 60 a_{dn} (v_c / v_1) (t_{dn} / R + 1 / v_c) \quad (4-11)$$

ここで,

$$t_{d0} = \sqrt{R - 2 \sin \theta (1_z / 2 - x) - (1_z / 2 - x)^2} / v_c \quad (4-12)$$

また, $n = 1$ では

$$a_{d1} = I_{dp} / t_{d1} \quad (4-13)$$

$$t_{d1} = t$$

$n = 2$ では

$$a_{d2} = -I_{dp} / t_{d1} - I_{dp} / (t_{d2} - t_{d1}) \quad (4-14)$$

$$t_{d2} = t - t_{d1}$$

$n = 3$ では

$$a_{\text{ss}} = I_{\text{sp}} / (t_{\text{ss}} - t_{\text{sr}}) \quad (4-15)$$

$$t_{\text{ss}} = t - t_{\text{sr}}$$

ここで

I_{sp} : 雷放電電流の波高値

t_{sr} : 雷放電電流の波頭長

t_{ss} : 雷放電電流が零から立ち上がり再び零になるまでの時間

v_e : 光速 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

v_r : 雷放電の上昇速度

4. 2. 3 架空線路側端末に生ずる雷サージ

図4. 1 (b) の等価回路に於て水平電界 E_{sn} ($n = 1$: 架空部分, $n = 2$: 地下部分) が線路に沿った誘起起電力となると、シース・大地幹線路上の点 y の電流 $I_{\text{sn}}(y)$, 電圧 $V_{\text{sn}}(y)$ は式(4-16), (4-17)に示す微分方程式で表される。

$$- \frac{\partial V_{\text{sn}}(x)}{\partial x} = Z_{\text{sn}} I_{\text{sn}}(x) + E_{\text{sn}} \quad (4-16)$$

$$- \frac{\partial I_{\text{sn}}(x)}{\partial x} = Y_{\text{sn}} V_{\text{sn}}(x) \quad (4-17)$$

式(4-16), (4-17)において Z_{sn} , Y_{sn} は伝送路の一次インピーダンスと一次アドミッタンス ($n = 1$: 架空線路, $n = 2$: 地下線路), h は架空線路の地上高である。

式(4-16), (4-17)の微分方程式の解は式(4-18), (4-19)となる。

$$I_n(y) = [A_n + S_n(y)] \exp\{-\gamma_n(y - l_{n-1})\} - [B_n + Q_n(y)] \exp\{\gamma_n(y - l_{n-1})\} \quad (4-18)$$

$$V_n(y) = Z_n [A_n + S_n(y)] \exp\{-\gamma_n(y - l_{n-1})\} + Z_n [B_n + Q_n(y)] \exp\{\gamma_n(y - l_{n-1})\} \quad (4-19)$$

但し、 $S_n(y)$ 、 $Q_n(y)$ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} S_n(y) &= \frac{1}{2Z_n} \int_{l_{n-1}}^y (-E_{n,n}(x)) \exp\{\gamma_n(x - l_{n-1})\} dx \\ Q_n(y) &= \frac{1}{2Z_n} \int_{l_{n-1}}^y (-E_{n,n}(x)) \exp\{-\gamma_n(x - l_{n-1})\} dx \end{aligned} \right\} (4-20)$$

$$l_{n-1} \left[\begin{array}{ll} 0 & (n=1: \text{架空線路}) \\ l_1 & (n=2: \text{地下線路}) \end{array} \right] \quad (4-21)$$

Z_n 、 γ_n ：シース・大地間線路の特性インピーダンス及び伝搬定数

($n=1$ ：架空線路、 $n=2$ ：地下線路)

l_1 ：架空線路長

A_n 、 B_n ：端末条件により決まる定数

図4. 1 (b) より架空線路および地下線路のシース・大地間の端末条件は式(4-22)となる。

$$\left. \begin{aligned} V_1(0) &= -R_n I_1(0) \\ V_1(l_1) &= V_2(l_1) \\ I_1(l_1) &= I_2(l_1) \\ V_2(l_2) &= R_n I_2(l_2) \end{aligned} \right\} (4-22)$$

但し

R_n ：架空線路側端末シース・大地間終端抵抗

R_n ：地下線路側端末シース・大地間終端抵抗

式(4-18)、(4-19)を式(4-22)の端末条件で解くことにより A_n 、 B_n を求めれば架空線路側端末の雷サージ $V_1(0)$ は式(4-23)となる。

$$V_1(0) = \int_0^{l_1} Z_{s1}(x) E_{h1}(x) dx + \int_{l_1}^{l_2} Z_{s2}(x) E_{h2}(x) dx \quad (4-23)$$

Z_{s1} , Z_{s2} はそれぞれ架空部分, 地下部分の水平電界と架空線路側端末雷サージとの関係を表す伝達関数で, その式を表4. 1に示す.

4. 2. 4 地下線路側端末に生ずる雷サージの解析

図4. 1 (b) に示す等価回路で, 心線・シース間線路の点 u に置ける電流 $I_0(u)$, 電圧 $V_0(u)$ は式(4-24), (4-25)となる[5].

$$I_0(u) = [A_0 + S_0(u)] \exp(-\gamma_0 u) - [B_0 + Q_0(u)] \exp(\gamma_0 u) \quad (4-24)$$

$$V_0(u) = Z_0 [A_0 + S_0(u)] \exp(-\gamma_0 u) + Z_0 [B_0 + Q_0(u)] \exp(\gamma_0 u) \quad (4-25)$$

但し, $S_0(u)$, $Q_0(u)$ は次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} S_0(u) &= \frac{1}{2Z_0} \int_0^u (-Z_{rs} I_s(y) \exp(\gamma_0 y) dy \\ Q_0(u) &= \frac{1}{2Z_0} \int_0^u (-Z_{rs} I_s(y) \exp\{-\gamma_0 y\} dy \end{aligned} \right\} (4-26)$$

Z_0, γ_0 : シース・大地間線路の特性インピーダンス及び伝搬定数

Z_{rs} : 架空ケーブルシース ($n=1$), 地下ケーブルシース ($n=2$) の伝達インピーダンス

$I_n(y)$: シース・大地間線路に流れる電流 ($n = 1$: 架空線路,

$n = 2$: 地下線路)

A_0, B_0 : 端末条件より決まる定数

図4. 1 (b) より架空線路および地下線路のシース・大地間の端末条件は式(4-27)となる.

$$\begin{aligned} V_0(0) &= -R_1 I_0(0) \\ V_0(l_2) &= R_2 I_0(l_2) \end{aligned} \quad (4-27)$$

但し

R_1 : 架空線路側端末心線・シース間線路終端抵抗

R_2 : 地下線路側端末心線・シース間線路終端抵抗

式(4-24), (4-25)において, $I_n(y)$ は式(4-18)を式(4-22)の端末条件の下で解くことにより得られるから, 式(4-25)を式(4-27)の端末条件の下で解き A_0, B_0 を求めれば, 地下線路側端末に生ずる雷サージ $V_0(l_2)$ は水平電界 $E_{n1}(x)$ で表すことができ式(4-28)となる.

$$\begin{aligned} V_0(l_2) &= \int_0^{l_1} Z_{21}(x) E_{n1}(x) dx \\ &+ \int_{l_1}^{l_2} Z_{22}(x) E_{n2}(x) dx \end{aligned} \quad (4-28)$$

Z_{21}, Z_{22} はそれぞれ架空線路, 地下線路の水平電界と地下線路側端末雷サージとの関係を表す伝達関数で, その式を表4. 1に示す.

4. 3 数値解析

シース・大地間, 心線・シース間の特性インピーダンス, 伝搬定数, ケーブルシースの伝達インピーダンスは周波数の関数で表されており, これらの関数を時間領域の関数に変換して雷サージの解析を行なうことは困難である. そこで, 式(4-2), (4-3)に示すように, 水平電界をフーリエ変換を用いて周波数領域に変換し, 式(4-23), (4-28)により周

表 4. 1 架空および地下ケーブルの水平電界とケーブル端末雷サージとの関係を表す伝達関数

	架空ケーブル端末の雷サージ	地下ケーブル端末の雷サージ	
架空ケーブル部分からの伝達関数	$Z_{a1}(x) = C_{11} e^{\gamma_1 x} - C_{12} e^{-\gamma_1 x}$ $C_{11} = -\frac{T_A}{2} \left(\frac{T_4}{Z_1} - T_2 \right) \cdot e^{-\gamma_1 l_1}$ $C_{12} = \frac{T_A}{2} \left(\frac{T_4}{Z_1} + T_2 \right) \cdot e^{\gamma_1 l_1}$	$Z_{21}(x) = C_{11} e^{\gamma_1 x} + C_{12} e^{-\gamma_1 x} - C_{13} e^{\gamma_0 x} + (-P_1 C_{13}) e^{-\gamma_0 x}$ $C_{11} = S_a \left[\frac{Z_{k1}}{2Z_1} \frac{(T_2 Z_1 - T_4) e^{-\gamma_1 l_1}}{T_2 T_3 - T_1 T_4} (P_1 S_b(-\gamma_0) - S_b(\gamma_0)) \right. \\ \left. + \frac{Z_{k1}}{2Z_1} \left\{ P_1 \frac{e^{-(\gamma_0 + \gamma_1) l_1}}{\gamma_0 + \gamma_1} + \frac{e^{(\gamma_0 - \gamma_1) l_1}}{\gamma_0 - \gamma_1} \right\} - Z_{k2} \frac{P_1 S_c(-\gamma_0) - S_c(\gamma_0)}{T_2 T_3 - T_1 T_4} \right]$ $C_{12} = S_a \left[\frac{Z_{k1}}{2Z_1} \frac{(T_2 Z_1 + T_4) e^{\gamma_1 l_1}}{T_2 T_3 - T_1 T_4} (P_1 S_b(-\gamma_0) - S_b(\gamma_0)) \right. \\ \left. - \frac{Z_{k1}}{2Z_1} \left\{ P_1 \frac{e^{-(\gamma_0 - \gamma_1) l_1}}{\gamma_0 - \gamma_1} + \frac{e^{(\gamma_0 + \gamma_1) l_1}}{\gamma_0 + \gamma_1} \right\} - Z_{k2} \frac{P_a (P_1 S_c(-\gamma_0) - S_c(\gamma_0))}{T_2 T_3 - T_1 T_4} \right]$ $C_{13} = -S_a \frac{Z_{k1}}{2Z_1} \left(\frac{1}{\gamma_0 - \gamma_1} - \frac{1}{\gamma_0 + \gamma_1} \right)$	
地下ケーブル部分からの伝達関数	$Z_{a2}(x) = C_{21} e^{\gamma_2 x} + C_{22} e^{-\gamma_2 x}$ $C_{21} = -T_A P_b e^{-2\gamma_2(l_2 - l_1)} \cdot e^{-\gamma_2 l_1}$ $C_{22} = T_A e^{\gamma_2 l_1}$	$Z_{22}(x) = C_{21} e^{\gamma_2 x} - C_{22} e^{-\gamma_2 x} - C_{23} e^{\gamma_0 x} - (-P_1 C_{23}) e^{-\gamma_0 x}$ $C_{21} = S_a \left[-Z_{k1} \frac{P_b e^{-2\gamma_2 l_2} e^{\gamma_2 l_1}}{T_2 T_3 - T_1 T_4} (P_1 S_b(-\gamma_0) - S_b(\gamma_0)) \right. \\ \left. - Z_{k2} \frac{P_b e^{-2\gamma_2 l_2} e^{\gamma_2 l_1}}{T_2 T_3 - T_1 T_4} (P_1 S_d(-\gamma_0) - S_d(\gamma_0)) - \frac{Z_{k2}}{2Z_2} \left\{ \frac{P_1 e^{-\gamma_0 - \gamma_2 l_2}}{\gamma_0 - \gamma_2} - \frac{e^{(\gamma_0 - \gamma_2) l_2}}{\gamma_0 - \gamma_2} \right\} \right]$ $C_{22} = S_a \left[Z_{k1} \frac{e^{\gamma_2 l_1}}{T_2 T_3 - T_1 T_4} (P_1 S_b(-\gamma_0) - S_b(\gamma_0)) \right. \\ \left. - Z_{k2} \frac{e^{\gamma_2 l_1}}{T_2 T_3 - T_1 T_4} (P_1 S_d(-\gamma_0) - S_d(\gamma_0)) - \frac{Z_{k2}}{2Z_2} \left\{ \frac{P_1 e^{-(\gamma_0 - \gamma_2) l_2}}{\gamma_0 - \gamma_2} - \frac{e^{(\gamma_0 + \gamma_2) l_2}}{\gamma_0 - \gamma_2} \right\} \right]$ $C_{23} = -S_a \frac{Z_{k2}}{2Z_2} \left(\frac{1}{\gamma_0 - \gamma_2} - \frac{1}{\gamma_0 + \gamma_2} \right)$	
伝達関数に使用されている関数値	$T_A = \frac{Z_1 (1 + P_a)}{T_2 T_3 - T_1 T_4}$ $S_a = \frac{1 + P_2}{2(e^{\gamma_0 l_2} - P_1 P_2 e^{-\gamma_0 l_2})}$ $S_b(\gamma_0) = \frac{P_a (e^{(\gamma_0 - \gamma_1) l_1} - 1)}{\gamma_0 - \gamma_1} - \frac{e^{(\gamma_0 + \gamma_1) l_1} - 1}{\gamma_0 + \gamma_1}$	$S_c(\gamma_0) = e^{\gamma_2 l_1} \frac{e^{(\gamma_0 - \gamma_2) l_2} - e^{(\gamma_0 - \gamma_2) l_1}}{\gamma_0 - \gamma_2} - P_b e^{-2\gamma_2(l_2 - l_1)} e^{-\gamma_2 l_1} \frac{e^{(\gamma_0 + \gamma_2) l_2} - e^{(\gamma_0 + \gamma_2) l_1}}{\gamma_0 - \gamma_2}$ $S_d(\gamma_0) = \frac{1}{2} \left(\frac{T_3}{Z_2} - T_1 \right) e^{\gamma_2 l_1} \frac{e^{(\gamma_0 - \gamma_2) l_2} - e^{(\gamma_0 - \gamma_2) l_1}}{\gamma_0 - \gamma_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{T_3}{Z_2} - T_1 \right) e^{-\gamma_2 l_1} \frac{e^{(\gamma_0 + \gamma_2) l_2} - e^{(\gamma_0 + \gamma_2) l_1}}{\gamma_0 - \gamma_2}$	$T_1 = P_a e^{-\gamma_1 l_1} - e^{\gamma_1 l_1}$ $T_2 = 1 - P_b e^{-2\gamma_2(l_2 - l_1)}$ $T_3 = Z_1 (P_a e^{-\gamma_1 l_1} - e^{\gamma_1 l_1})$ $T_4 = Z_2 (1 - P_b e^{-2\gamma_2(l_2 - l_1)})$ $P_a = \frac{R_a - Z_1}{R_a + Z_1}, P_b = \frac{R_b - Z_2}{R_b + Z_2}$ $P_1 = \frac{R_1 - Z_0}{R_1 + Z_0}, P_2 = \frac{R_2 - Z_0}{R_2 + Z_0}$

波数領域での雷サージを求め、それをフーリエ逆変換を用いて時間領域に戻す方法で解析を行なった。また、式(4-23)、(4-28)の積分は計算機により実行すると多くの時間を必要とするため、線路の各点に生じる水平電界 $E_{h_n}(x)$ を線路長方向に折れ線近似して式(4-23)、(4-28)の積分を行ない計算時間の短縮を図った。いま、図4.1(b)に示す線路を M 個に分け、分割点を $x_0, x_1, \dots, x_m, \dots, x_M$ とすれば、 $x_{m-1} < x < x_m$ の時、水平電界は式(4-29)となる。

$$E_{h_n}(x) = a_m x + b_m \quad (4-29)$$

但し、

$$a_m = (E_{h_n}(x_m) - E_{h_n}(x_{m-1})) / (x_m - x_{m-1}) \quad (4-30)$$

$$b_m = E_{h_n}(x_m) - a_m x_m \quad (4-31)$$

$$n = \begin{cases} 1 & x_m \leq l_1 \\ 2 & x_{m-1} \geq l_1 \end{cases} \quad (4-32)$$

式(4-29)を式(4-23)、(4-28)へ代入して積分を行なえば表4.1より加入者側および局内側に生ずる雷サージは式(4-33)、(4-34)となる。

$$V_1(0) = \sum_{m=1}^{M_1} \{ C_{11} F_m(\gamma_1) + C_{12} F_m(\gamma_1) \} + \sum_{m=M_1+1}^M \{ C_{21} F_m(\gamma_2) + C_{22} F_m(\gamma_2) \} \quad (4-33)$$

$$\begin{aligned}
V_0(l_2) = & \sum_{m=1}^{M_1} \{ C_{11} F_m(\gamma_1) + C_{12} F_m(\gamma_1) \\
& + C_{13} F_m(\gamma_1) + C_{14} F_m(\gamma_1) \} \\
& + \sum_{m=M_1+1}^M \{ C_{21} F_m(\gamma_2) + C_{22} F_m(\gamma_2) \} \\
& + C_{23} F_m(\gamma_2) + C_{24} F_m(\gamma_2) \} \quad (4-34)
\end{aligned}$$

但し、

$$\begin{aligned}
F_m(\gamma) = & (\exp(\gamma x_{m-1}) / \gamma^2 [a_m \gamma \Delta x \exp(\gamma x) \\
& + \{ (a_m x_{m-1} + b_m) \gamma - a_m \} 2 \exp(\gamma \Delta x / 2) \\
& \cdot \sinh(\gamma \Delta x / 2)] \quad (4-35)
\end{aligned}$$

$$x_{M_1} = l_1 \quad (4-36)$$

$$\Delta x = x_m - x_{m-1} \quad (4-37)$$

解析に用いた主な定数値を表4. 2に示す。雷放電電流サージ波形については文献[6]より平均値を、架空線路長、全線路長などの布設条件に関するものは現用の公衆通信網の平均的な条件を選んだ。また、計算で用いた高速フーリエ変換、線路の分割数は波形が十分に求められる値に選んでいる。シース・大地間線路の架空部分の特性インピーダンス、伝搬定数については文献[7]で、地下部分については文献[8]で報告されている方法に従って計算を行ない、ケーブルの伝達インピーダンスは文献[3]に従って計算を行った。なお、心線・シース間線路の特性インピーダンス、伝搬定数については実測値[8]の平均を用いた。

表4. 2に示す定数を用いて式(4-23)、(4-28)により求めた架空線路側端末と地下線路側端末に生ずる雷サージ波形の計算例を図4. 3に示す。図4. 3は線路と雷撃点までの距離を一定として線路とのなす角度(θ)を変化させたときの架空線路側端末、地下線路側端末に生ずる雷サージ波形を示しており、(1)加入者側($\theta = 180$ 度)に雷撃があった場合と局側にあった場合($\theta = 0$ 度)では極性が異なり、サージ波形の波高値(以下サージ電圧という)は $\theta = 90$ 度付近で最も小さくなる。(2)加入者側で雷撃があった場合と局側にあった場合では前者の方がサージが大きい。(3)架空線路側

表 4. 2 解析に用いた定数値

要 因		定 数 値
雷放電* ¹		波高値 : 10 k A, 波頭長 : 2 μ s, 波尾長 : 41 μ s
ケーブル構造と布設条件	架空**	地上高 : 5 m, ケーブル半径 : 1 c m ケーブルシース厚さ : 0. 2 m m ケーブルシース接地抵抗 : 2 Ω / k m
	地下**	埋設深さ : 1. 5 m, ケーブル半径 : 2 c m ケーブルシース厚さ : 0. 2 m m (アルミ), 0. 1 8 m m (鉄) 鉄テープの比透磁率 : 1 0 0
心線・シース間 線路**	線路の一次定数 : $R = 76 \Omega / k m,$ $L = 4.6 \times 10^{-3} H / k m$ $C = 8.45 \times 10^{-8} F / k m$ $G = 1.92 \times 10^{-9} \cdot f (S / k m)$ (f : 周波数)	
線 路	線路長 (直線) : 2 k m, 架空線路長 / 全線路長 : 0. 5	
端末条件	$R_s = 200 \Omega, R_b = 1 \Omega, R_1 = 200 \Omega, R_2 = 200 \Omega$	
大 地**	導電率 : 0. 01 S / m, 比誘電率 : 1 0	
落雷発生回数**	1.5×10^{-7} 回 / m ² (1 雷雨日当り)	
計算条件	高速フーリエ変換 : データ長 (1024 μ s), データ数 (1024 個) 線路の分割数 : 1 0	

* 1 : 文献 [6], * 2 : 文献 [3], [7], * 3 : 文献 [3], [8], * 4 : 文献 [8],
* 5 : 文献 [9], * 6 : 文献 [10]

端末に生ずるサージは地下線路側端末に生ずるサージに比べてサージの波高値が大きく鋭いことがわかる。

この数値解析方法を用いて、架空ケーブルシースの接地抵抗、雷撃位置と雷サージの関係について検討を行なった、以下その結果を述べる。

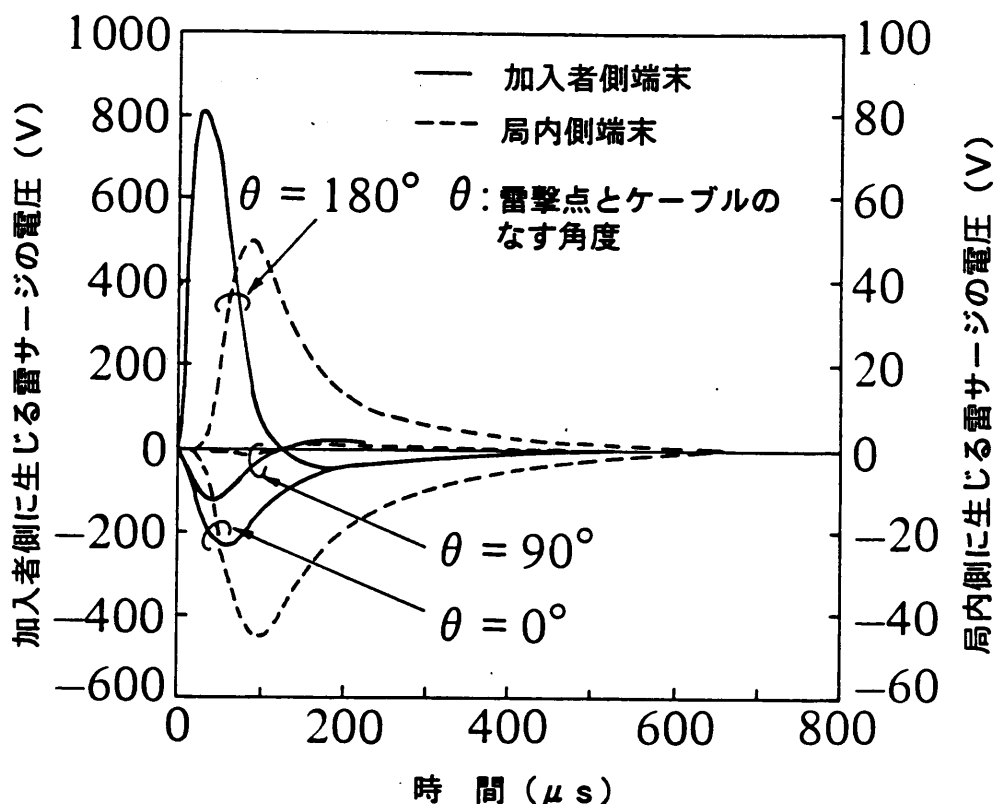


図 4. 3 架空線路端末および地下線路端末に生ずる雷サージ波形の計算例

(1) 架空ケーブルシースの接地抵抗と雷サージ波高値の関係

実際の通信線では架空ケーブルのケーブルシースは数十から数百mごとに接地されている。この接地抵抗を1km当りの値で表して、その接地抵抗値と雷サージ波高値の関係を図4.4に示す。図4.4では線路と雷撃点との距離を($R = 2 \text{ km}$)と線路と雷撃点のなす角度($\theta = 180$ 度)を一定とした。図より架空部分の全線路長に占める割合を変えても架空線路側端末及び地下線路側端末の生ずる雷サージ波高値の変化は小さいことがわかる。また、架空線路側端末の雷サージ波高値は接地抵抗が大きくなるにしたがって大きくなるが、地下線路側端末では逆に小さくなるため、架空部分の接地抵

抗が十分大きな場合 ($R_g = 1 \text{ k}\Omega / \text{km}$) では架空線路側端末と地下線路側端末の雷サージ波高値の比は ($V_o(\ell_2) / V_i(0) = 0.007$) となるのに対して、多点接地の影響を考慮した場合 ($R_g = 2 \Omega / \text{km}$) は ($V_o(\ell_2) / V_i(0) = 0.1$) となり、架空部分の多点接地は架空と地下線路側端末の雷サージ波高値の比に大きな影響を与えることがわかる。

第2章で述べた雷観測の結果、加入者線路の加入者側端末（架空線路側端末に相当）と局内側端末（地下線路側端末に相当）の雷サージ波高値の比は0.2であり、架空線路が多点で大地に接地されており、その値が $2 \Omega / \text{km}$ 程度であることを考慮すれば、この観測結果を説明できることがわかる。

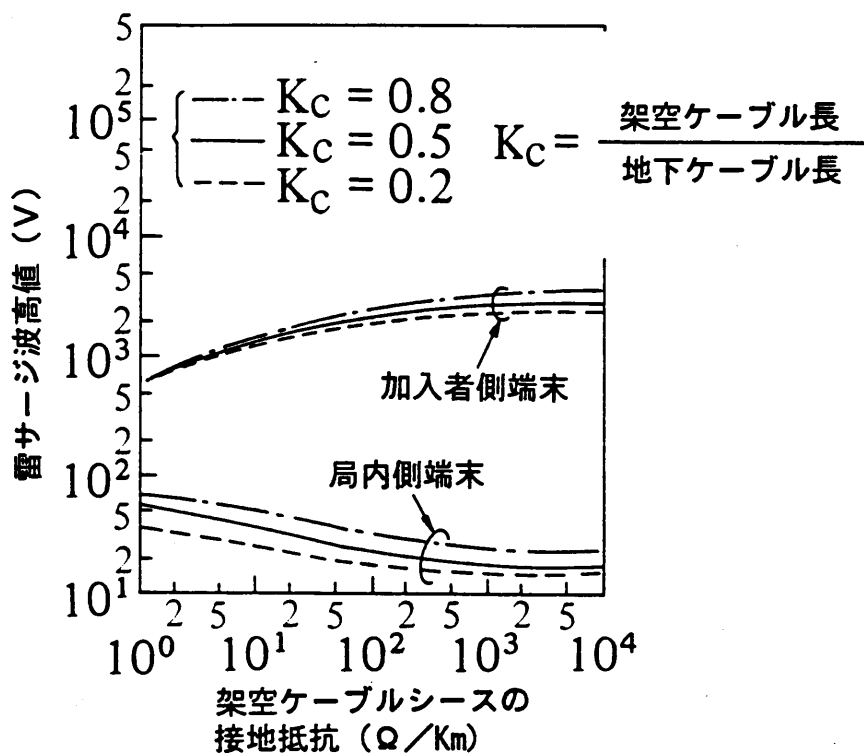


図4. 4 架空ケーブル接地抵抗値とケーブル端末に誘起する雷サージ波高値の関係

(2) 雷撃位置と雷サージ波形の関係

雷撃点との距離 (R) 及び線路と雷撃点とのなす角度 (θ) を変えたときの雷サージ波高値、波頭長 (Front time)、波尾長 (Time to half value) の変化を図4. 5 ~ 4. 7 に示す。

図4. 5 は雷サージ波高値の雷撃位置依存性を示しており、架空線路側端末、地下線

路側端末とも雷撃点が遠くなるにしたがって雷サージ波高値は単調に減少し、その傾向はほぼ直線で表されることと、地下線路側端末の雷サージ波高値は架空線路側端末の雷サージ波高値の0.05~0.15倍となる、ことがわかる。

図4.6, 4.7はそれぞれ波頭長, 波尾長の雷撃位置依存性を示しており, (1) 波頭長, 波尾長とも雷撃点が遠くなるにしたがって長くなる傾向がある, (2) 両者とも雷撃点が遠くなるに従って線路と雷撃点とのなす角度の影響が小さくなる, (3) 地下線路側端末に生じる波頭長, 波尾長は架空線路側端末に比べて1.5~2.5倍長くなる, ことがわかる。

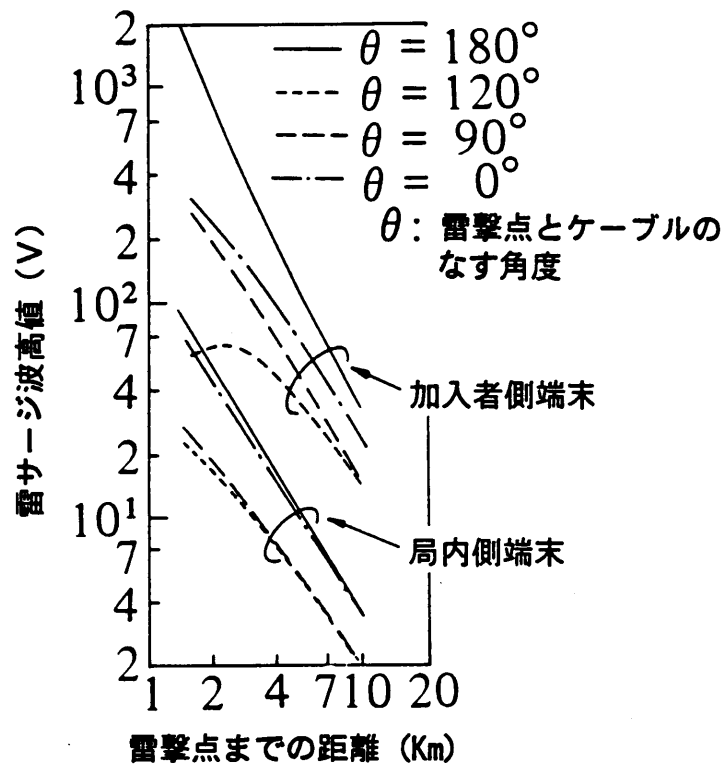


図4.5 雷撃点までの距離と雷サージ波高値の関係

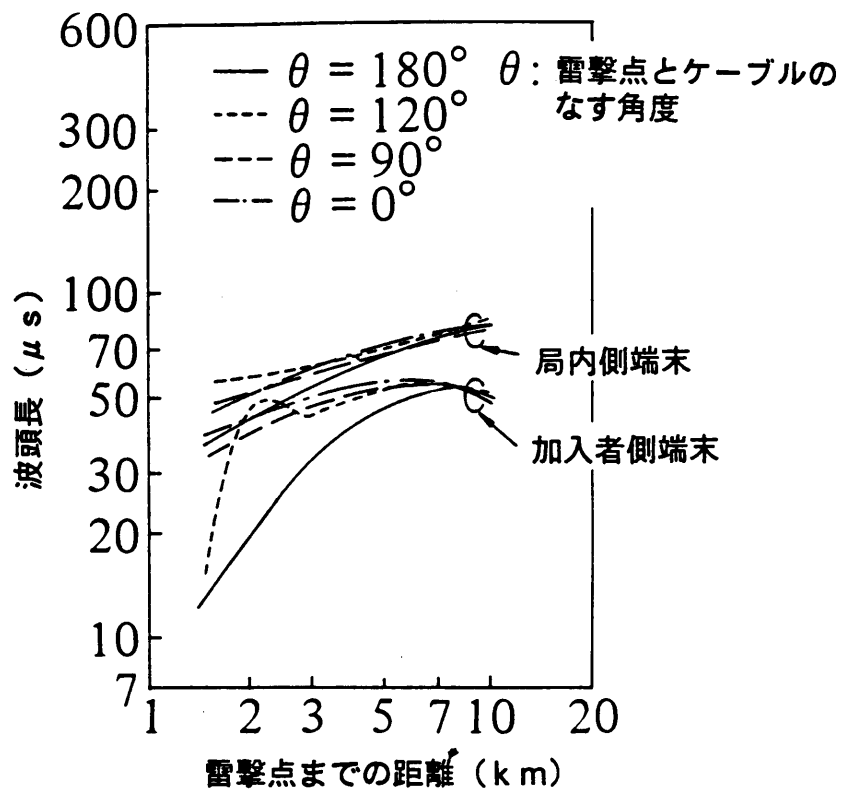


図 4. 6 雷撃点までの距離と雷サージ波頭長の関係

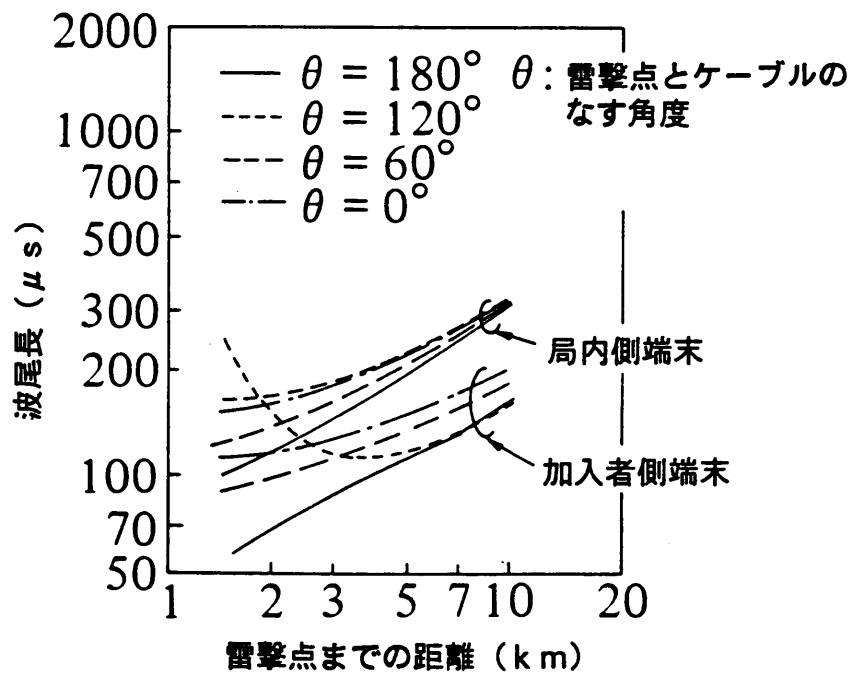


図 4. 7 雷撃点までの距離と雷サージ波尾長の関係

4. 4 通信線路端末に生ずる雷サージ分布の解析

前節により、雷撃位置と雷サージの関係が明らかになった、本節ではこの結果を用いて通信線路端末に生ずる雷サージの分布を求め、雷観測より得られたデータと比較検討を行なう。

雷サージ分布の解析モデルを図4. 8に示す。図で斜線部分は雷サージ波高値が $V_{p,N}$ (V)以下の雷撃位置を示している。通信線路端末に生じる雷サージ波高値は、図4. 5に示すように線路から十分遠方 ($R > 2 \text{ km}$) では、雷撃点が線路から遠ざかるにしたがって単調に減少するので、図4. 8の斜線部分の内側に雷撃点を持つ雷サージ波高値は斜線部分の雷サージ波高値より大きくなる。従って、各正方形の中央に雷撃があった時の雷サージを求め、その波高値を大きな順にならべ

$$V_{p,1} > V_{p,2} > \dots > V_{p,L} > \dots > V_N \quad (4-38)$$

とすれば $V_{p,L}$ (V)以上の雷サージ波高値の累積発生頻度 $N(V_{p,L})$ は式(4-39)となる。

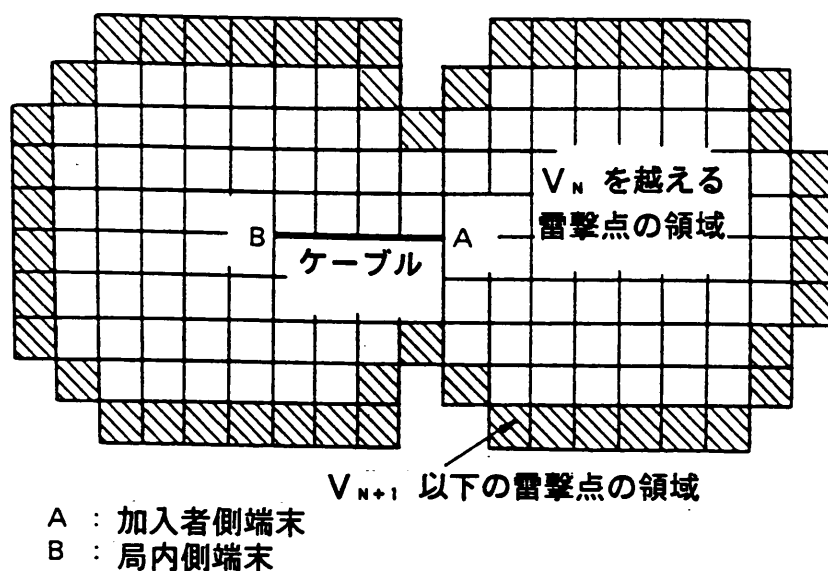


図4. 8 雷サージ波形の発生分布を解析するためのモデル

$$N(V_{pL}) = S \cdot L_p \cdot L \quad (4-39)$$

L : 式(4-39)で雷サージ波高値の大きな順から数えたときの V_L の値

S : 正方形の面積

L_p : 1 雷雨日, 単位面積当りの雷撃確率

また, 図4. 8の斜線部分より内側に雷撃点を持つ雷サージの波頭長 (t_r), 波尾長 (t_h) を小さな順に並べ

$$t_{r1} < t_{r2} < \dots < t_{rL} < \dots < t_{rN} \quad (4-40)$$

$$t_{h1} < t_{h2} < \dots < t_{hL} < \dots < t_{hN} \quad (4-41)$$

とすれば, $V_{pN}(V)$ 以上の雷サージ波高値をもつ雷サージの波頭長, 波尾長の累積百分率 $Q(t_L)$ は式(4-42)となる.

$$Q(t_L) = (L/N) \times 100 \quad (4-42)$$

図4. 9に架空線路側端末, 地下線路側端末に生ずる雷サージの回線・雷雨日当りの累積発生回数を示す. 解析に当たっては線路長4 km, 架空線路長と全線路長の比0. 5 (雷観測線路の平均長は4. 4 km, 架空線路長と全線路長の比は0. 57) として行なった. また, 単位面積当りの雷撃確率は 1.5×10^{-7} 回/m² とした. 図4. 9では大地導電率0. 01 S/m (ケーブルシースの接地抵抗2 Ω /km), 大地導電率0. 001 S/m (ケーブルシースの接地抵抗20 Ω /km) の場合について解析値を求めており, 実際の観測線路の布設条件はこれらの条件の範囲内 (図の斜線部分) にはいると考えられる. 宇都宮市周辺に於て昭和52~54に渡って観測を行なった結果を併せて示す. 観測線路が分岐や折れ曲がりなどの要因を含むことを考えれば, 解析値は観測値とよく一致している.

一方, 雷サージ波形について, 図4. 10, 4. 11に大地導電率0. 01 S/m, ケーブルシースの接地抵抗2 Ω /kmの時に架空線路側端末で200 V, 地下線路側端末で20 V以上の雷サージ波高値を持つ雷サージの波頭長, 波尾長の累積百分率を示す.

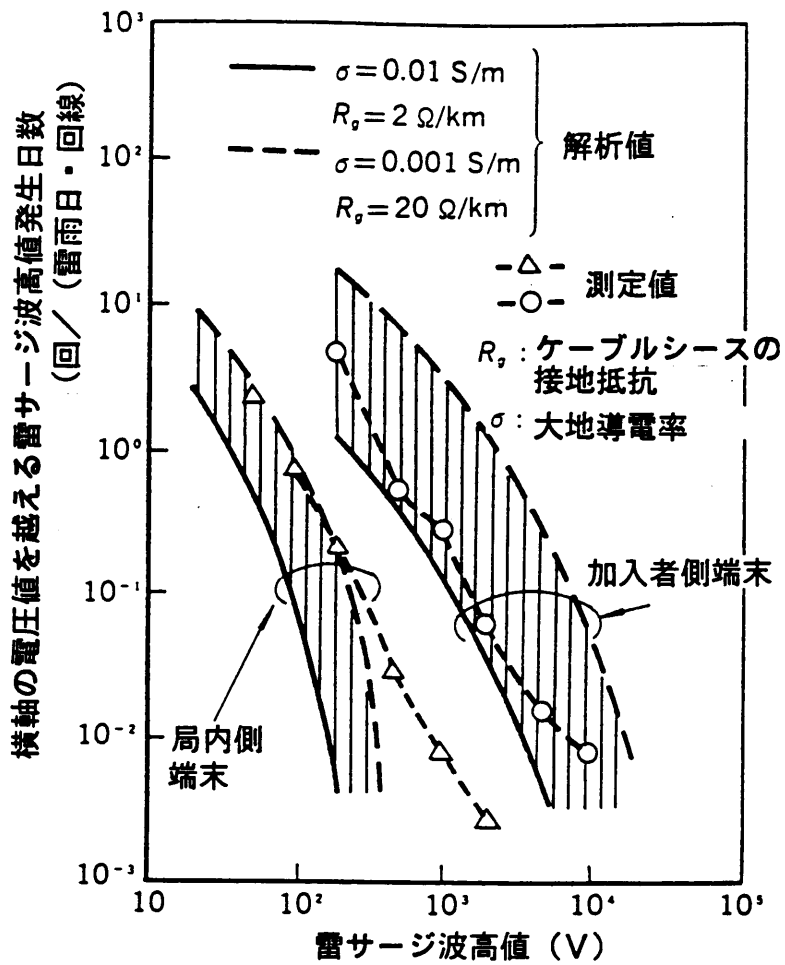


図 4. 9 雷サージ波高値の累積発生頻度分布解析結果

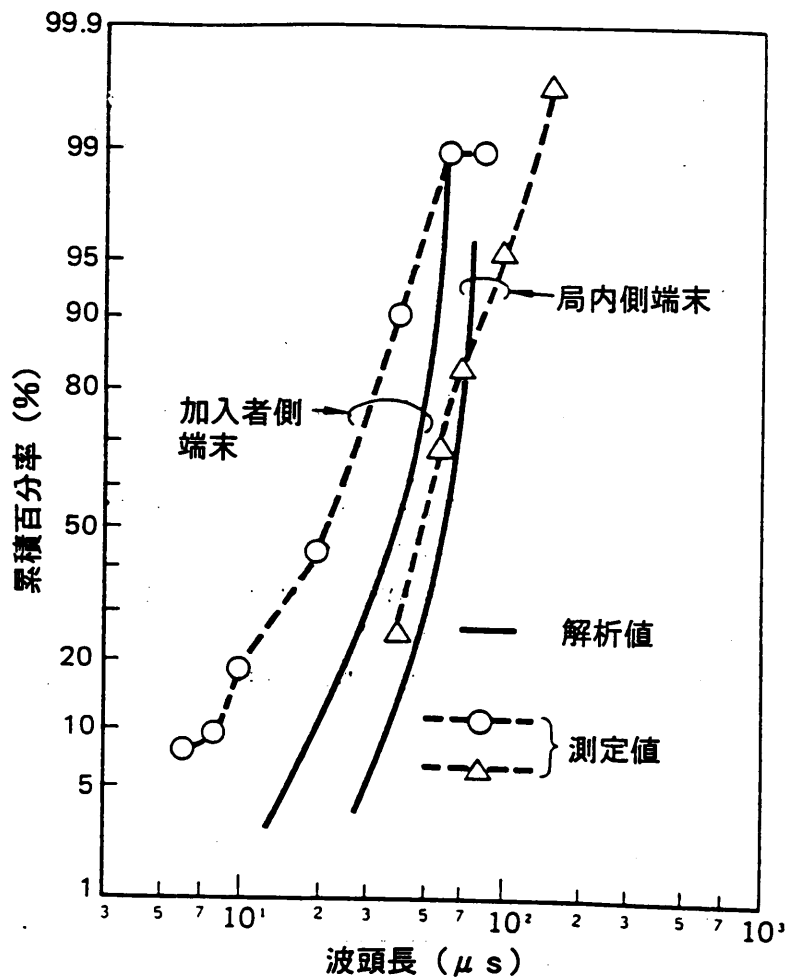


図 4. 10 雷サージ波頭値の累積百分率解析結果

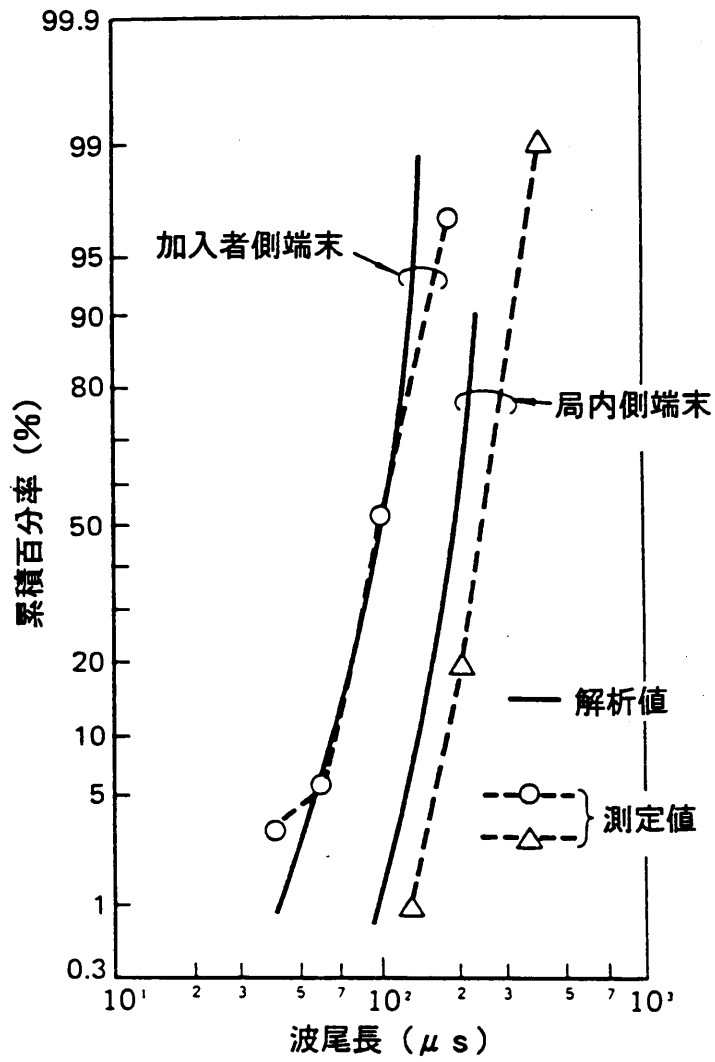


図 4. 1 1 雷サージ波尾長の累積百分率解析結果

図より、架空線路側端末は地下線路側端末に比べ波頭長、波尾長とも短くなること、解析結果と観測結果[1]はほぼ一致していることがわかる。

4. 5 本章のまとめ

本章では、通信線路端末の雷サージ誘起メカニズムを明らかにするため、一般に使用されている通信線路の形態に近い、架空・地下複合線路の雷サージ誘起機構モデルを設定して理論解析を行ない、線路端末に生じる雷サージを求めた。その結果、架空ケーブルのケーブルシースが多点で接地されおり、その接地抵抗が $2\ \Omega / \text{km}$ 程度であることを考慮することにより、雷サージの観測結果から得られている架空線路側端末に生じる雷サージ波高値と地下線路側端末に生じる雷サージの比が0.2となる現象を、よく説明できることがわかった。また、雷撃位置と雷サージの関係を用いて、雷サージの分布をコンピュータシミュレーションにより求めた。解析結果は、雷観測より得られた結果とほぼ一致し、本章で用いた雷サージの誘起機構モデルにより、通信線路の雷サージ誘起機構をほぼ説明できることがわかった。

付録 4. 1 線路の曲がりによる雷サージ波高値の変化

地下より架空の立ち上がり点（線路の中間点）で線路が折れ曲がったときの解析モデルを図 4. A 1 に示す。線路上の点 x での水平電界の線路長方向成分 $E_{h1}(x, \omega)$ は図 4. A 1, 式 (4-2), (4-3) より架空部分では式 (4-43), 地下部分では式 (4-44) となる。

$$E_{h1}(x, \omega) = T(R, \theta, \alpha) \sqrt{j\omega\epsilon_0/\sigma} E_v(x, \omega) \quad (4-43)$$

$$E_{h2}(x, \omega) = T(R, \theta, 0) \sqrt{j\omega\epsilon_0/\sigma} \exp(-\sqrt{j\omega\mu_0\sigma} h_c) \cdot E_v(x, \omega) \quad (4-44)$$

ここで

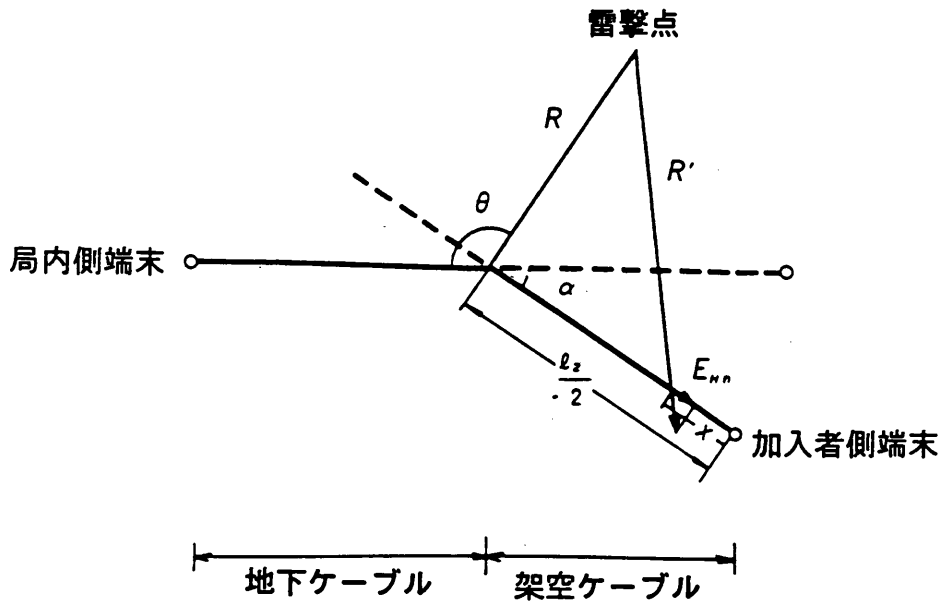


図 4. A 1 線路の曲がりと雷サージの関係解析するためのモデル

$T(R, \theta, \alpha)$

$$= \frac{x - \{R \cos(\theta - \alpha) - l_z / 2\}}{\sqrt{\{R \sin(\theta - \alpha)\}^2 + [x - \{R \cos(\theta - \alpha) + l_z / 2\}]^2}} \quad (4-45)$$

α : 線路の折れ曲がり角

式(4-2), (4-3)のかわりに式(4-43), (4-44)を用いて表4. 2に示す条件にしたがって求めた加入者末端ので200V以上の雷サージ波高値を生ずる雷撃点の範囲を図4. A 2に示す. 図4. A 2より線路を折り曲げることにより200V以上の雷サージ波高値を生ずる領域の形は変わるが, 面積はほとんど変化せず, 線路を折り曲げることによって雷サージ波高値の累積発生頻度はほとんど変化しないと考えられる.

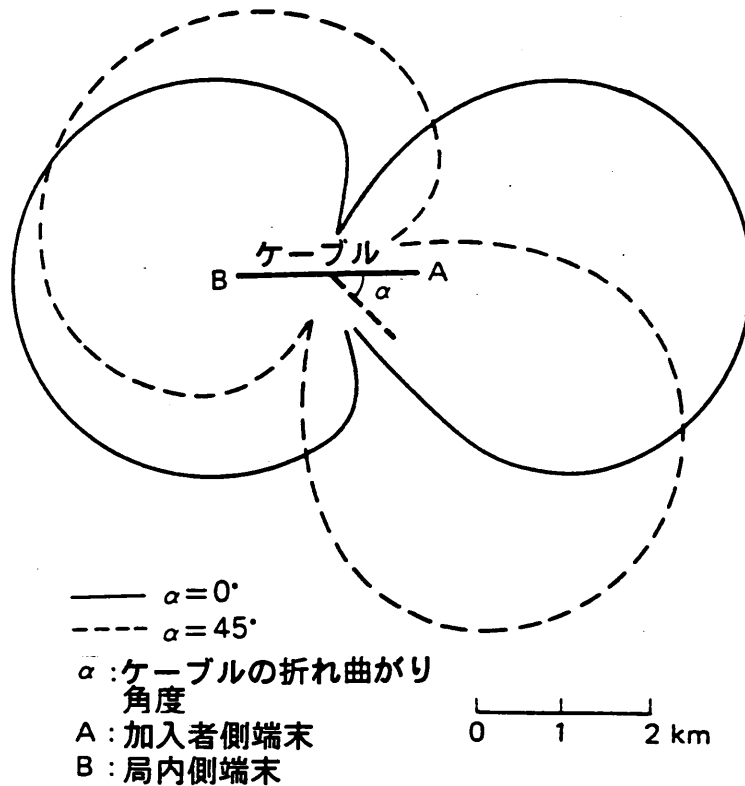


図4. A 2 200V以上の雷サージが発生する雷撃点範囲の線路の曲がりによる差

参考文献

- [1]古賀広昭, 元満民生, 田口守彦, 貝津良輔, 山口開成 ; "通信線路端末に現われる雷サージ波形の特性", 信学論 (B), J 6 4 - B, 7, p p. 6 2 7 - 6 3 4
(昭 5 6 - 0 7)
- [2]H. Koga, T. Motomitsu and M. Taguchi ; "Lightning surge waves induced on overhead lines", Trans. IECE Japan, E62.4, pp.216-223 (April 1979)
- [3]S. A. Schelknoff ; "The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields", Bell Syst. Tech. J. , 13, pp.532-579
(Oct. 1934)
- [4]虫明康人, 安達三郎 ; "基礎電波工学", p p. 2 7 6 - 2 7 9, 共立出版 (昭 4 5)
- [5]E. D. Sunde ; "Earth conduction effects in transmission systems",
Dover Pub., pp.14-17(1968)
- [6]M. A. Uman ; "Lightning", pp.114-137, McGraw Hill (1969)
- [7]J. R. Carson ; "Wave propagation in overhead wires with ground return",
Bell Syst. Tech. J., 5, pp.539-554(May 1926).
- [8]桑原伸夫, 古賀広昭, 大槻文男, 元満民生 ; "架空・地下複合線路系に誘起する雷サージの検討", 信学技報, E M C J 7 9 - 5 0 (1 9 7 9 - 1 2)
- [9]電気学会・電子通信学会編 ; "日本の大地導電率" (昭 4 4 - 0 8)
- [10]CCITT, Handbook ; "The protection of telecommunication lines and equipment against lightning discharges", Published by the International Telecommunication Union(1974)

第5章 雷サージ試験回路の設計

5. 1 まえがき

通信装置の雷サージ防護対策を行なうためには、通信装置の雷サージに対する障害率を推定できる雷サージ試験回路が必要である。通信線路端末に生ずる雷サージ波形は落雷の規模や発生位置などによって変化するが、数多くのデータをとるとある分布形にしたがって生じている[1]。従来、装置の耐雷サージ試験は雷サージの分布形から適当に波形を選び、その波形を発生する低出力インピーダンスのサージ発生器と純抵抗で試験回路を構成して行なってきた[2]。しかし、試験用サージ波形の選び方や出力インピーダンスの決定法の根拠が明らかでなく、この試験を行なっても通信装置の障害率を予測できなかった。

本論文では、これまでに、障害率の予測可能な雷サージ試験法を明らかにするため、雷サージ観測や雷サージ誘起機構の解析を行い、雷サージ波形の分布や雷サージ特性を説明できる誘起機構モデルを求めてきた。本章では、この研究成果をもとに、装置の雷サージ試験を行なったとき、その装置がどの程度の耐雷特性があるかを求めるための、雷サージ試験回路の試験波形と出力インピーダンスの決定方法について述べる。

5. 2 雷サージ試験回路の考え方

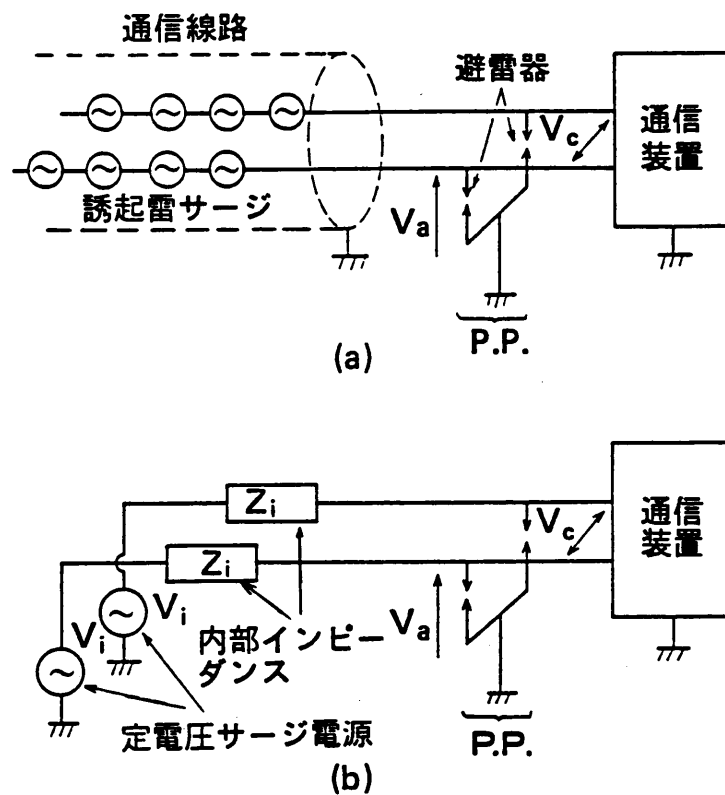
通信装置は一般に図5. 1 (a) に示すように線路に接続され、その入力部に一次防護回路が(P. P.) が取り付けられている。

雷放電により空間には電磁界の変化が起こり、それにより通信線路上には分布誘起起電力の形で雷サージが誘起される[3], [4]。線路上で誘起した雷サージは、ケーブルの心線と大地またはシースから構成される伝送路(以下縦回路という)を伝搬し装置の入力端子とグラウンド間の雷サージ(縦サージ(V_v))となる。

避雷器は縦サージが放電開始電圧を越えると放電を起こす。このとき、避雷器の特性が全く同じならば避雷器は同時に放電するため心線間には雷サージが現われないが、実

際には避雷器ごとに放電電圧特性が少し異なるため同時には放電せず心線間に雷サージ（横サージ（ V_c ））が現われる[5].

すなわち、図5. 1 (a) に示すように装置には縦サージと横サージが同時に印加されるようになる。従って、雷サージ試験回路としては従来の出力1端子と接地1端子の2端子の試験回路でなく、縦サージと横サージを同時に印加できる出力2端子と接地1端子の3端子の回路が必要である。また、通信線端末に生じる雷サージは、端末に接続される通信装置の心線-大地間の入力インピーダンスや通信装置に実装されている防護回路の動作により変化する。雷サージ試験回路はこのような雷サージの変化を模擬する必要がある。また、雷サージ試験回路は、装置の障害確率を推定するため通信線路端末に生じる雷サージの発生確率を模擬する必要もある。



V_a : 心線-大地間に現れる雷サージ
 V_c : 心線間に現れる雷サージ
 P.P. : 一次保安器

図5. 1 通信線路端末に現われる雷サージの誘起機構モデル (a) とその等価回路 (b)

図5. 1 (a) の回路は、回路理論より図5. 1 (b) の等価回路で表すことができる[6]。そこで、この等価回路の定電圧源をサージ発生源（以下定電圧サージ電源（ V_i ）と呼ぶ）として、インピーダンスを内部インピーダンス（ Z_i ）とするような雷サージ試験回路を用い、サージ発生源の波形を通信線路端末に生じる雷サージの発生確率に従って定めれば、上記に示した条件を満たす雷サージ試験回路を実現できる。

図5. 2に定電圧サージ電源と内部インピーダンスの決定方法を示す。まず、通信線の雷サージ誘起機構より、内部インピーダンスを表す理論式を求める。この理論式と雷観測線路の条件より具体的な内部インピーダンスの値を求め、この値と雷観測の結果得られた雷サージの分布形より定電圧サージ電源の分布形を求める。次に、内部インピーダンスの理論式と通信装置にとって厳しい通信線路の条件より試験回路の内部インピーダンスを決定し、定電圧サージ電源の分布形より、雷サージの発生確率に応じた波形を定めて試験波形とする。

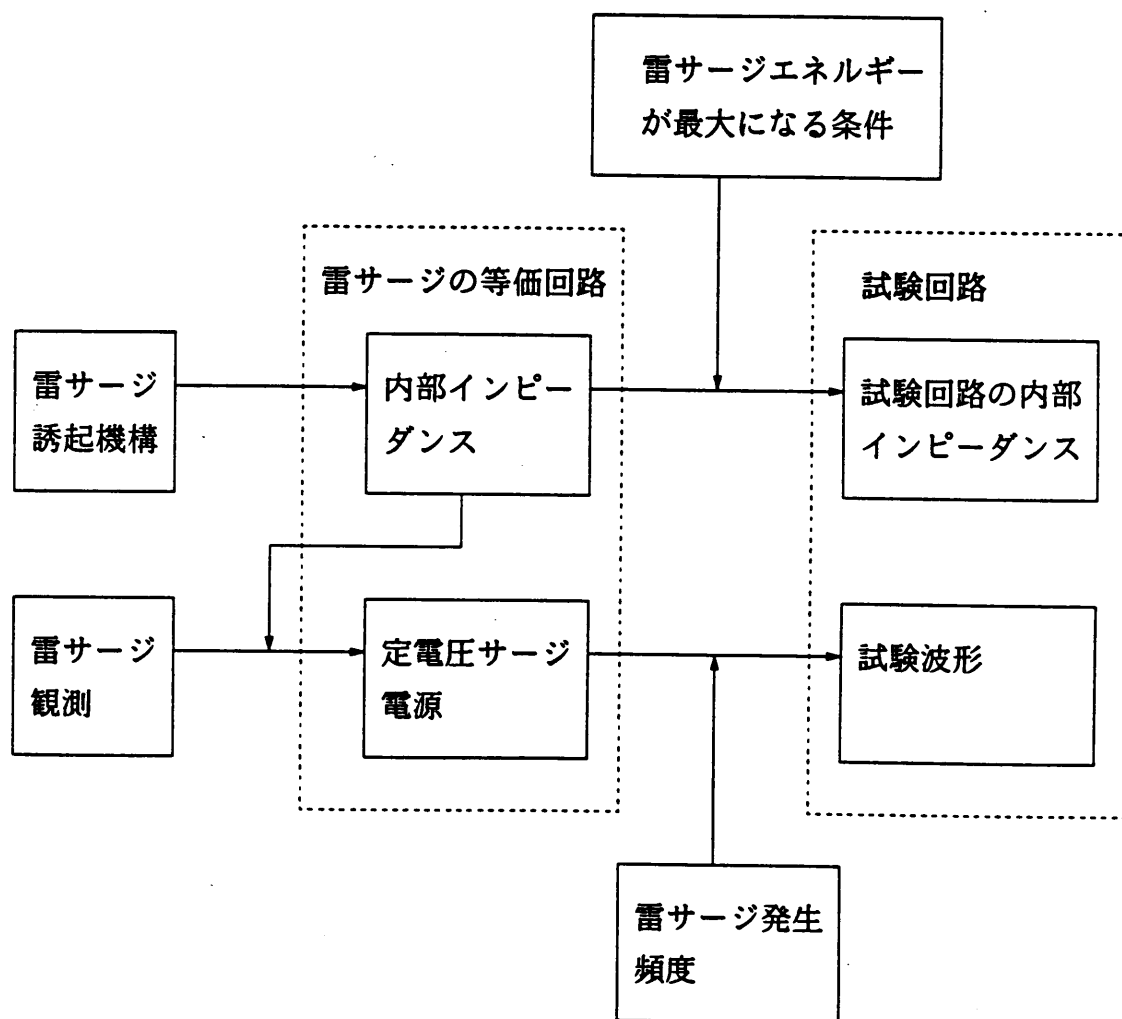


図5. 2 定電圧サージ電源と内部インピーダンスの決定方法

5. 3 雷サージの等価回路

5. 3. 1 内部インピーダンスの理論式

通信線路の雷サージ誘起機構モデルを図5. 3に示す。大気中に雷放電が起こると図に示すようにケーブル心線と大地の間に垂直成分が E_v 、水平成分が E_h の電界が生ずる。これらの電界がケーブル心線上の誘起起電力となる。誘起した雷サージはケーブルと大地よりなる伝送路を伝搬し線路末端でケーブル心線と大地間の雷サージとなる。垂直電界、水平電界により伝送路上に誘起する電圧 $V(x)$ 、電流 $I(x)$ は式(5-1)、(5-2)に示す伝送方程式を解くことにより求められる。

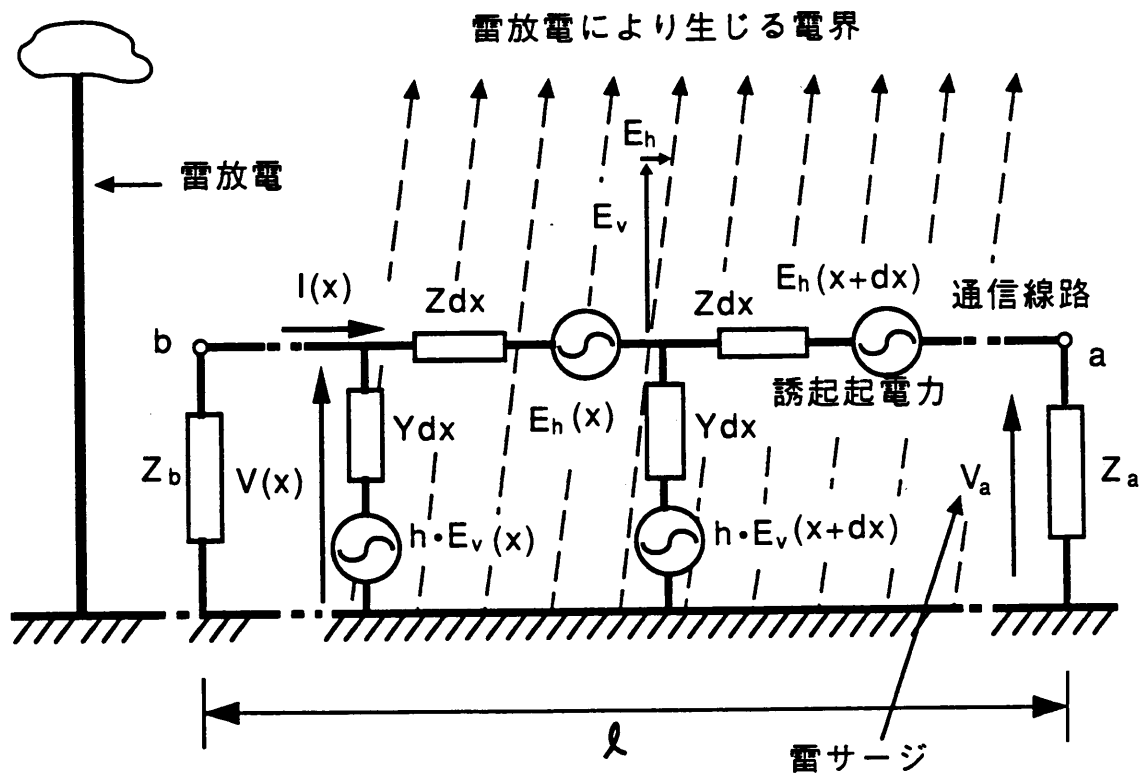


図5. 3 通信線路の雷サージ誘起機構モデル

$$-\frac{\partial V(x)}{\partial x} = Z I(x) + E_a \quad (5-1)$$

$$-\frac{\partial I(x)}{\partial x} = Y(V(x) - h E_v) \quad (5-2)$$

式(5-1), (5-2)においてZ, Yは伝送路の一次インピーダンスと一次アドミッタンス, hは架空線路の地上高である.

式(5-1), (5-2)の微分方程式の解は式(5-3), (5-4)となる.

$$V(x) = Z_0 \{A + S(x)\} \exp(-\gamma_0 x) + Z_0 \{B + Q(x)\} \exp(\gamma_0 x) \quad (5-3)$$

$$I(x) = \{A + S(x)\} \exp(-\gamma_0 x) - \{B + Q(x)\} \exp(\gamma_0 x) \quad (5-4)$$

ここで,

$$S(x) = \frac{1}{2Z_0} \int_0^x \{-E_a + \gamma_0 h E_v\} \exp(\gamma_0 x) dx \quad (5-5)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2Z_0} \int_0^x \{-E_a - \gamma_0 h E_v\} \exp(-\gamma_0 x) dx \quad (5-6)$$

式(3)~(6)において Z_0 , γ_0 は雷サージが伝搬する伝送路の特性インピーダンス, 伝搬定数で架空部分は文献[7]で検討されている. A, Bは伝送路の端末条件により決まる定数である.

図5. 3に示す雷サージ誘起機構モデルより端末条件は式(5-7), (5-8)となる.

$$b \text{ 点 } (x=0) \text{ で } V(0) = -Z_b I(0) \quad (5-7)$$

$$a \text{ 点 } (x=l) \text{ で } V(l) = Z_a I(l) \quad (5-8)$$

式(7), (8)で Z_a , Z_b は雷サージが伝搬する伝送路の終端インピーダンスである. また, $V(0)$, $V(l)$ は線路の両端末に生ずる雷サージである. 式(5-7), (5-8)に基づいて

線路の a 端末に生ずる雷サージ V_a を求めると式 (5-3), (5-4) より式 (5-9), (5-11) となる.

$$V_a = \frac{Z_0 (1 + P_a)}{\exp(\gamma_0 \ell) - P_a P_b \exp(-\gamma_0 \ell)} \{ S(\ell) - P_b Q(\ell) \} \quad (10)$$

ここで

$$P_a = \frac{Z_b - Z_0}{Z_b + Z_0}, \quad P_b = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (11)$$

等価回路の決定方法を図 5. 4 に示す. 回路解析理論より, 図 5. 3 に示す回路を a 端末からみた等価回路は図 5. 4 (a) で表される. この等価回路で Z_i , V_i はそれぞれ内部インピーダンスと電圧源である.

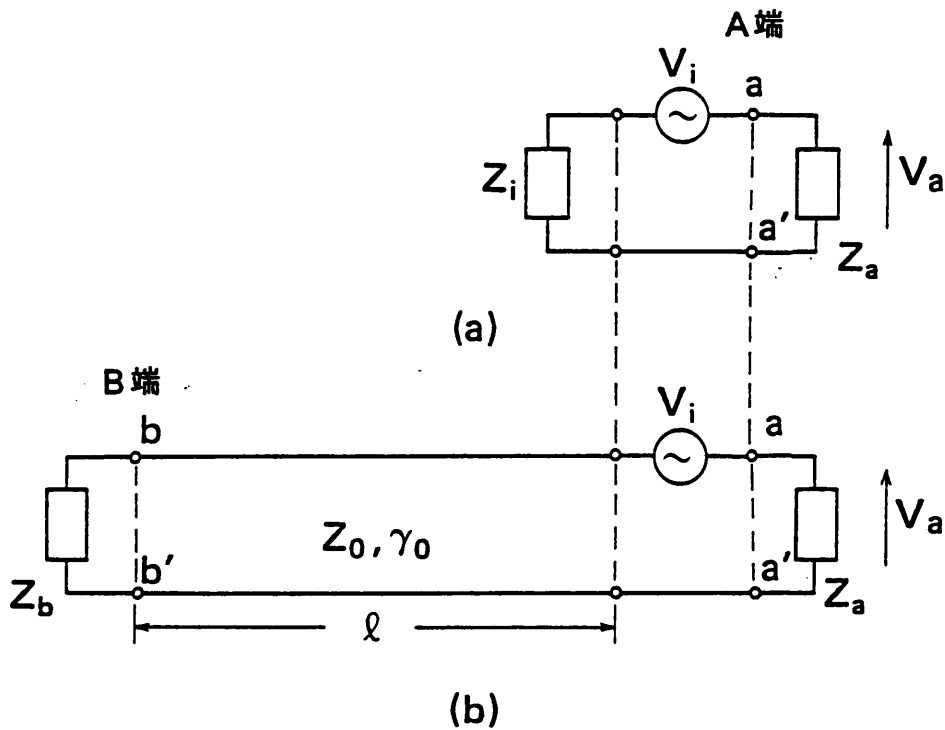


図 5. 4 等価回路の決定方法

図5. 4 (a) の等価回路より、内部インピーダンスは式(5-12)で与えられる。

$$Z_i = \frac{V_{.1} - V_{.2}}{\frac{V_{.2}}{Z_{.2}} - \frac{V_{.1}}{Z_{.1}}} \quad (5-12)$$

ここで、 $V_{.1}$ 、 $V_{.2}$ はそれぞれ a 端末を $Z_{.1}$ 、 $Z_{.2}$ で終端した時の電圧である。式(5-10)を式(5-12)に代入して内部インピーダンスを求めると式(5-13)となる。

$$Z_i = Z_o \frac{1 + P_o \exp(-2\gamma_o l)}{1 - P_o \exp(-2\gamma_o l)} \quad (5-13)$$

式(5-13)は、内部インピーダンスが図5. 4 (b) に示すように特性インピーダンス Z_o 、伝搬定数 γ_o 、遠端の反射係数 P_o の伝送線路を近端からみたときの入力インピーダンスで表されることを示している。図5. 4 (b) に示す伝送線路で a - b は心線を、a' - b' は大地を表している。式(5-13)に示すように、内部インピーダンスは Z_o 、 V_i の関数ではないので、通信線路端末に接続される通信装置の種類が変わって入力インピーダンスの値 (Z_i) が変わっても通信装置に印加する雷サージの波形 (V_i) が変わっても変化しない。従って、この内部インピーダンスを雷サージ試験回路の内部インピーダンスとして使用すれば、通信装置の種類によって雷サージ試験回路を変更する必要がない。

5. 3. 2 定電圧サージ電源

図5. 4 (a) に示す等価回路より、定電圧サージ電源 V_i は式(5-14)で表される。

$$V_i = \frac{Z_o + Z_i}{Z_o} V_o \quad (5-14)$$

ここで、 V_o は通信線路端末に生じる雷サージである。

また、式(5-14)、(5-10)より、定電圧サージ電源は式(5-15)で与えられる。

$$V_i = 2 Z_0 \frac{\{S(\ell) - P_0 Q(\ell)\}}{\exp(\gamma_0 \ell) - P_0 \exp(-\gamma_0 \ell)} \quad (5-15)$$

式(5-15)はA端の終端インピーダンス Z_0 を含んでいないので、この式より、定電圧サージ電源はA端での終端条件すなわち、A端に接続される通信装置の種類に依存しないことがわかる。

式(5-15)を解けば、定電圧サージ電源の値は理論的に求められるが、 $S(\ell)$ 、 $Q(\ell)$ の値は、雷放電波形や線路長等の種々のパラメータにより変化するので、現在では定電圧サージ電源の値を理論的に求めることは困難である。そこで、本論文では、通信線路端末に生じる雷サージの観測結果より、定電圧サージ電源を求めた。

通信線路端末に生じる雷サージの分布形は第2章に示すように、式(5-16)、(5-17)、(5-18)で与えられる。

$$N(V_{sp}) = K_s V_{sp}^{-p} \quad (5-16)$$

$$n(t_{st}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{st}} \exp\left\{-\frac{1}{\sqrt{2} \sigma_{st}} \ln \frac{t_{st}}{\mu_{st}}\right\}^2 \quad (5-17)$$

$$n(t_{sh}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{sh}} \exp\left\{-\frac{1}{\sqrt{2} \sigma_{sh}} \ln \frac{t_{sh}}{\mu_{sh}}\right\}^2 \quad (5-18)$$

ここで

V_{sp} : 端末に生じる雷サージ波高値

K_s : 雷サージ波高値の累積発生頻度を表す定数値

μ_s : 平均値 (f : 波頭長、h : 波尾長)

σ_s : 標準偏差 (f : 波頭長、h : 波尾長)

である。加入者端末および局内端末の雷サージ波高値の累積発生頻度を表す定数値(K_s)、平均値(μ_s)及び標準偏差(σ_s)を表5.1に示す。

式(5-14)より、低電圧サージ電源の値は式(5-19)となる。

$$v_i = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Z_b + Z_i}{Z_b} \left[\int_{-\infty}^{\infty} v_s \exp(-j\omega t) dt \right] \exp(j\omega t) d\omega \quad (5-19)$$

ここで、 v_i 、 v_s は式定電圧サージ電源波形と観測雷サージ波形（時間領域）である。

5. 4 雷サージ試験回路

雷サージ試験回路を設計するために必要な項目は、試験回路、回路素子の値、試験波形である。本節では、これらのパラメータの決定方法について述べる。

5. 4. 1 試験回路を構成する回路パラメータの決定法

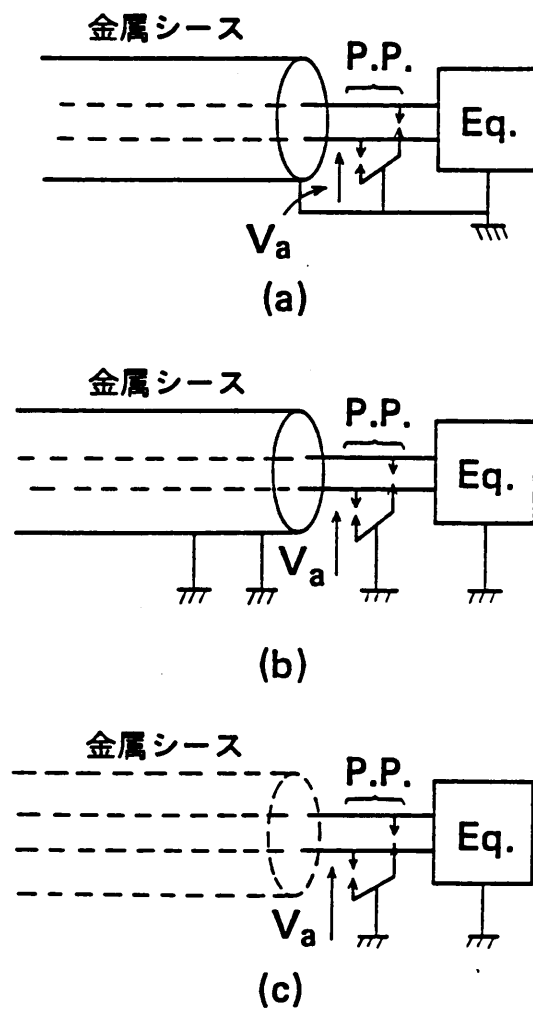
雷サージ試験回路は図5. 1 (b)となる。第5. 2節で述べたように、通信装置には心線・大地間に生じる電圧と心線間に生じる電圧を同時に印加する必要があるので、通信装置に接続する2端子とグランド1端子の合計3端子の構成となる。 Z_i は試験回路の内部インピーダンスで図5. 1に示す回路の内部インピーダンスに相当する値である。また、 v_i は試験波形を発生するサージ発生器で図5. 1に示す回路の定電圧サージ電源に相当する。なお、このサージ発生器の内部インピーダンスは Z_i より十分小さい必要がある。

内部インピーダンスは式(6-13)及び図5. 4に示すように端末側から線路側を見たときの入力インピーダンスで表されることがわかった。従って、試験回路は、線路の線路定数、長さ、遠端（B端）の終端条件を定めれば求められる。

通信線路と装置の主な接続例を図5. 5 (a)から(c)に示す。図5. 5で(a)の場合、装置の接地はケーブルの金属シースと直接接続されるため、心線・シース間に現われる雷サージが装置に印加される。また、(b)、(c)の場合、装置には心線・大地間に現われる雷サージが印加される。

図5. 5に示すどの接続形態が装置にとって最も厳しい条件であるかを明らかにするためには第4章に示した雷サージの解析を用いて、線路端末に生じる雷サージのエネルギー計算する必要があるが、図5. 5 (a)、(c)については、解析が可能であるが

(b) の接続形態に関しては解析が困難である。そこで、実験線路を用いて図5. 5 (a) ~ (c) 各接続形態の場合の入力インピーダンスを測定した。測定に用いた実験系を図5. 6に示す。実験では、長さ1 kmの架空線路を用い、起誘導線に正弦波電流を印加し、端末に現われる電圧の端末抵抗依存性より入力インピーダンスを求めた。なお、図5. 6の実験系で、金属シースを有するケーブルのシースは各柱ごとに接地されており、その値は実際の線路の典型的な値である $10 \Omega / \text{km}$ に設定されている。また図中で R_{a1} 、 R_{a2} 、 R_{a3} 、 R_{a4} はそれぞれ独立した低接地抵抗の接地端子に接続されている。また、矢印部分の(a)から(c)は図5. 6の(a)から(c)に対応している。



Eq. : 通信装置
P.P. : 一次保安器
 V_a : 縦サージ

図5. 5 通信線路と装置の主な接続例

測定結果を図5. 7に示す。図より、心線・大地間の入力インピーダンスは心線・シース間の入力インピーダンスとそれほど変わらないことがわかる。そこで、特に心線・シース間、心線・大地間を分けて考えず、内部インピーダンスが小さい方が装置にとって厳しい条件であるため、縦回路として図5. 7で最もインピーダンスの小さな図5. 5 (a) の接続形態である心線・シース間の入力インピーダンスを内部インピーダンスとして定めることにした。

心線・シース間線路の遠端側のインピーダンスを変えたとき端末で消費される雷サージエネルギー量の解析結果を図5. 8に示す。解析では、第4章で示した架空・地下複合線路の解析モデルを用いて解析を行なった。

解析で用いた条件を表5. 1に示す。表より、終端抵抗は、装置の防護を考える場合、防護回路の避雷器が動作している状態を問題とすれば良いので心線・シース間の抵抗としては $10\text{ m}\Omega$ を採用した。また、落雷場所としては、端末に生じる雷サージエネルギーが最大となる、線路の延長方向に落雷した場合を用いた。さらに、解析の簡略化のため、終端および端末の終端インピーダンスは純抵抗とし、終端については短絡($0\ \Omega$)、解放($1\text{ M}\Omega$)及び整合状態($200\ \Omega$)を計算条件として選んだ。

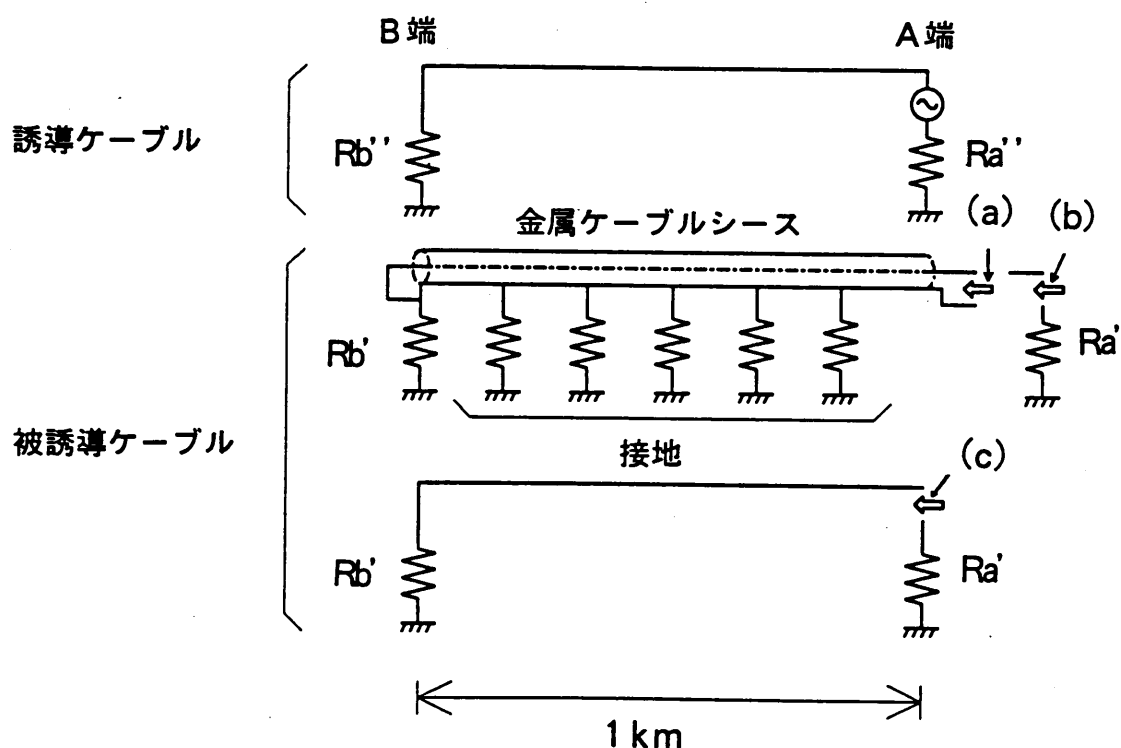


図5. 6 解析モデルを決定するための誘導実験回路

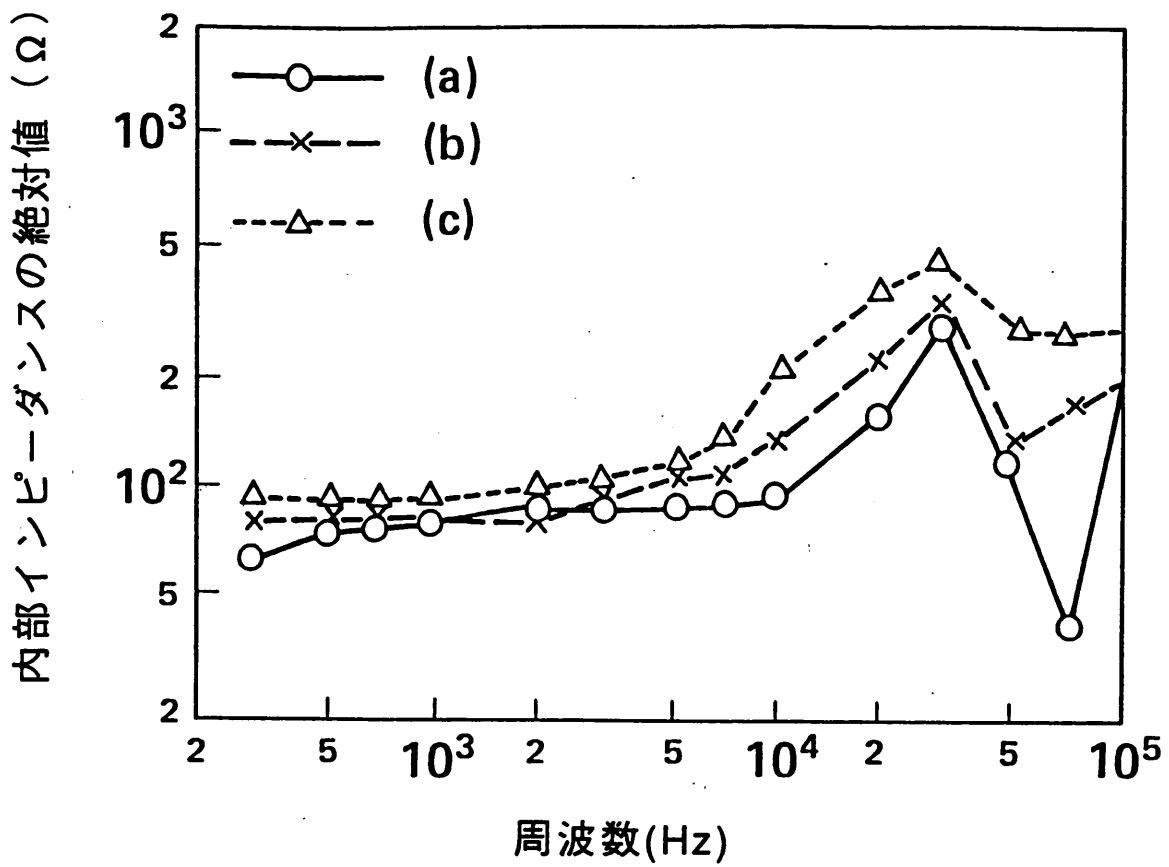


図5.7 入力インピーダンスの測定結果

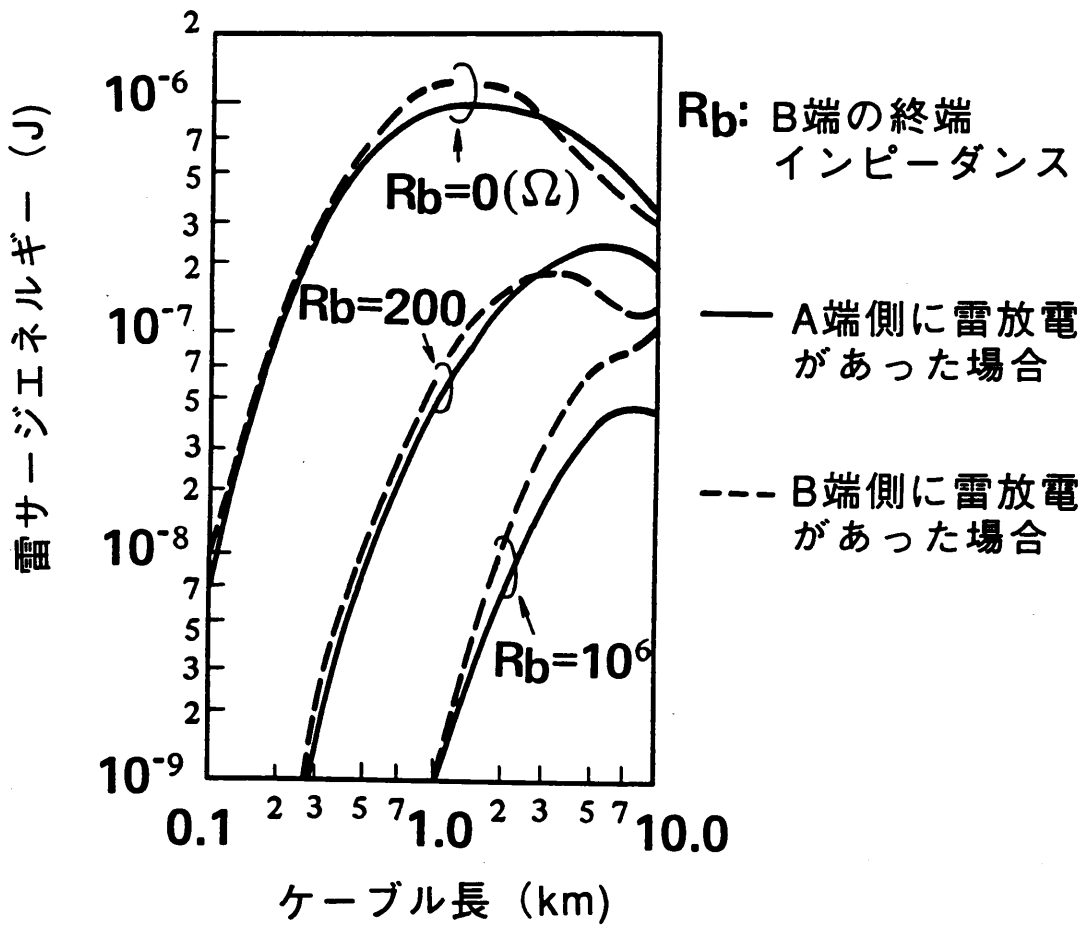


図5.8 終端抵抗が変化した時の雷サージ電力と線路長の関係

表 5. 1 解析に用いた線路条件

要 因	定 数	値
雷放電		波高値：10 k A, 波頭長：2 μ s, 波尾長：41 μ s
ケーブル構造と布設条件	架空	地上高：5 m, ケーブル半径：1 cm ケーブルシース厚さ：0.2 mm ケーブルシース接地抵抗
	地下	埋設深さ：1.5 m, ケーブル半径：2 cm ケーブルシース厚さ：0.2 mm (アルミ), 0.18 mm (鉄) 鉄テープの比透磁率：100
心線・シース間線路		線路の一次定数：R = 76 Ω / km, L = 4.6 $\times 10^{-3}$ H / km C = 8.45 $\times 10^{-8}$ F / km G = 1.92 $\times 10^{-9} \cdot f$ (S / km) (f : 周波数)
線路		線路長 (直線) : 0.1 ~ 10 km, 架空線路長 / 全線路長 : 0.5
端末条件		R _s = 200 Ω , R _v = 1 Ω , R ₁ = 10 m Ω *, R ₂ = 0 Ω , 200 Ω , 1 M Ω
大地		導電率 : 0.01 S / m, 比誘電率 : 10
雷撃点		各端末において, 線路の延長線上 1 km**
計算条件		高速フーリエ変換 : データ長 (1024 μ s), データ数 (1024 個) 線路の分割数 : 10

* : 雷防護を考える場合, 防護回路避雷器の動作状態を問題にすれば良いので心線・シース間は低抵抗で終端される。

** : 線路の延長線方向に落雷した雷を側面雷と呼び, 図 5. 4 の A 側と B 側の 2 種類がある。線路の中心と雷撃点との距離を一定とすれば, 雷サージ電力はこのような側面雷の場合に最大となる。

* 1 : 定数値の決定根拠は第 4 章表 4. 2 参照

図5. 8より、遠端（図5. 4のB端）が短絡の場合、通信装置に印加される電力は最大となることと、線路長が長くなるにしたがって誘起起電力は増すが線路内の損失も大きくなるため、端末で消費される電力は線路長が2 km付近で最大となることがわかる。

従って、試験回路としては、使用する通信ケーブルの心線-シース間線路を用い、その線路長を2 km、遠端を短絡で使用すれば良い。

5. 4. 2 試験回路素子値の決定法

内部インピーダンスは式(6-13)及び図5. 4に示すように端末側から線路側を見たときの入力インピーダンスで表されることがわかった。しかし、この入力インピーダンスは分布定数線路で表されるため、内部インピーダンスを実現するために大きなスペースを必要となってしまう、雷サージ試験回路としては適切でない。そこで、式(5-13)を簡略化して、内部インピーダンスを集中定数回路により表す方法を示す。

これまでの検討結果より、

- (1) 心線・シース間線路に現われる雷サージエネルギーが通信装置の一般的な接続形態の中では最も大きい。
- (2) 線路長2 km付近で端末に現われる雷サージエネルギーは最大となる。
- (3) 線路の遠端を短絡した時、端末で消費されるエネルギーが最大となる。

ことがわかった。これらの条件が定まれば、内部インピーダンスを集中定数で表すことができる。

線路の遠端を短絡した時の入力インピーダンスは式(5-13)で $P_0 = -1$ となり、式(5-19)となる。

$$Z_i = Z_0 \times \tanh(\gamma_0 l) \quad (5-19)$$

式(5-19)の $\tanh \gamma_0 l$ を級数展開し第1項目を取り整理すると、式(5-20)となる。

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{R_1 + j\omega L_1}} \quad (5-20)$$

ここで、

$$R_1 = \frac{8}{\pi^2} R_{01} \quad (5-21)$$

$$L_1 = \frac{8}{\pi^2} L_{01} \quad (5-22)$$

$$C_1 = \frac{2}{2} C_{01} \quad (5-23)$$

ここで R_{01} 、 L_{01} 、 C_{01} は心線・シース間で構成される線路の一次定数である。図 5. 1 および式 (5-20) より、集中定数で表した試験回路は図 5. 9 に示す回路となる。この回路で、 v_1 は低インピーダンスのサージ発生器で試験用雷サージを発生する。

なお、図 5. 1 に示す回路では v_1 は 2 個あるが、図 5. 9 に示す回路では 1 個である。これは、図 5. 1 の回路で v_1 の両端の値は等しいので 1 個のサージ発生器で置き換えることができるためである。

5. 4. 3 試験波形の決定法

試験波形は定電圧サージ電源の分布形より、被試験装置に要求される障害率に対応して定められる。以下、その決定方法を示す。

通信装置の雷サージによる障害は通常、電圧とエネルギーにより生じる、前者の代表例が IC の半導体素子の破壊であり、後者の代表例がヒューズ等の破断である。実際の雷サージによる障害は両者が複合して生じるものであるから、本論文では、雷サージの持つエネルギーと波高値の発生頻度が等しいとの条件のもとに、雷サージ波形を決定する。

定電圧サージ電源の分布形が雷サージの観測の結果得られた雷サージの分布形と同じであると仮定すると、第 2 章より、雷サージ波高値の発生頻度は式 (5-24) で求められる。

$$Q_p(V_{1p}) = K_1 V_{1p}^{-p}$$

(5-24)

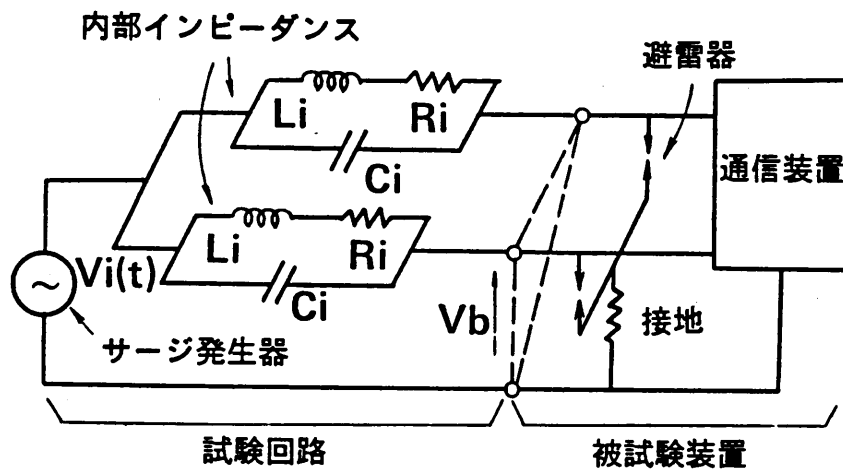
ここで、 V_{1p} は試験波形の波高値である。

試験波形の波頭長と波尾長は雷サージのエネルギーから決定される。雷サージの持つエネルギーの発生頻度 Q_s は雷サージ波形を第2章(図2.20)で示すように三角波形で近似すれば、式(5-25)で与えられる。

$$Q_s = \int_0^{\infty} \frac{d}{dV_{1p}} K_1 V_{1p}^{-p} \left[\int_{t_x}^{\infty} n(t_{10}) dt_{10} \right] dV_{1p} \quad (5-25)$$

$$t_x = \ln \left(\frac{E_s}{K_1 V_{1p}^2} \right)$$

式(5-25)で E_s は雷サージのエネルギーで式(5-27)で定義される。また、 $n(t_{10})$ は式(2-27)で定義される零点長の累積発生頻度である。



$$R_i = 50 \Omega, L_i = 1 \text{ mH}, C_i = 60 \text{ nF}$$

図5.9 雷サージ試験回路

$$E_s = K_{10} V_{10}^2 t_0 \quad (5-26)$$

$$t_{10} = 2 t_{1h} - t_{1r} \quad (5-27)$$

零点長の累積発生頻度分布は、波頭長、波尾長の累積発生頻度分布より求められ、定電圧サージ電源に於けるこれらの累積発生頻度分布が、観測雷サージ同様対数正規分布で表されると仮定すれば、式(5-28)となる[5].

$$n(t_{10}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{10}} \exp \left\{ -\frac{1}{\sqrt{2} \sigma_{10}} \ln \frac{t_{10}}{\mu_{10}} \right\}^2 \quad (5-28)$$

ここで

$$\begin{aligned} \mu_{10} &= 2 \mu_{1h} \exp \left[-0.45 \left(\frac{\mu_{1r}}{2 \mu_{1h}} \right) \sigma_{1h}^2 \right] \\ &\quad - \mu_{1r} \exp \left[-0.45 \left(\frac{\mu_{1r}}{2 \mu_{1h}} \right) \sigma_{1r}^2 \right] \end{aligned} \quad (5-29)$$

$$\sigma_{10} = \left(1 + \frac{\mu_{1r}}{\mu_{1h}} \right) \sigma_{1h}^2 \quad (5-30)$$

である.

雷サージの波高値と雷サージのエネルギーの発生頻度が同じであると仮定すると、式(5-24), (5-25)より、試験波形の零点長は式(5-31)となる.

$$t_{10} = \mu_{10} \exp(0.45 \sigma_{10}^2) \quad (5-31)$$

式(5-29)と式(5-31)を比較して、試験波形の波頭長 t_{1r} 、波尾長 t_{1h} は式(5-32), (5-33)となる.

$$t_{th} = \mu_{th} \exp \left[-0.45 \left(\frac{\mu_{tr}}{2 \mu_{th}} \right) \sigma_{th}^2 \right] \quad (5-32)$$

$$t_{tr} = \mu_{tr} \exp \left[-0.45 \left(\frac{\mu_{tr}}{2 \mu_{th}} \right) \sigma_{tr}^2 \right] \quad (5-33)$$

また、試験波形の波高値 V_{tp} は式(5-24)より、式(5-34)となる

$$V_{tp} = (Q_p / K_1)^{-1/p} \quad (5-34)$$

ここで、 Q_p は雷サージの発生頻度である。

式(5-32)、(5-33)は、試験波形の波頭長、波尾長は、雷サージのエネルギーの発生頻度と波高値の発生頻度が等しいと仮定した場合は、雷サージの発生頻度に依存せず、試験波形の波形は一定で、その波高値を変えるのみで発生頻度を模擬できることを意味している。

5. 5 試験結果から障害率の推定法

図6. 9に示す試験回路を用いて通信装置の試験を行ない、通信装置が破壊した雷サージの波高値を V_{tp} とすれば、式(5-34)より、その装置の雷サージに対する障害率 Q_p は、式(5-35)となる。

$$Q_p = K_1 V_{tp}^{-p} \quad (5-35)$$

5. 6 試験波形の設定例

以上、試験回路の設計方法と試験波形の設定例について述べて来たが、本節では、通信装置に最も厳しい条件に基づいて回路と試験波形を設定する。

試験回路を設定するためには式(5-20)～(5-23)より線路の心線・シース間線路の一次定数と線路長が必要になる。設定に用いたこれらの条件を表5.2に示す。線路の一次定数としては、内部インピーダンスが最も小さい場合が最も厳しい条件であるため、ここでは、一般に使用されている通信ケーブルでは線路抵抗の最も小さい0.9mmφの心線径をもつケーブルの一次定数を用いた。オープンショート法[7]を用いて測定した一次定数の1kHzに於ける実測値を表5.3に示す。また、0.4-30PCCP-Aケーブルについて測定した、100Hz～100kHzまでの一次定数の実測値を

表5.2 試験回路の定数値設定に用いた線路条件

線路条件	定数値
心線・シース間線路の一次定数	$R_{01} = 30 \Omega / \text{km}$, $C_{01} = 57 \text{ nF} / \text{m}$ $L_{01} = 0.74 \text{ mH} / \text{km}$
線路の遠端の終端条件	短絡
線路長	2 km

表5.3 心線・シース間線路の一次定数測定値

心線径 (mm)	一次定数 (1 kHz)		
	$R_{01} (\Omega / \text{km})$	$C_{01} (\text{nF} / \text{km})$	$L_{01} (\text{mH} / \text{km})$
0.4	141	59	0.65
0.5	91	62	0.70
0.65	55	51	0.76
0.9	30	57	0.75

図5. 10に示す。図に示すように、実測結果によれば、一次定数は100 Hzから100 kHzまではほぼ一定の値をとることがわかる。雷サージの観測結果によれば、雷サージの主なエネルギー成分は50 kHz以下にほとんど含まれるので、雷サージの試験回路に使用する限りは、一次定数の周波数依存性は無視できる。線路長は図5. 8に示すように、線路長2 km付近が最も雷サージエネルギーが大きいので2 kmとした。

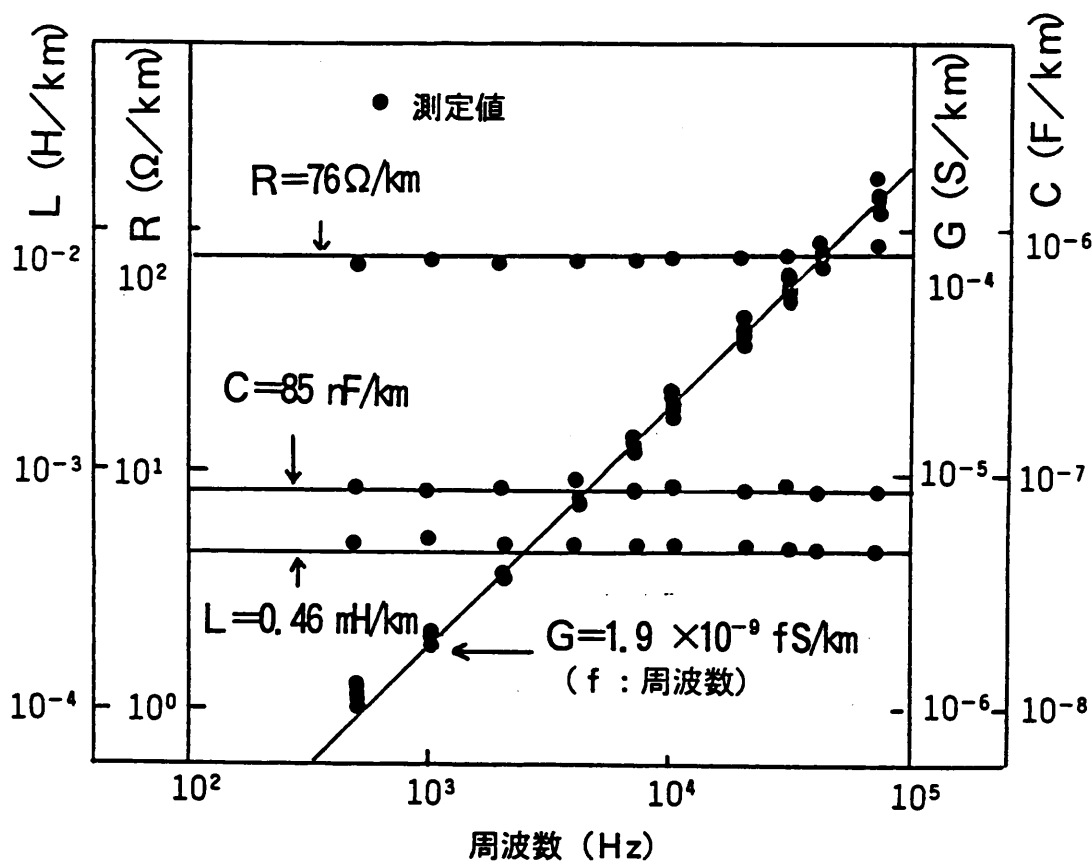


図5. 10 心線・シース間線路定数測定例
 (0.4-30P平衡ケーブルの L_1 , L_2 をより合わせて測定)

この値を用いたときの、内部インピーダンスの厳密値と近似値を図5. 11に示す。図に示すように、50 kHz以下では、厳密式を用いて求めた値と、近似式を用いて求めた値は、ほぼ一致しており、図5. 9に示す回路で、内部インピーダンスは模擬できることがわかる。表5. 2に示す定数を用いて求めた、等価回路定数の具体例を図5. 9に示す。

雷サージ試験波形を求めるためには、定電圧サージ電源の分布形が必要になる。そのため、まず、観測雷サージ波形の分布形より、定電圧サージ電源の分布を求める必要がある。観測雷サージの分布は第2章で述べたように式(2-1)～式(2-4)および表5. 4に

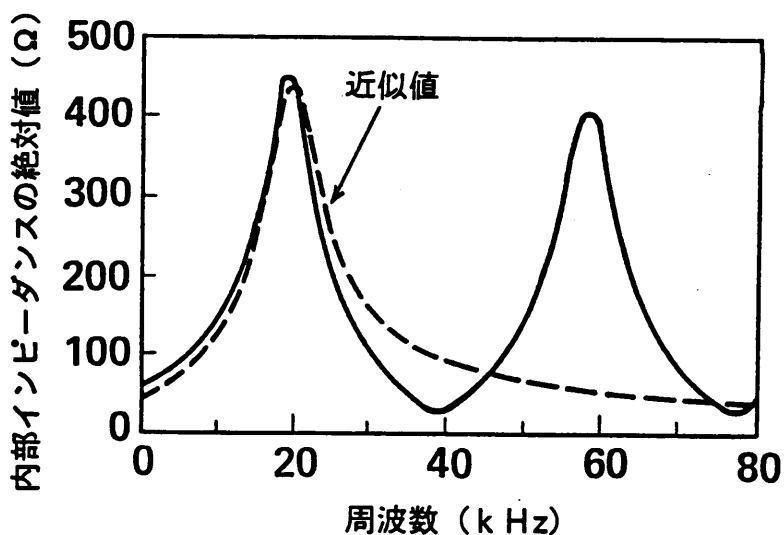


図5. 1.1 内部インピーダンスの厳密値と集中定数で近似した値

表5. 4 雷サージ波形の分布を表す定数値（観測雷サージ）

項目		加入者側端末	局内側端末
波高値	K	6.0×10^4	0.36×10^4
	p	1.8	1.8
波頭長	μ_r	$20 \mu s$	$60 \mu s$
	σ_r	0.56	0.56
波尾長	μ_h	$100 \mu s$	$250 \mu s$
	σ_h	0.56	0.36

示すパラメータで表される。表5. 4に示す値と表5. 2に示す条件および5. 4節で述べた方法により求めた定電圧サージ電源の分布形を図5. 12～5. 14に示す。なお、この分布の詳細な求め方は、第6章で述べる。図5. 12は雷サージ波高値の分布形を示しており、定電圧サージ電源の分布形も、観測雷サージ同様に式(6-16)で表されることがわかる。また、図5. 13, 5. 14はそれぞれ加入者側端末局内側端末の波頭長、波尾長の分布を示しており、いずれの分布も対数正規確率用紙上でほぼ直線で表すことができ、観測雷サージ波形同様に式(6-17), (6-18)で表すことができることがわかる。図5. 12～5. 14に示す分布形の分布を表す定数値を表5. 5に示す。表5. 5に示す定数値を基に5. 4節に述べた方法で決定した試験波形例を表5. 6に示す。

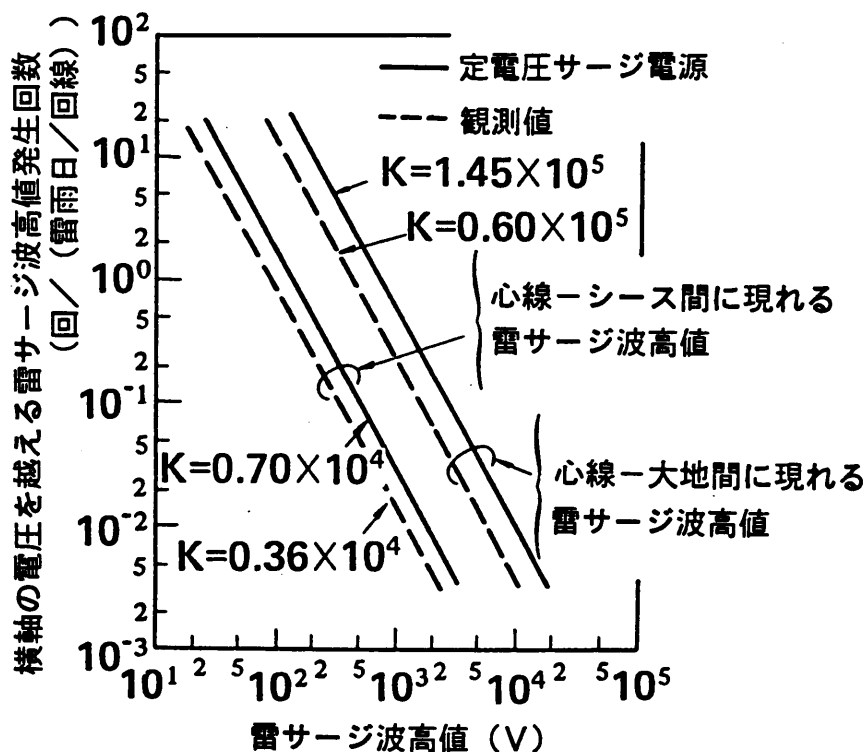


図5. 12 定電圧サージ電源の波高値の分布

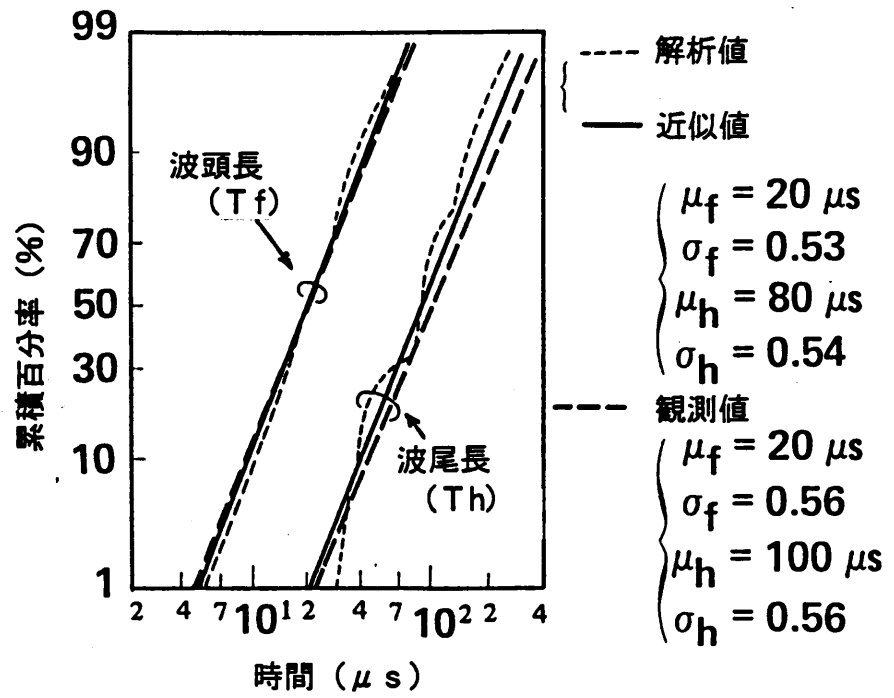


図 5. 1 3 定電圧サージ電源の波頭長・波尾長の分布 (加入者側端末)

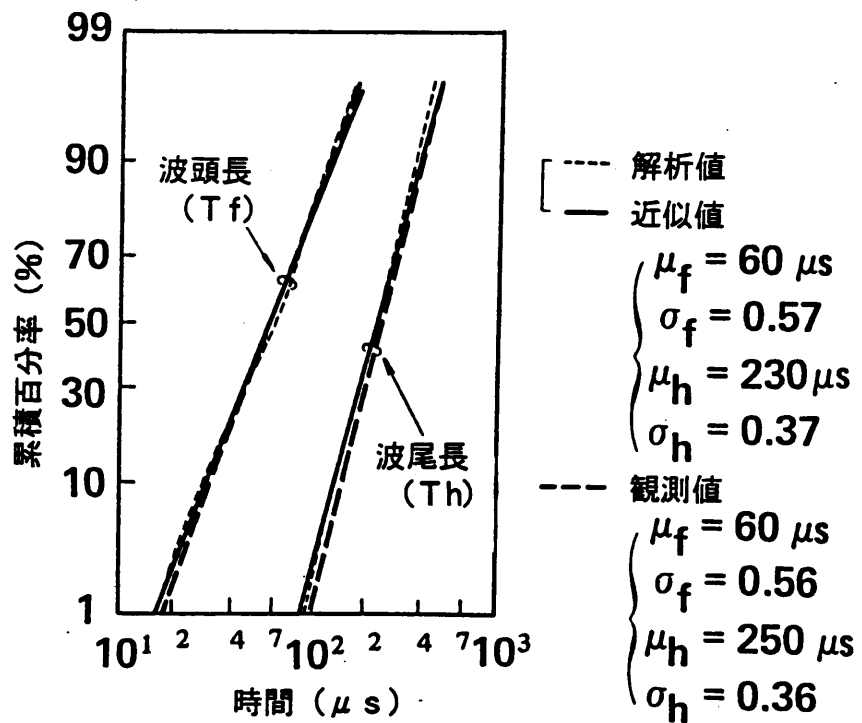


図 5. 1 4 定電圧サージ電源の波頭長・波尾長の分布 (局内側端末)

表 5. 5 雷サージ波形の分布を表す定数值 (定電圧サージ電源)

項目		加入者側端末	局内側端末
波高値	K_i	14.5×10^4	0.70×10^4
	p	1.8	1.8
波頭長	μ_{it}	$20 \mu s$	$60 \mu s$
	σ_{it}	0.53	0.57
波尾長	μ_{ib}	$80 \mu s$	$230 \mu s$
	σ_{ib}	0.54	0.37

表 5. 6 雷サージ試験回路定数の設定例

項目		加入者側端末	局内側端末
内部インピーダンスの定数值		$R_i = 50 \Omega, L_i = 1 \text{ mH}$ $C_i = 60 \text{ nF}$	
雷サージ試験波形	波高値	$V_{tp} = (Q_p / 1.45 \times 10^5)^{-(1/1.8)}$ Q_p : 障害発生頻度	$V_{tp} = (Q_p / 1.45 \times 10^5)^{-(1/1.8)}$ Q_p : 障害発生頻度
	波頭長	$20 \mu s$	$60 \mu s$
	波尾長	$100 \mu s$	$250 \mu s$

5. 7 従来の雷サージ試験回路の評価

これまで述べてきたように、従来の雷サージ試験回路を用いた試験では装置の障害率との対応付けはできないが、従来の試験回路で試験された装置も多いため、その試験結果はどの程度の障害率に対応するかを理論的に示す。

従来用いられている雷サージ試験回路[2]を図5. 15に示す。雷サージ試験はサージ発生器 V_1 より純抵抗 R_1 を介して被試験物にサージを印加している。被試験物に印加されるサージ波形を v_0 とし v_0 のサージ波高値、エネルギーの発生頻度を求めると図5. 16となる。図5. 16は試験波形の波高値1KV、波頭長 $10\mu s$ 、波尾長 $200\mu s$ で、心線・大地間に接続された通信装置の試験を行なった場合を示しており、以下の方法で求める。

- (1) 図5. 15の従来のサージ試験回路で負荷に印加されるサージ波高値 V_0 とサージェネルギー E_0 を求める。
- (2) 図5. 10の試験回路で負荷に印加されるサージ波高値、エネルギーが V_0 、 E_0 となるときの雷サージ波高値の発生頻度 Q_0 を求める。
- (3) Q_0 が従来の試験回路で試験を行なったときの装置の障害発生率 Q_p' となる。

なお、サージ波高値を変化させた場合は次式で装置の障害発生頻度を定めることができる。

$$Q_0' = V_1^{-p} Q_0 \quad (5-36)$$

図5. 16より、従来の試験回路では装置の入力抵抗により装置に印加される波形が変化しないので、入力抵抗によりサージ波高値、エネルギーによる障害発生頻度が異なってくることがわかる。つまり従来の試験回路で試験を行なった場合は、故障の原因が電圧によるものかエネルギーによるものかを定めないと障害率を定められない。また、図5. 15の被試験物がアレスタ等の電圧に対してして非線形な動作をする場合は被試験物に印加されるサージ波形の解析が困難であるため、本節で示した方法で障害発生頻度を求めることは困難である。

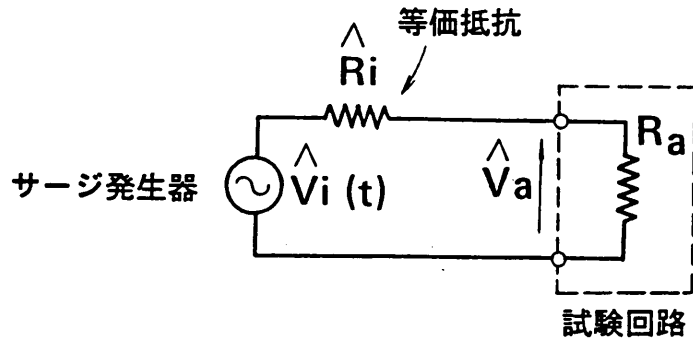


図 5. 1 5 従来使用していた, 雷サージ試験回路

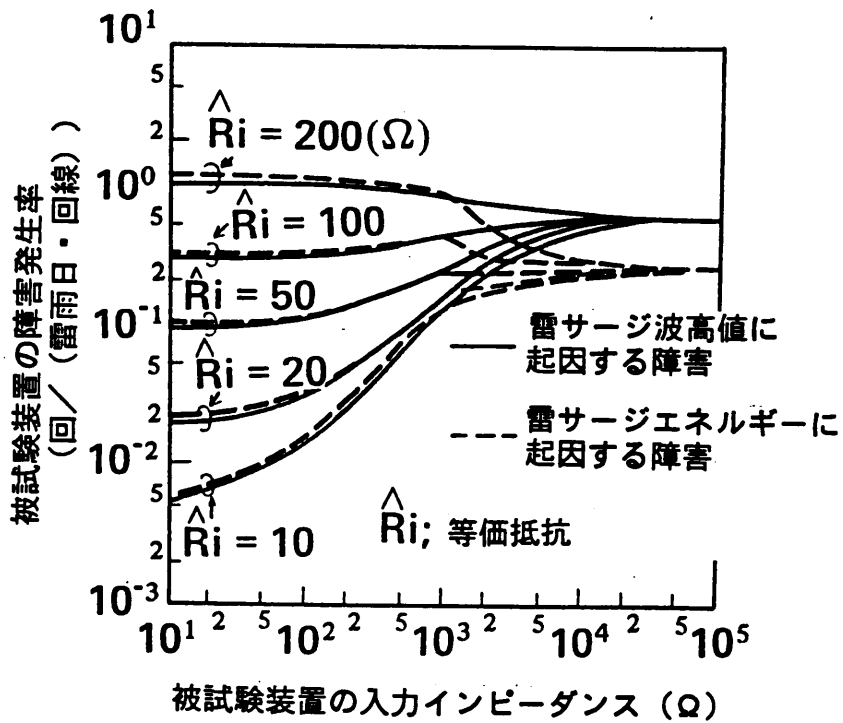


図 5. 1 6 従来の試験回路と障害発生頻度の関係

本章では、被試験物の負荷抵抗に依存せずに被試験物の雷サージに対する障害率が評価できる雷サージ試験回路の設計法を示した。そのために、通信線路端末に現われる雷サージを内部インピーダンスと定電圧サージ電源で表される等価回路で表し、内部インピーダンスについては、通信線路端末に現われる雷サージの理論式から定めた。

また、通信装置にとって最も厳しい、装置に印加される雷サージのエネルギーが最大となる条件下では、内部インピーダンスが簡単な集中定数回路で表されることを示し、その回路素子の値を定める理論式を導いた。定電圧サージ電源に関しては、通信線路端末で観測した雷サージ波形の分布形から、定電圧サージ電源の分布形を求める方法を示した。

また、この分布形が、観測雷サージ波形の分布形と同じであると仮定して、雷サージの発生頻度に応じた試験波形を定める方法を示し、装置に印可される雷サージのエネルギーと波高値が等しい条件下では、雷サージの発生頻度に応じた試験波形は、波頭長、波尾長に依存せず、その波高値を変えるのみで定められることを示した。さらに、装置の耐雷サージ試験の結果得られた装置の破壊電圧より、装置の雷サージ障害率を推定する方法を示した。つぎに、本章で述べた方法を用いて、通信装置にとって最も激しい条件に基づいて、設定した試験波形例を示した。最後に、従来から使用されている試験回路を用いた試験結果からも、本章で示す検討結果を用いればある条件のもとでは障害率の推定が可能であることを示した。

参考文献

- [1]古賀広昭, 元満民生, 田口守彦, 貝津良輔, 山口開成; "通信線路端末に現われる雷サージ波形の特性", 信学論(B), J64-B, 7, pp.627-634(昭56-07)
- [2]山本, 原田; "インパルス電圧, 電流の標準波形", 電気学会雑誌, 99, 8, pp.46-49(昭56-07)
- [3]桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦; "架空・地下複合線路端末に生じる誘導雷サージ", 信学論(B), J65-B, pp.31-38(昭57-01)
- [4]Koga H., Motomitsu T. and Taguchi M; "Lightning surge waves induced on overhead lines", Trans. IEICE Japan, E62, 4, pp.216-223 (April 1979)
- [5]古賀広昭, 元満民生, 田口守彦, 貝津良輔, 山口開成; "通信機器に印可される雷サージ波形設定法", 信学論(B), j64-B, 8, pp.785-792(昭56-08)
- [6]Sunde E. D. ; "Earth Conduction Effects in Transmission Systems", Dover Pub. , pp.14-17 (1968)
- [7]林憲一; "有線電話伝送工学", 学献社, pp.253-256 (1969)
- [8]桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生, 井手口健; "雷サージ試験回路設計法の検討", 信学技報, EMCJ82-20 (1982-07)
- [9]桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦; "架空・地下複合線路に誘起する雷サージの検討", 信学技報, EMCJ79-50 (1979-02)
- [10]電子通信学会編; "伝送回路", コロナ社, pp.364-372 (1972)

第 6 章 通信装置の雷サージ耐力試験装置

6. 1 まえがき

筆者は、第 5 章で通信線路端末に生じる雷サージの等価回路を導き、この等価回路と通信線路端末に生じる雷サージの分布から装置の種類に関係なく雷障害率を推定できる雷サージ試験回路が実現できることを示した。また、通信装置にとって最も厳しい条件より試験波形と試験回路を設計する方法を示した[1]～[3]。本章では、この設計法を用いて、加入者線路の平均的な設置条件より、加入者側端末に接続される通信装置の耐雷サージ試験回路を構成して通信装置の耐雷サージ特性の試験を行い、実際の雷障害率と比較している。

6. 2 雷サージ試験回路

第 5 章で述べたように雷サージ試験回路は図 6. 1 になる。図 6. 1 で V_1 は定電圧サージ電源、 Z_1 は内部インピーダンスである。ここで Z_1 は第 5 章より式(7-1)となる。

$$Z_1 = Z_0 * \tanh(\gamma_0 \ell) \quad (6-1)$$

ここで、 Z_0 、 γ_0 は心線・シース間線路の特性インピーダンスと伝搬定数である。

式(6-1)の $\tanh(\gamma_0 \ell)$ を級数展開し第 1 項目、2 項目をとり整理すると、

式(6-2)となる。

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{R_1 + j\omega L_1}} + R_1' \quad (6-2)$$

ここで、

$$R_1 = \frac{8}{\pi^2} R_{o1} \ell \quad (6-3)$$

$$L_1 = \frac{8}{\pi^2} L_{o1} \ell \quad (6-4)$$

$$C_1 = \frac{\ell}{2} C_{o1} \quad (6-5)$$

$$R_1' = R_{o1} \ell \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \right) \quad (6-6)$$

である。

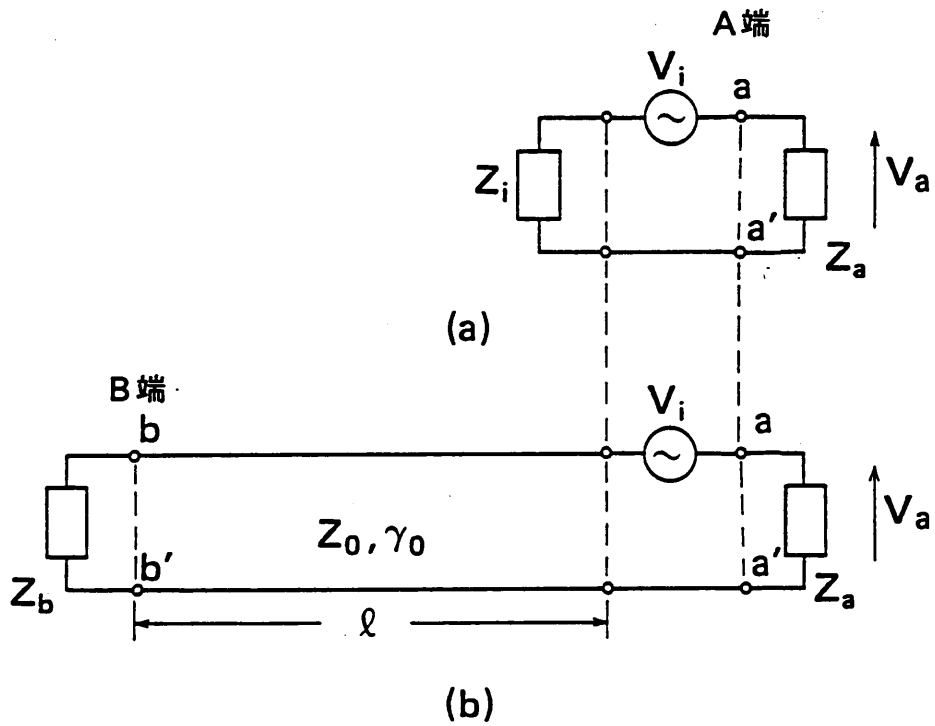


図 6. 1 雷サージ試験回路

また、式(6-3)~(6-6)で R_{01} , L_{01} , C_{01} は心線・シース間で構成される線路の一次定数、 l は線路長である。

式(7-2)より、雷サージ試験回路は図6. 2となる。図6. 2に於て、 V_i は試験波形を発生する低出力インピーダンスの雷サージ発生器、 R_i , L_i , C_i , R_i' は内部インピーダンスを構成する集中定数の値で式(6-3)~(6-6)で定められる。

図6. 2に示す試験回路の具体的な例を図6. 3に示す。図6. 3で C , G , L , R_1 , R_2 は試験波形を発生するためのサージ発生器で図6. 2に示すように雷サージ発生器は定電圧源として考える必要があるため、 R_1 を R_2 に比べて大きくしている。ただ、このようにすると試験波形の波高値が小さくなるため、この回路ではコンデンサの充電電圧を500kVとしている。図6. 3で Z_i は内部インピーダンスであり、具体的には図6. 2に示す回路である。 $P.P.$ 及び R_3 は加入者宅に取り付けられている保安器とその接地抵抗を、 R_4 は電源線の接地抵抗を模擬している。これらの回路パラメータの決定方法の概略は第5章で述べたが、本節では、その決定法に従って、以下の仮定のもとで具体的な回路パラメータを決定する。

- (1) 内部インピーダンスは日本の通信線路の平均的条件から決定する。
- (2) 試験波形は雷サージの観測値から決定する。
- (3) 保安器及びその接地抵抗、電源線接地抵抗は日本の平均的な値を用いる。

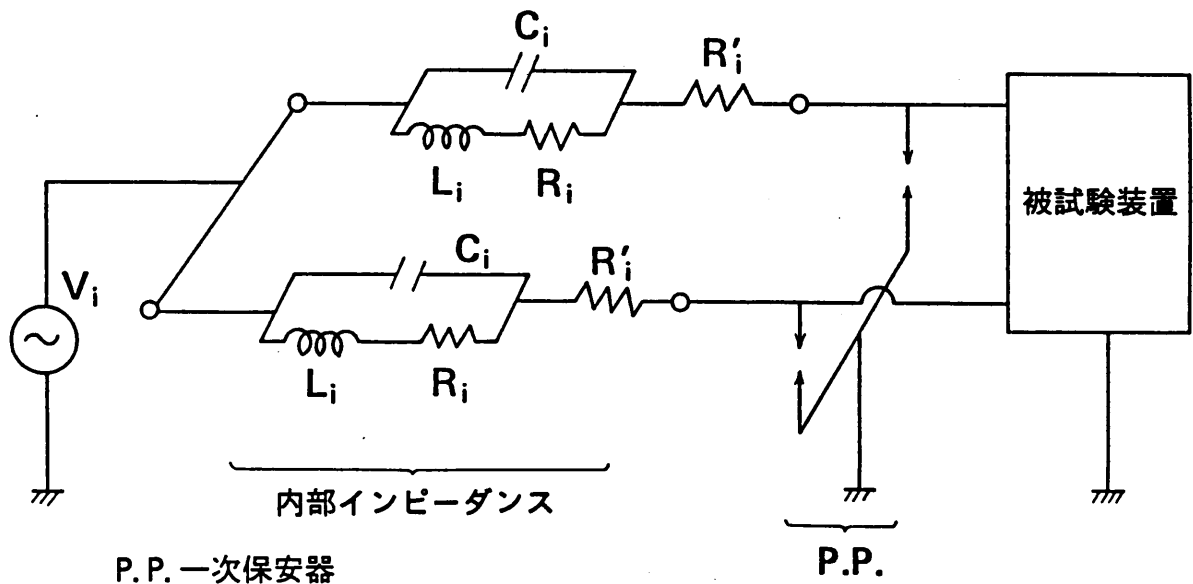


図6. 2 集中定数を用いて表した雷サージ試験回路

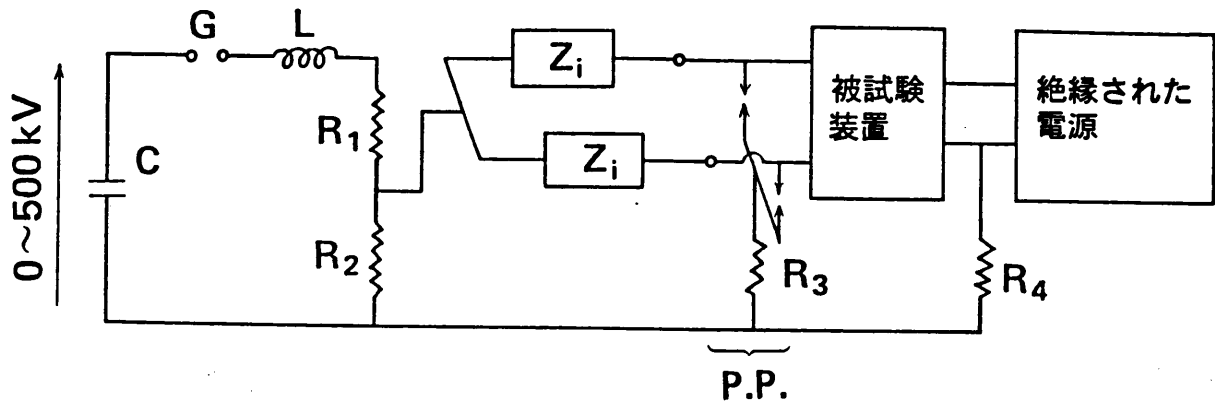


図 6. 3 雷サージ試験回路の具体的構成例

6. 2. 1 内部インピーダンス回路パラメータの決定

図 6. 2 示すように、内部インピーダンス回路パラメータは C_i , L_i , R_i , R_i' である。式 (6-3) ~ (6-6) に示すように、内部インピーダンスは心線・シース間線路の一次定数と線路長を決定すれば定められる。

心線・シース間線路の一次定数を決定するため、日本で最も広く通信用に使用されている、心線径が 0.4 mm の平衡対通信ケーブル (0.4-30PCCP-AP) の心線・シース間 (平衡対を構成する 2 本の心線とケーブルの金属シース間) の一次定数を測定した。その結果を図 6. 4 に示す。測定はオープンショート法 [4] を用い、測定する心線のケーブル内の位置により線路定数が変動する可能性もあるので、10 対の心線の一次定数を測定した。図に示すように、心線・シース間の線路定数は心線の収容位置ではほとんど変化しないことと、100 kHz まではほぼ一定の値を示すことがわかる。

日本の通信ケーブル長の分布 [5] を図 6. 5 に示す。図に示すように、日本の通信ケーブルはほとんどが長さ 4 km 以下であり、その平均長は 2 km であることがわかる。

以上の結果を式 (6-3) ~ 式 (6-6) に代入して、内部インピーダンスの回路パラメータを求めると表 6. 1 に示す値となる。

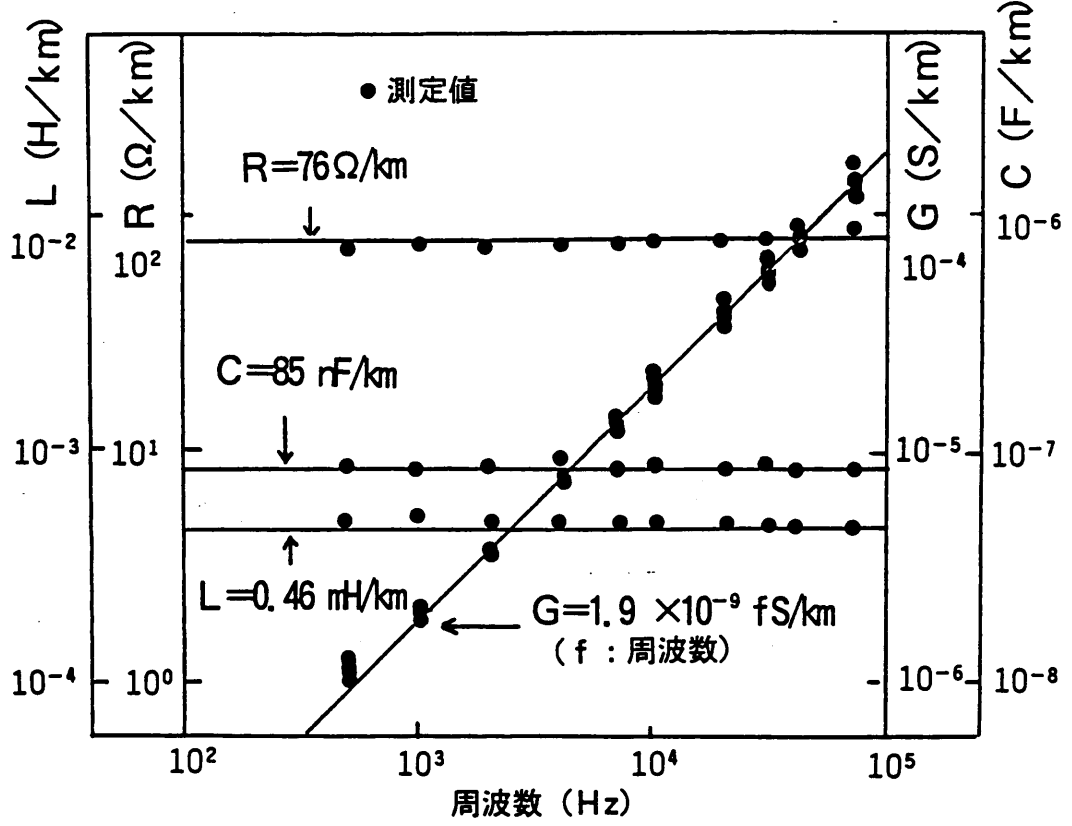


図 6. 4 心線・シース間線路一次定数の測定例

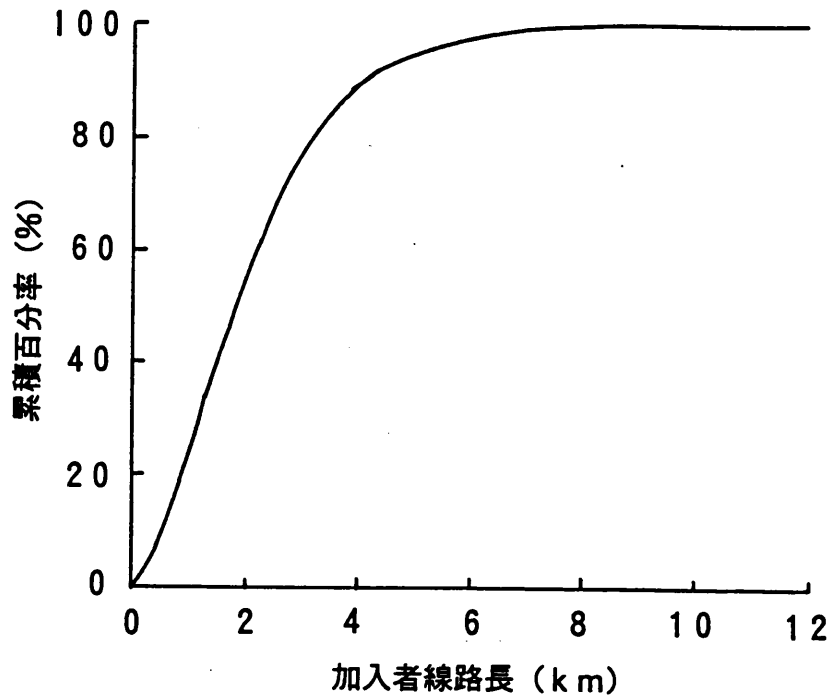


図 6. 5 日本のケーブル長の分布

表 6. 1 内部インピーダンスの回路パラメータ

項目	定数値
心線・シース間線路 の一次定数	$R_{01} = 141 \Omega / \text{km}$ $L_{01} = 0.64 \text{ mH} / \text{km}$ $C_{01} = 59 \text{ nF} / \text{km}$
通信ケーブル長	$l = 2 \text{ km}$
回路定数値	$R_1 = 250 \Omega, \quad L_1 = 1 \text{ mH}$ $C_1 = 60 \text{ nF}, \quad R_1' = 50 \Omega$

6. 2. 2 雷サージ試験波形の決定

加入者側端末に生じる雷サージの分布形は第2章に示すように、式(6-7), (6-8), (6-9)で与えられる。

$$N(V_{sp}) = K \cdot V_{sp}^{-p} \quad (6-7)$$

$$n(t_{st}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{st}} \exp \left\{ -\frac{1}{\sqrt{2} \sigma_{st}} \ln \frac{t_{st}}{\mu_{st}} \right\}^2 \quad (6-8)$$

$$n(t_{sh}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{sh}} \exp \left\{ -\frac{1}{\sqrt{2} \sigma_{sh}} \ln \frac{t_{sh}}{\mu_{sh}} \right\}^2 \quad (6-9)$$

ここで

V_{sp} : 端末に生じる雷サージ波高値

p : 雷サージ波高値の分布を表す定数

K : 雷サージ波高値の累積発生頻度を表す定数値

μ_{st} : 平均値 (f : 波頭長、 h : 波尾長)

σ_{st} : 標準偏差 (f : 波頭長、 h : 波尾長)

である。加入者端末および局内端末の雷サージ波高値の累積発生頻度を表す定数値

(K.) , 平均値 (μ.) 及び標準偏差 (σ.) を表 6. 2 に示す。

第 5 章より, 低電圧サージ電源の値は式(6-10)となる。

$$v_i = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Z_b + Z_i}{Z_b} \left[\int_{-\infty}^{\infty} v_s \exp(-j\omega t) dt \right] \exp(j\omega t) d\omega \quad (6-10)$$

ここで, v_i , v_s は式定電圧サージ電源波形と観測雷サージ波形 (時間領域) である。

式(6-10)を用いて, 定電圧サージ電源の波頭長, 波尾長の分布は以下の方法で求めた。

(1) 観測雷サージ波形を図 6. 6 に示す様に波高値が 1 の三角波形で近似する。

表 6. 2 観測雷サージ波形及び定電圧サージ電源分布を表す定数値 (加入者側端末)

項 目		定 数 値	
		観測雷サージ波形	定電圧サージ電源
波高値	K	0.6×10^6	2.5×10^6
	p	1.8	1.8
波頭長	平均値	$20 \mu s$	$25 \mu s$
	標準偏差	0.56	0.39
波尾長	平均値	$100 \mu s$	$118 \mu s$
	標準偏差	0.56	0.51

(2) 乱数を用いて式(6-7), (6-8)で表される分布を持つように波頭長 t_{01} , 波尾長 t_{02} を発生させる。その場合, 波頭長と波尾長の比は一定とし, 波頭長 t_{01} は式(6-11)で定める。

$$t_{01} = \mu_{01} / \mu_{02} \times t_{02} \quad (6-11)$$

(3) 発生させた各波形を式(6-9)に代入して, 定電圧サージ電源波形を求め, その結果より波頭長, 波尾長を求める。

(4) 各波頭長, 波尾長の計算結果からその分布を求める。

乱数を用いて1000の観測波形を発生させ, 定電圧サージ電源の波頭長, 波尾長の分布を求めた結果を図6.7に示す。なお, 計算に用いた観測波形の数を7000まで増したが, 計算結果はほとんど変化しなかった。図6.7より, 定電圧サージ電源の波頭長, 波尾長の分布も図中でほぼ直線となり, 観測雷サージ波形の分布同様に式(6-12), (6-13)で表されることがわかる。

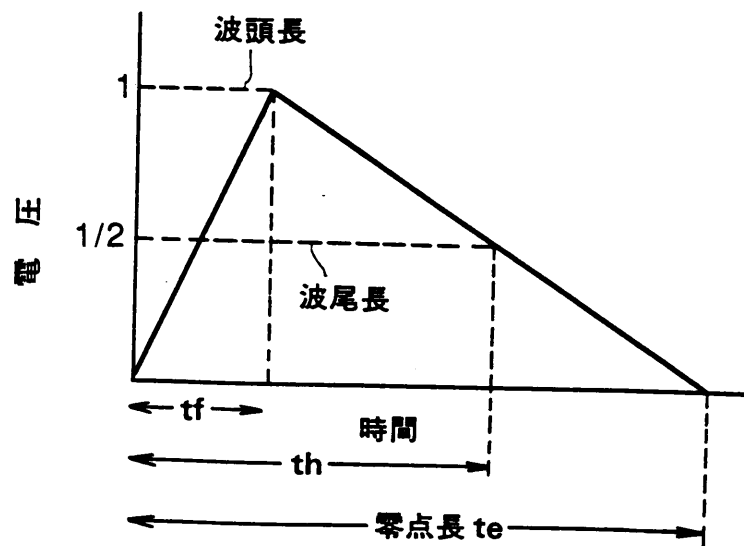


図6.6 雷サージ波形の近似方法

$$n(t_{1f}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{1f}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{1f}^2} \ln^2 \frac{t_{1f}}{\mu_{1f}}\right\} \quad (6-12)$$

$$n(t_{1h}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{1h}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{1h}^2} \ln^2 \frac{t_{1h}}{\mu_{1h}}\right\} \quad (6-13)$$

ここで

μ_i : 定電圧サージ電源平均値 (f : 波頭長、h : 波尾長)

σ_i : 定電圧サージ電源標準偏差 (f : 波頭長、h : 波尾長)

である。図6.7より求めた、定電圧サージ電源の波頭長、波尾長の分布を表す定数値を表6.2に示す。

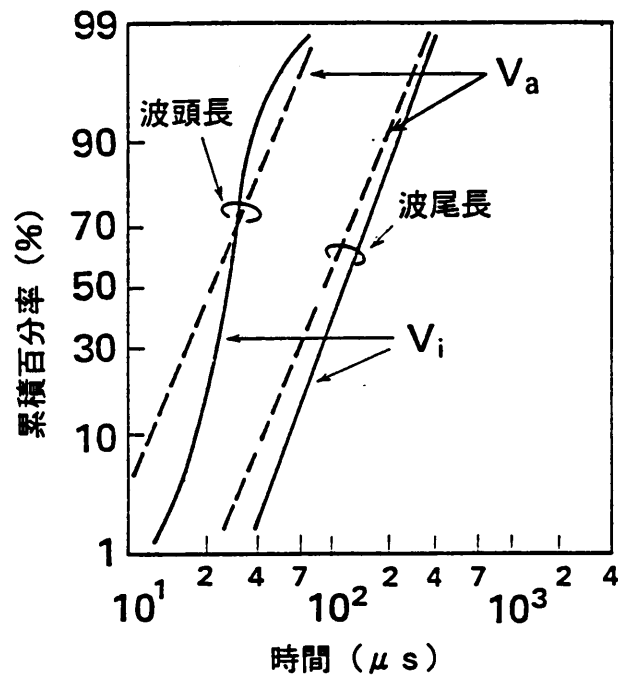


図6.7 定電圧サージ電源の波頭長、波尾長の分布

定電圧サージ電源の波高値の分布を求めるためには、まず、観測雷サージ波形の波高値が1の場合の定電圧サージ電源の分布を求める。求めた定電圧サージ電源の波高値と観測雷サージ波高値の比 (V_{1p}/V_{ap}) の分布を図6. 8に示す。波高値の比の分布を、図6. 8上で直線で近似すると、式(6-14)となる。

$$n(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} \exp\left\{-\frac{A - \ln(\mu_a)}{\sqrt{2}\sigma_a}\right\}^2 \quad (6-13)$$

ここで

$$A = \ln(V_{1p}/V_{ap}) \quad (6-15)$$

μ_a : 平均値 (図6. 8の場合2. 19)

σ_a : 標準偏差 (図6. 8の場合0. 05)

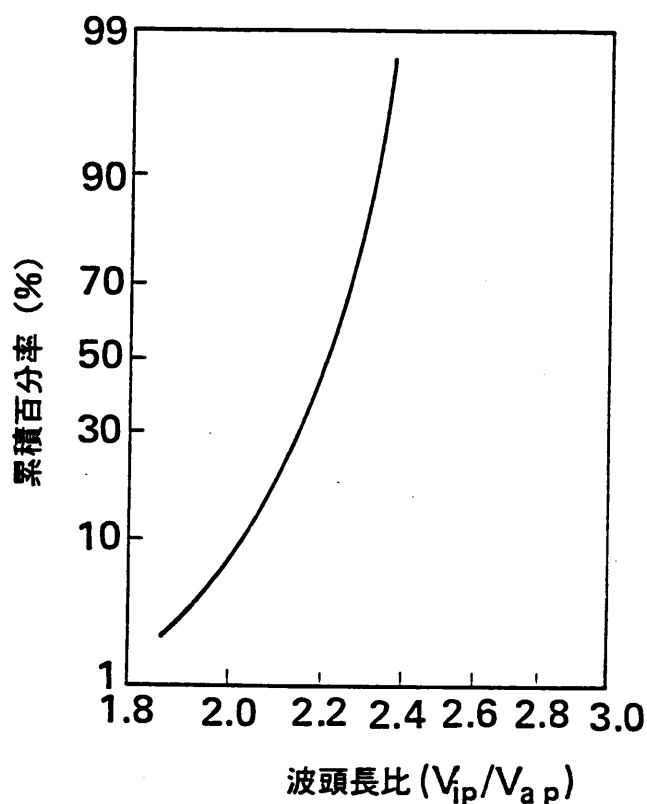


図6. 8 定電圧サージ電源と観測雷サージの波高値の比の分布

いま、 A と $A + dA$ の間の微小領域を考えると、式(6-6)より、定電圧サージ電源の波高値の発生頻度は式(6-16)となる。

$$N(V_{1p}) = K (V_{1p} / \exp(A))^{-p} \quad (6-16)$$

式(6-15)を全領域で積分すれば、定電圧サージ電源の分布が求められ、その値は、式(6-14)、(6-15)より、式(6-17)となる。

$$\begin{aligned} N(V_{1p}) &= K V_{1p}^{-p} \exp(1.62\sigma_s^2) \mu_s^{-p} \\ &= K_1 V_{1p}^{-p} \end{aligned} \quad (6-17)$$

ここで

$$K_1 = K \exp(1.62\sigma_s^2) \mu_s^{-p} \quad (6-18)$$

である。

式(6-17)より、定電圧サージ電源の波高値の分布も観測雷サージ波形の波高値分布を表す式と同じ式で表されることがわかる。求めた雷サージ波高値の分布を図6.9に、分布を表す K_1 の値を表6.2に示す。

雷サージ試験波形は第6章より式(6-19)～(6-21)となる。

$$t_{1h} = \mu_{1h} \exp \left[-0.45 \left(\frac{\mu_{1r}}{2\mu_{1h}} \right) \sigma_{1h}^2 \right] \quad (6-19)$$

$$t_{1r} = \mu_{1r} \exp \left[-0.45 \left(\frac{\mu_{1r}}{2\mu_{1h}} \right) \sigma_{1r}^2 \right] \quad (6-20)$$

$$V_{1p} = (Q_p / K_1)^{-1/p} \quad (6-21)$$

ここで、 Q_p は障害率である。表6.2に示す定数値を用いて試験波形を求めた結果を表6.3に示す。

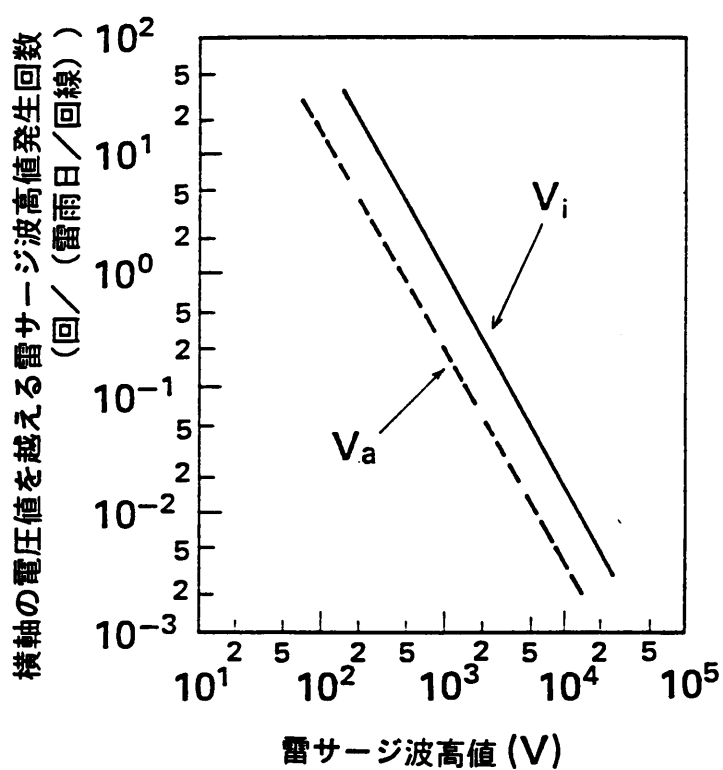


図 6. 9 定電圧サージ電源の波高値の分布

表 6. 3 雷サージ試験回路の回路パラメータ値
(加入者側端末に接続される通信装置用)

項目		パラメータ値
試験波形	波頭長	28 μ s
	波尾長	135 μ s
	波高値	$(Q_p / 2.5 \times 10^6)^{-1/1.8}$ Q_p : 障害率 (回 / (雷雨日 · 回線))
試験回路		$R_1 = 250 \Omega$, $L_1 = 1$ mH $C_1 = 60$ nF, $R_1' = 50 \Omega$ $R_2 = 100 \Omega$, $R_4 = 50 \Omega$
サージ発生器	回路定数	$C_s = 0.6 \mu$ F, $L_s = 1$ mH $R_1 + R_2 = 100 \Omega$ ($R_1 = 80 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$)
	充電電圧	0 ~ 500 kV

6. 2. 3 試験波形発生器の設計

表6. 3に示す試験波形を発生するサージ発生器の回路定数は式(6-22), (6-23)で与えられる[6].

$$L_s = p (t_{tr} / t_{th}) / C_s \quad (6-22)$$

$$R_1 + R_2 = q t_{th} / C_s \quad (6-23)$$

ここで, C_s は充電用のコンデンサの値であり, 充電エネルギー ($C_s \times V_s$, V_s : 充電電圧) ができるだけ大きくなるように適当に定める. 図6. 2に示す試験回路では C_s は表6. 3に示す値とした. また, p , q は式(6-24), (6-25)に示す式の解として与えられる.

$$q = p^{p/(p-1)} / (p-1) \quad (6-24)$$

$$\frac{1}{2q} = \exp \left\{ - \frac{t_{th}}{t_{tr}} \cdot \frac{\ln(p)}{p-1} \right\} - \exp \left\{ - \frac{t_{th}}{t_{tr}} \cdot \frac{p \ln(p)}{p-1} \right\} \quad (6-25)$$

式(6-22), (6-23)より, L_s 及び $R_1 + R_2$ の値は表6. 3に示す値となる. R_2 の値は $R_1 + R_2$ の1/10程度が望ましいが, 試験できる障害率の範囲が狭くなってしまうので1/5とした. なお, この値を用いても, 図6. 2に示す試験回路の保安器が放電回路が放電した場合でも R_2 の両端につながる負荷は最悪でも50Ω以上であるので, 波形に与える影響はほとんどない.

6. 2. 4 試験回路のその他のパラメータの決定

加入者保安器の設置抵抗 R_s と, R_4 の値は日本の平均的な値を用い, 表6. 3に示

す値とした。また、加入者保安器としては、実験では日本で最もよく使用されている4号保安器を使用した。

6. 3 通信装置の雷サージ試験結果

実験にはボタン電話装置を使用した。この通信装置は主装置と電話機（子機）から構成されており、主装置に20台程度の電話機が接続できる。実験では、ボタン電話装置のVer. 1とVer. 2を使用した。ここで、Ver. 2はVer. 1の耐雷サージ特性を改善したものである。

実験では、装置に加える試験波形の波高値を少しずつ増して実験を行ない、装置が破損した試験波形の波高値 V_{1p} を求め、その結果から、第5章に示すように、式(6-26)を用いて障害率を求めた。

$$Q_p = 2.5 \times 10^{-5} V_{1p}^{-1.5} \quad (6-26)$$

試験結果を表6. 4に示す。表6. 4に示している値は、Ver. 1及びVer. 2のボタン電話機各5台の障害率の平均値である。表より、Ver. 2のボタン電話機の方が3倍程度耐雷サージ特性が優れていることがわかる。

表6. 4 ボタン電話装置の雷サージ試験結果

ボタン電話装置名	試験値 (回 / (雷雨日・回線))	調査値 (回 / (雷雨日・回線))
Ver. 1	2.9×10^{-3}	2.4×10^{-3}
Ver. 2	1.3×10^{-3}	0.8×10^{-3}
Ver. 1と Ver. 2の比	0.45	0.35

試験結果の妥当性を確認するため、試験を行なった通信装置の雷障害率との対応を行なった。4000台のVer. 1ボタン電話装置と3000台のVer. 2ボタン電話装置について2年間に渡って障害の調査を行なった。2年間で雷サージにより障害を起こした台数と、日本の年間平均雷雨日数より、これらのボタン電話装置の雷障害率を求めた。求めた結果を表6. 4に同時に示す。

表6. 4より、試験回路で求めた雷障害率は実際の雷障害率の倍程度大きくなっていることがわかる。このことは、この試験回路により、通信装置の雷障害率を安全サイド側ではほぼ推定できることを意味している。

6. 4 本章のまとめ

第5章で検討を行なった雷サージ試験回路を、通信線路の加入者側端末を対象として実際に構成して通信装置の試験を行なった。その結果以下のことがわかった。

- (1) 日本の通信線路の平均的な値として、通信ケーブルの心線径が0.4mm、線路長が2kmを選び、雷サージ試験回路を設計した。その結果、内部インピーダンスは $R_i = 250\ \Omega$ 、 $L_i = 1\ \text{mH}$ 、 $C_i = 60\ \text{nF}$ 、 $R_i' = 50\ \Omega$ の各値を持つ集中定数回路で構成できることがわかった。また、加入者保安器の接地抵抗として $100\ \Omega$ 、電力線の接地抵抗として $50\ \Omega$ を日本の平均的な値として選んだ。
- (2) 通信線路端末で観測された雷サージの分布形より、定電圧サージ電源の分布形を乱数を用いたシュミレーションにより求め、試験波形を定めた。その結果、試験波形の波頭長は $28\ \mu\text{s}$ 、波尾長は $135\ \mu\text{s}$ となった。また、波高値は雷障害率から求められることを示し、その関係式を定電圧サージ電源の分布形より求めた。
- (3) 雷サージ試験回路を大電力サージ発生器を用い構成し、ボタン電話装置を用いて試験を実施した。求めた雷障害率は実際の雷障害率の2倍程度であった。このことは、この試験回路で通信装置の雷障害率をほぼ推定できることを意味している。

参考文献

- [1] 桑原伸夫, 古賀広昭, 井手口健, 元満民生, "通信機器の耐雷サージ試験回路設計法", 信学論(B), J 66-B, 7, pp 900-907 (昭58-07)
- [2] N. Kuwabara, H. Koga, T. Motomitsu; "New lightning test circuit for telecommunication equipment", IEEE Trans., Electromagnetic Comaptibility, Vol.30, No.3, August 1988
- [3] N. Kuwabara, H. Koga and T. Motomitsu, "New lighting test circuit for telecommunication equipment", IEEE Int. Sym. EMC(Tokyo), pp.746-751
- [4] 林憲一; "有線伝送工学", 学献社, 1969
- [5] 横田, 堀尾, 八木; "電話網加入者線の実態", 施設, 29, 11, 1977
- [6] C. C. I. T. T., Handbook: The protection of Telecommunication Lines and Equipment against Lightning Discharges, 1974.

第 7 章 通信装置雷サージ耐力の経済的設定法

7. 1 まえがき

通信装置の雷防護対策に関しては、被防護装置の耐量や伝送帯域などを考慮した防護回路の設計、避雷器など防護素子の特性向上や防護素子の合理的な組合せ方法などの検討はなされているが[1]、通信装置雷サージ耐量の地域別適用方法（地域により通信装置の雷サージ耐量を変化させることにより雷サージ対策費の軽減を図る方法）については、まだ十分な検討がなされていない。

本章では、第 2 章に示す雷サージ観測の結果より明らかになった、通信線路上に誘起する雷サージ波高値の発生頻度が地域により大きく異なる点に注目し、装置の雷防護回路の性能を地域により変える方法を提案する。そして、地域を任意の数に区分したとき、雷防護対策費が最小となる耐量設定法が存在することを明らかにするとともに、本方法が雷防護対策費の経済化に有効な方法であることを示す。

7. 2 雷サージ波高値の地域による変化

通信線路上に誘起する雷サージ波高値の発生頻度は日本の各地域で異なる。そして、日本の各地域に於ける雷サージ波高値の発生頻度は、各地域に於て雷サージ波高値を測定すれば求めることができるが、それには長い年月と多数の計測装置を必要とするためかなりの困難さをともなう。そこで本節では、雷サージの観測結果[2]、雷雨日数[3]、大地導電率[4]を用いて各地域の雷サージ波高値の発生頻度を求める方法について述べる。

雷サージ波高値の発生頻度に影響を及ぼす各種要因とその効果については第 2 章で述べられており、各種要因と雷サージ波高値の発生頻度のとの関係をまとめて表 7. 1 に示す。

日本全体を考えた場合、年間雷雨日数の変化は1桁[3]、大地導電率の変化は3桁[4]であり、これらの変化による雷サージ波高値発生頻度の変化は、ほぼ1桁程度になる。また、冬期雷（11月から翌年3月）の1雷雨日当りの発生頻度は、夏期雷（5月から10月）の1/2である[2]。

一方、通信線路に関する各種要因、すなわち地下・架空線路、線路長、分岐線路状況、ケーブル構造などは、表7.1に示すように雷サージ波高値の発生頻度 Q_p に小さな影響しか与えないので、これら通信線路に関する各種要因は、雷サージ波高値発生頻度の地域に対する変化要因としては考慮する必要がない。

また、雷サージ波高値は、雷撃電流の大きさや雷撃点と通信線路との位置関係の影響を大きく受ける。しかし、通信線路は網目状に張り巡らされているので、この影響はどの地域でもほぼ同じと考えられる。

従って、雷サージ波高値の発生頻度が地域によって異なる主要因として、冬期雷と夏期雷の差異を考慮した年間雷雨日数と大地導電率[4]の2要因を設定すれば良いと考えられる。

表7.1 雷サージ波高値の発生頻度に影響を及ぼす各種要因

項目	雷サージ発生頻度 の変化量	日本に於ける各項目 の変化の範囲
年間雷雨日数 d	$Q_p \propto d$	5 ~ 30 日
大地導電率 σ	$Q_p \propto \sigma^{-0.5}$	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-1}$ (S/m)
冬期雷・夏期雷	Q_p (冬期) = 0.5 Q_p (夏期)	冬期雷は日本海沿岸 に多い
線路長 l	$Q_p \propto (\log l)^{-1.5}$	小都市の平均 1 km 中大都市の平均 1.5 km
地下・架空線路	ほとんど差異なし	
分岐線路	同上	
ケーブル構造	アルミシースの有無 による大きな差異なし	

すなわち、j 地域に於ける1年、1回線当りの雷サージ波高値の累積頻度 $NT(A_j, V_p)$ は、j 地域の年間雷雨日数及び大地導電率を用いて、式(7-1)で表される。

$$NT(A_j, V_p) = d_j \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_j} \right)^{0.5} K_k V_p^{-p}$$

$$= A_j V_p^{-p} \quad (7-1)$$

ここで

$$d_j = 0.5 d_{w,j} + d_{s,j} \quad (7-2)$$

$$A_j = d_j \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_j} \right)^{0.5} K_k \quad (7-3)$$

d_j : j 地域の冬期雷と夏期雷を考慮した年間雷雨日数

$d_{w,j}$: j 地域の冬期の雷雨日数

$d_{s,j}$: j 地域の夏期の雷雨日数

σ_j : j 地域の大地導電率 (S/m)

σ_k : 関東地方の大地導電率 (2.0×10^{-2} S/m)

k_k : 関東地方の雷サージ波高値の累積発生頻度分布を表す定数 (観測値)
(回 / (雷雨日・回線))

A_j : j 地域の年間雷雨日数と大地導電率によって定まる係数 (j 地域を表す係数)

p : 雷サージ波高値の発生頻度を表す係数 (1.8)

V_p : 雷サージ波高値

ここでは、式(7-1)に示すように任意の地域の於ける雷サージ波高値の発生頻度を求めるに際しては、観測データの多い関東地方の発生頻度を基準とした。なお、式(7-1)の雷サージ波高値のべき数 p は地域により変化しないことが明かとなっている[5]。

また、表7.1に示すように局側端末と加入者側端末と雷サージ波高値の発生頻度が異なるが、ここでは、被害の大きい、加入者側端末に設置される装置の雷防護対策

を検討の対象とした。但し、局側端末に設置される通信装置の雷防護を考える際にも、ここで述べる手法を用いることができる。

7. 3 雷防護対策費を求める基本式

本節では、装置に要求される信頼度（許容障害率：いかなる地域に設置されている装置もこの障害率を越えては行けない）及び雷防護回路の保護能力と価格の関係が与えられたとして、地域別雷防護対策法を施した場合の雷防護対策費を表す基本式について述べる。

7. 3. 1 地域別雷防護対策法の考え方

全ての地域の装置に同一の防護回路を施すとすれば、雷サージ波高値の発生頻度のもっとも多い地域の装置の雷障害率を許容値以下に抑える雷防護回路を設計する必要がある。そのため、雷サージ波高値の発生頻度の少ない地域では過剰防護となり、結果として全体の雷防護対策費が高価となる。

そこで、全国を雷サージ波高値の発生頻度別にいくつかのグループ（地域）に分割し、それぞれのグループに於ける装置の雷障害率が許容値以下になるような防護能力を有する雷防護回路を各グループの装置に施すことにすれば、過剰防護の地域が少なくなり、結果として雷防護回路が一種類の場合に比較して全体の雷防護対策費を安価にすることができる。

7. 3. 2 地域区分の手順と定式化

図7. 1に7. 3. 1の考え方に基づいた地域区分法の手順を示す。

以下、雷防護対策費の地域区分決定の手順および定式化について述べる。

(1) 雷サージ波高値の発生頻度

日本全体を適当な単位地域（例えば県単位に）分割し、各単位地域に於ける雷サージ

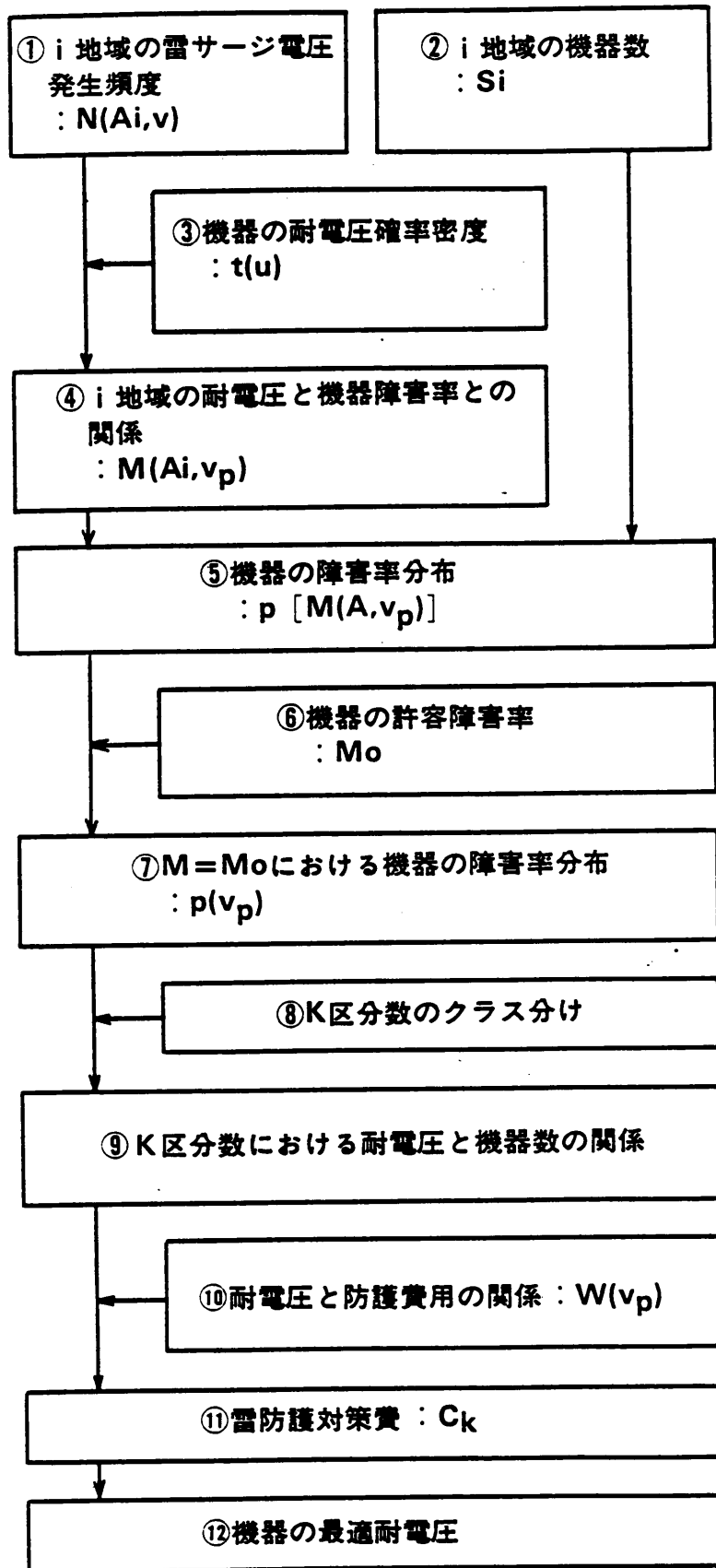


図 7. 1 機器の耐電圧決定の手順

波高値の発生頻度を7.2で述べた方法で求める。すなわち、j地域に於ける、1年、1回線（装置）当りの雷サージ波高値の発生頻度 $q_i(A_j, V_p)$ は、式(7-1)に示す雷サージ波高値の累積発生頻度 $NT(A_j, V_p)$ を用いて、式(7-4)で表される。（図7.1, ①）

$$q_i(A_j, V_p) = - \frac{\partial}{\partial V_p} NT(A_j, V_p) \quad (7-4)$$

(2) 装置の雷障害率

雷防護回路を付加した装置に、波高値 V_p の雷サージ印加されたとき、装置に雷障害が発生する確率を $s(V_p)$ とすると、j地域に設置された装置に雷サージ波高値 V_p が印加されたときの雷障害率 $m(A_j, V_p)$ は式(7-4)を用いて式(7-5)で表される。

$$m(A_j, V_p) = q_i(A_j, V_p) s(V_p) \quad (7-5)$$

従って、j地域に現われる全雷サージ波高値による装置の障害率は、式(7-5)を $0 \sim \infty$ の範囲で積分すれば良く、式(7-6)となる。

$$\begin{aligned} M(A_j) &= \int_0^{\infty} m(A_j, V_p) dV_p \\ &= \int_0^{\infty} [q_i(A_j, V_p) s(V_p)] dV_p \end{aligned} \quad (7-6)$$

今、 $s(V_p)$ が式(7-7)で表されると仮定する。

$$s(V_p) = U(V_p - V_{p0}) \quad (7-7)$$

$U(V_p - V_{p0})$: 単位ステップ関数

式(7-7)は、 V_{p0} 以上の雷サージ波高値が印加されたときに、雷防護回路あるいは装置が必ず破壊され、装置を防護できないことを意味する。従って、これ以後、 V_{p0} を装置の破壊電圧と呼ぶ。また、本論文では $s(u)$ はすべて式(7-7)で表されるとする。

式(7-7)を用いれば、式(7-5)、(7-6)は、式(7-8)、(7-9)のように書ける。

$$m(A_j, V_p) = \begin{cases} 0 & V_p < V_{pp} \\ q_t(A_j, V_p) & V_p \geq V_{pp} \end{cases} \quad (7-8)$$

$$M(A_j) = NT(A_j, V_{pp}) \quad (7-9)$$

すなわち、装置の耐電圧を V_{pp} としたときの雷障害率は、波高値が V_{pp} の雷サージの発生頻度と等しくなる。

以上のことから、装置の耐電圧を定めることにより、各単位地域に置ける耐電圧と雷障害率の関係を求めることができる(図7. 1, ③)。

(3) 雷障害率分布

式(7-9)によれば、装置の雷障害率は装置の耐電圧と地域を表す係数 A_j によって定められる。ところで、装置の雷害発生率は全国ある一定のレベル以上である必要がる。いま、この値を M_0 とおくと式(7-3)、(7-9)より各地域において装置に必要とされる耐電圧 V_{jpp} は式(7-10)となる。

$$V_{jpp} = (M_0 / A_j)^{-1/p} \quad (7-10)$$

従って、地域ごとに、式(7-10)に示すように、装置の耐電圧を設計する必要がある。また、地域によって設置されている装置の台数は異なるので、ある耐電圧を必要とする装置の台数は異なってくる。そこで、耐電圧 V_{jpp} を必要とする装置の台数 $S_j(V_{jpp})$ を V_{jpp} が小さい順に

$$S_1(V_{1pp}) \cdots S_j(V_{jpp}) \cdots S_k(V_{kpp}) \quad (7-11)$$

並べるとこれは V_{jpp} と S_j の関数となる。従って、

$$S_j(V_{jpp}) / S_0 \equiv p [M(V_{jpp})] \quad (7-12)$$

と定義して、 $p [M (V_{j,p})]$ を雷障害率分布と呼ぶ、式(7-12)に示すように雷障害率分布は全装置数のうち耐電圧が $V_{j,p}$ の装置数の割合を示している。従って、

$$\sum_{j=1}^k p [M (V_{j,p})] = 1 \quad (7-13)$$

である。kを無限に大きくすれば、 $p [M (V_{j,p})]$ は連続関数となり、式(7-13)より、式(7-14)が成立する。(図7. 1, ⑦)

$$\int_0^{\infty} p [M (V_{p,p})] V_{p,p} = 1 \quad (7-14)$$

(4) 防護対策費

ここで、雷防護回路の価格が、式(7-15)で表すように耐電圧だけに依存し、耐電圧が1Vの時の価格を1と仮定する。

$$P_r (V_{p,p}) = V_{p,p}^c \quad (7-15)$$

c : 防護費係数

全国をkグループに分割し、それぞれのグループで異なった雷防護回路を適用する場合を考えると、全体の雷防護対策費 C_k は式(7-12)、(7-15)を用いて、式(7-16)となる(図7. 1, ⑧)。

$$C_k = \sum_{j=1}^k P_r (V_{j,p}) \cdot S_0 \cdot p [M (V_{j,p})] M_0 \quad (7-16)$$

M_0 : 装置の許容障害率

(6) 最適耐電圧

区分数が1の場合、耐電圧は最も雷サージの発生頻度の大きな地域に合わせる必要がある。この値を V_{max} とする。

次に全国を2つの地域で区分した場合、一方の地域の耐電圧は V_{max} であるが、もう一方の地域の耐電圧は、低くすれば安い防護回路を適用できる装置数が減少し、高くすれば、防護回路の値段が上がるので、 C_x が最小となる耐電圧が存在する。同様に区分数が3以上の場合、各地域について最適の耐電圧が存在する。以後この耐電圧を最適耐電圧と言う(図7.1, ⑫)。

(7) 地域区分を行なった場合の防護対策費

単位地域(例えば県単位)ごとに雷防護回路の耐電圧を設定すると、全単位地域に於ける装置の雷障害率は、許容値 M_0 と等しくなるので、全地域に渡る装置の雷障害率の平均値、すなわち平均雷障害率は許容値と等しくなる。

一方、全国を単位地域より大きな地域でグループ分けすると(地域区分数 k が最大値未満の場合)、雷障害率が許容値より小さくなる単位地域がでてくるため、平均雷障害率 $M_{v,k}$ は M_0 より小さくなる。 $M_{v,k}$ は、装置の雷障害率とそれに対応する装置の台数の関係を用いて、式(7-17)で求めることができる。

$$M_{v,k} = \sum_{j=1}^k M(A_j, V_{j,p}) \cdot p[M(V_{j,p})] \quad (7-17)$$

以上述べたように、全国を k 個に区分した場合の雷防護対策費は、装置の雷障害率分布 $p[M(V_{j,p})]$ 、雷防護回路の価格 $P_r(V_{j,p})$ 、装置の許容雷障害率 M_0 の関数として表される。

従って、保護すべき装置の許容障害率、各単位地域に置ける装置の設置台数、雷防護回路の耐電圧と価格の関係を定めれば、雷サージ波高値の地域依存性を考慮して地域区分を行なった場合の雷防護対策費は、式(7-16)までの基本式を用いて求めることができる。

7. 4 地域別雷防護対策の具体例

本節では、日本の全加入者に導入される装置の雷防護を想定し、装置の耐雷特性の地域区分の具体例について述べる。

ここでは、単位地域を都道府県、装置の許容雷障害率を $M_0 = 10^4 \text{ fit}$ (約 8.8×10^{-2} 回/年)、装置の雷防護対策費を $P_r(V_{50}) = V_{50}$ (すなわち $c = 1$) とした場合について、解析を行なった。

7. 4. 1 装置の雷障害率分布 $p[M(V_{50})]$

前節で述べたように装置の雷障害率分布 $p[M(V_{50})]$ は装置に要求される雷障害率、各地域別の装置数、年間雷雨日数、大地導電率から求めることができる。 $p[M(V_{50})]$ の計算例を図7. 2に示す。図7. 2は地域を都道府県で区分した場合の $p[M(V_{50})]$ の累積百分率を示しており以下の手順で求めた。

(1) 装置に要求される雷障害率を決める

(図7. 2の場合 $M_0 = 10^4 \text{ fit}$ (約 8.8×10^{-2} 回/年))

(2) 式(7-10)を用いて、各都道府県の大地導電率、年間雷雨日数から V_{50} を求める。

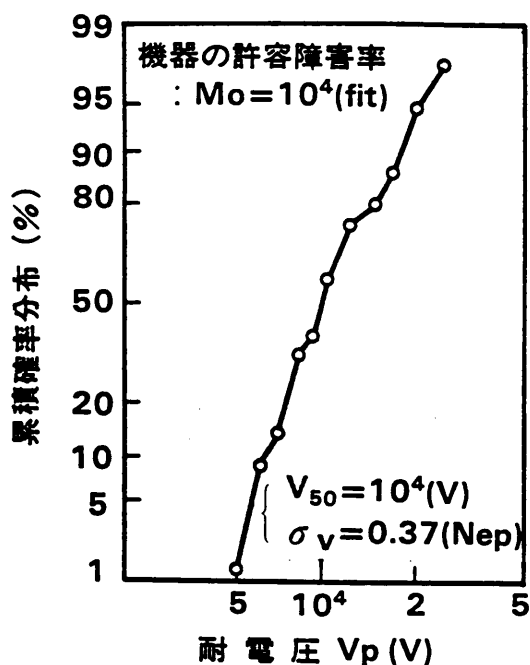


図7. 2 機器の雷障害率分布 $p[M(V_{50})]$ の累積百分率

(3) 各都道府県の装置数と日本全国の装置数より $p [M (V_{p,p})]$ を求める。

(図7. 2では、装置数の代わりに加入者数を使用)

(4) $p [M (V_{p,p})]$ を $V_{p,p}$ の小さい順に並べそれを

$$p [M (V_{1,p,p})] \cdots p [M (V_{i,p,p})] \cdots p [M (V_{k,p,p})] \quad (7-18)$$

と置く。

(5) $\sum_{i=1}^j p [M (V_{i,p,p})]$ を縦軸に $V_{i,p,p}$ を横軸に確率用紙にプロットする

なお、大地導電率は文献[4]から雷雨日数は文献[3]から加入者数は文献[6]を用いた。図から装置の耐電圧を10 kVに設定すると、全装置の50%の装置の雷障害率を許容値以下に、また25 kV(耐電圧の最大値)に設定すると全装置の雷障害率を許容値以下に抑えることができることがわかる。

$p [M (V_{p,p})]$ の累積百分率は、図7. 2に示すようにほぼ対数正規分布(平均値 $\mu_v : 10^4 V$, 標準偏差 $\sigma_v : 0.37 \text{ Nep}$)で表すことができる。従って $p [M (V_{p,p})]$ は

$$p [M (V_{p,p})] = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \exp \left\{ -\frac{\lg n (V_{p,p}) - \lg n (\mu_v)}{\sqrt{2} \sigma_v} \right\}^2 \quad (7-19)$$

と近似できる。

ここで

$V_{p,p}$: 雷防護回路の耐電圧

σ_v : 耐電圧の標準偏差 (Nep)

μ_v : 雷障害率がMの時の耐電圧の50%値

である。

7. 4. 2 雷防護対策費の地域区分依存性

日本全体を1～3及び最大区分数（都道府県数：46）で地域区分した場合の雷防護対策費を図7. 3に示す。解析は以下の手順で行なった。

(1) 装置に要求される雷障害率を決める

（図7. 3の場合 $M_0 = 10^4 \text{ fit}$ （約 8.8×10^{-2} 回/年））

(2) 式(7-10)を用いて、各都道府県の大地導電率、年間雷雨日数から V_{pp} を求める。

(3) 各都道府県の装置数と日本全国の装置数より $p [M (V_{pp})]$ を求める。

（図7. 3では、装置数の代わりに加入者数を使用）

(4) $p [M (V_{pp})]$ を V_{pp} の小さい順に並べそれを

$$p [M (V_{1pp})] \cdots p [M (V_{1pp})] \cdots p [M (V_{npp})] \quad (7-20)$$

と置く。

(5) 区分数1の場合は、最も装置の耐電圧を必要とする地域に装置の耐電圧を合わせる必要があるから、式(8-18)の装置の耐電圧の最大値 V_{max} （ V_{max} ：図8.

2の場合2.5 kV）を式(7-16)に代入して対策費を計算

(6) 区分数2の場合は装置の耐電圧を V_{s-2} 、 V_{s-1} の2段階に設定する。ここで V_{s-2} は V_{max} に設定、 V_{s-1} は $V_{1pp} \sim V_{n-1pp}$ まで変えて対策費を式(7-16)を用いて計算し最適値を決定

(7) 区分数3の場合は装置の耐電圧を V_{s-3} 、 V_{s-2} 、 V_{s-1} の2段階に設定する。ここで V_{s-3} は V_{max} に設定、 V_{s-2} 、 V_{s-1} は $V_{1pp} \sim V_{n-1pp}$ まで変えて（但し

$V_{s-2} > V_{s-1}$ ）対策費を式(7-16)を用いて計算し最適値を決定

(8) 区分数が3以上の場合も同様な手順で計算を行なう。

図7. 3から、地域区分数を2から3にすると、地域区分数が1の場合に比べて雷防護対策費が40～50%に軽減されること、しかも最大区分数（46）の場合（雷防護対策費が最小）に比べて20～30%程度しか増加しないことがわかる。従って、地域区分数として、2～3区分を考えれば、地域区分の経済効果を十分得ることができる。

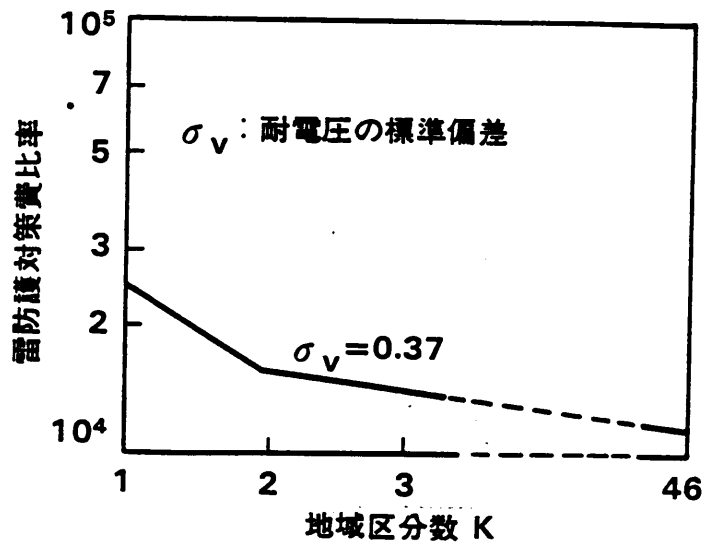


図 7. 3 雷防護対策費の区分数依存性

7. 4. 3 最適耐電圧

地域区分数が 2，すなわち雷防護回路の耐電圧を 2 段階に設定する場合，耐電圧の設定値により，雷防護対策費がどのように変化するかを図 7. 4 に示す。計算は以下の手順で行なった。

(1) 装置に要求される雷障害率を決める

(図 7. 3 の場合 $M_0 = 10^4 \text{ fit}$ (約 8.8×10^{-2} 回/年))

(2) 式(7-10)を用いて，各都道府県の大地導電率，年間雷雨日数から $V_{0.0}$ を求める。

(3) 各都道府県の装置数と日本全国の装置数より $p[M(V_{0.0})]$ を求める。

(図 7. 3 では，装置数の代わりに加入者数を使用)

(4) $p[M(V_{0.0})]$ を $V_{0.0}$ の小さい順に並べそれを

$$p[M(V_{1.0.0})] \cdots p[M(V_{1.0.0})] \cdots p[M(V_{n.0.0})] \quad (7-21)$$

と置く。

(5) 分数 2 の場合は装置の耐電圧を V_{2-2} ， V_{2-1} の 2 段階に設定する。ここで

V_{2-2} は $V_{n.0.0}$ に設定， V_{2-1} は $V_{1.0.0} \sim V_{n-1.0.0}$ まで変えて対策費を式(7-16)を用いて計算する

図より，第 1 グループの雷防護回路の耐電圧 ($V_{0.2.2}$) を耐電圧の最大値，

$V_{max} = 25 \text{ kV}$ (図 7. 2 参照) に選べば, 第 2 グループの雷防護回路の耐電圧 (V_{2-1}) が 10 kV 付近で雷防護対策費が最小となることがわかる。

地域区分数を 1 ~ 3 にした場合の最適耐電圧を表 7. 2 に示す。また同表には雷防護対策費, 平均雷障害率の値も同時に示している。

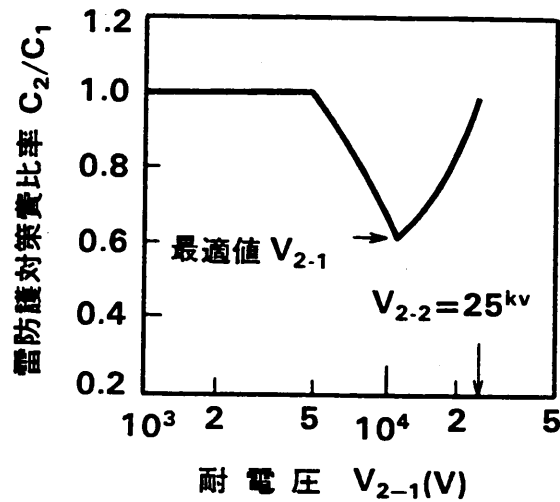


図 7. 4 耐電圧と雷防護対策費の関係

表 7. 2 地域区分数と最適耐電圧の関係

区分数	雷防護対策費	最適耐電圧 (Kv)	平均雷障害率 (fit)
1	1.0	$V_{1-1} = 25$	2.6×10^3
2	0.62	$V_{2-1} = 12$ $V_{2-2} = 25$	5.7×10^3
3	0.57	$V_{3-1} = 9$ $V_{3-2} = 12$ $V_{3-3} = 25$	6.7×10^3
4 6	0.46	図 7. 2 から各地域ごとに読みとる	10^4

* 1 : 区分数が 1 の時を基準とした。

* 2 : 許容雷障害率を 10^4 fit とした。

7. 4. 4 地域区分の具体例

図7. 5に雷防護回路の耐電圧を3段階に設定した場合の各クラスの地域区分例を示す。なお図7. 5は以下の手順で計算を行なった。

(1) 装置に要求される雷障害率を決める

(図7. 3の場合 $M_0 = 10^4 \text{ fit}$ (約 8.8×10^{-2} 回/年))

(2) 式(7-10)を用いて、各都道府県の大地導電率、年間雷雨日数から V_{pp} を求める。

(3) 各都道府県の装置数と日本全国の装置数より $p [M (V_{pp})]$ を求める。

(図7. 3では、装置数の代わりに加入者数を使用)

(4) $p [M (V_{pp})]$ を V_{pp} の小さい順に並べそれを

$$p [M (V_{1pp})] \cdots p [M (V_{1pp})] \cdots p [M (V_{npp})] \quad (7-22)$$

と置く。

(5) 区分数3の場合は装置の耐電圧を V_{s-3} , V_{s-2} , V_{s-1} の3段階に設定する。こ

こで V_{s-3} は V_{max} に設定, V_{s-2} , V_{s-1} は $V_{1pp} \sim V_{n-1pp}$ まで変えて (但し

$V_{s-2} > V_{s-1}$) 対策費の計算を式(7-16)を用いて計算し最適値を決定, その時の

都道府県別の装置の耐電圧を図面上に図示

図より、クラス1 (雷防護回路の耐電圧が9 kV) の地域が北海道、東北に集中しているのは、これらの地方では年間雷雨日数が少なく、従って雷サージの発生頻度が小さいためである。またクラス3 (25 kV) の地域が西日本地方に集中しているのは、この地方の年間雷雨日数が多く、かつ大地導電率が小さいため雷サージの発生頻度が大きいことが原因である。

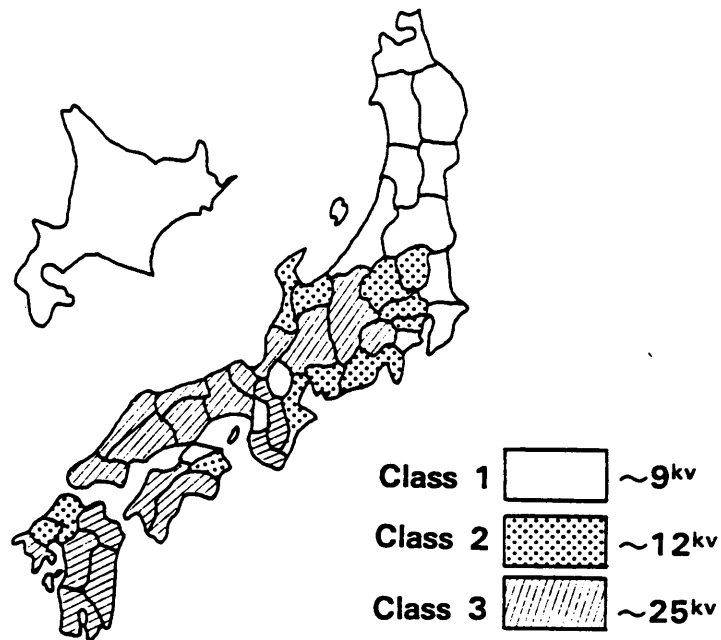


図 7. 5 地域区分の具体例

7. 5 本章のまとめ

雷サージの発生頻度が地域によって異なる点に着目し、雷防護回路を地域により変える方法を提案し、この地域別雷防護対策法が雷防護対策の軽減に有効であることを示した。また、日本全体を3クラスに区分した場合の地域区分例を示し、地域区分をしない場合に比べ、雷防護対策費が約半分となることを示した。

なお、本章では、雷防護回路の価格が耐電圧だけで決まると仮定したが、量産などによる価格の低下などを考慮すれば、さらに精度のよい結果が得られると思われる。

参考文献

- [1]黒沢，上條，根岸：“通信用ガス入避雷管”，研実報，30，5，pp. 1229
- 1242（昭56-05）
- [2]古賀，元満，田口，貝津，山口：“通信線路端末に現われる雷サージの特性”，
信学論（B），J64-B，7，pp. 627-634（昭56-07）
- [3]畑山編：“気象災害”，共立出版（昭41）。
- [4]誘導調査調整委員会：“日本の大地導電率”，電気学会・電子通信学会（昭44
- 08）
- [5]元満，古賀，田口：“市内線路系における雷サージ電圧発生頻度分布”，昭55
信学総全大，338。
- [6]日本電信電話公社施設局：“全国電話局地図”，電気通信協会，昭和47年

第 8 章 結 論

通信線に接続される通信装置は、通信線路端末に現われる雷サージにより障害を起こすことがある。近年、科学技術の進歩により、通信は音声だけでなく画像、データ通信等種々の目的で利用されてきており、その重要性は増してきている。そのため、これらの通信に使用される通信装置を雷サージに対して適切に防護することは、通信システムの信頼性維持、管理の上からも重要な問題である。通信装置を雷サージから適切に防護するためには、雷サージ試験法を定め、その試験法により耐雷サージ試験を行なって、これらの装置の雷サージ防護回路設計を適切に行なうことが必要である。

本論文では、この雷サージ試験法を明らかにしている。雷サージ試験回路は試験結果から得られた装置の障害率と実際の雷障害率が対応付けられることである。そのために、まず、日本の通信線路に生じる雷サージの観測、線路端末に生じる雷サージ誘起メカニズムの解析を実施し、雷サージの性質及び雷サージ分布特性を明らかにし、この結果を利用して、通信線路端末に生じる雷サージを表す等価回路を求めている。次に、この等価回路に基づいて、通信装置の雷サージに対する障害率を推定できる耐雷サージ試験法を明らかにするとともに、通信装置の耐雷設計法へも応用している。以下その要約を示す。

- (1) 雷サージカウンタ、雷サージ波形自動記録装置等の雷サージ観測装置の開発を行なうと同時に、これらの観測装置を用いて日本各地に於いて通信線路端末に現われる雷サージ観測を行い、雷サージに影響を及ぼす各種要因効果および、市内線路系の雷サージの発生頻度、多重性などその主要な特性の検討を行なった。

その結果、雷サージの要因効果として、①雷撃距離依存性、②線路長依存性、③分岐線路依存性、④終端抵抗依存性、⑤ケーブル構造依存性、⑥地上高依存性、⑦大地導電率依存性、⑧季節の違い、⑨雷サージ波高値の累積発生頻度、⑩雷サージ波形の波頭長、波尾長の累積発生頻度、⑪雷サージ波形の周波数スペクトル、⑫雷サージの多重性、等の要因依存性を明らかにできた。

- (2) 通信線路端末に生ずる雷サージの誘起機構を明らかにするため、同一雷放電により離れた点に生ずる雷サージを観測できる光ファイバを用いた雷観測システムを構成し、雷サージ波形の観測を行なった。その結果、①架空線路端末に生ずる雷サージは主に雷放電の際空間に生ずる電界の大地に水平な成分により誘起すること、②地下線路端末には架空線路端末と同程度の大きさの雷サージが誘起すること、③架空ケーブルの金属シースを接地することにより架空線路端末に生ずる雷サージ波高値は小さくなることがわかった。
- (3) 架空・地下複合線路の雷サージ誘起機構モデルを設定して、雷放電により空間に電界が生じ、その電界の大地に水平な成分が通信線路端末に生じる雷サージの誘起起電力となるとして、通信線路端末に生じる雷サージ波形の要因依存性およびその分布の解析を行なった。その結果、架空ケーブルのケーブルシースが多点で接地されていることを考慮することにより雷サージの観測結果をよく説明でき、このモデルにより通信線路の雷サージ誘起機構をほぼ説明できることがわかった。
- (4) 通信線路端末に現われる雷サージを内部インピーダンスと定電圧サージ電源で表される等価回路で表した。次に、内部インピーダンスを通信線路端末に現われる雷サージの理論式から求め、これが、通信装置にとって最も厳しい、装置に印加される雷サージのエネルギーが最大となる条件下では、簡単な集中定数回路で表されることを示し、その回路素子の値を定める理論式を導いた。また、通信線路端末で観測した雷サージ波形の分布形から、定電圧サージ電源の分布形を求める方法を示した。

定電圧サージ電源をサージ発生器とし、内部インピーダンスをサージ発生器の内部インピーダンスとして、雷サージ試験回路を構成すると、①通信装置の負荷に関わらず、通信装置に印加される雷サージを模擬できるので、全ての通信装置を1種類の試験装置で試験ができる、②通信装置に印加される雷サージの発生頻度は、定電圧サージ電源の発生頻度と同じとなるので、装置が破壊した定電圧サージ電源波形より、通信装置の雷サージに対する障害率を求めることができる、特徴がある。

次に、この分布形が、観測雷サージ波形の分布形と同じであると仮定して、雷サージの発生頻度に応じた試験波形を定める方法を示し、装置に印加される雷サージのエネルギーと波高値が等しい条件下では、雷サージの発生頻度に応じた試験波形は、波頭長、波尾長に依存せず、その波高値を変えるのみで定められることを示した。また、装置の耐雷サージ試験の結果得られた装置の破壊電圧より、装置の雷サージ障害率を推定する方法を示した。さらに、通信装置にとって最も激しい条件に基づいて、設定した試験波形例を示した。

最後に、従来から使用されている試験回路を用いた試験結果からも、ある条件のもとでは障害率の推定が可能であることを示した。

- (5) 試験回路の内部インピーダンスを構成する回路素子の値を日本ケーブル長の平均値、加入者保安器の接地抵抗の平均値、電源線の接地抵抗の平均値等から決定し、雷サージ試験波形を雷観測の結果得られた市内加入者線路端末に現われる雷サージの分布形から定めた。次に、この結果を用いて、雷サージ試験回路を実際に大電力サージ発生器を用い構成し、ボタン電話装置を被試験物として、試験を実施した。試験の結果得られた装置の障害率は実際の雷障害率の約倍であり、この試験回路を用いることにより、通信装置の雷障害率をほぼ推定できることがわかった。

この雷サージ試験回路は、若干の改良が加えられ、現在、NTTで通信装置の試験に使用されている。また、CCITTの規格として取り上げられており、現在審議中である。

- (6) 雷サージの発生頻度が地域によって異なる点に着目し、雷防護回路を地域により変える地域別雷防護対策法が雷防護対策の軽減に有効であることを示した。また、日本全体を3クラスに区分した場合の地域区分例を示し、地域区分をしない場合に比べ、雷防護対策費が約1/2でよいことを示した。

本論文をまとめるに当たり一方ならぬご指導，御教示を頂きました静岡大学大学院（博士課程）電子科学研究科長水品静夫教授に心から感謝の意を表します。また，有益な御討論，御助言を頂きました静岡大学工学部光電機械工学科宮川達夫教授，電子工学科池田弘明教授，電子工学科岡本尚道教授，電気工学科神藤正士教授，電子工学研究所渡辺健蔵教授に深く感謝いたします。

本研究は日本電信電話株式会社通信網総合研究所において行なわれたものであり，当初本研究の機会を与えて下さいました丸林元長岡技術大学教授（当時線路研究部長），寿司範二ダイヤルメディカルシステム取締役技術部長（当時線路研究部統括調査役）並びに引続きその機会を与えて頂きました福富秀夫住友電工常務取締役研究開発本部副本部長（当時線路研究部長），加藤尋則藤倉電線研究開発本部副本部長（当時線路研究部統括調査役），小島伸哉東北工業大学教授（当時線路研究部長），内田直也古河電気工業技師長（当時線路研究部統括調査役）に深謝いたします。また，本論文の執筆の機会を賜りました，青山友紀伝送システム研究所部長（元通信網総合研究所通信品質研究部長），浅谷耕一通信網総合研究所通信品質研究部長に深謝します。特に，本論文の執筆にあたり，多くの御指導を頂きました徳田正満通信網総合研究所通信 E M C 研究グループリーダーに感謝します。

本研究を遂行するにあたっては，茨城電気通信研究所線路施設研究室の諸兄をはじめ多くの方々に御指導・御討論を頂きました。特に，古賀広昭フィールドシステム研究開発センタグループリーダーには，直接の指導者として数多くの御指摘・御討論を頂きました。貝津良輔氏（当時線路施設研究室長），田口守彦藤倉電線情報通信事業部本部長（当時線路施設研究室長），石田之則日本工業大学教授（当時線路施設研究室長）には研究室室長として，研究の各段階で種々の御指導を頂きました。井手口健通信網総合研究所主幹研究員，元満民生技術協力センタ主任技師，服部光男ネットワークシステム開発センタ主任技師，大槻文男フィールドシステム研究開発センタ主任研究員，阿部徹治フィールドシステム研究開発センタ主任研究員には，共同研究者として数多くの御指導，御討論を頂きました。ここに厚く御礼を申し上げます。

1. 学会論文

- [1] 桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦; " 架空・地下複合線路端末に生ずる誘導雷サージ", 信学論 (B), J 6 5 - B, 1, pp. 31~38 (昭 5 6 - 0 1)
- [2] 桑原伸夫, 古賀広昭, 井手口健, 元満民生; " 通信機器の耐雷サージ試験回路設計法" 信学論 (B), J 6 6 - B, 7, pp. 9 0 0 - 9 0 7 (昭 5 8 - 0 7)
- [3] 元満民生, 古賀広昭, 桑原伸夫, 大槻文男; " 雷防護対策費経済化のための地域区分法", 信学論 (B), J 6 6 - B, 8, pp. 1027~1034 (昭 5 8 - 0 8)
- [4] 桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生; " 光ファイバを用いた雷サージ観測", 信学論 (C), J 7 0 - C, 1, pp. 21~30 (昭 6 2 - 0 1)
- [5] 桑原伸夫, 古賀広昭; " ノンメタル光ケーブル用高信頼性 FRP 抗張力体", 信学論 (B), J 7 1 - B, 5, pp. 626~632, (1988年5月)
- [6] N. Kuwabara, H. Koga, T. Motomitsu; "A new lightning surge test circuit for telecommunications equipment", IEEE Trans., Electromag. Compat., Vol. 30, No. 3, pp. 393~400, August 1988

2. 研究報告 (L e t t e r)

- [1] 桑原伸夫, 満永豊, 古賀広昭; " 光ケーブルに用いる FRP の破断寿命推定法", 信学論 (B), J 6 8 - B, 9, pp. 1081~1082 (昭 6 0 - 0 9)
- [2] N. Kuwabara, T. Ideguchi; "Calculation of near field emitting from telecommunication lines", Trans. IEICE Japan, E70, 4, pp. 247-249, April 1987

3. その他の論文

- [1] 元満民生, 古賀広昭, 田口守彦, 桑原伸夫, 大槻文男, 貝津良輔; " 通信線路へ誘起する雷サージの諸特性", 研実報, V o l. 3 0, N o. 5, pp. 1157~1173

- [2] 桑原伸夫, 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦; "加入者線路端末に生ずる誘導雷サージ特性", 研実報, Vol. 32, No. 1, pp.237~247, (1983)
- [3] N. Kuwabara, H. Koga, T. Motomitsu; "Indirect lightning surges at subscriber line ends", Review of the Electrical Communication Laboratories, Vol. 31, No. 4, pp.539-549, 1983.
- [3] 桑原伸夫, 元満民生, 井手口健; "通信機器に適用する耐雷試験回路", N T T R & D, 38, 6, pp.691~699, 1989

4. 国際会議

- [1] N. Kuwabara, H. Koga, T. Motomitsu; "New lightning test circuit for telecommunication equipment", IEEE Int. Sym. EMC(Tokyo), pp.746-751, Oct.16-18, 1984
- [2] N. Kuwabara and T. Ideguchi, "Probe for measuring interference voltages at ISDN telecommunication line interfaces", IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Comp. pp.311~316, Seattle August 1988
- [3] N. Kuwabara, F. Amemiya and T. Ideguchi; "Interference field emission due to unbalance in telecommunication lines", IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Comp. pp.487~492, Nagoya Sep. 1989
- [4] N. Kuwabara, F. Amemiya and M. Tokuda; "An electric-field probe using a bulk LiNbO₃ electro-optic crystal", Third Optoelectronics Conference(OEC'90), 12B3-14, July 1990
- [5] N. Kuwabara, K. Tajima and F. Amemiya; "Development of wide-band and highly sensitive electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator", IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Comp. New Jersey, August 1991

5. 研究会

- [1] 桑原伸夫, 古賀広昭, 大槻文男, 元満民生; "架空・地下複合線路系に誘起する雷

サージの検討”，信学技報，EMC J 79-50（1979）

- [2]元満民生，古賀広昭，桑原伸夫，大槻文男，田口守彦；”分岐のある架空通信線路に現れる雷サージ電圧の検討”，信学技報，EMC J 80-14（1980）
- [3]桑原伸夫，古賀広昭，元満民生，田口守彦；”加入者線路系に生じる雷サージの検討”，信学技報，EMC J 80-95（1981）
- [4]桑原伸夫，古賀広昭，元満民生，井手口健；”雷サージ試験回路設計法の検討”，信学技報，EMC J 82-20（1982）
- [5]阿部徹治，古賀広昭，桑原伸夫；”雷放電電流による大地上の電界について”，信学技報，EMC J 83-2（1983）

6. 学会講演

- [1]元満民生，古賀広昭，久木田重蔵，大槻文男，桑原伸夫，田口守彦；”市内線路系に現れる雷サージ波形の検討”，昭和54年度信学会総合全国大会S18-8
- [2]古賀広昭，元満民生，久木田重蔵，大槻文男，桑原伸夫，田口守彦；”架空通信線路への雷サージ誘起機構”，昭和54年度信学会総合全国大会S18-9
- [3]桑原伸夫，古賀広昭；”地下線路のシース・大地間線路定数の一検討”，昭和55年度信学会総合全国大会1966
- [4]古賀広昭，桑原伸夫；”地下線路端末に現れる雷サージ波形の検討”，昭和55年度信学会総合全国大会1970
- [5]元満民生，古賀広昭，久木田重蔵，大槻文男，桑原伸夫，田口守彦；”通信線路に生じる雷サージ電圧観測結果報告（分岐線路の影響に付いて）”，昭和55年度信学会総合全国大会1973
- [6]桑原伸夫，古賀広昭，元満民生，田口守彦；”架空-地下複合線路に生ずる雷サージの検討”，昭和55年度信学会通信部門全国大会337
- [7]桑原伸夫，古賀広昭，元満民生，田口守彦；”架空通信線路に現れる雷サージ電圧の検討（分布設置の影響）”，昭和56年度信学会総合全国大会1949
- [8]桑原伸夫，古賀広昭；”加入者線路端末に生ずる雷サージ波形分布の解析”，昭和57年度信学会総合全国大会1913
- [9]桑原伸夫，古賀広昭，元満民生，山根宏；”光ファイバを用いた雷サージ波形観

測”，昭和57年度信学会総合全国大会1914

[10]桑原伸夫，古賀広昭，井手口健，元満民生； ” 機器用雷サージ試験回路の設定法”，昭和57年度信学会通信部門全国大会639

[11]元満民生，桑原伸夫，阿部徹治； ” 雷障害発生地域検出法に関する実験結果報告”，昭和58年度信学会総合全国大会1897

1. 学会論文誌

- [1]水品静夫, 近藤博司, 桑原伸夫, 大須賀哲夫; "リッジ導波管広帯域固体素子マウント", 信学論(B), J60-B, 2, pp.140~147 (昭52-02)

2. 研究報告 (Letter)

- [1]S. Mizushina, N. Kuwabara, H. Kondoh; "Theoretical analysis of a ridged-waveguide mounting structure", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-25, pp.1131-1134, Dec. 1977.
- [2]桑原伸夫, 古賀広昭, 小中康夫, 石田之則; "延伸ポリオキシメチレンを抗張力体として用いた光ケーブルの温度特性", 信学論(C), J69-C, 8, pp.1084~1087 (昭61-08)
- [3]K. Tajima, N. Kuwabara and F. Anemiya; "Highly sensitive electric field sensor using LiNbO3 optical modulator", IEICE Trans. on Communications, Vol.E74, No.7, July 1991

3. その他の論文

- [1]桑原伸夫, 田島公博, 雨宮不二雄, 徳田正満; "LiNbO3光編変調器を用いた高帯域高感度電界センサ", Denshi Tokyo No.29, pp.174~177, 1990
- [2]桑原伸夫, 村川一雄, 桜井一美; "EMI測定用大型電波暗室の設計とその特性", NTT R & D, 40, 4, pp.481~486, 1991
- [3]村川一雄, 田島公博, 桑原伸夫; "光技術を用いたEMC測定法", NTT R & D, 40, 4, pp.487~493, 1991
- [4]雨宮不二雄, 桑原伸夫, 田淵誠; "通信装置の伝導・放射妨害波試験・評価法", NTT R & D, 40, 4, pp.473~480, 1991

4. 国際会議

- [1] S. Mizushima, N. Kuwabara, H. Kondoh; "Theoretical analysis of a ridged-waveguide mounting structure", in 1977 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp., pp. 442-444, June 21-23, 1977.
- [2] K. Murakawa, N. Kuwabara and F. Amemiya; "Radiation properties of spherical dipole antenna", Proceedings of ISAP'89, pp. 913~916, 1989
- [3] K. Murakawa, N. Kuwabara and F. Amemiya; "Radiation properties of spherical dipole antenna", IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Comp. pp. 572~576, Nagoya Sep. 1989

5. 研究会

- [1] 桑原伸夫, 水品静夫, 近藤博司; "リッジ導波管固体素子マウント", 信学技報, MW 76-129 (1977)
- [2] 近藤博司, 水品静夫, 桑原伸夫; "リッジ導波管空洞広帯域インパット及びガン発振器", 信学技報, SSD 76-83 (1977)
- [3] 村川一雄, 桑原伸夫, 井手口健; "光給電球状ダイポールアンテナの特性", 信学技報, EMCJ 87-3 (1987)
- [4] 桑原伸夫, 井手口健; "架空通信ケーブルより放射される電磁界の特性", 信学技報, EMCJ 87-17 (1987)
- [5] 桑原伸夫, 井手口健, 金森久哲, "ISDN通信機器の通信線端子雑音測定法の一検討", 信学技報, EMCJ 87-80 (1987)
- [6] 桑原伸夫, 倉本昇一, 佐藤正治, 徳田正満; "光学結晶を用いた電界アンテナの特性", EMCJ 88-90 (1988)
- [7] K. Murakawa, N. Kuwabara, F. Amemiya; "Far field strength estimation for evaluating the radiated interference field", EMCJ 88-67 (1988/11)
- [8] 雨宮不二雄, 桑原伸夫, 田淵誠; "通信装置の通信線経由妨害波測定法に関する検討", 信学技報, EMCJ 90-15 (1990)
- [9] 馬杉正男, 村川一雄, 桑原伸夫, 雨宮不二雄, "間接静電気放電による電磁パルス

の時間領域における測定”，信学技報，EMC J 9 0 - 5 5 (1 9 9 0)

[10]村川一雄，桑原伸夫，雨宮不二雄；”受信用球状ダイポールアンテナの特性”，

信学技報，EMC J 9 1 -

[11]桑原伸夫，田島公博，雨宮不二雄；”LiNbO₃光変調器を用いた高感度電界センサ

の感度特性”，信学技報，EMC J 9 1 - 6 (1 9 9 1)

6. 学会講演

[1]近藤博司，水品静夫，桑原伸夫；”オクターブ同調20GHz帯インパット発振

器”，昭和51年度信学会光・電波部門大会133

[2]桑原伸夫，桑原恒夫，満永豊，古賀広昭；”光ファイバ心線の低温時に置け

る短波長帯損失増加現象”，昭和59年度信学会総合全国大会212

[3]桑原恒夫，桑原伸夫，北村敏広；”ジェリー浸漬光ファイバの低温損失”，

昭和59年度信学会総合全国大会2263

[4]桑原伸夫，桑原恒夫，北村敏広；”FRP外装光ケーブルの機械特性”，

昭和59年度信学会総合全国大会2164

[5]桑原伸夫，桑原恒夫，北村敏広；”金属外装耐雷光ケーブルの一設計法”，

昭和59年度信学会通信部門全国大会534

[6]桑原伸夫，満永豊，古賀広昭；”光ケーブル用FRP抗張力体の強度信頼性”，

昭和60年度信学会総合全国大会2187

[7]林明，桑原伸夫，満永豊；”FRP外装光ケーブルの機械特性”，昭和60年度信

学会総合全国大会2188

[8]桑原伸夫，古賀広昭，石田之則；”延伸ポリオキシメチレンを高張力体として用い

た光ケーブル”，昭和61年度信学会総合全国大会2129

[9]桑原伸夫，古賀広昭；”無誘導光ケーブル用高信頼性FRP抗張力体”，昭和61

年度信学会総合全国大会2239

[10]桑原伸夫，古賀広昭；”ノンメタル光ケーブル用FRP抗張力体の必要条件と光

ケーブル設計”，昭和61年度信学会通信部門大会300

[11]桑原伸夫，井手口健；”通信線路より放射される近傍電磁界解析”，昭和62

年度信学会総合全国大会2574

- [12]村川一雄, 桑原伸夫, 井手口健; "球状ダイポールの近傍電磁界の数値解析",
昭和62年度信学会総合全国大会
- [13]桑原伸夫, 金森久哲, 村川一雄; "ISDN用通信機器のEMI測定条件"
昭和63年信学会春季全国大会SB-4-2
- [14]桑原伸夫, 井手口健, 雨宮不二雄; "通信線不平衡と放射妨害波特性",
昭和63年度信学会秋季全国大会B-116
- [15]村川一雄, 桑原伸夫, 雨宮不二雄; "遠方における放射雑音電磁界推定法",
昭和63年信学会秋季全国大会SB-3-3
- [16]桑原伸夫, 雨宮不二雄, 徳田正満; "ISDN通信機器の通信線端子妨害波測定
法" 信学会春季全国大会(1989年)SB-47
- [17]田島公博, 桑原伸夫, 雨宮不二雄, 野沢敏矩; "Mach-Zender型光変調器を用いた
電界センサの特性測定結果", 信学会秋季全国大会(1990)B-224
- [18]村川一雄, 桑原伸夫, 雨宮不二雄; "球状ダイポールアンテナの放射特性の測定
結果", 信学会秋季全国大会(1990)
- [19]田淵誠, 桑原伸夫, 雨宮不二雄; "通信線端子妨害波電圧測定方法の提案", 信
学会秋季全国大会(1990)
- [20]桜井一美, 桑原伸夫, 雨宮不二雄, 田淵誠; "外来電波・放射妨害波に対する建
物の遮蔽効果", 信学会秋季全国大会(1990)
- [21]桑原伸夫, 雨宮不二雄, 田淵誠; "ISDN端末用四線式擬似通信回路網の提
案", 信学会春季全国大会(1991)
- [22]田島公博, 桑原伸夫, 雨宮不二雄, 小林隆一; "インダクタンス装荷による
LiNbO₃を用いた高感度電界センサの感度特性", 信学会春季全国大会(1991)
B-304
- [23]馬杉正男, 村川一雄, 桑原伸夫, 雨宮不二雄; "帯電した銅パイプから放射され
る電磁パルスの波形解析結果", 信学会春季全国大会(1991)SB-3-1