

## 通信機器に適用する雷サージ試験装置

正員 元満 民生<sup>†</sup>      正員 桑原 伸夫<sup>††</sup>  
正員 井手口 健<sup>††</sup>      正員 徳田 正満<sup>††</sup>

Lightning Surge Test Generator for Telecommunication Equipment

Tamio MOTOMITSU<sup>†</sup>, Nobuo KUWABARA<sup>††</sup>, Tsuyosi IDEGUCHI<sup>††</sup> and  
Masamitsu TOKUDA<sup>††</sup>, Members

あらまし 通信線路上に誘起する雷サージが原因で通信機器が破損することがある。本論文では、通信機器の雷サージに対する信頼度（雷障害件数）を精度良く推定できる雷サージ試験装置の設計法、およびその設計法に基づいて開発した雷サージ試験装置の性能について述べている。まず、雷サージの誘起メカニズム等から、機器に印加される雷サージの諸特性を明らかにした。更に、雷サージの波高値（電圧）、しゅん度（波高値/波頭長）およびエネルギーに対する機器の耐力評価が一度で行える試験用サージ波形の設定法を明らかにし、それに基づいて試験用サージ波形を求めた。そして、機器に印加される雷サージ特性と試験用サージ波形を、LRC から成る回路素子数の少ない基本的なインパルス電圧発生回路で実現する方法を明らかにした。この設計法に基づいて開発した雷サージ試験装置は、通信機器の雷障害件数を精度良く推定することができ、かつ大きさおよび価格が従来の試験装置の約 1/10 で実用性の高い試験装置であることを明らかにした。

キーワード 雷サージ, 避雷器, インパルス電圧, 雷サージ試験

### 1. まえがき

メタリック通信線路（以下、通信線路と呼称）近傍に落雷があると通信線路上に雷サージが誘起され、それが原因で通信機器が破損し、通信サービスが途絶することがある。そのため、通信機器の開発時に雷サージ試験装置を用いて雷サージに対する信頼度（雷障害件数）を予測・評価することが行われる。

雷サージに対する通信機器の耐力を試験・評価する方法については、これまでいくつかの検討がなされてきた<sup>(1)-(5)</sup>。文献(5)で述べられている雷サージ試験装置は、通信線路上に誘起する雷サージの諸特性から試験回路のサージ電源を定め、更に機器に印加される雷サージのエネルギーが最大となる条件から試験回路のインピーダンスを定める方法で設計されている。この試験装置は、通信機器の雷障害件数を精度良く推定することができる点で優れた試験装置であるが、内部イン

ピーダンスの小さい（定電圧）インパルス電圧発生装置が必要であるため、大型で高価になる問題がある。

本論文では、機器に印加される雷サージの諸特性を回路素子数の少ない基本的なインパルス電圧発生回路で実現することで得られる雷サージ試験装置の設計法を提案する。そして、この設計法に基づいて開発した雷サージ試験装置は、通信機器の雷障害件数を精度良く推定することができ、かつ小型で経済的であり、実用性の高い試験装置であることを示す。

### 2. 雷サージ試験装置の設計法

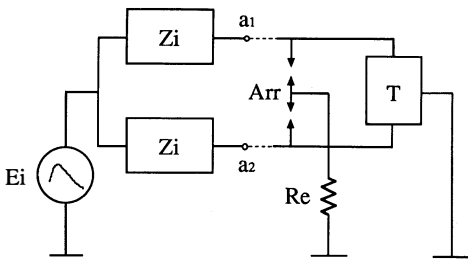
#### 2.1 従来の雷サージ試験装置<sup>(5)</sup>

通信線路上に誘起する雷サージの等価回路は、図1に示すように、雷サージの等価電源  $E_i$  と等価インピーダンス  $Z_i$  ( $a_1$  又は  $a_2$  端から見込んだ1心線~大地帰路回路の入力インピーダンス) で構成される。文献(5)で述べられている雷サージ試験装置(試験装置 S) は図2に示すように、雷サージ等価電源を定電圧のインパルス電圧発生器(回路1)で、等価インピーダンスを LRC (回路2) で模擬するものであり、通信機器の雷障害件数を精度良く推定できる試験装置である。

しかしながら、定電圧のインパルス電圧発生器(回

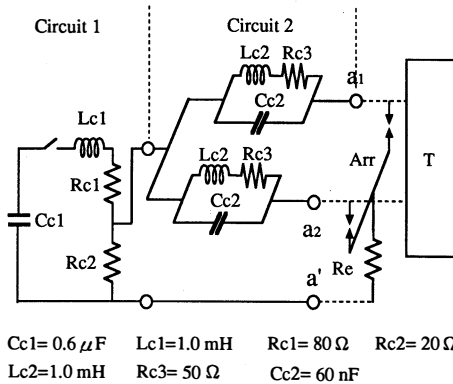
<sup>†</sup> NTT 技術協力センタ, 武蔵野市  
NTT Technical Assistance & Support Center, Musashino-shi,  
180 Japan

<sup>††</sup> NTT 通信網研究所, 武蔵野市  
NTT Telecommunication Networks Laboratories, Musashino-shi,  
180 Japan



Ei: equivalent voltage source, Zi: equivalent impedance, T: equipment, Re: earth resistance, Arr: lightning surge arrester

図1 雷サージの等価回路  
Fig. 1 Equivalent circuit for lightning surge.



Cc1=0.6 μF Lc1=1.0 mH Rc1=80 Ω Rc2=20 Ω  
Lc2=1.0 mH Rc3=50 Ω Cc2=60 nF

図2 雷サージ試験装置 S の構成<sup>(5)</sup>  
Fig. 2 Lightning surge test generator S for the equipment at the subscriber end.

路 1) を実現するためには大容量のインパルス電圧発生器が必要であり、更に雷サージの内部インピーダンスを近似した回路(回路 2) でエネルギーの一部が消費されるため、試験装置の大型化、高価格化が避けられないとの欠点がある。

また試験装置 S は出力 2 端子 (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) と接地 1 端子 (a') の 3 端子で構成されており、図 2 に示すように避雷器を接続した状態で試験を実施する。この試験方法では、二つの避雷器がともに動作した場合には接地抵抗 Re 両端の電位差が機器に印加(縦電圧雷サージ試験)され、また、二つの避雷器のうち片方の避雷器が動作した場合には両心線間の電位差が機器に印加(横電圧雷サージ試験)される。すなわち、縦および横電圧雷サージ試験を同時に行うことができる。しかしながら、避雷器の動作(放電)特性にはばらつきがあるので、試験装置 S を用いて横電圧雷サージ試験を実施

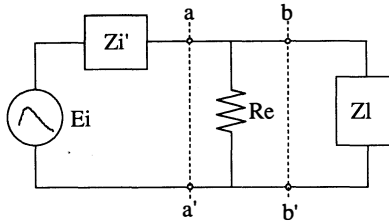
する際には避雷器を替えながら試験を行わなければならない、試験回数が多くなる欠点がある。横電圧雷サージ試験については避雷器を接続せずに、あらかじめ避雷器の動作特性を見込んだ試験電圧を定めそれを用いて試験する方法<sup>(5)</sup>があり、この方法の方が避雷器を設置した状態で行う試験方法より合理的である。従って試験装置 S の有用性は主に縦電圧雷サージ試験にあると言える。

## 2.2 雷サージ試験装置設計法

本論文で提案する雷サージ試験装置は、縦電圧雷サージ試験(図 1 で二つの避雷器がともに動作した状態)に関するもので、2.1 で述べた試験装置 S の小型化、低価格化を目指したものである。

図 1 に示すように、通信線路の心線~大地間に現われる雷サージによって二つの避雷器が動作すると、接地抵抗 Re を通して雷サージ電流が大地へ流れ、それによって発生する縦電圧が通信機器に印加される(印加雷サージ)が、そのときの等価回路は図 3 のようになる。同図の Ei は図 1 で示した雷サージ等価電源、Zi' は図 1 の a<sub>1</sub>-a<sub>2</sub> (a<sub>1</sub> と a<sub>2</sub> を短絡) 端から見込んだ 2 心線~大地帰路回路の入力インピーダンス、Re は避雷器の接地抵抗、Zl は試験対象通信機器の入力インピーダンスである。そして、本論文の雷サージ試験装置は、図 3 の b, b' 端から左を見た回路を LRC から成る回路素子数の少ない基本的なインパルス電圧発生回路で近似することで実現する。すなわち、線路条件等を含んだものをインパルス電圧発生回路で近似するもので、この点で試験装置 S の設計思想と異なる。

具体的には以下の手順で雷サージ試験装置を設計する。まず、図 3 中の Ei は文献(5)で明らかにされておりその値を用いる。Zi' は雷サージが通信機器に加わる状態での線路条件から、Re は加入者保安器用接地の抵抗値の分布から求める。以上で図 3 の b, b' 端から左を見た回路の等価回路が得られる。つぎに、得られた等価回路を以下の方法でインパルス電圧発生回路で近似する。図 3 からわかるように、印加雷サージの波形は Zi' によっても変化する。そこで、Zi' が変化したときの印加雷サージの波高値、波頭長および波尾長の変化を、Zi' が無限大のときの印加雷サージ(図 3 の b, b' 端から左を見た回路の電圧源であり、印加雷サージ等価電源と呼称)でそれぞれ規格化したもの(印加雷サージのインピーダンス依存性)を図 3 の等価回路から数値計算で求める。この印加雷サージのインピーダンス依存性は、図 3 の b, b' 端から左を見た回路の



Ei: equivalent voltage source, Zi': equivalent impedance, Zi: equipment input impedance, Re: earth resistance

図3 機器に印加される雷サージの等価回路  
Fig.3 Equivalent circuit for lightning surge fed to equipment.

特性を表している。そして、得られた印加雷サージのインピーダンス依存性と印加雷サージ等価電源を同時に精度良く近似できるインパルス電圧発生回路を数値計算で求める。このようにして求めた雷サージ試験装置は、図3の  $b, b'$  端から左を見た回路の特性を近似しており、雷サージ等価電源、線路および避雷器の接地抵抗の各条件を反映したものとなっている。なお本論文では、 $Z_i$  を純抵抗として検討を行った。

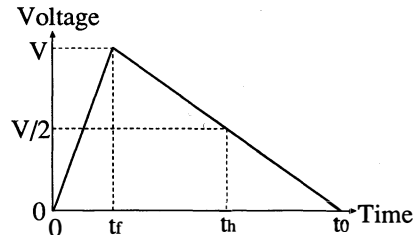
ところで、雷サージ等価電源の波高値や波尾長等の発生頻度は分布する<sup>(6)</sup> ので、印加雷サージもある発生確率を有する。そして、1回の印加試験で雷障害件数(の期待値)を推定しようとする、印加雷サージの発生確率を考慮した試験用のサージ波形(試験用サージ波形)を求める必要がある<sup>(3)</sup>。次章では試験用サージ波形の求め方について述べる。

### 3. 試験用サージ波形の設定方法

雷サージの波高値とエネルギーによって機器が破壊する場合の試験用サージ波形の設定方法については、既に報告されている<sup>(3)</sup>。本論文では、波高値とエネルギーによる破壊に、しゅん度(波高値/波頭長)による破壊モードを加え、これら3破壊モードによる機器の雷障害件数が等しくなるように試験用サージ波形の波高値、波頭長および波尾長を定める。

本論文では、印加雷サージ等価電源から試験サージ波形を定める。なお検討に際しては、印加雷サージ等価電源の波高値  $V$  のるい積発生頻度は  $V^{-1.8}$  に比例し、その波頭長、波尾長および零点長のるい積発生頻度はいずれも対数正規分布であるとしたが、これらの前提が許されることは4.で示す。

また本論文では、サージ波形を図4に示す3角波形で近似し、波高値  $V$ 、波頭長  $t_r$ 、波尾長  $t_h$  および零点



V: peak value,  $t_r$ : front time,  $t_h$ : time-to-half value,  $t_0$ : time-to-zero value

図4 3角波形によるサージ波形の定義  
Fig.4 Definition of peak value, front time, time-to-half value, time-to-zero value, and triangular waveform.

長  $t_0$  をそれぞれ図のように定義した。

試験用サージ波形の設定手順は以下のようである。印加雷サージ等価電源の波高値等の発生頻度分布から、印加雷サージ等価電源の波高値、しゅん度およびエネルギーの発生頻度を求める。つぎに、機器の許容される雷障害件数と波高値、しゅん度およびエネルギーの発生頻度が等しいとして、試験用サージ波形の波高値、波頭長および波尾長を求める。

$$Q_0 = N_v(V) = N_c(C) = N_e(E) \quad (1)$$

ここで、 $Q_0$  は1雷雨日、1回線当りの通信機器の許容雷障害件数、 $N_v(V)$  は波高値が  $V$ 、 $N_c(C)$  はしゅん度が  $C$ 、 $N_e(E)$  はエネルギーが  $E$  である印加雷サージ等価電源のるい積発生頻度である。

#### 3.1 波高値の決定

波高値が  $V$  以上である印加雷サージ等価電源の1雷雨日、1回線当りのるい積発生頻度が下式で表されるとする。

$$N(V) = A \times V^{-1.8} \quad (2)$$

ここで、 $Q_0$  と  $N(V)$  が等しいとの条件から求まる波高値  $V_{pt}$  は下式となる。

$$V_{pt} = \left( \frac{Q_0}{A} \right)^{-\frac{1}{1.8}} \quad (3)$$

そして、 $V_{pt}$  で試験して機器が破損しなければ機器の雷障害発生件数は許容雷障害件数  $Q_0$  以下と考えることができるので、式(3)で求まる  $V_{pt}$  を試験用サージ波形の波高値とする。

#### 3.2 波頭長の決定

しゅん度は波高値と波頭長によって決まる。そして試験用サージ波形の波頭長は、印加雷サージ等価電源のしゅん度のるい積発生頻度と機器の許容雷障害件数が等しいとの条件から求める。

しゅん度  $C$  を、波高値  $V$  と波頭長  $t_f$  を用いて下式で定義する。

$$C = V/t_f \tag{4}$$

いま、印加雷サージ等価電源の波頭長のるい積発生頻度が対数正規分布で表されるとすると、波頭長の発生密度関数  $f(T)$  は下式で表される。

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left\{-\frac{(T-M)^2}{2\sigma_f^2}\right\} \tag{5}$$

$$T = \ln t_f \tag{6}$$

$$M = \ln t_{fm} \tag{7}$$

ここで、 $t_{fm}$  は波頭長の 50% 値、 $\sigma_f$  は標準偏差である。

そして、波高値が  $V$  でかつしゅん度が  $C$  以上である印加雷サージ等価電源の発生密度関数  $g(C, V)$  は、式(4)、(5)を用いて下式のように表される。

$$\begin{aligned} g(C, V) &= \int_0^{\ln(V/C)} f(T) dT \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \int_C^\infty \frac{1}{u} \exp\left\{-\frac{\left(\ln \frac{V}{u} - \ln t_{fm}\right)^2}{2\sigma_f^2}\right\} du \end{aligned} \tag{8}$$

一方、印加雷サージ等価電源の波高値が  $V$  の発生密度関数  $n_v(V)$  は、るい積発生頻度(式(2))を微分することにより下式のように求まる。

$$n_v(V) = -\frac{dN(V)}{dV} = 1.8AV^{-2.8} \tag{9}$$

そして、波高値が  $V$  以上でかつしゅん度が  $C$  以上である印加雷サージ等価電源のるい積発生頻度  $N_c(C)$  は、 $g(C, V)$  と  $n_v(V)$  を用いて下式で求められる。

$$\begin{aligned} N_c(C) &= \int_V^\infty n_v(u) \cdot g(C, u) du \\ &= A \cdot \exp\left\{2\left(\frac{1.8}{2}\right)^2 \sigma_f^2\right\} \cdot t_{fm}^{-1.8} \cdot C^{-1.8} \end{aligned} \tag{10}$$

ここで、 $N_v(V) = N_c(C)$  とすると、試験用サージ波形の波頭長  $t_{ft}$  は下式となる。

$$t_{ft} = t_{fm} \cdot \exp\left(-\frac{1.8\sigma_f^2}{2}\right) \tag{11}$$

### 3.3 波尾長の決定

試験用サージ波形の波尾長は、印加雷サージ等価電源のエネルギーのるい積発生頻度と機器の許容雷障害件数が等しいとの条件から求める。

サージ波形を三角波形で近似し、印加雷サージ等価電源のエネルギー  $E$  を下式<sup>(3)</sup>で定義する。

$$E = k \cdot V^2 \cdot (2t_h - t_f)$$

$$= k \cdot V^2 \cdot t_0 \tag{12}$$

ここで、 $k$  は任意の定数である。

その結果、波高値が  $V$  でかつエネルギーが  $E$  以上である印加雷サージ等価電源の発生密度関数  $h(E, V)$  は、印加雷サージ等価電源の零点長の発生密度関数と式(12)を用いて式(8)を求めたと同様な方法で求めることができる。

$$\begin{aligned} h(E, V) &= \int_{\ln\left(\frac{E}{kV^2}\right)}^\infty f(T) dT \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \int_E^\infty \frac{1}{u} \exp\left\{-\frac{\left(\ln \frac{u}{kV^2} - \ln t_{0m}\right)^2}{2\sigma_0^2}\right\} du \end{aligned} \tag{13}$$

ここで、 $t_{0m}$  は零点長の 50% 値、 $\sigma_0$  は零点長の標準偏差である。

そして、波高値が  $V$  以上でかつエネルギーが  $E$  以上である印加雷サージ等価電源のるい積発生頻度  $N_e(E)$  は、 $h(E, V)$  と式(9)を用いて下式で求められる。

$$\begin{aligned} N_e(E) &= \int_V^\infty n_v(u) \cdot h(E, u) du \\ &= A \times t_{0m}^{0.9} \cdot \exp\left\{2\left(\frac{1.8}{4}\right)^2 \sigma_0^2\right\} \cdot V^{-1.8} \cdot t_0^{-0.9} \end{aligned} \tag{14}$$

ここで、 $N_v(V) = N_e(E)$  とすると、試験用サージ波形の零点長  $t_{0t}$  は下式となる。

$$t_{0t} = t_{0m} \cdot \exp\left\{\frac{1.8\sigma_0^2}{4}\right\} \tag{15}$$

本論文ではサージ波形を三角波形で近似するので、 $t_h$ 、 $t_f$ 、 $t_0$  には次の関係がある。

$$t_h = \frac{t_f + t_0}{2} \tag{16}$$

従って、試験用サージ波形の波尾長  $t_{nt}$  は、式(15)、(16)から下式となる。

$$t_{nt} = \frac{t_{fm} \cdot \exp\left(-\frac{1.8\sigma_f^2}{2}\right) + t_{0m} \cdot \exp\left(\frac{1.8\sigma_0^2}{4}\right)}{2} \tag{17}$$

以上で試験用サージ波形の波高値、波頭長および波尾長が求まった。試験用サージ波形の波高値は通信機器の許容雷障害件数  $Q_0$  に依存するが、波頭長および波尾長は  $Q_0$  に依存しない。従って、機器の雷サージに対する耐力を評価する際には、試験用サージの波頭長と波尾長を固定し、波高値を上昇させながら試験を実施すればよい。

### 4. 印加雷サージの諸特性

本章では、雷サージ試験装置の基礎となる印加雷サージの等価回路、印加雷サージ等価電源、試験用サージ波形、印加雷サージのインピーダンス依存性について具体的に述べる。

#### 4.1 等価回路

図3に示した印加雷サージの等価回路を以下の条件で具体化した。

雷サージ等価電源  $E_i$  の波高値、波頭長および波尾長の積発生頻度分布として文献(5)で述べられている値を用いた。 $Z_i'$  は、加入者線路の平均値(心線径が0.4 mmφで線路長が2 km) および印加雷サージのエネルギーが最大となる条件 ( $a_1$ - $a_2$  端の反対側で2心線を一括し抵抗零で接地)<sup>(5)</sup>を用いて下式で求めた。

$$Z_i' = Z_0 \tanh(\gamma l) \tag{18}$$

ここで、 $Z_0$  は2心線~大地帰路回路の特性インピーダンス、 $\gamma$  は伝搬定数、 $l$  は線路長である。計算には2心線~大地帰路回路の1次定数として、 $R=76 \Omega/\text{km}$ 、 $L=4.6 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ 、 $C=8.5 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$ <sup>(8)</sup>を用いた。また、 $R_e$  は全国の加入者保安器用接地の抵抗値の50%値である80  $\Omega$ とした。

#### 4.2 印加雷サージ等価電源と試験用サージ波形

3.で述べたように、試験用サージ波形は印加雷サージ等価電源の発生頻度分布から求める。ここでは、印加雷サージ等価電源の波高値等の発生頻度分布とそれから求めた試験用サージ波形について述べる。

##### 4.2.1 印加雷サージ等価電源の発生頻度分布

印加雷サージ等価電源の波高値、波頭長、波尾長および零点長の積発生頻度分布は、図3に示す等価

回路を4.1で述べた条件下で、文献(5)で示されている手法を用いて数値計算で求めた。その結果を表1に示す。同表に示すように、印加雷サージ等価電源の波高値の積発生頻度は  $V^{-1.8}$  に比例し、波頭長、波尾長および零点長の積発生頻度はいずれも対数正規分布で近似することができる。

##### 4.2.2 試験用サージ波形

式(3)、(11)、(17)および表1の数値を用いて、試験用サージ波形の波高値、波頭長および波尾長を求めた結果を表2に示す。この試験用サージ波形を用いれば、電圧、しゅん度およびエネルギーの3破壊モードに対する評価を1回の印加試験で行うことができる。

##### 4.3 印加雷サージのインピーダンス依存性

図3に示した印加雷サージの等価回路を用いて、機器の入力インピーダンス  $Z_I$  を変化させたときの印加雷サージの波高値、波頭長および波尾長の変化量を数値計算で求めた。なお、変化量を求めるに際しては印加雷サージ等価電源が表2の値となるときの雷サージ等価電源で固定し、かつ  $Z_I$  を純抵抗とした。印加雷サージのインピーダンス依存性を図5に示す。同図では、

表2 試験用サージ波形

波高値: $V_{0,t}$ (V)	波頭長: $t_{r,t}$ ( $\mu\text{s}$ )	波尾長: $t_{h,t}$ ( $\mu\text{s}$ )
$V_{0,t} = \left( \frac{Q_0}{5.4 \times 10^4} \right)^{1.8}$	15	100
【備考】 $Q_0$ は1雷雨日、1回線当たりの通信機器の許容雷障害件数		

表1 印加雷サージ等価電源の諸特性

波高値: $V$ *1	波頭長: $t_r$ *2		波尾長: $t_h$ *2		零点長: $t_0$ *2,3	
比例定数: $A$	50% 値: $t_{r,m}$ ( $\mu\text{s}$ )	標準偏差: $\sigma_r$ (Np)	50% 値: $t_{h,m}$ ( $\mu\text{s}$ )	標準偏差: $\sigma_h$ (Np)	50% 値: $t_{0,m}$ ( $\mu\text{s}$ )	標準偏差: $\sigma_0$ (Np)
$5.4 \times 10^4$	20	0.56	90	0.56	160	0.56
*1 波高値の積発生頻度: $N(V) = A V^{-1.8}$ (回/雷雨日/回線) *2 発生密度関数 (対数正規分布): $f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(T-M)^2}{2\sigma^2}\right\}$ ここで、 $T = \ln t_r$ , $M = \ln t_{r,m}$ , $\sigma = \ln \sigma_r$ 又は、 $T = \ln t_h$ , $M = \ln t_{h,m}$ , $\sigma = \ln \sigma_h$ 又は、 $T = \ln t_0$ , $M = \ln t_{0,m}$ , $\sigma = \ln \sigma_0$ *3 三角波形で近似し、波頭長と波尾長から求めた						

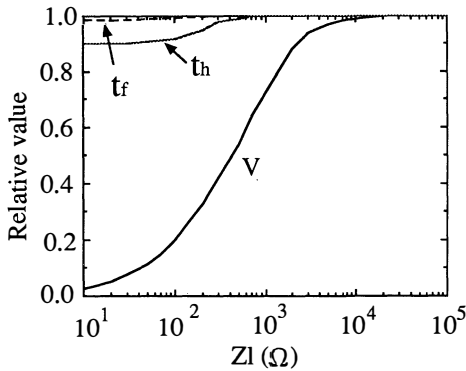


図5 機器に印加される雷サージの負荷インピーダンス依存性  
Fig. 5 Dependence of lightning surge fed to equipment on equipment impedance.

$ZI$  を変化させたときの印加雷サージの波高値、波頭長および波尾長を印加雷サージ等価電源でそれぞれ規格化している。図5から、印加雷サージの波高値は  $ZI$  が小さくなるにつれて小さくなり、 $ZI$  が  $10\ \Omega$  では  $1/10$  程度になる、波頭長は  $ZI$  にほとんど依存しないが、波尾長は  $ZI$  が小さくなるにつれて10%程度短くなるのがわかる。

### 5. 雷サージ試験装置の具体例

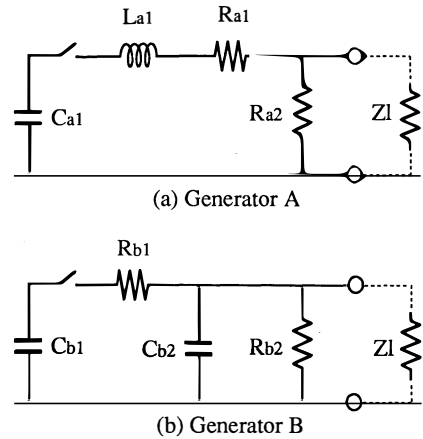
雷サージ試験装置は、試験用サージ波形と印加雷サージのインピーダンス依存性を同時に精度良く近似しなければならない。本章では、LRC から成る回路素子数の少ない基本的なインパルス電圧発生回路で試験用サージ波形と印加雷サージのインピーダンス依存性を近似する方法およびその結果、雷サージ試験装置の性能評価結果について述べる。

#### 5.1 回路定数の決定

図6に示す二つの基本的なインパルス電圧発生回路で、試験用サージ波形と印加雷サージのインピーダンス依存性を近似することを試みた。

図6の発生回路において、試験用サージ波形と印加雷サージのインピーダンス依存性を有する回路定数を解析的に求めることはできない。そこでまず、発生回路の出力波形が試験用サージ波形と等しくなるときの回路定数相互の関係を求め、その関係を満足する範囲で回路定数を変化させ、印加雷サージのインピーダンス依存性を精度良く近似することのできる回路定数を定める方法で回路定数を求めた。

発生回路 A では、波頭長は  $L_{a1}$ 、波尾長は  $R_{a1} + R_{a2}$



$ZI$ : equipment input impedance

図6 インパルス電圧発生回路  
Fig. 6 Impulse voltage generator circuit.

の値によって主に定まる<sup>(10)</sup>。回路定数の決定は、まず主コンデンサ  $C_{a1}$  の値を任意に定め、 $ZI = \infty$  の時の出力波形 ( $R_{a2}$  に現われる電圧) が試験用サージ波形と等しくなるように回路定数を決定した。 $C_{a1} = 1\ \mu\text{F}$  のときは、 $L_{a1} = 0.52\ \text{mH}$ 、 $R_{a1} + R_{a2} = 115\ \Omega$  で出力波形が試験用サージ波形と等しくなる。この回路定数において  $R_{a2}$  と  $ZI$  が変化したときの出力波形を数値計算で求めた結果、出力波形の波高値と波尾長は変化するが波頭長はほとんど変化しないことがわかった。 $R_{a2}$  と  $ZI$ 、波高値、波尾長の関係を図7(a)、(b)に示す。図7の横軸は  $R_{a2}$ 、縦軸は  $ZI = \infty$  のときの波高値と波尾長でそれぞれ規格化した値である。図中の○は図5に示した  $ZI$  ごとの印加雷サージの波高値と波尾長であり、出力サージの波高値と波尾長はこれらにできるだけ一致することが望ましい。図7(a)から、発生回路 A では  $ZI = 1,000\ \Omega$  の場合を除き、 $R_{a2} = 71\ \Omega$  のとき出力サージの波高値は印加雷サージの波高値とよく一致することがわかる。一方、図7(b)に示すように出力サージの波尾長は  $ZI$  の減少に伴って短くなり、 $R_{a2} = 71\ \Omega$  では  $0.6 \sim 1.0$  となる。印加雷サージの波尾長も  $ZI$  の減少に伴って短くなるが、その範囲は  $0.9 \sim 1.0$  である(図5)。出力サージの波尾長と印加雷サージの波尾長の差異は、雷サージ試験装置による雷障害件数の推定誤差を発生させる原因となる。推定誤差の評価については5.2で述べる。

一方、発生回路 B では波頭長は  $C_{b2}$  と  $R_{b1}$  によって主に定まる<sup>(10)</sup>。発生回路 B における回路定数および

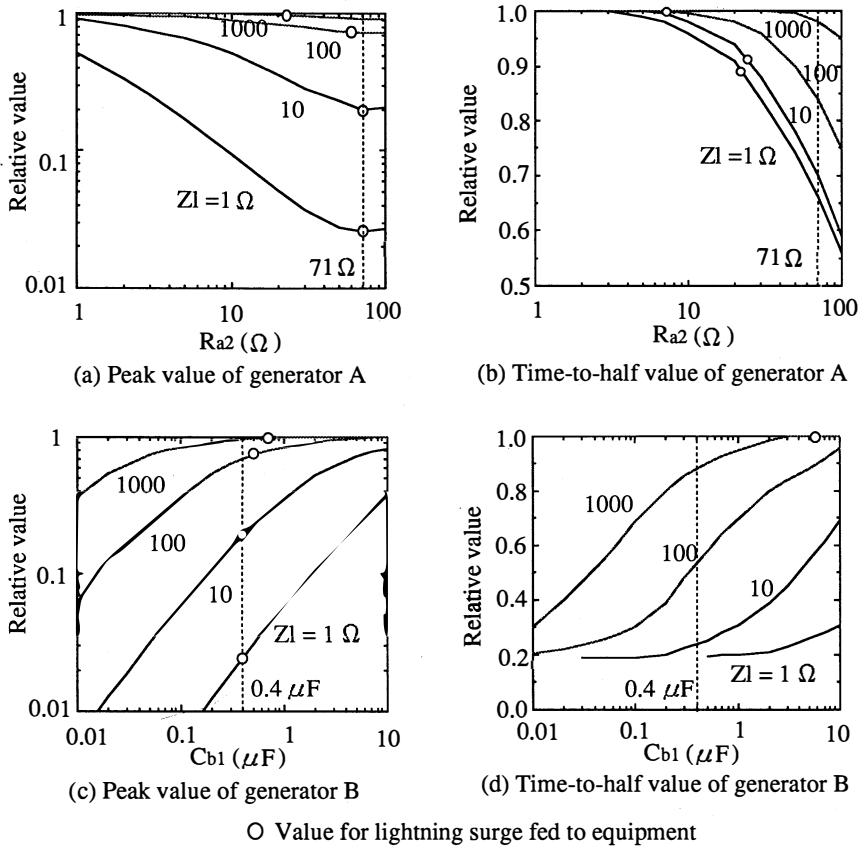


図 7 発生回路の負荷インピーダンス依存性  
Fig. 7 Equipment input impedance ( $Zl$ ) dependency on generators.

出力波形の機器の入力インピーダンス依存性は、発生回路 A の場合と同様に数値計算で求めた。図 7(c) と (d) は、発生回路 B における出力サージの波高値と波尾長が入力インピーダンス  $Zl$  によって変化する様子を示している。なお、波頭長はほとんど変化しない。発生回路 B において、主コンデンサ  $C_{b1}$  を  $0.4 \mu\text{F}$  としたとき、出力サージの波高値は印加雷サージの波高値とよく一致することが、図 7(c) からわかる。一方、出力サージの波尾長は  $Zl$  の減少に伴って短くなり、 $C_{b1}=0.4 \mu\text{F}$  では  $0.2 \sim 1.0$  となる。発生回路 B の波尾長は、印加雷サージの波尾長に比べてかなり短くなる。

### 5.2 試験装置の評価

本節では、インパルス電圧発生回路 A (試験装置 A) および発生回路 B (試験装置 B) で実現する雷サージ試験装置の雷障害件数の推定誤差について評価する。更に、二つの試験装置の効率や価格、大きさ (容積) を 2.1 で述べた雷サージ試験装置 (試験装置 S) と比

較することで評価する。

#### 5.2.1 雷障害件数の推定誤差評価方法

図 3 の等価回路から求めた印加雷サージの波高値を  $V_0$ 、波頭長を  $t_{f0}$ 、波尾長を  $t_{h0}$ 、零点長を  $t_{00}$ 、また試験装置によって機器に印加されるサージの波高値を  $V_x$ 、波頭長を  $t_{fx}$ 、波尾長を  $t_{hx}$ 、零点長を  $t_{0x}$  とすると、機器が波高値、しゅん度およびエネルギーによって破壊するときの雷障害件数の推定誤差はそれぞれ以下のように求められる。

(1) 通信機器が波高値で破壊される場合の雷障害件数の推定誤差  $\epsilon_v$  は、式 (2) から下式で求められる。

$$\epsilon_v = \frac{N_v(V_x)}{N_v(V_0)} = \left(\frac{V_x}{V_0}\right)^{-1.8} \quad (19)$$

(2) 機器がしゅん度に関連して破壊される場合の雷障害件数の推定誤差  $\epsilon_c$  は、式 (10) に示した開放雷サ

ージ等価電源のしゅん度の発生頻度を用いて下式で求められる。

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \frac{N_c(V_x, t_{fx})}{N_c(V_0, t_{f0})} \\ &= \left( \frac{V_x \cdot t_{f0}}{V_0 \cdot t_{fx}} \right)^{-1.8} \end{aligned} \quad (20)$$

(3) 機器がエネルギーで破壊される場合の雷障害件数の推定誤差  $\epsilon_e$  は、式(14)に示した印加雷サージ等価電源のエネルギーの発生頻度を用いて下式で求められる。

$$\begin{aligned} \epsilon_e &= \frac{N_e(V_x, t_{0x})}{N_e(V_0, t_{00})} \\ &= \left( \frac{V_x^2 \cdot t_{0x}}{V_0^2 \cdot t_{00}} \right)^{-0.9} \\ &= \left\{ \frac{V_x^2(2t_{hx} - t_{fx})}{V_0^2(2t_{h0} - t_{f0})} \right\}^{-0.9} \end{aligned} \quad (21)$$

いずれの破壊モードにおいても、推定誤差  $\epsilon$  が1のとき推定雷障害件数は実際の雷障害件数に等しく、推定誤差が  $\epsilon$  の試験装置で雷サージ試験を行ったときの推定雷障害件数は、実際の雷障害件数の  $1/\epsilon$  倍となる。従って、 $\epsilon$  が1より小さい試験装置で雷サージ試験を行ったときの推定雷障害件数は、実際の雷障害件数より大きめに出るため、通信機器からみると安全側に推定される。

5.2.2 試験装置の容積および価格の評価方法

雷サージ試験装置は、機器の雷障害件数が精度良く推定できる以外に、小型で安価であることが要求される。ここでは、試験装置の効率、大きさ(容積)および価格を評価する方法について述べる。評価に際しては、2.1で述べた試験装置Sを基準にした。

(1) 雷サージ試験装置の効率  $\eta_e$  は、試験装置の主コンデンサの充電電圧  $V_c$  と試験装置の出力電圧  $V_p$  との比で定義し、評価することとした。

$$\eta_e = \frac{V_p}{V_c} \quad (22)$$

(2) 試験装置の大きさ(容積)は、試験装置に用いる主コンデンサの容積で決まるとして評価することとした。単位容量、単位動作電圧のコンデンサを考えると、コンデンサの容積は試験装置に必要とされる蓄積エネルギー量に比例する。いま、試験装置Sで必要とされる蓄積エネルギーを  $W_s$ 、出力電圧を試験装置Sと同一としたときに試験装置AまたはBで必要とされる蓄積エネルギーを  $W_x$  としたとき、雷サージ試験装置の容積比  $\eta_b$  を下式で定義し、評価する。

$$\eta_b = \frac{W_x}{W_s} \quad (23)$$

(3) 試験装置の価格は、試験装置に用いる主コンデンサの価格で決まるとして評価する。付録に示すように、コンデンサの価格は蓄積エネルギー量に依存する。そこで、雷サージ試験装置の価格比  $\eta_p$  を下式で定義し、評価する。

$$\eta_p = \left( \frac{W_x}{W_s} \right)^{0.75} \quad (24)$$

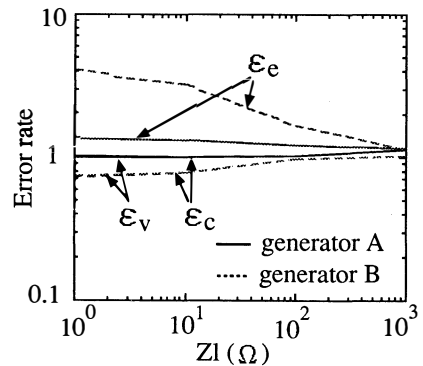
5.2.3 評価結果

評価結果を表3および図8に示す。図8から、試験装置Aで雷障害件数を推定する際の最大誤差は、機器がエネルギーで破壊し、かつ被試験機器の入力インピーダンスが1Ωのときで  $\epsilon_e=1.4$ 、試験装置Bの場合は同様に  $\epsilon_e=4.1$  と推定される。この誤差は、いずれも試験装置の波尾長の短縮率が機器に印加される雷サージのそれに比べて大きい(図7)ことが原因である。試験装置AとBの効率、試験装置Sに比べ数倍良いことが表4からわかる。そして、容積と価格はいずれも試験装置Sの約1/10であり、大幅に改善されるこ

表3 試験装置の評価結果

種別	誤差	効率*	容積*	価格*
試験装置A	図8	3.6	0.08	0.15
試験装置B	図8	3.6	0.04	0.08

\* 試験装置S(図2)に対する相対値



$\epsilon_v$  is the estimation error for malfunction due to lightning surge voltage,  $\epsilon_c$  is due to steepness, and  $\epsilon_e$  is due to energy.

図8 雷サージ試験装置の雷障害件数の推定誤差  
Fig.8 Estimation error rate of lightning-surge test generator.



表 4 雷サージ試験装置 A の性能確認結果 (雷障害件数の推定)

	雷障害件数 (件/雷雨日/回線)	備考
実測値	$1.6 \times 10^{-3}$	調査年数 : 4年
推定値	$1.0 \times 10^{-3}$	サンプル数 : 3台

とがわかる。

以上述べたように、雷障害件数の推定誤差や容積、価格の観点から、試験装置 A が雷サージ試験装置として総合的に優れていることがわかる。

### 5.3 試験装置 A の性能確認

雷サージ試験装置 A の性能を確認するために、雷障害件数が既知のボタン電話機を例にとり、開発した試験装置 A を用いて室内試験を実施した。その結果、表 4 に示すように、推定雷障害件数と実際の雷障害件数はよく一致しており、試験装置 A は通信機器の雷障害件数の推定に有効であることが確認された。

## 6. む す び

本論文では、通信機器の雷サージに対する信頼度(雷障害件数)を精度良く推定することができ、小型で安価な雷サージ試験装置の設計法を提案した。この設計法の基本的な考え方は、機器に印加される雷サージを、回路素子数の少ない基本的なインパルス電圧発生回路で近似することである。

まず、通信線路上に現われる雷サージの誘起メカニズムや諸特性等を用いて、機器に印加される雷サージの等価回路を導出し、その等価回路を用いて機器に印加される雷サージの諸特性を明らかにした。更に、雷サージの波高値、しゅん度およびエネルギーに対する通信機器の耐力を1回のサージ試験で評価することができるサージ波形(試験用サージ波形)の設定方法を明らかにした。そして、機器に印加される雷サージ特性と試験用サージ波形を、LRC から成る回路素子数の少ない基本的なインパルス電圧発生回路で実現する雷サージ試験装置設計法を明らかにした。

本設計法に基づいて開発した雷サージ試験装置を、雷障害件数の推定精度、容積(大きさ)、価格等について評価した結果、通信機器の雷障害件数を精度良く推定でき、かつ大きさおよび価格が従来の試験装置の約1/10であり、実用性の高い雷サージ試験装置であることが明らかになった。

今後は、本論文で提案した雷サージ試験装置を用いて、各種通信機器の雷サージに対する信頼度評価試験を実施する予定である。

**謝辞** 本研究を行うに当り貴重な御助言を頂いた熊本電波工業高等専門学校古賀広昭教授、NTT 保全サービス部技術協力センタ雨宮不二雄プロジェクトリーダーに感謝致します。

## 文 献

- (1) 山本充義, 原田達哉: “インパルス電圧, 電流の標準波形”, 電学誌, **99**, 8, pp. 46-49 (1979-08).
- (2) Bodle D. W. and Gresh P. A.: “Lightning surges in paired telephone cable facilities”, Bell Syst. Tech. J., **40**, pp. 547-576 (1961-03).
- (3) 古賀広昭, 元満民生, 田口守彦, 貝津良輔, 山口開生: “通信機器に印加される雷サージ試験波形設定法”, 信学論(B), **J64-B**, 8, pp. 785-792 (1981-08).
- (4) 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), **J66-B**, 7, pp. 900-907 (1983-07).
- (5) Kuwabara N., Koga H. and Motomitsu T.: “A new lightning surge test circuit for telecommunications equipment in Japan”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., **EMC-30**, 3, pp. 393-400 (1988-08).
- (6) Koga H., Motomitsu T. and Taguchi M.: “Lightning surge waves on induced overhead lines”, Trans. IECE Japan, **e62**, 4, pp. 216-223 (1979-04).
- (7) 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”, 信学論(B), **J64-B**, 7, pp. 627-634 (1981-07).
- (8) 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**, 1, pp. 31-38 (1982-01).
- (9) Koga H. and Motomitsu T.: “Lightning-induced surges in paired telephone subscriber cable in Japan,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., **EMC-27**, 3, pp. 152-161 (1985-08).
- (10) 鶴見策郎, 河野照哉, 山本充義, 河村達雄: “高電圧工学”, pp. 73-78, 電気学会 (1988).

## 付 録

### コンデンサの価格

主コンデンサに蓄積した電荷を放電させてサージ電圧を得るインパルス電圧発生装置の価格は、主コンデンサに蓄積するエネルギーが増大すれば上昇する。主コンデンサの蓄積するエネルギーが異なる4台のインパルス電圧発生装置から、インパルス電圧発生装置の価格  $P$  と主コンデンサの蓄積エネルギー  $W$  の関係を求めた結果を、図 A・1 に示す。同図より、インパルス電圧発生装置の価格  $P$  と主コンデンサの蓄積エネルギー  $W$  の関係は下式で表されることがわかる。

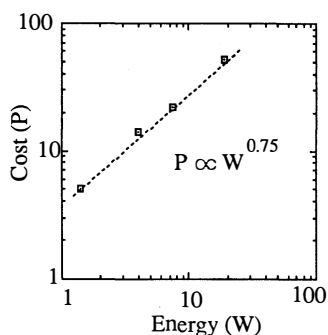


図 A・1 蓄積エネルギーと価格の関係

Fig. A・1 Relationship between stored energy and cost.

$$P \propto W^{0.75} \quad (\text{A} \cdot 1)$$

(平成6年11月16日受付, 7年2月1日再受付)



**徳田 正満**

昭42北大・工・電子卒, 昭44同大学大学院修士課程了。同年日本電信電話公社に入社。以来, 光ケーブル伝送特性測定法, 通信機器のEMC等の研究に従事。現在, NTT通信網総合研究所通信品質研究部徳田研究グループリーダー。工博。昭61年度本会業績賞受賞。著書「光通信要覧」の測定法に関する章。



**元満 民生**

昭42宇部高専・電気卒。同年日本電信電話公社(現, 日本電信電話(株))電気通信研究所入所。以来, 通信線路上に誘起する雷サージの研究, 通信システムにかかわるEMC分野の研究・開発に従事。現在, NTT技術協力センタ主任技師。昭57年度オーム

技術賞受賞。



**桑原 伸夫**

昭50静岡大・工・電子卒。昭52同大学院修士課程了。同年, 日本電信電話公社茨城電気通信研究所入所。以来, 通信システムの雷防護, 光ファイバの信頼性評価, 通信システムのEMI評価, EMCにおける光計測技術等に関する研究・開発に従事。

現在, NTT通信網研究所主幹研究員。工博。



**井手口 健**

昭46九州大・工・通信卒。同年日本電信電話公社に入社。以来, 電力線からの誘導対策用遮蔽ケーブルの研究, 通信機器の耐雷試験法の研究, 通信システムのEMC試験評価技術の研究に従事。現在, NTT通信網総合研究所通信品質研究部通信EMC研究グループリーダー。